

Approche holistique de la prise de décision en rénovation des logements collectifs et bâtiments tertiaires.

Meray Nassimos¹, Anabelle Rahhal¹, and Pierre Leclercq¹

¹LUCID, University of Liège, LUCID, Allée de la Découverte 9, BAT 52, B-4000 Liège, Belgium

Abstract. Renovating existing buildings is a key lever for achieving European climate and energy objectives. However, renovation decisions in multi-family and commercial buildings are still often based on fragmented indicators, such as initial cost or energy performance alone, without integrating the interactions between technical systems, uses, operating costs, and their evolution over time. This article presents the methodological framework developed in the CARMEN (CARbone – ENergie) project, based on Complex Systems Dynamics (CSD) and an expanded Total Cost of Ownership (TCO) model. The objective is to develop a decision-support tool capable of integrating multidimensional data and simulating different long-term renovation scenarios. The article outlines the context and state of the art of decision-support methods in renovation, then presents the proposed methodological approach, based on a systemic building model. This approach allows for the prospective evaluation of renovation strategies by simultaneously integrating energy, economic, and temporal dimensions.

Keywords. Renovation, dynamics of complex systems, total cost of ownership, decision support, holistic approach.

Résumé. La rénovation du parc immobilier existant constitue un levier essentiel pour atteindre les objectifs climatiques et énergétiques européens. Pourtant, les décisions de rénovation dans les bâtiments collectifs et tertiaires reposent encore souvent sur des indicateurs fragmentés, tels que le coût initial ou la seule performance énergétique, sans intégrer les interactions entre les systèmes techniques, les usages, les coûts d'exploitation et leur évolution dans le temps. Cet article présente le cadre méthodologique développé dans le projet CARMEN (CARbone – ENergie), basé sur la Dynamique des Systèmes Complexes (DSC) et sur une modélisation élargie du Coût Total de Possession (TCO). L'objectif est de développer un outil d'aide à la décision capable d'intégrer des données

¹ Corresponding author: meray.nassimos@uliege.be

multidimensionnelles et de simuler différents scénarios de rénovation sur le long terme. L'article expose le contexte et l'état de l'art des méthodes d'aide à la décision en rénovation, puis présente l'approche méthodologique proposée, fondée sur une modélisation systémique du bâtiment. Cette approche permet d'évaluer de manière prospective les stratégies de rénovation en intégrant simultanément les dimensions énergétiques, économiques et temporelles.

Mots clés. Rénovation, dynamique des systèmes complexes, coût total de possession, aide à la décision, approche holistique.

1 Introduction

1.1 Contexte général

Le secteur du bâtiment représente environ 36-40% de la consommation énergétique et une part significative des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle européenne [1]. Les politiques publiques identifient la rénovation énergétique du parc existant comme une priorité stratégique. Toutefois, la majorité des bâtiments existants, notamment dans le logement collectif et le tertiaire, présentent des performances énergétiques insuffisantes et des systèmes techniques vieillissants. La rénovation constitue donc un enjeu technique, économique et environnemental majeur. Cependant, elle implique des décisions complexes engageant des investissements importants et produisant des effets à long terme. Les gestionnaires des bâtiments à rénover doivent arbitrer entre des contraintes budgétaires, des exigences réglementaires croissantes, des objectifs de décarbonation, des risques technologiques et économiques, tout en maintenant la qualité d'usage. Par conséquent, les choix réalisés aujourd'hui influencent la trajectoire énergétique et économique du bâtiment sur plusieurs décennies (20-40-60 ans).

1.2 Complexité décisionnelle en rénovation

La prise de décision dans le cadre de la rénovation d'un bâtiment existant ne se limite pas à l'amélioration d'un composant isolé. Elle implique l'analyse d'un ensemble de sous-systèmes interdépendants qui structurent la performance globale du bâtiment. Ces sous-systèmes comprennent notamment : l'enveloppe du bâtiment (isolation, menuiseries), les systèmes énergétiques (chauffage, ventilation, refroidissement), les installations électriques, les dispositifs de pilotage et d'automatisation, ainsi que les conditions d'usage et les facteurs sociaux, incluant les comportements des occupants et les pratiques de maintenance. À ces dimensions techniques et d'usage s'ajoutent également les modalités de financement du projet, qui influencent fortement les choix d'investissement et les stratégies de rénovation.

Ces différents paramètres interagissent selon des relations dynamiques et non linéaires. L'amélioration de la performance de l'enveloppe réduit les besoins thermiques, ce qui modifie les régimes de fonctionnement des systèmes HVAC, influence leur taux de dégradation et, par conséquent, les coûts de maintenance associés. À l'inverse, le choix d'un système technique plus performant peut diminuer la consommation énergétique en phase d'exploitation, tout en augmentant le carbone incorporé initial ou les coûts de remplacement futurs. Par ailleurs, l'évolution des usages du bâtiment constitue un facteur déterminant, dans la mesure où elle influence directement les profils de consommation énergétique. La littérature consacrée aux comportements des occupants [2, 3, 4] montre que la variabilité des usages peut expliquer une part significative des écarts observés entre la performance

énergétique calculée et la performance réelle des bâtiments. Par ailleurs, les phénomènes de vieillissement des composants, tels que la perte d'étanchéité à l'air, la dégradation des isolants ou la diminution du rendement des chaudières, introduisent une dynamique temporelle souvent insuffisamment prise en compte dans les évaluations statiques [5]. Dans ce contexte, le bâtiment rénové peut être appréhendé comme un système socio-technique complexe caractérisé par des interactions multiples, des mécanismes de rétroaction, une évolution temporelle et la présence d'incertitudes. Cette complexité remet en question la pertinence d'approches décisionnelles fondées exclusivement sur des indicateurs statiques.

1.3 Limites des approches traditionnelles existantes

Malgré cette complexité, les décisions de rénovation reposent encore largement sur des critères simplifiés, tels que le coût d'investissement initial, le temps de retour sur investissement, des analyses énergétiques ponctuelles, ainsi que des indicateurs statiques de performance. Les simulations énergétiques traditionnelles utilisent souvent une année météorologique typique et des hypothèses d'occupation standardisées. Or, plusieurs travaux ont démontré que l'incertitude climatique et comportementale peut fortement influencer les résultats [6,7]. Ces approches de Life Cycle Costing (LCC) fragmentées ne permettent pas d'intégrer les coûts futurs (les prix de l'énergie sont constants ou prévisibles), d'évaluer les effets indirects, ni de simuler les dynamiques temporelles.

Ces hypothèses simplificatrices limitent la capacité à évaluer des trajectoires adaptatives ou séquencées. Il en résulte des décisions potentiellement sous-optimales, privilégiant des solutions à court terme minimisant l'investissement initial plutôt que maximisant la performance globale à long terme.

Cet article constitue une contribution de positionnement méthodologique en première année du projet CARMEN. Les résultats expérimentaux feront l'objet de publications ultérieures.

1.4 Question de recherche

Dans ce contexte, la question centrale de cet article est la suivante :

Comment concevoir un outil d'aide à la décision en rénovation capable d'intégrer la complexité dynamique du bâtiment et d'évaluer les stratégies de rénovation selon une approche holistique fondée sur les trois points : l'énergie, le carbone et le financement intégrés ?

2. État de l'art

2.1 Approches cycle de vie économiques et environnementales

Les décisions de rénovation reposent traditionnellement sur des outils d'analyse économique classique tels que : le coût d'investissement initial, le temps de retour sur investissement (durée nécessaire pour que les économies cumulées compensent l'investissement initial), la valeur actualisée nette (VAN), le taux de rentabilité interne, et le coût du cycle de vie (LCC-Life Cycle Costing). Ces méthodes permettent d'intégrer une partie des coûts différés mais restent généralement statiques, peu intégrées aux dynamiques techniques et faiblement systémiques. Elles ne modélisent pas explicitement les rétroactions entre performance énergétique, dégradation et maintenance.

2.1.1 Life Cycle Costing (LCC)

Le LCC élargit l'analyse aux coûts [8] : d'exploitation, de maintenance, de remplacement, et de fin de vie. Le LCC reste souvent découplé des dynamiques physiques du bâtiment. Il ne modélise pas explicitement les interactions entre dégradation des systèmes, évolution des performances énergétiques et stratégies de maintenance. Dans les projets de rénovation complexes, cette absence d'interaction dynamique limite la capacité prédictive des modèles.

2.1.2 Analyse du cycle de vie (ACV)

Parallèlement, l'ACV, normalisée par l'ISO 14040/44 [9] , permet d'évaluer l'impact environnemental global des bâtiments sur l'ensemble du cycle de vie. Les travaux de De Wolf et al. (2017) [10] montrent l'importance croissante du carbone incorporé dans les stratégies bas-carbone. Toutefois, les applications de l'ACV restent majoritairement centrées sur la construction neuve et modélisent rarement des trajectoires de rénovation adaptatives. L'intégration dynamique entre ACV et LCC reste encore limitée dans la littérature récente, notamment lorsqu'il s'agit d'intégrer les effets d'apprentissage, les évolutions réglementaires ou les incertitudes énergétiques à long terme.

2.1.3 Coût Total de Possession (Total Cost of Ownership-TCO)

L'approche du coût total de possession (TCO) étend l'analyse traditionnelle du coût du cycle de vie en intégrant l'ensemble des coûts associés à un actif tout au long de sa durée de vie, y compris l'acquisition, l'exploitation, la maintenance, le remplacement et les coûts de fin de vie. Bien que ce concept soit largement utilisé dans la gestion des actifs industriels et la planification des infrastructures, son application aux bâtiments demeure limitée. Dans la plupart des études, les évaluations du CTP sont partielles ou statiques et rarement couplées à une modélisation dynamique du système. De ce fait, les interactions entre les performances techniques, les processus de dégradation, les coûts d'exploitation et les stratégies d'investissement ne sont pas pleinement représentées dans le temps.

Alors que le Life Cycle Costing (LCC) vise principalement à évaluer les coûts associés au cycle de vie d'un produit ou d'un bâtiment, le Total Cost of Ownership (TCO) adopte une perspective plus large en intégrant également les coûts indirects et organisationnels associés à l'exploitation et à la gestion de l'actif.

2.2 Outils multicritères et approches comparatives (MCDM)

Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM, Multiple Criteria Decision Making) ont été largement mobilisées pour intégrer simultanément des dimensions économiques, énergétiques, environnementales et sociales dans les projets de rénovation. Elles offrent un cadre structuré permettant de comparer différentes alternatives sur la base d'indicateurs pondérés.

Toutefois, ces approches présentent plusieurs limites. Les pondérations attribuées aux critères reposent souvent sur des jugements subjectifs. De plus, ces méthodes ne prennent généralement pas en compte les dynamiques temporelles ni les interactions causales entre les variables. En conséquence, elles conduisent principalement à un classement statique des alternatives plutôt qu'à une analyse prospective fondée sur la simulation de l'évolution du système. En conséquence, les méthodes multicritères constituent principalement des outils de comparaison à un instant donné, plutôt que des instruments de simulation prospective. Elles ne permettent pas d'évaluer les trajectoires d'investissement ou les effets cumulatifs

des décisions successives dans le temps, ce qui est pourtant central dans les projets de rénovation lourde du parc collectif et tertiaire [11].

2.3 Incertitudes et robustesse décisionnelle

Les décisions de rénovation des bâtiments s'inscrivent dans un contexte fortement incertain, en raison de la multiplicité des facteurs susceptibles d'influencer la performance réelle des stratégies de rénovation sur le long terme. Ces incertitudes peuvent affecter à la fois les dimensions techniques, économiques et opérationnelles des projets.

Plusieurs catégories d'incertitudes peuvent être identifiées dans la littérature :

- incertitudes climatiques, liées à l'évolution des conditions météorologiques futures et à la variabilité interannuelle du climat ;
- incertitudes économiques, notamment concernant l'évolution des prix de l'énergie et des coûts d'exploitation ;
- incertitudes comportementales, associées aux usages réels des bâtiments et aux comportements des occupants ;
- incertitudes technologiques, liées aux performances réelles des équipements et à la durée de vie effective des composants ;
- incertitudes réglementaires, résultant de l'évolution possible des normes énergétiques et environnementales.

Les méthodes de propagation d'incertitude des données (Monte Carlo, Sobol, Latin Hypercube Sampling) sont de plus en plus mobilisées dans les simulations énergétiques comme des standards [12]. Néanmoins, ces approches se concentrent généralement sur des sous-systèmes énergétiques spécifiques ou sur des analyses paramétriques. L'intégration simultanée des incertitudes techniques, économiques et organisationnelles dans un cadre décisionnel global reste encore limitée. Dans une perspective stratégique, la robustesse ne consiste pas uniquement à optimiser une performance moyenne, mais à analyser la stabilité d'une trajectoire de rénovation face à des chocs exogènes et à des dynamiques internes.

2.4 Vers une modélisation systémique dynamique

La Dynamique des Systèmes Complexes (DSC), issue des travaux de Jay W. Forrester [13], permet de modéliser des relations non linéaires, des boucles de rétroaction, des dynamiques temporelles, et des trajectoires évolutives. Concrètement, la DSC représente le système sous forme de stocks (ex. : performance énergétique de l'enveloppe, niveau de dégradation des équipements), de flux (taux de variation de ces stocks dans le temps) et de boucles de rétroaction reliant ces variables. Cette structuration permet de simuler l'évolution du système dans le temps et de mettre en évidence des comportements émergents (amplification, stabilisation) invisibles dans une analyse statique. Cette approche a été appliquée à la planification énergétique, aux systèmes urbains, et à la gestion des infrastructures, mais son application à la rénovation des bâtiments reste encore émergente et rarement couplée à une modélisation financière détaillée, intégrant un coût total de possession étendu. Or, le bâtiment rénové constitue un système complexe caractérisé par :

- l'interaction entre l'enveloppe et les systèmes énergétiques ;
- la dégradation progressive des composants au cours du temps ;
- l'apparition d'effets économiques différés liés aux investissements et aux coûts d'exploitation ;

- la capacité de réinvestissement potentiellement générée par les économies d'énergie réalisées.

Ces interactions dynamiques justifient l'adoption d'une approche systémique intégrée pour l'analyse et l'aide à la décision dans les projets de rénovation.

3. Positionnement méthodologique et motivations du projet

Afin de positionner le projet CARMEN dans le cadre des recherches existantes, une analyse comparative des travaux majeurs a été réalisée. L'objectif principal de cette analyse, constituant une revue de littérature ciblée, est de mettre en évidence les apports et limites méthodologiques des approches existantes, sans présenter leurs résultats spécifiques. Les références retenues ont été sélectionnées pour leur rigueur méthodologique et leur pertinence par rapport aux axes centraux du projet, à savoir :

- la prise en compte des incertitudes affectant les décisions de rénovation, incluant les dimensions techniques, économiques et comportementales ;
- l'intégration des dynamiques d'évolution des performances techniques, énergétiques et économiques sur le long terme ;
- l'approche multidimensionnelle, combinant simultanément énergie, carbone et aspects financiers ;
- le soutien à une décision robuste, permettant d'anticiper les effets différés et les interactions complexes entre les sous-systèmes du bâtiment.

4. Résultats et discussions

4.1 Études similaires et positionnement de CARMEN

Le tableau 1 présente les résultats de l'analyse de la revue de littérature comparative des travaux majeurs, en mettant en évidence leurs apports et leurs limites au regard des objectifs du projet CARMEN. Des références ont été retenues pour leur solidité méthodologique et leur lien direct avec les thématiques centrales du projet : incertitudes, dynamiques d'évolution, intégration multidimensionnelle et décision robuste.

Tableau 1: Synthèse des principales études thématiques et méthodologiques les plus pertinentes

Publications pertinentes	Contenu spécifique et positionnement par rapport à CARMEN
Carpino et al. (2022) [14]	Intégration d'analyses d'incertitude et de sensibilité pour réduire les risques dans les projets de rénovation énergétique. Approche robuste mais centrée sur la performance énergétique, sans modélisation systémique dynamique intégrée du cycle de vie économique.
Galimshina et al. (2020) [15]	Méthode statistique pour identifier des choix de rénovation robustes sur les plans environnemental et économique. Approche probabiliste pertinente, mais sans intégration explicite des boucles de rétroaction temporelles propres à la dynamique des systèmes.
Coppitters et al. (2021) [16]	Optimisation robuste d'un système photovoltaïque–batterie–pompe à chaleur sous incertitude. Focalisation sur l'optimisation technico-énergétique d'un système donné, sans modélisation globale bâtiment–usages–coûts sur le long terme.
Chaudhry et al. (2024a) [17]	Analyse robuste du potentiel des réseaux 5GDHC (5th Generation District Heating and Cooling) sous incertitude des marchés énergétiques. Approche territoriale et énergétique avancée, mais non centrée sur la décision multi-composants à l'échelle bâtiminaire intégrant TCO dynamique.

Chaudhry et al. (2024b) [18]	Optimisation opérationnelle des réseaux thermiques de 5e génération sous incertitudes futures. Contribution importante en matière de robustesse énergétique, mais limitée aux infrastructures énergétiques collectives.
Almusaed et al. (2021) [19]	Étude d'une façade cinétique intelligente intégrant les concepts de passeport matériaux. Approche innovante sur les matériaux et la circularité, mais non intégrée à une modélisation décisionnelle économique globale.
Atta et al. (2021) [20]	Digitalisation des passeports matériaux via BIM pour projets durables. Contribution forte sur la traçabilité et la donnée, sans modélisation dynamique des impacts économiques et énergétiques sur horizon long.
Hagedorn et al. (2023) [21]	Vérification sémantique interdisciplinaire de données bâtiment via conteneurs d'information liés. Approche avancée sur l'interopérabilité et la cohérence des données, mais sans outil prospectif de simulation économique.
Wagner et al. (2022) [22]	Développement d'une ontologie des produits de construction pour données liées. Contribution à la structuration des données bâtementaires, complémentaire mais distincte d'un modèle dynamique décisionnel.
Deng et al. (2022) [23]	Revue sur la transformation du knowledge management en construction via TIC. Vision organisationnelle et informationnelle, sans modélisation quantitative intégrée du TCO dynamique.
Tchouanguem Djuedja et al. (2021) [24]	Système intégré de données liées pour l'industrie AEC (Architecture, Engineering and Construction). Contribution forte en structuration numérique des données, mais absence de modélisation systémique des interactions économiques et énergétiques.
Zhang et al. (2021a) [25]	Cadre d'évaluation de la circularité dans l'AEC. Approche centrée sur les indicateurs de circularité, sans intégration dynamique multi-variable sur le long terme.
Zhang et al. (2021b) [26]	Automatisation du calcul de KPI pour benchmarking énergétique. Approche performante pour indicateurs, mais statique et non basée sur des boucles de rétroaction temporelles.
Naanaa et al. (2024) [27]	Optimisation des flux d'information dans les projets de rénovation via données liées. Contribution méthodologique sur la gestion de l'information, complémentaire mais distincte d'un modèle décisionnel dynamique intégré.
Calixte et al. (2024) [28]	Approche ontologique du jumeau numérique pour maintenance énergétique. Orientation vers le jumeau numérique et la maintenance, sans intégration explicite d'un TCO élargi incluant coûts indirects et trajectoires d'investissement.

Au regard des travaux récents, plusieurs tendances méthodologiques émergent dans la littérature sur la rénovation énergétique des bâtiments. Parmi celles-ci, on note :

- la montée en puissance des approches robustes sous incertitude (Carpino et al., 2022 ; Galimshina et al., 2020 ; Chaudhry et al., 2024).
- le développement d'architectures de données et d'ontologies bâtementaires (Hagedorn et al., 2023 ; Wagner et al., 2022 ; Tchouanguem Djuedja et al., 2021).
- l'intégration BIM (Building Information Modeling), LCA (Life Cycle Assessment, analyse du cycle de vie), LCC (Life Cycle Costing, coût du cycle de vie) et circularité (Atta et al., 2021 ; Zhang et al., 2021).
- l'optimisation énergétique ciblée de systèmes spécifiques (Coppitters et al., 2021).

Cependant, aucune de ces approches ne combine simultanément :

- une modélisation en Dynamique des Systèmes Complexes,
- une intégration explicite des boucles de rétroaction économiques,
- un Coût Total de possession étendu, incluant coûts indirects et trajectoires d'investissement,
- une simulation prospective multi-scénarios sur 20 à 40 ans,
- et une application ciblée aux décisions stratégiques en rénovation de logements collectifs et bâtiments tertiaires.

C'est précisément cette intégration systémique et dynamique qui constitue l'originalité scientifique du projet CARMEN.

La littérature sur la rénovation énergétique des bâtiments peut être regroupée en deux grandes catégories. La première concerne les études de simulation énergétique paramétrique, qui analysent l'impact de variables telles que l'isolation, l'orientation ou le taux de vitrage à l'aide d'outils comme TRNSYS ou EnergyPlus. Ces travaux apportent une compréhension détaillée des phénomènes physiques, mais restent généralement limités à des contextes climatiques spécifiques ou à des variables isolées. La seconde catégorie regroupe les approches basées sur le Life Cycle Costing (LCC) et l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permettent d'intégrer les dimensions économiques et environnementales sur l'ensemble du cycle de vie. Toutefois, ces approches reposent souvent sur des scénarios statiques et modélisent rarement les interactions dynamiques entre performance énergétique, dégradation des systèmes et évolution des coûts énergétiques.

Par ailleurs, dès la phase initiale d'un projet de rénovation, les décisions architecturales et techniques sont souvent prises sans intégration complète des dimensions énergétiques, carbone et financières. Les outils d'évaluation sont mobilisés tardivement dans le processus, une fois les choix structurants déjà établis. Cet ordre limite la capacité d'optimisation globale et peut conduire à des compromis sous-optimaux. L'intégration précoce d'outils de simulation et d'analyse systémique dans le processus décisionnel constitue donc un enjeu majeur.

Le projet CARMEN se positionne précisément à l'intersection de ces lacunes. Il ne vise pas à développer un outil de simulation énergétique isolé ni une simple extension du LCC, mais à proposer un cadre conceptuel intégrateur fondé sur la Dynamique des Systèmes et sur une modélisation étendue du Coût Total de Possession, capable de soutenir des décisions de rénovation robustes, multidimensionnelles et prospectives.

4.2 Proposition d'un nouveau cadre méthodologique

Afin de répondre aux limites identifiées dans la littérature, le projet CARMEN propose un cadre méthodologique visant à développer un outil d'aide à la décision capable d'intégrer la complexité des systèmes de rénovation de bâtiments.

4.2.1 Le cadre conceptuel du projet CARMEN

Ce cadre conceptuel s'articule autour de trois axes principaux :

1. Couplage dynamique des dimensions énergie-carbone-finance

Le modèle vise à représenter les interactions entre la performance énergétique du bâtiment, les émissions de carbone associées et les coûts économiques sur l'ensemble du cycle de vie. Cette approche permet d'évaluer les effets combinés des stratégies de rénovation sur les trajectoires énergétiques, environnementales et financières.

2. Modélisation systémique fondée sur la dynamique des systèmes

La méthodologie s'appuie sur les principes de la Dynamique des Systèmes Complexes afin de représenter les interactions entre les différents sous-systèmes du bâtiment. Cette approche permet de modéliser les boucles de rétroaction, les phénomènes de dégradation et les évolutions temporelles des performances techniques et économiques.

3. Prise en compte explicite des incertitudes

Le cadre méthodologique intègre également les incertitudes associées aux paramètres techniques, économiques et comportementaux. L'intégration de ces incertitudes vise à améliorer la robustesse des analyses et à soutenir des décisions de rénovation plus résilientes face aux évolutions futures.

4.2.2 Fondements en Dynamique des Systèmes Complexes

La méthodologie développée dans le projet CARMEN repose sur une démarche structurée en plusieurs étapes visant à représenter les interactions dynamiques entre performance énergétique, coûts et décisions d'investissement.

1. Identification des variables clés :

La première étape du processus de modélisation consiste à identifier les variables essentielles qui permettent de représenter le système bâtiminaire et d'évaluer la performance des rénovations. Ces variables traduisent les différentes dimensions influençant le comportement du bâtiment et son efficacité. On distingue notamment :

- variables énergétiques : elles concernent la performance thermique de l'enveloppe, les consommations énergétiques, et les gains ou pertes liés aux équipements et à l'isolation.
- variables économiques : elles incluent les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les économies potentielles générées par la rénovation.
- variables techniques : elles reflètent la dégradation des composants, la durée de vie des équipements, ainsi que la fiabilité des systèmes installés.
- variables temporelles : elles traduisent l'évolution des performances et des dégradations au fil du temps, permettant de modéliser la longévité des composants et la planification des interventions.
- variables d'usage : elles sont liées aux comportements des occupants et aux conditions réelles d'exploitation, influençant directement la performance énergétique et le confort. En intégrant ces variables hétérogènes, le modèle CARMEN appréhende la nature multidimensionnelle des systèmes de rénovation et permet de représenter les interactions entre la performance technique, les résultats économiques et les conditions d'exploitation au fil du temps.

2. Définition des relations causales :

La seconde étape du processus de modélisation consiste à formaliser les relations de causalité entre les variables identifiées. Dans un bâtiment rénové, ces interactions sont nombreuses et permettent de comprendre comment chaque facteur influence la performance globale. Parmi les principales relations :

- isolation → réduction de la consommation : l'amélioration de l'isolation thermique diminue les besoins en chauffage et en climatisation.
- réduction de la consommation → baisse des coûts d'exploitation : la diminution des consommations énergétiques se traduit directement par une réduction des coûts liés à l'exploitation du bâtiment.
- choix des matériaux → impact sur la maintenance : la sélection des matériaux et des équipements conditionne les besoins futurs en entretien et en remplacement.
- qualité de l'exploitation technique → performance énergétique réelle : la manière dont le bâtiment est exploité et maintenu influence l'efficacité énergétique observée sur le long terme.

3. Construction de boucles de rétroaction :

La Dynamique des Systèmes Complexes permet d'identifier et de modéliser les boucles de rétroaction qui structurent l'évolution du système dans le temps. Dans CARMEN, ces boucles

sont identifiées à partir d'une matrice d'interdépendances qui formalise, pour chaque paire de variables, l'existence d'une relation causale. Ces relations sont ensuite représentées sous la forme d'un diagramme causal (Causal Loop Diagram), permettant de repérer les cycles fermés ; c'est-à-dire les chaînes causales qui reviennent sur une variable qu'elles ont elles-mêmes influencée. Chaque boucle est alors caractérisée selon son comportement global [13]: renforçante (effet cumulatif, ex. : investissement → économies → réinvestissement) ou régulatrice (effet stabilisateur, ex. : dégradation → hausse des coûts → réduction des investissements). Dans le contexte de la rénovation, la prise en compte de ces rétroactions est essentielle pour comprendre les trajectoires d'investissement à long terme.

4. Simulation dynamique sur horizon long :

Une fois les relations causales établies, le modèle permet de simuler l'évolution du système sur des horizons temporels étendus (5, 15 et 30 ans) sous Stella Architect. Cette échelle temporelle correspond à la durée de vie typique de nombreux composants du bâtiment et permet d'évaluer l'impact cumulé des décisions de rénovation.

4.3 Modélisation d'un Coût Total de Possession TCO étendu

Afin d'intégrer les dimensions économiques dans l'évaluation des stratégies de rénovation, le projet CARMEN mobilise le concept de Coût Total de Possession (TCO) appliqué au cycle de vie du bâtiment. Contrairement aux approches économiques limitées au coût d'investissement initial, cette approche vise à considérer l'ensemble des coûts générés tout au long de la durée de vie du bâtiment, depuis la phase de rénovation jusqu'à l'exploitation et la gestion à long terme.

Le modèle prend ainsi en compte plusieurs catégories de coûts. Les coûts d'investissement initiaux regroupent les dépenses nécessaires à la réalisation du projet de rénovation, notamment les travaux, les études techniques et la gestion de projet. Les coûts d'exploitation correspondent aux dépenses liées au fonctionnement du bâtiment, telles que les consommations d'énergie, l'eau ou l'exploitation technique. Les coûts de maintenance incluent les opérations préventives destinées à maintenir la performance des équipements ainsi que les interventions correctives liées aux défaillances techniques. Le modèle considère également les coûts de remplacement, liés au renouvellement de composants dont la durée de vie est limitée, comme certains équipements techniques ou systèmes énergétiques. Enfin, l'analyse peut intégrer certains coûts indirects, associés par exemple à des perturbations d'usage, des interruptions d'activité ou des impacts sur le confort des occupants.

Cette structuration permet d'élargir l'évaluation économique des projets de rénovation en intégrant les différentes composantes de coûts susceptibles d'influencer la performance globale du bâtiment sur le long terme.

4.4 Schématisation du cadre méthodologique de CARMEN

Pour mieux comprendre les principales étapes de l'étude et la méthodologie de recherche, le schéma (Figure 1) ci-après présente en détail le livrable visé par CARMEN, en mettant en évidence ses différents composants ainsi que leurs interactions. Un code couleur facilite la lecture : comme expliqué au point 4.2.1: en rouge le couplage dynamique des dimensions énergie-carbone-finance (ECF) ; en vert apparaît la modélisation systémique fondée sur la DSC ; en bleu figurent la prise en compte des incertitudes ; et en jaune les données et les

ontologies. Les partenaires du consortium CARMEN, identifiés en bordeaux, sont les institutions responsables des actions correspondantes du projet. Les approches calculatoires mobilisées (simulation thermique dynamique, modélisation TCO et propagation d'incertitude) ainsi que les données utilisées (bases de données matériaux, scénarios climatiques) sont détaillées dans les sections 4.2 à 4.4 correspondantes à chaque bloc du schéma.

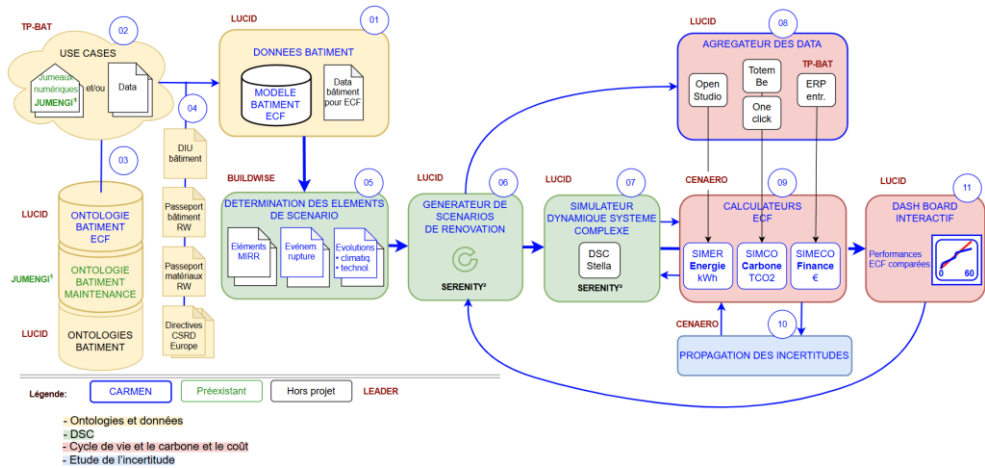


Figure 1 - Schéma détaillé du projet²

Un premier résultat opérationnel a été développé : une ontologie de rénovation des bâtiments structurant les concepts de performance énergétique, de coûts (CAPEX³, OPEX⁴, TCO) et de scénarios MIRR. Cette ontologie constitue le socle de données sur lequel s'appuiera le simulateur DSC. Elle représente la première étape de formalisation du modèle CARMEN.

5. Conclusion

Le projet CARMEN propose un cadre méthodologique innovant fondé sur la Dynamique des Systèmes Complexes et sur une modélisation étendue du Coût Total de Possession (TCO), permettant d'intégrer de manière holistique les dimensions énergie, carbone et finance. Cette approche contribue scientifiquement à formaliser une modélisation systémique appliquée à la rénovation, intégrant les rétroactions économiques et l'analyse de robustesse décisionnelle par la prise en compte des incertitudes. Sur le plan opérationnel, elle structure un outil d'aide à la décision basé sur la comparaison de scénarios et l'analyse prospective à long terme, s'appuyant sur une ontologie des données pour soutenir les décisions stratégiques. Certaines limites subsistent, notamment la sensibilité du modèle aux hypothèses et aux paramètres d'entrée, la complexité de la phase de calibration et la nécessité de disposer de données fiables. En particulier, certaines propriétés thermo-physiques utilisées dans les modèles, telles que la valeur U des fenêtres issue des fiches techniques, sont déterminées dans des conditions normalisées correspondant à l'état initial du produit, alors que des

² Acronymes schéma : LUCID (Laboratoire de l'Université de Liège en Ingénierie et Design) ; Buildwise (Centre scientifique de la construction) ; TP-BAT (Thomas & Piron Rénovation Bâtiment) ; Cenaero (centre de recherche en aéronautique) ; DSC (Dynamique des Systèmes Complexes) ; TCO (Coût Total de Possession) ; ECF (Énergie-Carbone-Finance).

³ CAPEX : (Capital Expenditure) : les dépenses d'investissement (ex : achat de matériel, logiciels)

⁴ OPEX (Operating Expenditure) : les dépenses d'exploitation ou opérationnelles (ex : maintenance)

phénomènes de vieillissement, tels que la dégradation du gaz intercalaire, l'altération des joints ou l'évolution des profilés, peuvent modifier la performance réelle au cours du temps. Il devient ainsi nécessaire d'intégrer explicitement une incertitude paramétrique afin de mieux représenter les conditions réelles d'exploitation et d'améliorer la robustesse des résultats, tout en prenant en compte le temps computationnel potentiel des simulations. Malgré ces limites, l'approche proposée permet de dépasser les analyses fragmentées traditionnellement utilisées dans l'évaluation des projets de rénovation et d'offrir un cadre décisionnel intégré capable de représenter les interactions, les rétroactions et les trajectoires économiques sur le long terme.

Les travaux futurs porteront sur la validation empirique du modèle, son expérimentation sur des cas réels de rénovation et l'amélioration de sa robustesse méthodologique.

Les défis de faisabilité identifiés : disponibilité des données, calibration du modèle et intégration des incertitudes, feront l'objet des travaux des années 2 et 3 du projet.

Déclaration relative à l'usage de l'IA

Conformément à la charte IA de l'ACCN/ENSA, des outils d'intelligence artificielle générative ont été utilisés dans le cadre de la rédaction de cet article. Grammarly a été utilisé pour reformuler certaines phrases ainsi que pour la correction grammaticale. Claude a été utilisé pour la relecture linguistique, l'assistance à la rédaction d'un résumé court, la traduction et la mise en forme des références bibliographiques.

Références

1. Resolia Energy, *Décarbonation du bâtiment : le défi caché de la transition énergétique – un secteur responsable de 42 % de la consommation énergétique et d'un tiers des émissions de l'UE*, Resolia Energy (2023)
2. D. Cali, S.P. Corgnati, V. Fabi, Predictability of occupant presence and performance gap in building energy simulation, *Appl. Energy* **208**, 1639–1652 (2016)
3. H.T. Ebuy, H. Bril El Haouzi, R. Benelmir, R. Pannequin, Occupant behavior impact on building sustainability performance: A literature review, *Sustainability* **15**, 2440 (2023)
4. A. Al-Maadid, M.S. Ben Ali, K. Si Mohammed, The effect of climate risk on the human development index using the panel time-varying interactive fixed effects, *Environ. Sustain. Indic.* **27**, 100757 (2025)
5. G. Eleftheriadis, M. Hamdy, Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: A review paper, *Energy Procedia* **132**, 321–326 (2017)
6. W. Belazi, S.-E. Ouldboukhitine, A. Chateaneuf, A. Bouchaïr, Uncertainty analysis of occupant behavior and building envelope materials in office building performance simulation, *J. Build. Eng.* **19**, 434–448 (2018).
7. C.J. Hopfe, J.L.M. Hensen, Uncertainty analysis in building performance simulation for design support, *Energy Build.* **43**, 2798–2805 (2011)
8. P. Gluch, H. Baumann, The life cycle costing approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making, *Build. Environ.* **39**, 571–580 (2004)
9. International Organization for Standardization, *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines* (ISO, Geneva, 2006)
10. C. De Wolf, F. Pomponi, A. Moncaster, Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice, *Energy Build.* **140**, 68–80 (2017)
11. R.A. Kelly, A.J. Jakeman, O. Barreteau, M.E. Borsuk, S. El Sawah, S.H. Hamilton, H.J. Henriksen, S. Kuikka, H.R. Maier, A.E. Rizzoli, H. van Delden, A.A. Voinov, Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management, *Environ. Model. Softw.* **47**, 159–181 (2013)
12. A.S. Silva, E. Ghisi, Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation, *Energy Build.* **76**, 381–391 (2014)
13. D. Provitolo, *La dynamique des systèmes selon J.W. Forrester*, Hypergeo (2006)

14. C. Carpino, R. Bruno, V. Carpino, N. Arcuri, Improve decision-making process and reduce risks in the energy retrofit of existing buildings through uncertainty and sensitivity analysis, *Energy Sustain. Dev.* **68**, 289–307 (2022)
15. A. Galimshina, M. Moustapha, A. Hollberg, P. Padey, S. Lasvaux, B. Sudret, G. Habert, Statistical method to identify robust building renovation choices for environmental and economic performance, *Build. Environ.* **183**, 107143 (2020)
16. D. Coppitters, W. De Paepe, F. Contino, Robust design optimization of a photovoltaic-battery-heat pump system with thermal storage under aleatory and epistemic uncertainty, *Energy* **229**, 120692 (2021)
17. A.M. Chaudhry, J. Hachez, S.V. Chicherin, G. Ghorbaniasl, S. Bram, Potential site evaluation of 5GDHC networks under uncertain energy market conditions: A two-step robust design analysis approach, *Energy* **303**, 131993 (2024)
18. A.M. Chaudhry, G. Ghorbaniasl, J. Hachez, S. Chicherin, S. Bram, Improving the potential of fifth-generation district heating and cooling networks through robust design and operational optimization under future energy market and demand uncertainties, *Energy Build.* **325**, 114998 (2024)
19. A. Almusaed, I. Yitmen, A. Almsaad, I. Akiner, M.E. Akiner, Coherent investigation on a smart kinetic wooden façade based on material passport concepts and environmental aspects, *Mater.* **14**, 3771 (2021)
20. I. Atta, E.S. Bakhoun, M.M. Marzouk, Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM, *J. Build. Eng.* **43**, 103233 (2021)
21. P. Hagedorn, P. Pauwels, M. König, Semantic rule checking of cross-domain building data in information containers for linked document delivery using the shapes constraint language, *Autom. Constr.* **156**, 105106 (2023)
22. A. Wagner, W. Sprenger, C. Maurer, T.E. Kuhn, U. Rüppel, Building product ontology: Core ontology for linked building product data, *Autom. Constr.* **133**, 103927 (2022)
23. H. Deng, Y. Xu, Y. Deng, J. Lin, Transforming knowledge management in the construction industry through information and communications technology: A 15-year review, *Autom. Constr.* **142**, 104530 (2022)
24. J.F. Tchouanguem Djuedja, F.H. Abanda, B. Kamsu-Foguem, P. Pauwels, C. Magniont, M.H. Karray, An integrated linked building data system: AEC industry case, *Adv. Eng. Softw.* **152**, 102930 (2021)
25. N. Zhang, Q. Han, B. de Vries, Building circularity assessment in the architecture, engineering, and construction industry: A new framework, *Sustainability* **13**, 12211 (2021)
26. Y.-Y. Zhang, Z.-Z. Hu, J.-R. Lin, J.-P. Zhang, Linking data model and formula to automate KPI calculation for building performance benchmarking, *Energy Rep.* **7**, 1326–1337 (2021)
27. H. Naanaa, W. Derigent, H.B. El Haouzi, M. Lezoche, Optimisation du flux d'information dans les projets de rénovation: une approche par les données liées, *SHS Web Conf.* **198**, 04002 (2024)
28. M. Calixte, A. Rahhal, P. Leclercq, Approche ontologique du jumeau numérique pour la maintenance énergétique des bâtiments, *SHS Web Conf.* **203**, 01002 (2024)