

ACV et évaluation multicritère pour la rénovation des bâtiments : proposition méthodologique

Thibault Goessel¹, Simon Ligier¹, Mathilde Louërat¹, Adélaïde Aublet¹, Robin Girard²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

² Mines Paris – PSL, Centre Procédés, Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques (PERSEE)

RESUME Pour répondre aux enjeux d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, l'acte de rénover doit à la fois permettre de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de garantir le confort estival. L'étude consiste en une proposition méthodologique pour embrasser ces deux enjeux. Elle propose d'abord des indicateurs permettant de s'assurer de la pertinence carbone de la rénovation. Elle étend aussi l'évaluation environnementale aux autres impacts environnementaux (ressources, déchets...) par l'adaptation de l'analyse de cycle de vie de bâtiments neufs à la rénovation. Ensuite, l'évaluation multicritère est élargie à la prise en compte du confort d'été en étudiant la capacité du bâtiment à limiter les surchauffes dans les pièces de vie. La prise de décision étant largement orientée par les coûts de rénovation, l'évaluation est complétée par une analyse de coût sur le cycle de vie du bâtiment rénové. Enfin, une méthodologie pour élaborer des stratégies de rénovation à partir de cette évaluation multicritère est envisagée. Elle se base sur l'utilisation de fronts de Pareto pour identifier les stratégies optimales.

Mots-clefs décarbonation, adaptation, analyse en coût global, confort d'été, stratégies de rénovation

I. INTRODUCTION

En France, le secteur du bâtiment représente environ 150MtCO₂eq en cycle de vie, soit 25% de l'empreinte carbone, et le tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont dues aux produits de construction et équipements (Pellan et al., 2024). Compte tenu des objectifs de décarbonation de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), l'objectif est de réduire les émissions à 96 MtCO₂eq en 2030 et à 16 MtCO₂eq en 2050 (MTE-MCT, 2023). De plus, vu les objectifs différenciés entre secteurs, la part liée aux produits de construction devrait devenir majoritaire.

La massification de la rénovation du parc bâti est évidemment l'un des leviers majeurs pour atteindre ces objectifs. En effet, les différents scénarios de neutralité carbone fixent la cible de 600 000 à 1 million de rénovations performantes en 2030, bien au-delà de ce qui a été observé jusqu'à présent (10 fois moins environ) (ADEME et al. 2022). Mais pour réduire les impacts du secteur sur l'ensemble du cycle de vie, il est nécessaire de se prémunir des transferts d'impacts

entre émissions liées à l'énergie et émissions liées aux composants du bâtiment. La rénovation, souvent abordée sous le seul prisme des consommations d'énergie, doit désormais être étudiée sur l'ensemble de ses impacts environnementaux via une analyse de cycle de vie.

Au-delà des ces enjeux d'atténuation du changement climatique, la rénovation doit aussi répondre aux enjeux d'adaptation. Le 3e Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC-3), qui devrait être publié à l'été 2024, repose sur un réchauffement de +3°C dans le monde d'ici 2100, soit +4°C en France métropolitaine. Un événement de température extrême qui se produisait auparavant 1 fois tous les 10 ans en moyenne en France devrait se répéter environ 7 fois plus souvent d'ici 2050 (IPCC, 2023). Ainsi, avec l'augmentation des températures et la plus grande fréquence d'événements extrêmes, l'intégration de la limitation des surchauffes dans la conception et la mise en œuvre des rénovations apparaît également primordial. Le confort thermique d'été s'intéresse à cette notion en évaluant le ressenti des occupants lors des vagues de chaleur.

Cette étude propose d'embrasser ces différents enjeux : Comment évaluer l'ensemble des impacts environnementaux dus à la rénovation de bâtiments ? Comment prendre en compte le confort d'été dans l'acte de rénovation ? Comment aider à la décision dans une approche multicritère pour répondre à la fois aux enjeux d'atténuation et d'adaptation ? Pour cela, l'analyse de cycle de vie adaptée à la rénovation sera d'abord abordée. Puis, l'extension de l'évaluation multicritère au confort d'été et au coût sera présentée. Enfin, une méthodologie pour élaborer des stratégies de rénovation à partir de cette analyse multicritère sera présentée.

II. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE EN RENOVATION

A. L'analyse de cycle de vie bâtiment, périmètre et spécificités en rénovation

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée (normes internationales ISO 14040 et ISO 14044) d'évaluation environnementale multicritère qui permet de quantifier les impacts d'un système (produit, service, entreprise...). Deux normes sont spécifiques au secteur du bâtiment : la norme française NF EN 15978 qui détaille les principes de l'ACV d'un bâtiment et la norme NF EN 15804+A1 qui régit l'ACV des produits de construction et équipement (depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie).

La réglementation environnementale 2020 (RE2020) rend obligatoire la réalisation d'une analyse de cycle de vie pour les bâtiments neufs (logement, bureau, enseignement) et généralise donc son utilisation (MTE-MTC, 2020). L'évaluation est réalisée sur un périmètre défini : impacts des composants sur tout leur cycle de vie (extraction, fabrication, transport, maintenance, fin de vie), impacts des consommations d'énergie et d'eau du bâtiment en exploitation, impacts dus au chantier de construction. La période d'étude de référence (PER), qui fixe la durée d'exploitation du bâtiment et donc les consommations d'énergie et d'eau ainsi que les renouvellements de composants, est fixée de façon conventionnelle à 50 ans.

Pour réaliser l'évaluation environnementale d'une opération de rénovation, le périmètre est le même que pour un bâtiment neuf mais l'évaluation est plus complexe car les composants sont décomposés en trois catégories : les composants neufs installés lors de l'opération de rénovation,

les composants présents dans le bâtiment initial et conservés et ceux déposés lors des travaux. Des règles sont donc à définir pour préciser comment comptabiliser les impacts de chacune des catégories.

B. Indicateurs de performance carbone en rénovation

Ces dernières années, plusieurs projets ont été menés en France sur l'ACV rénovation et plus largement sur la prise en compte du critère environnemental en rénovation. Des indicateurs de performance environnementale de la rénovation ont ainsi été proposés (FBE, 2021) puis testés sur des opérations réelles (Alliance GQE-GBC et. al., 2022 ; Hub, 2023).

En comparant les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux composants neufs avec les émissions de GES liées à l'énergie en phase d'exploitation, les indicateurs « Indice de rénovation » et « Temps de retour carbone (TRC) » permettent de vérifier que l'investissement carbone réalisé au moment de la rénovation est bien inférieur au gain carbone réalisé en exploitation.

L'indice de rénovation permet de quantifier la réduction d'émissions de GES permise par la rénovation :

$$IR_{\text{réno}} = E_{\text{gespn}} - (E_{\text{gesénergie,avant}} - E_{\text{gesénergie,après}})$$

avec E_{gespn} les émissions de GES dues aux composants neufs, $E_{\text{gesénergie,avant}}$, et $E_{\text{gesénergie,après}}$ les émissions de GES liées aux consommations d'énergie avant et après travaux respectivement.

Si $IR_{\text{réno}} < 0$, la rénovation est performante d'un point de vue du carbone, les travaux permettent de réduire les émissions de GES selon une approche « en cycle de vie » (et pas uniquement « en exploitation »).

Le temps de retour carbone représente quant à lui le temps nécessaire au bout duquel l'investissement carbone réalisé via les composants neufs au moment de la rénovation, est « rentabilisé » par les réductions d'émissions faites en exploitation. Le TRC ne peut être calculé que si $IR_{\text{réno}} < 0$, sinon il est infini.

$$TRC = PER * E_{\text{gespn}} / (E_{\text{gesénergie,avant}} - E_{\text{gesénergie,après}})$$

avec PER la période d'étude de référence.

Si $IR_{\text{réno}} < 0$, le TRC est forcément inférieur à la PER ce qui est cohérent avec le fait que la rénovation est performante.

C. Méthodologie d'ACV en rénovation

Au-delà de la seule performance carbone de la rénovation, il est nécessaire de disposer d'une méthodologie d'ACV rénovation qui prend en compte l'ensemble du périmètre (composants neufs, conservés et déposés, consommations d'eau et d'énergie et chantier) et qui permet d'évaluer l'ensemble des impacts (ressources, déchets...). La méthode ACV proposée¹ est basée sur une méthode ACV de bâtiments neufs (RE2020 ou autre) et précise les éléments spécifiques à la rénovation. Elle est décrite en détail dans (ADEME, 2022). Les éléments structurants sont les suivants :

¹ Méthodologie développée initialement pour le Test HQE Performance Existant (2017) puis reprise et affinée via le projet Quartier énergie carbone et intégrée au logiciel d'ACV quartier UrbanPrint (CSTB-Efficacity)

- Composants neufs, consommations d'eau et d'énergie, chantier : méthodologie similaire au bâtiment neuf
- Composants conservés : prise en compte des impacts dûs à la vie en œuvre (selon la durée de conservation dans le bâtiment rénové), de la fin de vie et de leur renouvellement durant la période d'étude de référence.
- Composants déposés : prise en compte des impacts dûs à leur fin de vie.

Une PER de 50 ans est recommandée en cohérence avec la RE2020 pour permettre les comparaisons neuf/rénovation. Pour quantifier les consommations d'énergie, le recours à une simulation énergétique dynamique est nécessaire. Il s'agit de connaître les consommations d'énergie par poste (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, éclairage, ventilation et auxiliaires...) et par vecteur énergétique (gaz, électricité, bois, réseau de chaleur...).

D'autres méthodes d'évaluation de la rénovation existent et se distinguent sur l'évaluation des composants déposés et conservés (FBE, 2021). Ces méthodes reposent sur la notion d'amortissement et ne prennent ainsi en compte que des impacts liés à des composants n'ayant pas atteint leur durée de vie de référence. Pour les composants non amortis, des impacts liés à la fabrication des composants sont donc comptabilisés alors qu'ils ont eu lieu avant la rénovation. Pour les composants amortis, aucun impact n'est comptabilisé alors que des impacts dûs à la fin de vie vont avoir lieu a minima.

En ne prenant en compte que les impacts « à venir » dans le cycle de vie du bâtiment rénové, la méthode retenue se caractérise par le suivi des flux physiques et de leur temporalité (contrairement aux autres méthodes). Cela lui confère plusieurs avantages :

- Possibilité de comparer des scénarios rénovation vs. déconstruction/reconstruction
- Mise en perspectives des émissions de GES calculées avec les budgets carbone disponibles pour le secteur du bâtiment
- Compatibilité avec une évaluation d'impacts multicritère (pour l'évaluation d'indicateurs d'économie circulaire par exemple)

Il est à noter que cette méthode est aussi cohérente avec le projet d'évolution de la norme EN 15978 qui intégrera tous les types d'évaluation de bâtiment, dont les rénovations.

III. EVALUATION MULTICRITERE : PRISE EN COMPTE DU CONFORT D'ETE ET DES COÛTS

L'analyse de cycle de vie est un outil d'aide à la décision qui peut être utilisé pour concevoir des solutions de rénovation minimisant les impacts environnementaux. Dans ce processus de décision, d'autres critères complémentaires peuvent être évalués afin de proposer une approche globale pour le choix de solutions optimales, notamment dans un contexte de changement climatique.

Différents travaux se sont intéressés à cette problématique d'évaluation et d'optimisation multicritères appliquée à la construction ou à la rénovation de bâtiments. Ce pan de recherche, regroupé sous l'analyse durable de cycle de vie (*Life Cycle Sustainability Assessment*), se développe pour la rénovation depuis 2014 (Amini Toosi et al., 2020). Trois grandes familles d'indicateurs

sont étudiées, selon qu'ils aient attiré à l'environnement (*Life Cycle Assessment*), l'économie (*Life Cycle Cost*) ou la société (*Social Life Cycle Assessment*). Historiquement, il existe une nette prépondérance pour les indicateurs économiques puis environnementaux, comme le détaille la Figure 1. Les études d'optimisation multi-dimensionnelles émergent depuis 2016. Dans ces études, les indicateurs environnementaux concernent généralement la consommation d'énergie primaire (en kWh) et le réchauffement climatique (en kgCO₂eq), tandis que le coût d'investissement et le coût global (en €) sont principalement convoqués pour les indicateurs économiques (Galimshina et al., 2021 ; Pannier et al., 2021 ; Merlet, 2020 ; Rogeau et al., 2020 ; Rivallain, 2013). Cependant, les impacts sociaux de la rénovation à travers l'évaluation du confort thermique des occupants, sont moins étudiés, comme le rappelle la Figure 1. Quelques études récentes d'optimisation sur ces trois grandes familles d'indicateurs, en prenant en compte aussi bien le chauffage que le refroidissement, sont à noter, avec un bâtiment résidentiel en Iran (Mostafazadeh et al., 2023) et une école aux Etats-Unis (Mostavi et al., 2017). Par exemple, des stratégies optimales coût-carbone de rénovation ne sont pas nécessairement les meilleures pour le confort thermique (Galimshina et al., 2021).

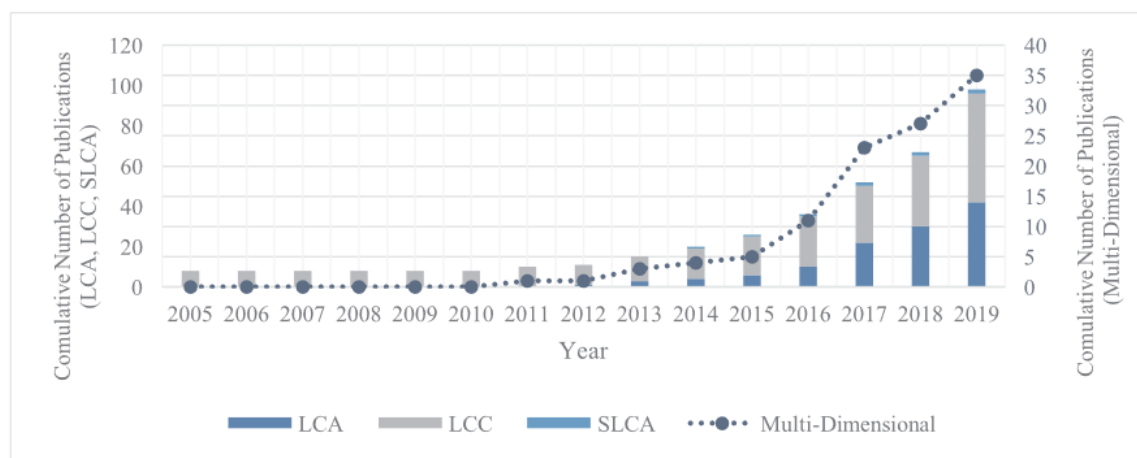


FIGURE 1 : Nombre d'articles publiés dans les journaux répertoriés sur Scopus autour de la LCSA en rénovation (Amini Toosi et al., 2020). LCA : Analyse du Cycle de Vie, LCC : Analyse de Coût du Cycle de Vie, SLCA : Analyse Sociale du Cycle de Vie

La méthodologie présentée ici vise à évaluer et identifier des solutions de rénovation optimisées pouvant être appliquées sur un bâtiment existant. Elle s'intéresse en particulier à trois problématiques majeures intervenant dans le cycle de vie du bâtiment rénové : l'empreinte carbone de la rénovation, le confort thermique d'été pour les occupants ainsi que les indicateurs financiers, avec les différents coûts associés au projet de rénovation. Les solutions étudiées sont appliquées de manière globale sur des bâtiments existants et concernent des changements sur l'enveloppe et les systèmes, sans échelonnage dans le temps. Une durée de vie post-travaux de 50 ans est prise en compte, afin de se baser sur la même durée que l'ACV réglementaire pour la construction neuve. Ces 3 grandes problématiques sont détaillées ci-dessous :

- La méthode d'analyse du cycle de vie retenue est celle décrite dans la partie précédente. Elle permet d'évaluer l'empreinte carbone des solutions de rénovation.

Pour estimer les consommations énergétiques des différents postes, une simulation énergétique dynamique (SED) est réalisée avec le modèle Cometh-SED, utilisé notamment dans les dernières réglementations thermiques en France (Silva et al., 2016). Cette simulation est couramment considérée comme représentative de la phase d'exploitation sur la durée de vie totale du projet étudié qui est ici de 50 ans. Différents travaux de la littérature tentent d'intégrer l'impact du réchauffement climatique sur le fonctionnement des bâtiments (Galimshina et al., 2021); (Lauzet, 2019); (Roux et al., 2016)). Dans une démarche prospective, la méthodologie d'identification de solutions de rénovation optimisées propose de diviser la période d'étude en 2 périodes caractéristiques auxquelles sont associées des données météorologiques régionalisées intégrant l'impact du réchauffement tendanciel, sur une méthodologie proche de ce qui a été développé par Piñas et al. (2022). Cette segmentation temporelle permet de représenter de manière plus représentative les consommations énergétiques et leur évolution sur le cycle de vie. Des éléments prospectifs sont également intégrés dans l'évaluation environnementale. Par exemple, la décarbonation du mix énergétique français telle qu'envisagée par (RTE, 2022) est modélisée dans l'ACV des stratégies de rénovation.

- L'analyse du coût du cycle de vie (ACCV) est une méthode efficace et reconnue depuis le début du XXI^e siècle pour évaluer les coûts engendrés par la rénovation d'un bâtiment (Elbeze, 2018). Le coût global direct (Life Cycle Cost) est utilisé, de par sa bonne représentativité de l'impact économique et sa forte utilisation dans la communauté scientifique (Amini Toosi et al., 2020). Cet indicateur comptabilise tous les coûts arrivant sur le cycle de vie du bâtiment rénové, à savoir le coût de production des éléments liés à la rénovation, les coûts d'opération majoritairement associés à l'énergie consommée, les coûts de remplacement, de réparation et de fin de vie. En complément du coût global direct, le coût des travaux de rénovation est considéré comme un indicateur d'intérêt pouvant intervenir dans le processus de décision.

- Le confort thermique d'été est quant à lui évalué en étudiant la capacité du bâtiment à limiter les surchauffes dans les pièces de vie. L'évaluation de l'ambiance thermique à la suite de la rénovation est effectuée sur 2 aspects différents : le confort thermique en ambiance modérée et le risque sanitaire en ambiance chaude. Les différentes ambiances thermiques sont définies dans la norme NF EN ISO 11399. Cette évaluation repose sur des variables environnementales (température de l'air, humidité relative, vitesse de l'air, température radiante) et sur l'occupant (principalement son métabolisme lié à son activité physique et sa vêtue).

L'approche méthodologie initiale consiste à mesurer les Degrés-Heures (DH, en °C.h) sur une année de simulation de la SED, c'est-à-dire quantifier la durée et

l'intensité de dépassement de seuils de température. 2 grandeurs différentes sont comparées pour l'évaluation du confort thermique. D'une part, nous établissons un seuil basé sur la température opérative, qui dépend du confort adaptatif (de Dear and Brager, 1998) et est appliqué dans la réglementation pour la construction neuve ("Réglementation environnementale RE2020," 2020). En guise d'exemple, le seuil journalier varie entre 26 et 28°C, tandis qu'il est de 26°C la nuit. D'autre part, nous mettons en place un seuil basé sur la Température Effective Standard (SET), qui dépend notamment de l'humidité relative et permet de quantifier le confort thermique et le risque sanitaire dans des contextes transitoires. Cet indice est basé sur le modèle à deux nœuds de Gagge (Gagge et al., 1986) et a été standardisé par l'ASHRAE (ASHRAE Standard 55-2010). L'approche originale choisie ici consiste à modéliser le bâtiment et ses consommations sur deux périodes représentatives de l'évolution tendancielle des conditions climatiques, permettant aussi de suivre l'évolution des indicateurs de confort. Ces indicateurs associés aux périodes actuelles ou futures peuvent être intégrés sous forme de contrainte ou de critère d'optimisation dans le processus d'aide à la décision.

L'étude des conditions de confort sur des années type représentatives de l'évolution tendancielle du climat est complétée par une évaluation complémentaire du confort thermique et de l'éventuel risque sanitaire associé sur une année caniculaire extrême. Le risque sanitaire est lié à l'exposition prolongée à la chaleur. Cette exposition prolongée entraîne des risques de crampes musculaires, d'œdèmes, d'épuisement, de malaise et d'hyperthermie, voire de décès. La SET, telle que définie par l'ASHRAE, définit des seuils de risque sanitaire à partir de 30°C. L'objectif est d'utiliser des séries climatiques de canicules régionalisées qui seront typiques dans les décennies futures, en se basant sur les projections établies par EURO-CORDEX pour différents modèles climatiques, comme l'ont fait (Dalelane et al., 2018) pour l'Allemagne. A partir de ces données prospectives, l'identification de phénomènes extrêmes, comme des canicules, se fera en étudiant la sévérité des phénomènes revenant tous les 5 ans, comme a pu le faire (Piñas et al., 2022) en suivant les principes de la norme ISO 15927.

En complément de ces approches originales associées à la problématique du confort thermique d'été et à l'adaptation au réchauffement climatique, la méthodologie vise à mieux intégrer la prise en compte de solutions de rafraîchissement passives (casquette solaire, brise-soleil orientable, sur-ventilation nocturne...) et actives (climatisation, brasseur d'air...). La modélisation des consommations de climatisation ainsi que les déterminants de l'installation de solutions actives sont rarement traitées dans les travaux de la littérature associés à l'évaluation multicritères pour l'éco-conception des bâtiments (Pannier et al., 2021 ; Merlet, 2020). L'intégration de séries climatiques prospectives traductrices d'un fort réchauffement climatique implique de prendre en compte plus finement les consommations liées au refroidissement. La modélisation des systèmes de climatisation est nécessaire au vu de leur forte implantation sur le territoire français (11% des ménages en 2016 mais

25% en 2020 et qui pourrait atteindre 80 à 95% dans le résidentiel d'ici 2050 (ADEME, 2021).

La

Figure 2 détaille la méthodologie retenue pour identifier les stratégies optimales de rénovation dans une évaluation multicritères. Elle intègre, dans la partie centrale du schéma, les évaluations multicritères présentées ci-dessus.

D'autres éléments de modélisation permettent d'appliquer la méthodologie afin d'identifier des solutions de rénovation globales optimales. Une base de données a été assemblée regroupant les gestes de rénovation représentatifs sur les principaux postes de rénovation : l'isolation des murs, de la toiture, et du sol, le remplacement des menuiseries, le remplacement des systèmes de chauffage, ventilation, climatisation et de production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire), ainsi que les systèmes de production photovoltaïque. A chacun des gestes de rénovation référencés sont associés des caractéristiques techniques et physiques, des données environnementales et des coûts. La base de données permet de constituer des bouquets de travaux qui constituent le plan d'expérience de l'approche d'évaluation et d'identification des solutions optimisées.

Une analyse combinatoire des solutions techniquement possibles est réalisée en amont du processus d'évaluation multicritère. En effet, afin de représenter au mieux la réalité et la complexité des chantiers de rénovation, une matrice d'interactions entre gestes de rénovation caractérise les interdépendances entre les différents lots techniques et les contraintes spécifiques aux bâtiments traités. Elle met en exergue les risques et vigilances à avoir selon les postes de rénovation retenus par la solution. Les risques portent notamment sur la tenue structurelle du bâtiment ou la qualité de l'air intérieur (par exemple, une mauvaise interaction entre les menuiseries et la ventilation peut entraîner une mauvaise gestion de l'humidité et dégrader fortement la qualité de l'air intérieur). Ces alertes tirées des retours d'expérience des chantiers de rénovation (P2E, 2021) viennent compléter l'analyse des solutions de rénovation au-delà des trois impacts retenus. Elles permettent de filtrer en amont du plan d'expérience les bouquets de solutions de rénovation réalistes prenant en compte, sans les modéliser, les problématiques de structure, de pathologie ou de qualité de l'air intérieur.

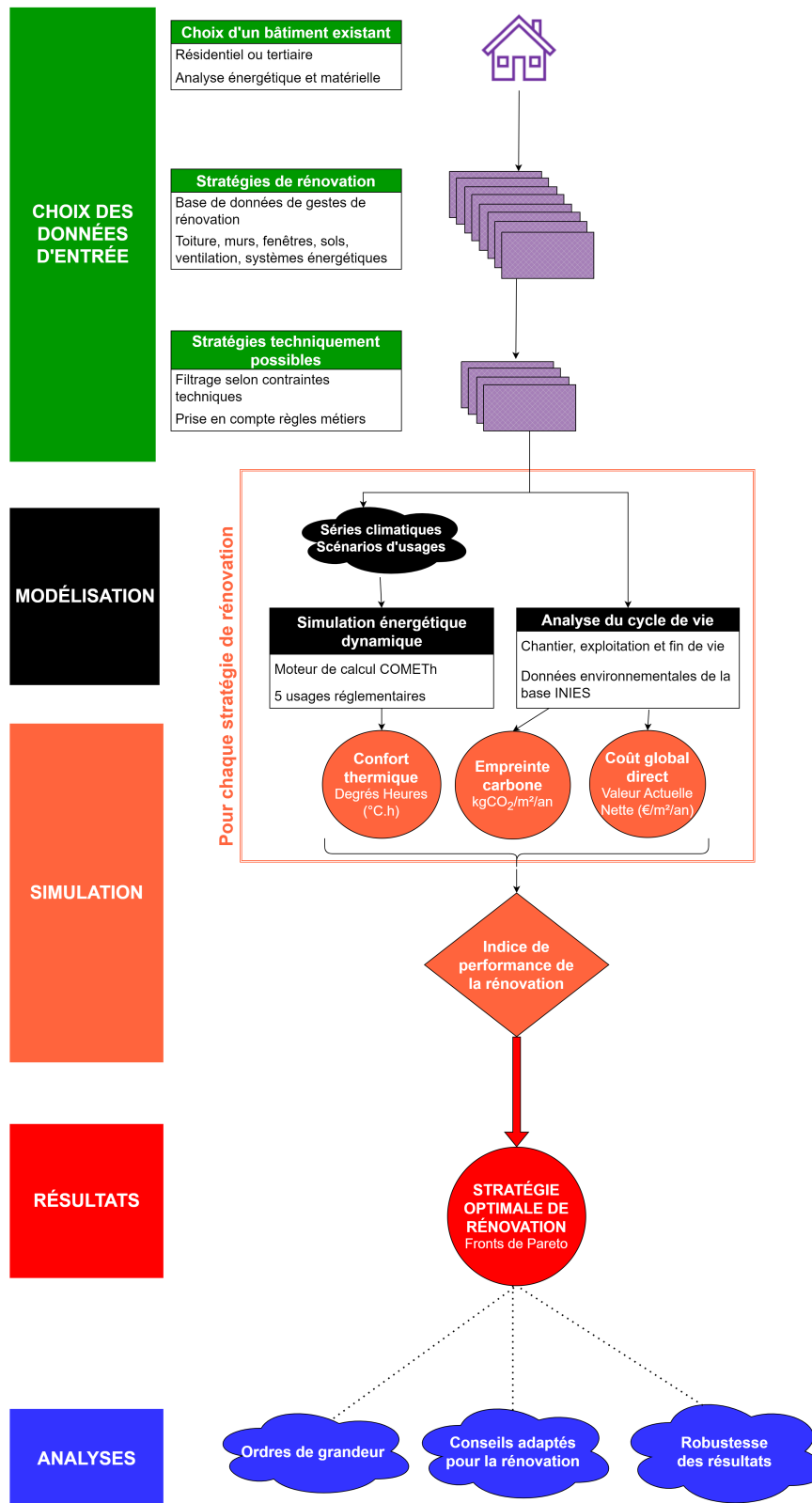


FIGURE 2 : Méthodologie d'identification des stratégies optimales de rénovation dans une évaluation multicritères

IV. ANALYSE MULTICRITERE DE STRATEGIE DE RENOVATION

Les ensembles de gestes de rénovation retenus sont ensuite évalués selon l'ensemble des méthodes décrites précédemment. Un n-uplet d'indicateurs est finalement associé à chaque scénario et caractérise sa performance sur les thématiques retenues. Différentes approches sont envisagées pour la visualisation de ces résultats et l'aide à la décision pour l'identification de solutions optimales. Parmi les différentes techniques existant dans la littérature, la visualisation des fronts de Pareto est souvent retenue pour l'aide à la décision, grâce à sa relative simplicité et sa facilité d'interprétation ((Pannier et al., 2021) (Rivallain, 2013)). Cette visualisation repose sur la dominance au sens de Pareto qui définit qu'une solution x^* domine une solution x au sens de Pareto si et seulement si :

- La solution x^* est au moins aussi bonne que la solution x sur tous les objectifs ;
- La solution x^* est strictement meilleure que la solution x sur un objectif, au moins.

Une solution est dite non-dominée, ou optimale au sens de Pareto, si et seulement si elle n'est dominée par aucune des solutions de l'espace de recherche étudié. Le front de Pareto est alors défini comme l'ensemble des solutions non-dominées. Il permet de visualiser les compromis possibles entre les critères d'optimisation pour aider à la décision. Le front de Pareto est particulièrement utile pour visualiser les solutions optimales minimisant 2 objectifs, comme le souligne la Figure 3.

Dans notre méthodologie, le front de Pareto décrit les solutions minimisant trois objectifs (empreinte carbone, coût global, inconfort thermique d'été). La visualisation en 3D est possible mais est moins aisée (Figure 4), c'est pourquoi les analyses reviennent régulièrement à des graphiques en deux dimensions.

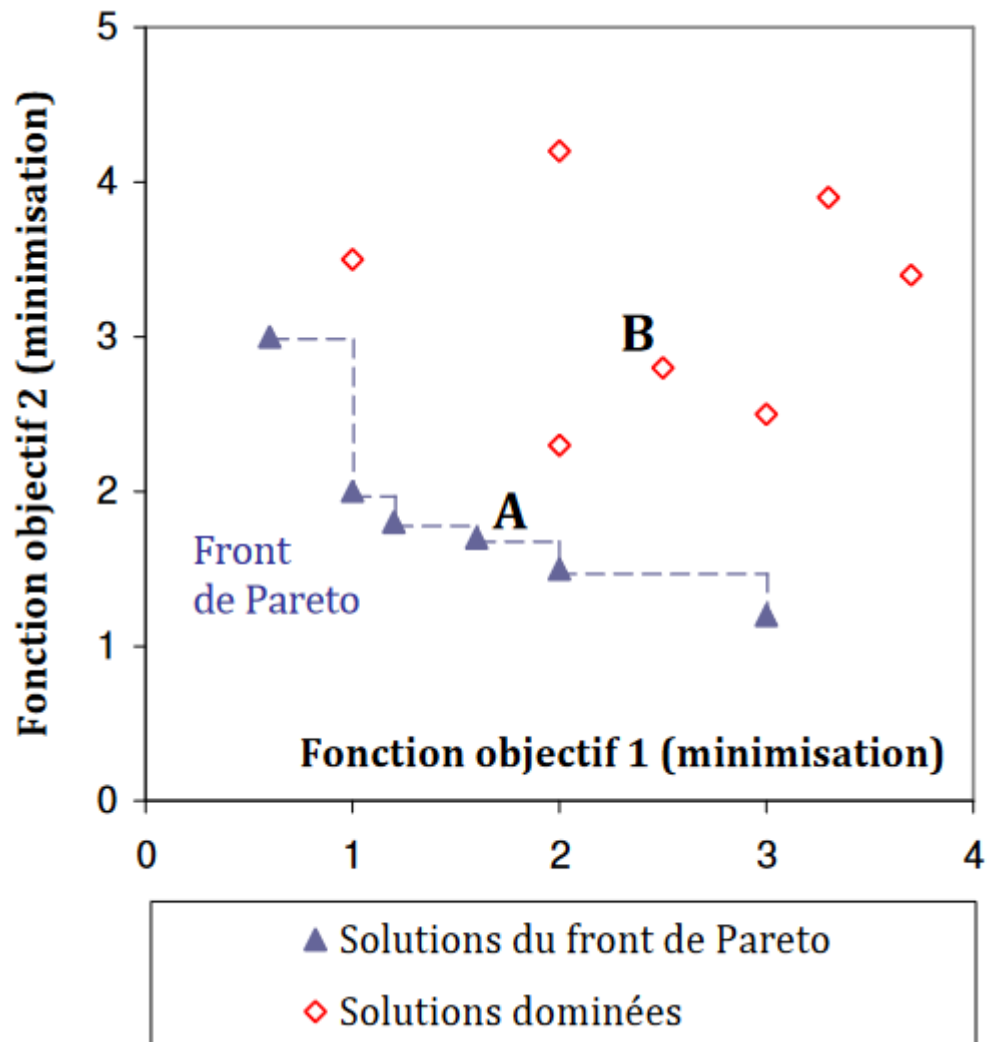


FIGURE 3 : Front de Pareto et solutions dominées sur un problème de minimisation à deux objectifs (Rivallain, 2013). A : solutions du front de Pareto. B : solutions dominées

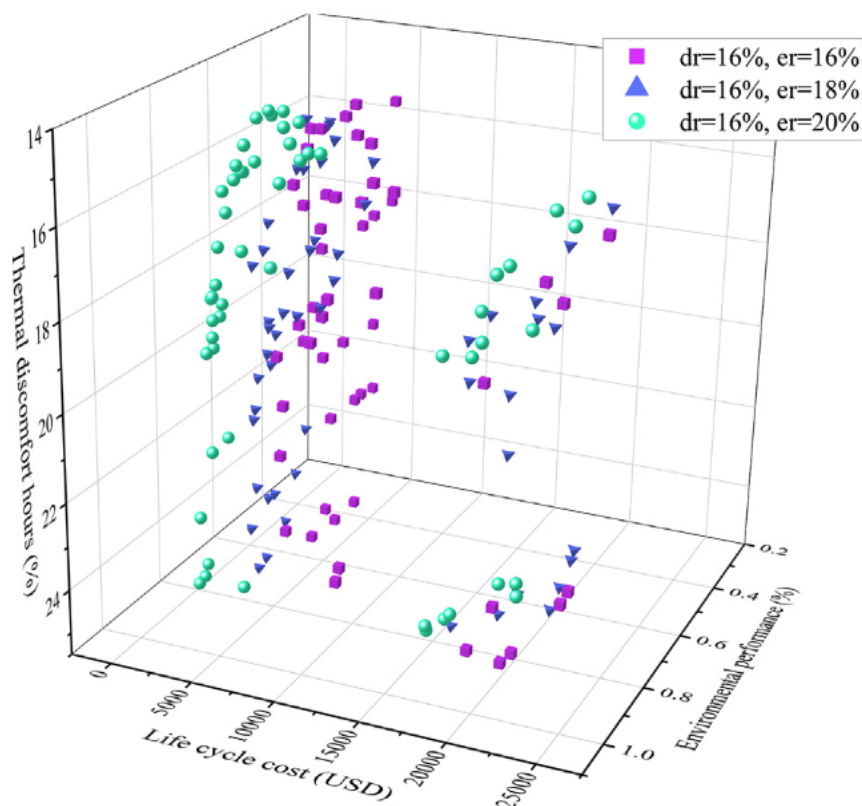


FIGURE 4 : Exemple de front de Pareto à 3 dimensions (Mostafazadeh et al., 2023), dr : taux d'actualisation, er : taux d'inflation des énergies.

Des approches d'analyse de sensibilité et d'incertitudes (ASAI) permettent aussi de caractériser la stabilité des meilleurs scénarios identifiés et leur dépendance à la variation de certaines données d'entrée que ce soient des données techniques, physiques ou des paramètres de différents modèles. Développées depuis les années 2000, notamment pour l'ACV, l'analyse d'incertitudes modélise les incertitudes des données d'entrée des ACV puis les propage jusqu'aux résultats, tandis que l'analyse de sensibilité étudie les effets de changements arbitraires des données d'entrée des ACV sur les résultats (Reap et al., 2008). Les travaux récents de (Recht, 2016) et (Pannier, 2017) ont permis d'appliquer ces techniques dans l'ACV du bâtiment. En l'état, la réflexion est toujours en cours mais notre méthodologie devrait intégrer l'analyse d'incertitudes avec un échantillonnage aléatoire de type Monte-Carlo (Saltelli et al., 2000) et une analyse de sensibilité globale basée sur la décomposition de la variance grâce aux indices de Sobol (Sobol, 1993).

L'exploitation finale de la méthodologie pour répondre à l'objectif d'aide à la décision repose sur des méthodes d'analyse transverse de l'ensemble des scénarios évalués. La connaissance brute produite peut être agglomérée afin de tirer des règles métier généralisables et partageables orientant la décision en fonction des typologies de bâtiments étudiés et des niveaux de performance initiaux. La construction de ce type de modèles agrégateurs ou métamodèles pour gérer la complexité du problème est une des pistes pour la suite des travaux. La littérature autour

de la classification de données selon les similitudes, et notamment le clustering, est actuellement étudiée (Chen et al., 2009) (Ali et al., 2020).

La méthodologie sera aussi appliquée sur des cas particuliers dans des contextes d'usage non conventionnels pendant la phase d'exploitation. Ces conditions descriptives de l'usage concernent notamment l'occupation des locaux, les périodes de présence, les températures de consigne de chauffage, les puisages d'ECS. La variation des solutions optimales de scénarios de rénovation dans des contextes de sobriété d'usage ou d'occupation limitée des résidences secondaires constitue un cas d'étude particulièrement intéressant.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour s'assurer qu'une rénovation contribue effectivement à la décarbonation, sans transfert d'impacts entre consommations d'énergie et composants, l'évaluation sur le cycle de vie des impacts des composants neufs installés lors de l'opération de rénovation est nécessaire. Pour étudier l'ensemble des impacts environnementaux causés par l'acte de rénover et pouvoir les comparer à un scénario déconstruction-reconstruction, l'étude propose de réaliser une analyse du cycle de vie de l'opération de rénovation. Celle-ci consiste à adapter la méthode d'ACV pour les bâtiments neufs avec des règles spécifiques à la prise en compte des composants présents dans le bâtiment initial, déposés et conservés lors des travaux de rénovation.

Au-delà des impacts environnementaux, une méthodologie d'évaluation multicritère intégrant les enjeux d'adaptation est proposée. Elle s'appuie sur des données météorologiques prospectives et consiste à quantifier le confort d'été et les consommations d'énergie dues à la climatisation. Une attention particulière est portée à la faisabilité technique des travaux de rénovation. Pour être utilisée comme aide à la décision la méthode intègre également l'évaluation des coûts sur le cycle de vie et repose sur une optimisation multicritère (fronts de Pareto).

Dans les approches de modélisation permettant de répondre aux enjeux du changement climatique, une analyse de cycle de vie transverse intégrant une démarche prospective semble nécessaire. Une réflexion est à mener sur la gestion de la complexité de l'aspect multicritère. En effet, contribuer à l'aide à la décision des acteurs de la filière nécessite de s'adapter à leur jeu de contraintes multifactoriel. Il sera intéressant de disposer de cas d'études permettant de consolider les connaissances et de pouvoir partager les bonnes pratiques en rénovation.

Enfin, pour planifier et accompagner la massification de la rénovation, un changement d'échelle de modélisation, du bâtiment au parc de bâtiments, sera à mener. Il devra permettre d'évaluer les indicateurs et d'identifier les limites à cette échelle globale sur les sujets de matériaux disponibles, de consommations énergétiques, d'impact sur les filières... L'articulation entre optimums locaux (à l'échelle du bâtiment) et optimum global (à l'échelle du parc) sera étudiée, notamment sur l'électrification des usages énergétiques et le recours aux matériaux biosourcés.

REFERENCES

ADEME, 2021. La climatisation dans le bâtiment [WWW Document]. Libr. ADEME. URL <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5182-la-climatisation-dans-le-batiment.html> (accessed 2.9.24).

ADEME, 2022, Méthode Quartier Energie Carbone, 136 pages

ADEME et al., 2022. Construction neuve et rénovation: les points communs des scénarios ADEME, négaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone 4

Ali, S.K., Aydam, Z.M., Rashed, B.M., 2020. Similarity metrics for classification: A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 928, 032052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/3/032052>

Alliance HQE-GBC et al., 2022, Optimisation et scénario NZC des cas génériques retenus

Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., Aste, N., 2020. Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review. *Sustain. Cities Soc.* 60, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>

Chen, Y., Garcia, E.K., Gupta, M.R., Rahimi, A., Cazzanti, L., 2009. Similarity-based Classification: Concepts and Algorithms. *J. Mach. Learn. Res.* 10, 747–776.

Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., Walter, A., 2018. A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 57, 477–491. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0141.1>

de Dear, R., Brager, G.S., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.

Elbeze, J., 2018. Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France.

FBE (Fondation Bâtiment Energie), 2021, Rapport Allongement du cycle de vie de la matière, 132 pages.

Gagge, A., Fobelets, A., Berglund, L., 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *Ashrae Trans.*

Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Padey, P., Lasvaux, S., Sudret, B., Habert, G., 2021. What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for building renovation? Not the usual one. *Energy Build.* 251, 111329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111329>

Hub des prescripteurs bas Carbone, 2023. Brief « Rénovation bas carbone, mesurer pour agir ! »

IPCC, 2023. SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6).

Lauzet, N., 2019. Prise en compte cumulée du réchauffement climatique et des surchauffes urbaines en phase amont de conception frugale des bâtiments centrée sur le confort des occupants : des propositions méthodologiques (phdthesis). Université de Bretagne Sud.

Merlet, Y., 2020. Elaboration de stratégies optimales de rénovation de parcs de bâtiments : Intégration du phasage et des contraintes (phdthesis). Université Savoie Mont Blanc.

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTE-MCT), 2023. Feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTE-MCT), 2020. Réglementation environnementale RE2020 [WWW Document]. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020> (accessed 2.9.24).

Mostafazadeh, F., Eirdmoussa, S.J., Tavakolan, M., 2023. Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach. *Energy Build.* 280, 112721. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112721>

Mostavi, E., Asadi, S., Boussaa, D., 2017. Development of a new methodology to optimize building life cycle cost, environmental impacts, and occupant satisfaction. *Energy* 121, 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.049>

P2E, 2021. Passeport Efficacité Energétique : Points de vigilance de la rénovation par étapes [WWW Document]. Exp. P2E. URL <https://www.experience-p2e.org/le-p2e/points-vigilance-etapes/> (accessed 5.12.23).

Pannier, M.-L., 2017. Étude de la quantification des incertitudes en analyse de cycle de vie des bâtiments (phdthesis). Université Paris sciences et lettres.

Pannier, M.-L., Recht, T., Robillart, M., Schalbart, P., Peuportier, B., Mora, L., 2021. Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints. *Energy Build.* 250, 111290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111290>

Pellan, Marin and Louërat, Mathilde and Almeida, Denise and Habert, Guillaume, 2024 (préprint). Beyond Sectoral Carbon Budgets for the Building Activities: A French Case Study. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4633977> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4633977>

Piñas, J., Gobert, R., Alessandrini, J.-M., Sabre, M., Kraiem, S., Lefebvre, G., Liu, W., Pelé, C., 2022. Will Cities Survive? Adequacy of Weather Data Standards to Assess Building Passive Performance During Summer An Application to French Buildings, in: *PLEA (Passive and Low Energy Architecture)* 2022. PLEA, Santiago, Chile.

Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 2: impact assessment and interpretation. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 374–388. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0009-9>

Recht, T., 2016. Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive (phdthesis). Université Paris sciences et lettres.

Rivallain, M., 2013. Study of decision aiding through multi criteria optimization for existing buildings holistic energy retrofit (phd). Université Paris-Est.

Rogean, A., Girard, R., Abdelouadoud, Y., Thorel, M., Kariniotakis, G., 2020. Joint optimization of building-envelope and heating-system retrofits at territory scale to enhance decision-aiding. *Appl. Energy* 264, 114639. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114639>

Roux, C., Schalbart, P., Assoumou, E., Peuportier, B., 2016. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. *Appl. Energy* 184, 619–629. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.043>

RTE, 2022. Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 [WWW Document]. URL <http://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques> (accessed 2.9.24).

Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M. (Eds.), 2000. Sensitivity analysis, Wiley series in probability and statistics. Wiley, Chichester ; New York.

Silva, D.D., Alessandrini, J.-M., Videau, J.-B., Millet, J.-R., 2016. Evaluation et perspectives du modèle thermique de COMETH, le cœur de calcul de la réglementation thermique des bâtiments neufs.

Sobol, I., 1993. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models.