

Meray Nassimos<sup>1</sup>, Anabelle Rahhal<sup>2</sup>

(1,2) LUCID -ULiège, (1) meray.nassimos@uliege.be, (2) a.rahhal@uliege.be

## Contexte et problématique

Le parc immobilier wallon présente encore de faibles performances énergétiques et carbone. Malgré des cadres comme le PEB<sup>1</sup> et la CSRD<sup>2</sup>, les rénovations restent souvent limitées à court terme et s'appuient sur des outils statiques, peu adaptés à l'évolution des usages, des coûts, des technologies et des émissions sur le cycle de vie. Dans ce contexte, ce projet cible les bâtiments résidentiels et tertiaires construits après 2000, classés PEB C et D, un segment important encore peu structuré en matière de rénovation.

## Objectifs

Le projet CARMEN<sup>3</sup> vise à soutenir la rénovation énergétique des bâtiments existants grâce à une plateforme de Dynamique des Systèmes Complexes (DSC). Celle-ci permettra de générer des scénarios de Maintenance, Investissement, Remplacement et Rénovation (MIRR) en fonction des performances énergétiques, carbone et financières ECF sur l'ensemble du cycle de vie. Cette plateforme constituera également un outil d'aide à la décision au service des gestionnaires et des investisseurs immobiliers afin de les accompagner dans la planification de stratégies de rénovation à long terme.

## Approche scientifique et technologique

Comme illustré dans la figure, le projet combine :

- Les ontologies et données liées au bâtiment pour assurer l'intégration des données.
- La modélisation des DSC reprenant les décisions de rénovation, systèmes énergétiques, réglementation et comportements ;
- L'analyse du cycle de vie, le carbone, et le coût total via des outils (One Click LCA<sup>4</sup>, TOTEM<sup>5</sup>) ;
- La quantification de l'incertitude (prix de l'énergie, climat, technologies) ;

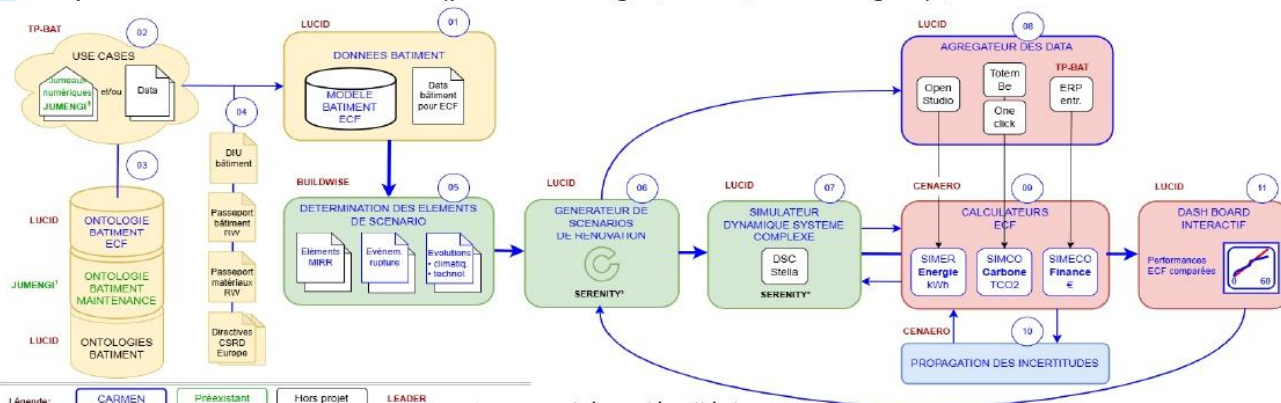


Figure - Schéma détaillé du projet

## Résultat et impact attendus

- Identifier des stratégies de rénovation efficaces ;
- Faciliter la conformité aux cadres réglementaires (PEB, CSRD) ;
- Centré sur la maîtrise de l'empreinte carbone des bâtiments pendant la phase d'exploitation tout en maintenant le confort.

**Remerciement :** Ce projet est financé par le Service Public de Wallonie, projet Win2Wal. Il se développe en partenariat avec Buildwise, CENAERO et TP.

**Références :** Calixte, X., & Allani, R. (May 2025). Modélisation de l'activité humaine dans la simulation du partage d'énergie au sein d'une communauté renouvelable : prise en compte de profils de consommateurs. [Paper presentation]. Conférence ModACT'25, Paris, France. / Rahhal, A., & Calixte, M. (May 2023). Approche ontologique pour la modélisation de l'activité : cas de la maintenance énergétique [Paper presentation]. Conférence ModACT'23, Paris, France.

**Abréviations :** 1. Performance Énergétique des Bâtiments, 2. Corporate Sustainability Reporting Directive, 3. Carbone, Maintenance et Énergie, 4. One Click LCA : logiciel d'Analyse du Cycle de Vie, 5. TOTEM : Tool to Optimise the Total Environmental Impact of Materials.

# Aide à la décision pour la rénovation des bâtiments : une approche par Dynamique des Systèmes Complexes intégrant énergie, carbone et coûts

Meray NASSIMOS, ULiège, LUCID, meray.nassimos@uliege.be  
Anabelle RAHHAL, ULiège, LUCID, a.rahhal@uliege.be

**Mots-clefs.** Consolidation de données multi-acteurs et multi-échelles, analyse, dynamique des systèmes complexe

## Contexte et problématique

Le parc de bâtiments en Wallonie présente encore de faibles performances énergétiques et carbone. Malgré des cadres comme le PEB (Performance Énergétique des Bâtiments) ou la CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), les pratiques de rénovation restent souvent limitées à une vision de court terme et les outils existants, majoritairement statiques, n'intègrent pas suffisamment l'évolution des usages, des coûts, des technologies et des émissions sur le cycle de vie. Dans ce contexte, ce projet (projet CARMEN- **C**arbone, **M**aintenance et **É**nergie) cible particulièrement les immeubles de logements et de tertiaire construits à partir de 2000 et présentant des performances énergétiques PEB C et D, un segment important du parc pour lequel les stratégies de rénovation restent encore peu structurées.

## Question de recherche

Comment une plateforme basée sur la Dynamique des Systèmes Complexes peut-elle aider à comparer et orienter les décisions de Maintenance, Investissement, Remplacement et Rénovation (MIRR) afin d'améliorer simultanément les performances énergétiques, carbone et financières (ECF) des bâtiments existants sur leur cycle de vie ?

## Objectifs

Le projet CARMEN vise à soutenir la rénovation énergétique des bâtiments existants grâce à une plateforme de Dynamique des Systèmes Complexes (DSC). Celle-ci permettra de générer des scénarios de Maintenance, Investissement, Remplacement et Rénovation (MIRR) en fonction des performances énergétiques, carbone et financières (ECF) sur l'ensemble du cycle de vie. Cette plateforme constituera également un outil d'aide à la décision au service des gestionnaires et des investisseurs immobiliers afin de les accompagner dans la planification de stratégies de rénovation à long terme.

## Méthodologie

Le projet CARMEN combine :

- Les ontologies et données liées au bâtiment pour assurer l'intégration des données.
- La modélisation des DSC reprenant les décisions de rénovation, systèmes énergétiques, réglementation et comportements ;
- L'analyse du cycle de vie et le carbone, via des outils (One Click LCA, TOTEM) ; et le coût total des investissements, énergie, maintenance et cycles de rénovation ;
- La quantification de l'incertitude (prix de l'énergie, climat, technologies) ;

Pour mieux comprendre les principales étapes de l'étude et la méthodologie de recherche, le schéma présente en détail le livrable visé par CARMEN, en mettant en évidence ses différents composants ainsi que leurs interactions. Un code couleur à côté des points, facilite la lecture : en jaune les données et les ontologies ; en vert apparaissent la modélisation systémique fondée sur la DSC ; en rouge le couplage dynamique des dimensions énergie-carbone-finance (ECF) ; et en bleu figurent la prise en compte des incertitudes. Enfin, chaque partenaire responsable d'une action ou d'une ressource est identifié en texte bordeaux.

## Résultat et impact attendus

Le projet CARMEN vise à développer un cadre méthodologique innovant pour l'aide à la décision en rénovation, intégrant de manière systémique les dimensions énergie, carbone et coûts. Il devrait aboutir à un outil basé sur la comparaison de scénarios et l'analyse prospective à long terme, intégrant les incertitudes.

Ce projet permettra d'identifier des stratégies de rénovation efficaces, de faciliter la conformité aux cadres réglementaires (PEB, CSRD) et de maîtriser l'empreinte carbone des bâtiments en phase d'exploitation tout en maintenant le confort. Il vise également à dépasser les approches fragmentées actuelles et à poser les bases pour la validation et l'application du modèle à des cas réels.

## Références

Calixte, X., & Allani, R. (May 2025). Modélisation de l'activité humaine dans la simulation du partage d'énergie au sein d'une communauté renouvelable : prise en compte de profils de consommateurs. [Paper presentation]. Conférence ModACT'25, Paris, France.

Rahhal, A., & Calixte, M. (May 2023). Approche ontologique pour la modélisation de l'activité : cas de la maintenance énergétique [Paper presentation]. Conférence ModACT'23, Paris, France.