

Outil de classement de technologies pour l'aide à la décision en rénovation de bâtiments

LAURA LAGUNA SALVADO¹, ÉRIC VILLENEUVE¹, DIMITRI MASSON¹

¹ UNIV. BORDEAUX, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

F-64210 Bidart, France

l.lagunasalvado@estia.fr, e.villeneuve@estia.fr, d.masson@estia.fr

Résumé – La prise de décision dans le contexte de la rénovation de bâtiment à consommation quasi-nulle implique de prendre en compte une multitude de parties prenantes, d'outils et d'objectifs différents. Cet article présente une méthodologie pour faciliter la collaboration entre les parties prenantes dans le processus de rénovation. Il identifie également des approches d'aide à la décision destinées à aider les principaux jalons décisionnels. Cette méthodologie s'appuie sur un prototype (comprenant une interface utilisateur et un algorithme) de système d'aide à la décision. Ce système permet le classement de différentes technologies de rénovation grâce à une méthode de décision multicritères. L'algorithme proposé combine des approches de pondération et de dominance floue et a été testé avec des données réelles pour classer des matériaux pour l'isolation thermique d'un bâtiment.

Abstract - Decision making in the context of Near Zero Energy Building refurbishment is subjected to heterogeneous stakeholders, tools and objectives. This paper presents a methodology to facilitate stakeholders' collaboration in the refurbishment processes and identifies decision support approaches to help on the main decision milestones. This methodology is supported by a prototype (user interface and algorithm) of a decision support system (DSS) that allows ranking different refurbishment technologies. The proposed DSS uses a multi criteria decision method that combines weighting and fuzzy dominances approach. The approach is illustrated with a real data set to rank thermal insulation materials.

Mots clés – Système d'aide à la décision, Décisions durables, Rénovation de bâtiment à consommation quasi-nulle, Décisions multicritères, Classement d'alternatives.


Keywords - Decision Support System, Sustainable decisions, Near Zero Energy Building refurbishment, Multi criteria decision making, Alternatives ranking.

1 INTRODUCTION

La rénovation de bâtiments résidentiels existants a été identifiée comme une priorité absolue dans le contexte économique de l'Europe. D'ici 2050, environ la moitié du parc immobilier existant en 2012 sera toujours opérationnelle [European Parliament, 2008]. Par conséquent, l'Union Européenne (UE) souhaite augmenter les taux actuels de rénovation annuelle de 1% à 2,5%. Considérant également que le secteur de la construction consomme énormément d'énergie [Ma et al., 2012], l'UE souhaite encourager les initiatives de rénovation du bâtiment à consommation quasi nulle (*Near Zero Energy Building* – NZEB).

Les défis sont multidisciplinaires et exigent des développements innovants axés sur plusieurs objectifs, notamment techniques, économiques, sociaux, environnementaux et juridiques, afin de renforcer un secteur de la construction hautement technologique. Les travaux présentés ici font partie du projet REZBUILD H2020 (*Refurbishment decision making platform through advanced technologies for NZEB renovation* – Plate-forme de

prise de décision pour la rénovation NZEB au moyen de technologies de pointe). Parmi les nombreux défis adressés par le projet, l'un des objectifs est de développer de nouvelles méthodologies collaboratives de rénovation.

Les projets de rénovation NZEB commencent par l'expression du besoin d'un client (propriétaire ou occupants du bâtiment, par exemple) visant à améliorer les caractéristiques (esthétique, structure, propriétés d'isolation, etc.) de leur bâtiment. Trois processus opérationnels principaux doivent ensuite être remplis pour réaliser ces améliorations : le processus de conception NZEB, la mise en œuvre de la rénovation et enfin la surveillance et la gestion énergétique du bâtiment rénové pour que le projet s'inscrive dans le temps. Ces processus impliquent la participation de différents acteurs, à commencer par les clients ainsi que les architectes et les concepteurs, les responsables de la rénovation, les fournisseurs de technologie, les constructeurs et les experts en simulation. Dans le cadre du processus de conception de la NZEB (Figure 1), le projet REZBUILD a défini trois étapes décisives dans la décision (représentées par le symbole  sur la Figure 1) : (i) l'étape d'évaluation préliminaire

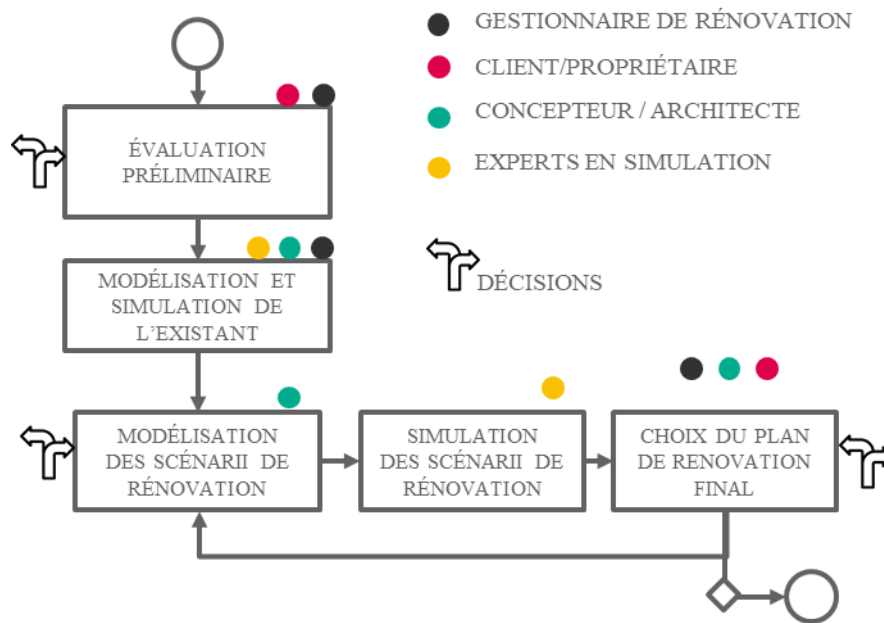


Figure 1. Étapes du processus de conception NZEB

(c'est-à-dire la définition d'objectifs de durabilité, (ii) le diagnostic du bâtiment existant...), (iii) la décision finale du plan de rénovation.

Pour améliorer les performances de construction NZEB et s'aligner sur les objectifs de réduction de temps et de coûts de l'UE, les décideurs doivent prendre en compte une quantité d'informations considérable. Ainsi, comme dans l'industrie de la production des années 90, le secteur du bâtiment est de plus en plus confronté à la nécessité de capitaliser et d'exploiter les connaissances générées tout au long de la chaîne de valeur. Les trois étapes décisionnelles du processus impliquent une quantité importante de données très diverses qui doivent être collectées auprès de multiples parties prenantes de divers domaines et de multiples systèmes d'information hétérogènes. Par conséquent, l'utilisation de ces données dans le processus de décision est complexe et difficile à réaliser sans outils de support, et repose uniquement sur l'expérience ou une seule expertise.

Le secteur du bâtiment a commencé à relever le défi de la structuration des données en développant le BIM (Building Information Modeling), une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une installation. Les efforts récents pour créer un format de fichier BIM interopérable peuvent permettre la collecte et la contextualisation de toutes les données liées au futur bâtiment, ainsi que le processus de construction, dans un référentiel centralisé. Cela fournit une opportunité de traiter les enjeux de décision avec le développement de systèmes d'aide à la décision qui permettent au secteur de la construction d'exploiter toutes les données disponibles et d'aider les décideurs à faire leur choix.

La diversité des parties prenantes et des objectifs de performance crée trois défis auxquels les approches décisionnelles doivent répondre (section 2), ce qui nous conduit à introduire une méthodologie générale pour soutenir le processus de décision de rénovation (section 3). Une partie de cette stratégie est ensuite

mise en œuvre sous la forme d'un outil de sélection interactive de technologies de réhabilitation dédié aux concepteurs (section 4).

2 DÉCISION DANS LA RÉNOVATION NZEB

Les décisions sont liées au bâtiment rénové et au processus de rénovation. Dans [Ma et al., 2012], les auteurs ont produit une analyse exhaustive couvrant l'ensemble du processus de rénovation et indiquant le chemin restant à parcourir par les universitaires et les professionnels pour rendre le parc de bâtiments existant durable. De notre point de vue, la complexité de la prise de décision dans le contexte de la rénovation de bâtiments durables tient principalement à la diversité des objectifs de performance (bâtiment rénové) et à la collaboration des parties prenantes (processus de rénovation) sur les différentes étapes décisionnelles.

2.1 Étapes décisionnelles

À partir de l'analyse du processus de conception NZEB (Figure 1), nous identifions trois étapes principales dans lesquelles des systèmes d'aide à la décision peuvent aider les parties prenantes :

- Étape d'évaluation préliminaire (1^{ère} étape dans la Figure 1) : cette évaluation a pour objectif de définir la portée des travaux de rénovation en fixant les objectifs généraux du projet (par exemple, 15% d'économies d'énergie) et en définissant les priorités concernant les solutions technologiques à mettre en œuvre (par exemple, le changement des fenêtres).
- Sélection des technologies de rénovation (3^{ème} étape de la Figure 1) : lors de la conception du futur bâtiment, les concepteurs (ou les architectes) doivent choisir parmi les alternatives technologiques celles qui seront mises en œuvre dans chaque partie du bâtiment (fenêtres, isolation, système de chauffage...). Il existe une pléthore de solutions de remplacement pour chaque famille de technologies de rénovation et de multiples critères de décision doivent être

pris en compte pour répondre aux besoins de l'utilisateur final et aux préférences des concepteurs.

- Choix du plan de rénovation final (5^{ème} étape de la Figure 1) : après la présentation de plusieurs scénarios de rénovation par les concepteurs et le calcul des indicateurs liés aux besoins de l'utilisateur final (consommation d'énergie, retour sur investissement, qualité de l'air, etc.) pour chaque scénario par les experts en simulation, il est nécessaire de choisir le design final du futur bâtiment rénové.

2.2 La rénovation NZEB : un problème multicritère

Un bâtiment NZEB est défini comme « un bâtiment à très haute performance énergétique où la quantité d'énergie requise, presque nulle ou très faible, devrait être largement couverte par des sources renouvelables produites sur place ou à proximité » [European Parliament, 2008]. Dans la littérature, les indicateurs proposés pour mesurer les performances de la NZEB sont étroitement liés au principe de durabilité « *Triple Bottom Line (TBL)* », qui prend en compte les dimensions économique, environnementale et sociale [Elkington, 1998].

Les décisions en matière de rénovation durable sont des problèmes multi-objectifs sujettes à des objectifs contradictoires, de nombreuses contraintes et limitations relatives au bâtiment, à son environnement ou encore la législation [Ferreira et al., 2013; Jafari et Valentin, 2018; Ma et al., 2012 ; Mjörnell et al., 2014; Nielsen et al., 2016]. Même s'il existe de nombreuses mesures d'indicateurs dans la littérature, dans [Mjörnell et al., 2014], les auteurs ont souligné les difficultés rencontrées pour rassembler les données nécessaires à leur calcul. Ainsi, de nombreuses simplifications et hypothèses sont souvent faites dans les outils de décision multicritères. Cependant, les approches qui incluent une évaluation exhaustive telle qu'un cadre décisionnel de groupe intégrant un modèle de préférence prioritaire et une classe caractéristique [Kadziński et al., 2018] ou un support de décision basé sur des réseaux de neurones, proposé par [Zavadskas et al., 2004], prennent beaucoup de temps.

Dans [Ferreira et al., 2013], les auteurs ont fait une revue de littérature et ont identifié deux principaux défis pour la recherche sur la prise de décision en matière de rénovation : (i) développer des méthodes rapides et efficaces exploitant les algorithmes existants et (ii) prenant en compte l'incertitude pour éviter de mauvaises décisions. Dans [Ma et al., 2012], les auteurs soulignent également le défi crucial induit par de nombreuses incertitudes liées à l'évolution du monde moderne, telles que le changement climatique, la servicisation, l'évolution des mentalités humaines, les changements de politique gouvernementale... Il est donc essentiel de ne pas négliger ce caractère incertain pour aider à trouver les meilleures options de rénovation en considérant des critères multiples (efficacité énergétique, coût, confort...) pendant toute la durée de la vie du bâtiment.

2.3 Collaboration entre les parties prenantes

Contrairement à de nombreux secteurs industriels, le secteur du bâtiment est caractérisé par des processus décisionnels fragmentés dans lesquels les acteurs participent en fonction de

leurs propres règles, outils, compétences et intérêts, afin d'atteindre collectivement l'objectif final de satisfaction des besoins du client [van Bueren et Priemus, 2002]. En outre, les clients sont des acteurs importants dans le processus de décision du projet global de rénovation mais ne font généralement pas partie du secteur de la construction. Une approche collaborative est donc essentielle car la prise de décision décentralisée présente le risque de ne pas exploiter toutes les opportunités du projet, notamment liées au développement durable et aux synergies entre technologies.

2.4 Enjeux scientifiques

À partir de la discussion ci-dessus, nous soulignons trois défis qu'il est nécessaire de relever pour améliorer le processus de décision de rénovation :

- **Hétérogénéité des objectifs** : il est nécessaire de trouver un équilibre entre la complexité des algorithmes (nombre de critères, exhaustivité) et le temps de décision.

Opportunités : une simplification des algorithmes (et donc des outils) doit permettre une flexibilité permettant de répondre aux exigences changeantes des décideurs.

- **Hétérogénéité des parties prenantes** : la compréhension et l'intégration des points de vue des différentes parties prenantes lors des étapes décisionnelles doit permettre une meilleure acceptabilité des résultats du système d'aide à la décision.

Opportunités : les méthodes de prise de décision multicritères (*Multi-Criteria Decision-Making – MCDM*) « a priori » et « interactives » permettent d'intégrer les préférences du décideur dans le processus de décision [Wang et al., 2009]. Une attention particulière doit être accordée à l'ergonomie de l'interface utilisateur pour assurer une élicitation dynamique des parties prenantes [Ambrosino et al., 2016].

- **Hétérogénéité des outils** : l'échange d'informations entre plusieurs outils informatiques est critique et l'incompatibilité entre les formats de fichiers pose de sérieux problèmes dans le contexte hétérogène de la rénovation de bâtiment. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité des outils pour accélérer et améliorer l'intégration des contributions des parties prenantes.

Opportunités : le format de fichiers BIM (voir section 3.1) a été développé pour collecter et échanger des informations techniques relatives au bâtiment mais permet aussi de stocker des indicateurs de performance [Gerrish et al., 2017 ; Habibi, 2017].

3 MÉTHODOLOGIE

Pour relever les défis abordés dans la section précédente, nous ne nous attendons pas à ce que les parties prenantes modifient des outils métier ou des processus décisionnels spécifiques, mais notre objectif est de leur offrir des moyens pour qu'ils soient capables d'échanger et d'exploiter les informations utiles afin d'améliorer les processus existants.

L'objectif de ce projet de recherche est donc de développer des solutions concrètes pour aider la prise de décision dans les

projets de rénovation. Nous avons suivi une approche inductive, basée sur la philosophie de la recherche-action afin d'extraire des connaissances scientifiques en se basant sur des problématiques terrain.

Ainsi, le projet REZBUILD innove en développant une méthodologie basée sur un « écosystème » (Figure 2) de parties prenantes, d'outils et de technologies facilitant la prise de décision en matière de rénovation NZEB. Cet « écosystème » est organisé autour d'une plate-forme de rénovation collaborative (*Collaborative Refurbishment Platform - CRP*) avec une gestion de données centrée sur le BIM.

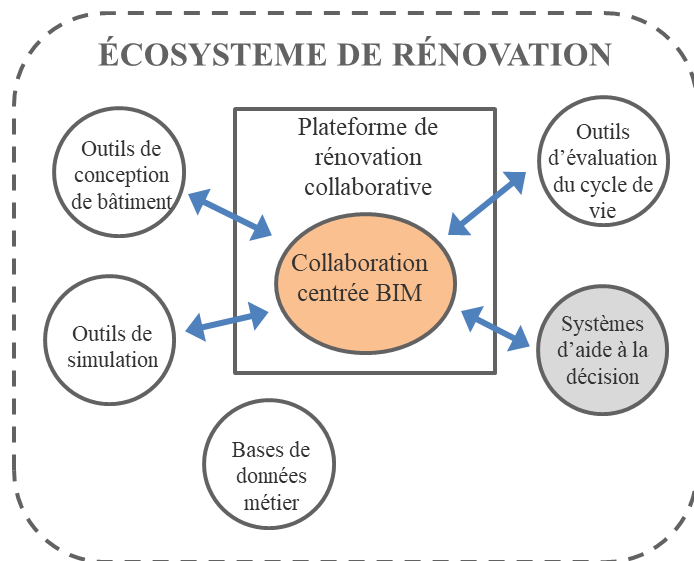


Figure 2. Écosystème de rénovation

3.1 Plateforme de rénovation collaborative

La CRP est conçue pour collecter, échanger et gérer des données provenant de sources différentes et parfois incompatibles. Le BIM a été identifié comme une technologie cruciale en raison de son potentiel en matière d'interopérabilité et de prise de décision. Dans le cadre du projet REZBUILD, le choix a été donc de centrer la CRP au tour du BIM, ce qui facilite gestion

collaborative de la rénovation du bâtiment grâce à une approche agile et à l'externalisation des outils métier de l'écosystème de rénovation (i.e. logiciels de conception, simulation).

Ce choix architectural du système permet de s'assurer que toute information relative à un projet de rénovation est traçable à partir du projet BIM (Figure 3) et que n'importe quel outil métier peut être utilisé dans l'écosystème de rénovation, tant que la compatibilité avec le format du BIM est respectée.

Cette approche permet aux parties prenantes de visualiser presque tout type d'informations, d'intégrer leurs contributions et d'exporter les données générées précédemment, toujours associées aux fichiers BIM. Parmi les données stockées dans les fichiers BIM, les besoins des utilisateurs finaux, les résultats de pré-évaluation, les indicateurs calculés à partir de simulation et les propositions du concepteur (conceptions alternatives) sont particulièrement pertinents pour la prise de décision [Habibi, 2017].

En association avec les fichiers BIM, le processus de rénovation nécessite l'utilisation de sources de données externes pour fournir des informations utiles au processus de décision. Parmi celles-ci, des bases de données contenant des descriptions de toutes les technologies de rénovation utilisables, des connaissances d'experts (règles de gestion...) ou des indicateurs externes (financiers, environnementaux...) sont pertinentes pour faciliter la prise de décision des concepteurs. Cependant, l'énorme quantité de données disponibles peut devenir un problème, car elle rend très complexes la compréhension et le contrôle de la décision des opérateurs humains. C'est pourquoi les systèmes d'aide à la décision doivent collecter, synthétiser et préanalyser toutes les données disponibles, les rendre intelligibles pour les concepteurs et ainsi les aider dans leurs choix.

Dans cet article, nous développons un système d'aide à la décision pour le jalon « Sélection des technologies de rénovation ». Cette étape décisive a la particularité d'être réalisée par un seul intervenant (concepteur/architecte), mais utilise des informations issues des attentes de l'utilisateur final et des informations de la base de données d'alternatives

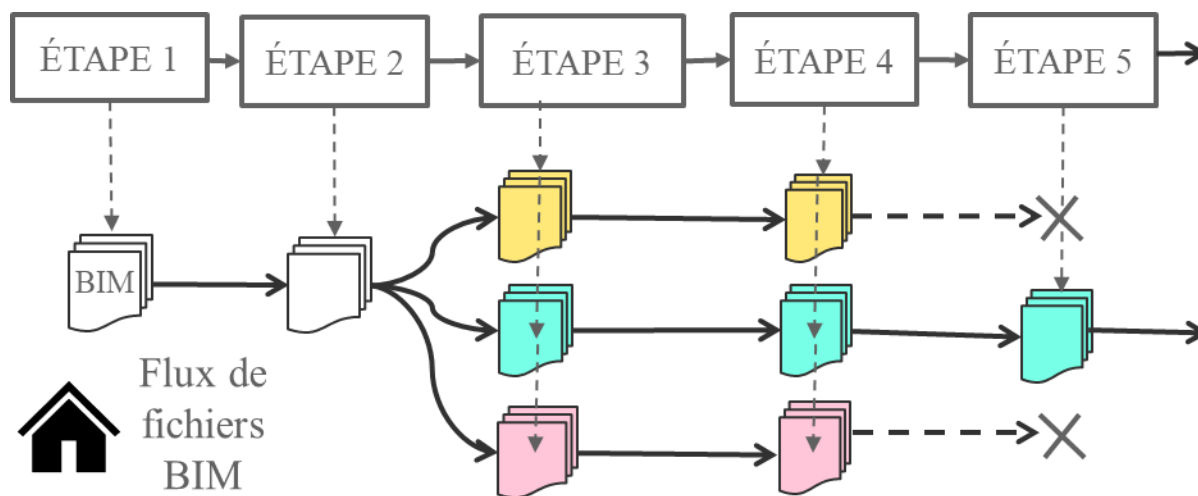


Figure 3. Flux de fichiers BIM dans la CRP

technologiques. Le processus de décision nécessite une interaction dynamique entre le décideur et le système d'aide à la décision pour trouver la(es) technologie(s) appropriée(s).

3.2 Classement d'alternatives technologiques

Comme évoqué dans des travaux précédents [Laguna Salvadó et al., 2018], trouver des solutions adaptées aux priorités du décideur nécessite de (i) prendre en compte les connaissances humaines (utilisateur final et/ou experts) lors de la mise en œuvre d'algorithmes décisionnels dans des problèmes à objectifs multiples (ii) en utilisant des approches floues de commande (au lieu de ne prendre en compte que les indicateurs technologiques et de rechercher « l'optimalité »). De plus, l'hybridation des connaissances humaines et des données technologiques (statistiques) permet également améliorer les processus de décision [Villeneuve et al., 2017].

Dans le contexte de la rénovation, les méthodes MCDM ont été largement appliquées pour classer les alternatives. Les approches les plus utilisées pour pondérer les critères dans la littérature sur le secteur de la construction sont la méthode AHP (*Analytical Hierarchy Process* – processus de hiérarchie analytique), dans laquelle les critères sont comparés par paires, déterminant subjectivement leur importance relative. D'autres méthodes telles que la somme pondérée élémentaire ou les méthodes de sur-classement (PROMETHEE, ELECTRE) peuvent également être utiles pour le classement des technologies. Comme discuté dans [Arroyo et al., 2015], une exploration scientifique visant à trouver des approches alternatives est nécessaire. Sachant que les critères peuvent être vagues ou contenir des imprécisions inhérentes à la nature des informations. Les méthodes MCDM « a priori » combinées à des méthodologies floues peuvent être appliquées pour prendre en compte l'imprécision des données [Wang et al., 2009].

La proposition présentée dans la section suivante a donc pour objectif de présenter une méthode MCDM simple et réactive s'appuyant sur une pondération des critères et la prise en compte

de l'incertitude pour ordonner des alternatives.

4 PROPOSITION

Comme nous l'avons énoncé précédemment, le besoin d'aide à la décision dans le domaine de la rénovation NZEB est surtout caractérisé par une nécessité d'interactivité entre le décideur et le système afin de comprendre et maîtriser l'impact des indicateurs sur le classement des alternatives. D'autre part, ce classement doit intégrer l'incertitude inhérente à la nature des informations collectées tout en tenant compte des préférences des utilisateurs. C'est pourquoi, nous présentons dans cette section deux contributions :

- (i) une interface utilisateur dynamique,
- (ii) un algorithme qui permettant le classement des technologies de rénovation en prenant en compte les préférences de l'utilisateur.

La proposition est illustrée avec un jeu de données de [Kadziński et al., 2018]. Un démonstrateur est accessible sur internet : <https://rezbuild-sorter.herokuapp.com/>.

4.1 Alternatives technologiques : un problème de décision

L'objectif du système d'aide à la décision est de combiner les préférences de l'utilisateur avec les indicateurs technologiques d'une manière dynamique et de fournir ainsi un classement de technologies pertinent. De ce fait, les décideurs (ici typiquement les architectes) doivent identifier les indicateurs les plus importants (préférences) dans un contexte donné afin de leur donner plus de poids lors du classement. De plus, le décideur peut rajouter de l'incertitude sur les valeurs des indicateurs pour éviter une discrimination trop catégorique (lors du classement) entre deux technologies qui ont des valeurs très proches.

Par conséquent, pour prendre en compte ces spécificités, deux paramètres de décision ont été définis pour l'algorithme de classement. L'**importance** caractérise le jugement du décideur concernant le poids d'un indicateur par rapport aux autres dans le

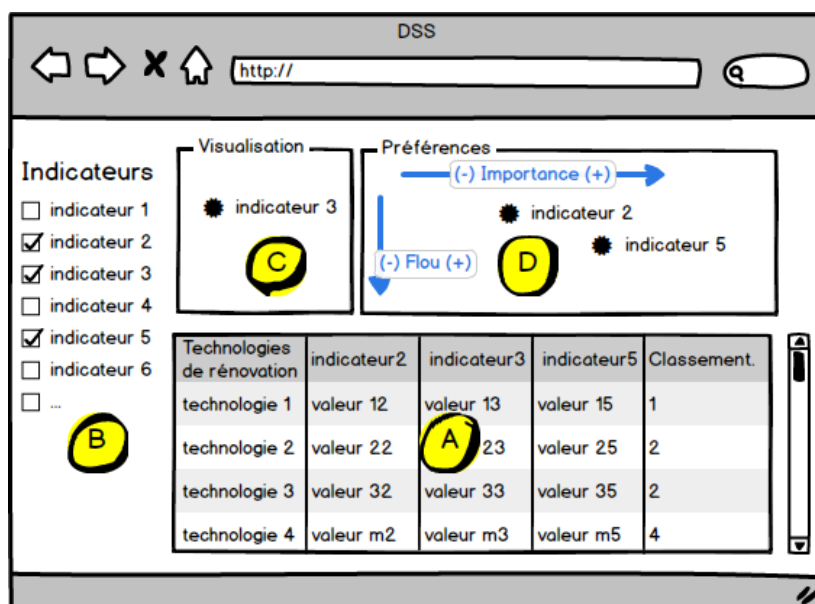


Figure 4. Maquette de l'interface utilisateur

classement des technologies de rénovation. Le **flou** caractérise le niveau d'incertitude défini par le décideur sur un indicateur afin d'ajouter de la souplesse dans le classement.

4.2 Interface utilisateur dynamique

L'interface affiche les informations relatives à la sélection des indicateurs, l'importance et le flou attribué à chaque indicateur sélectionné ainsi que le classement dynamique des technologies de rénovation obtenu (Figure 4).

Au centre de l'écran (A), la liste des technologies de rénovation est affichée. À gauche (B) on retrouve la liste des indicateurs caractérisant les technologies de rénovation. Un système de glisser-déposer vers la case « visualisation » (C) permet de sélectionner les indicateurs pertinents pour l'utilisateur.

Pour déclencher l'algorithme de classement, les indicateurs doivent être glissés et déposés vers la case « Préférences » (D). Les indicateurs **sélectionnés** y sont placés en fonction de l'**importance** (↔) et du **flou** (↓) que l'utilisateur leur accorde.

Une fois qu'il y a au moins un indicateur placé en (D), l'algorithme de classement est déclenché et le centre de l'écran (A) affiche une liste ordonnée (classement) des technologies de rénovation. Le temps de calcul étant insignifiant, l'utilisateur peut ajuster la position des indicateurs et le classement est mis à jour de manière dynamique.

4.3 Algorithme de classement

À partir de l'interface utilisateur, l'algorithme obtient les indicateurs à prendre en compte, avec le flou et l'importance associées (Tableau 1 et Tableau 2). L'importance peut prendre n'importe quelle valeur entre 1% et 100%. Le flou est limité entre 0 et 20% de la plage de valeurs de l'indicateur conserver la pertinence du classement en évitant de devenir la seule information.

Tableau 1. Données issues de la base de données des technologies de rénovation

	Indicateur 1	Indicateur 2	Indicateur 'n'
Technologie 1	Valeur '11'	Valeur '12'	Valeur '1n'
Technologie 2	Valeur '21'	Valeur '22'	Valeur '2n'
Technologie 'm'	Valeur 'm1'	Valeur 'm2'	Valeur 'mn'

Tableau 2. Données issues de l'interface utilisateur

	Indicateur 1	Indicateur 2	Indicateur 'n'
Importance	Importance (1)	Importance (2)	Importance (n)
Flou	Flou (1)	Flou (2)	Flou (n)

L'algorithme de classement se déroule en quatre étapes :

1. Calcul des indicateurs flous : un intervalle [min max], centré sur la valeur de l'indicateur et proportionnel à la plage de l'indicateur et au flou défini par le décideur, est calculé pour chaque couple technologie – indicateur.
2. Dominances floues : pour chaque indicateur, le nombre de technologies dominées (en termes d'intervalles) est calculé.

3. Dominance totale : l'algorithme calcule la somme des dominances floues pondérée en fonction de l'importance définie par l'utilisateur pour chaque indicateur.
4. Classement : les technologies de rénovation sont ordonnées par dominance totale décroissante.

La section suivante illustre le fonctionnement de cet algorithme au travers d'un exemple traitant du classement de matériaux isolants issus de [Kadziński et al., 2018].

4.4 Application à la sélection d'un matériau isolant

Pour expliquer le fonctionnement de l'algorithme, un scénario a été défini permettant d'illustrer les différentes étapes.

Considérons un concepteur qui doit choisir parmi une liste de 13 matériaux isolants (c'est-à-dire 13 alternatives technologiques de rénovation). Chaque matériau a été évalué suivant six critères caractérisant sa performance en termes de développement durable (aspects sociaux, économiques et environnementaux). Les critères retenus évaluent :

- le confort d'utilisation (g1),
- la réduction des émissions de CO2 (g2),
- la rentabilité économique (g3),
- l'impact sur la santé humaine (g4),
- l'impact sur la qualité de l'écosystème (g5),
- la consommation de ressources (g6).

Les données (Tableau 3) proviennent d'un cas réel. Pour plus d'informations sur les indicateurs, les matériaux et la collecte de données, veuillez consulter [Kadziński et al., 2018]. Pour des raisons de lisibilité, dans cette illustration, tous les indicateurs ont été normalisés sur une échelle de 0 à 5, où plus le nombre obtenu est élevé, meilleure est la note de la technologie sur l'indicateur considéré.

Tableau 3. Données normalisées du scénario issues de [Kadziński et al., 2018]

Matériau Isolant	g1	g2	g3	g4	g5	g6
Béton autoclavé	3,21	3,33	3,86	4,61	4,99	4,52
Dalle de liège	4,28	4,26	3,83	3,94	4,55	3,59
Perlite expansée	4,37	4,29	4,64	4,78	4,99	3,49
Carton dur	4,65	4,58	3,13	3,03	4,64	0,00
Laine de verre	4,62	4,68	4,47	4,56	4,97	3,86
Panneaux de fibres de gypse	0,68	0,73	1,18	2,60	4,91	2,47
Fibres de chanvre	4,34	4,46	4,78	5,00	4,93	4,81
Fibres de kénaif	4,62	4,65	4,92	4,87	4,63	5,00
Bois minéralisé	3,79	3,75	3,17	2,83	4,89	2,00
Contreplaqué	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38
Mousse de polystyrène	4,54	4,67	4,56	4,98	5,00	4,50
Polyuréthane	5,00	5,00	4,71	4,42	4,99	3,49
Laine de roche	4,65	4,73	5,00	4,10	4,98	4,75

Les hypothèses pour paramétrer l'algorithme sont résumées dans le Tableau 4. Elles traduisent les préférences du décideur exprimées via l'interface utilisateur. Ici, le concepteur choisit d'utiliser les critères g1, g2 et g6 (respectivement confort, CO2, ressources) pour faire son classement. Il considère le critère g1 comme étant moins important que les critères g2 et g6 pour refléter les exigences de son client. De plus, il sait que la plupart

Tableau 5. Indicateurs flous du scénario

Matériau Isolant	g1	g2	g6
Flou	5%	10%	15%
Béton autoclavé	[2,96 3,46]	[2,83 3,83]	[3,77 5,27]
Dalle de liège	[4,03 4,53]	[3,76 4,76]	[2,84 4,34]
Perlite expansée	[4,12 4,62]	[3,79 4,79]	[2,74 4,24]
Carton dur	[4,40 4,90]	[4,05 5,08]	[-0,75 0,75]
Laine de verre	[4,37 4,87]	[4,18 5,18]	[3,11 4,61]
Panneaux de fibres de gypse	[0,43 0,93]	[0,23 1,23]	[1,72 3,22]
Fibres de chanvre	[4,09 4,59]	[3,96 4,96]	[4,06 5,56]
Fibres de kénaf	[4,37 4,87]	[4,15 5,15]	[4,25 5,75]
Bois minéralisé	[3,54 4,04]	[3,25 4,25]	[1,25 2,75]
Contreplaqué	[-0,25 0,25]	[-0,50 0,50]	[-0,37 1,13]
Mousse de polystyrène	[4,29 4,79]	[4,17 5,17]	[3,75 5,25]
Polyuréthane	[4,75 5,25]	[4,50 5,50]	[2,74 4,24]
Laine de roche	[4,40 4,90]	[4,23 5,23]	[4,00 5,50]

des alternatives technologiques ont de bonnes performances en termes de confort et il est confiant avec cette mesure. Le paramètre flou pour g1 est donc défini à un niveau faible (5%). Ensuite, pour g2 et g6, le concepteur est moins confiant. Il fixe donc le flou à des niveaux plus importants (respectivement 10% et 15%).

Tableau 4. Données du scénario issues de l'interface utilisateur

	g1	g2	g6
Importance	50%	100%	100%
Flou	5%	10%	15%

À partir de ces données d'entrée, l'algorithme traite les informations par la séquence suivante :

1. Les indicateurs flous sont calculés pour chaque couple technologie – indicateur en fonction du paramètre « Flou » (Tableau 5). Un flou de 10%, sur une plage d'indicateurs ayant une étendue de 5, revient à ajouter et retirer 0,5 à toutes les valeurs de l'indicateur pour créer des intervalles centrés sur ces valeurs initiales (voir l'exemple du critère g2 dans le Tableau 5).
2. Les dominances floues sont calculées pour chaque couple technologie – indicateur (Tableau 6) en fonction des intervalles issus de l'étape précédente. Pour chaque indicateur, chaque intervalle (représentant un couple technologie – indicateur) est comparé aux autres intervalles. Si, et seulement si, la borne supérieure d'un intervalle A est inférieure à la borne inférieure de l'intervalle B, il existe une dominance de B sur A. Dans tous les autres cas (chevauchement partiel ou total des intervalles), il n'y a pas de dominance (les alternatives sont considérées comme équivalentes suivant ce critère). Le nombre de dominances

est calculé pour chaque couple technologie – indicateur.

3. La dominance totale par technologie est calculée par la somme des dominances floues pondérées en fonction de l'importance (Tableau 6).
4. Les matériaux sont classés par dominance totale décroissante (Tableau 6).

4.5 Discussion des résultats

L'algorithme proposé permet de classer dynamiquement les technologies de rénovation en prenant en compte des indicateurs technologiques et les préférences de l'utilisateur. Grâce au flou et à la notion de dominance, le fait d'avoir des indicateurs presques

Tableau 6. Classement des technologies par dominance totale décroissante

Matériau Isolant	g1	g2	g6	Dominance Totale	Classement
Importance	50%	100%	100%		
Polyuréthane	7	4	2	3,8	1
Fibres de kénaf	4	3	3	3,2	2
Laine de roche	4	3	3	3,2	2
Fibres de chanvre	4	3	3	3,2	2
Mousse de polystyrène	4	3	2	2,8	5
Laine de verre	4	3	2	2,8	5
Béton autoclavé	2	3	2	2,4	7
Perlite expansée	4	2	2	2,4	7
Dalle de liège	3	2	2	2,2	9
Bois minéralisé	3	2	2	2,2	9
Carton dur	4	3	0	2,0	11
Panneaux de fibres de gypse	1	0	2	1,0	12
Contreplaqué	0	0	0	0,0	13

identiques, avec des valeurs légèrement différentes, n'est pas crucial pour le classement final.

Dans le scénario, si la somme pondérée est calculée directement sur la valeur de l'indicateur (pas de flou ni de dominance), la mousse de polystyrène (rang 5) prend la première position au lieu du polyuréthane (rang 1). De plus, si tout le flou est diminué jusqu'à 1%, la mousse de polystyrène reste à la 5ème position mais la fibre de kénaf prend la 1ère.

Les niveaux de flou ont un impact direct sur le nombre de technologies ayant le même score de « dominance totale » (c'est-à-dire la laine de roche, les fibres de kénaf et les fibres de chanvre dans notre scénario). Avec l'approche présentée, il n'y a pas d'ordre relatif entre ces alternatives, elles ont donc un classement équivalent. Les recherches à venir doivent adresser cette question, notamment l'impact sur les choix du décideur et la sélection des critères potentiels pour obtenir un classement absolu.

À titre de comparaison, dans [Kadziński et al., 2018], article dont est issu le jeu de données que nous utilisons, les auteurs ont mis en œuvre une approche multicritères en trois étapes. Au lieu de classer les alternatives de matériaux isolants, ils proposent de les trier dans trois catégories prédéfinies. Les alternatives assignées à la meilleure classe (la plus durable) sont à celles figurant dans le top 6 de notre classement.

5 CONCLUSION

Cet article présente (i) une méthodologie pour le processus de rénovation des bâtiments NZEB qui facilite la collaboration des parties prenantes, l'interopérabilité des outils, la collecte de données et la prise de décision ainsi qu'une (ii) approche dynamique pour classer les alternatives en fonction de critères (indicateurs) et des préférences de l'utilisateur dans ce contexte. Un prototype comprenant l'interface utilisateur et l'algorithme est disponible sur : <https://rezbuild-sorter.herokuapp.com/>

Plusieurs perspectives se dégagent de ces travaux initiaux. D'un côté, l'interface utilisateur doit être testée avec des utilisateurs potentiels dans le contexte du projet H2020 REZBUILD. L'objectif est de relever les défis liés aux interactions homme-machine (ergonomie de l'interface, visualisation des données...). D'autre part, l'algorithme doit être testé et ajusté avec des volumes de données plus importants provenant du consortium afin de valider l'approche proposée de dominance floue et sa pertinence pour les utilisateurs finaux avec un ensemble complet de données réelles et contextualisées.

6 RÉFÉRENCES

Ambrosino, J., Masson, D.H., Legardeur, J., Tastet, G., 2016. IdeaValuation: Encourage exchanges during a creative session by the ideas qualitative evaluation using a digital tool, in: Ergo'IA 2016 : "Créativité et Innovation Responsable Pour l'industrie Du Futur : Comment Le Design, l'Ergonomie et l'IHM Répondront Aux Challenges de Demain?". Bidart, France.

Arroyo, P., Tommelein, I.D., Ballard, G., 2015. Comparing AHP and CBA as Decision Methods to Resolve the Choosing

Problem in Detailed Design. *J. Constr. Eng. Manag.* 141, 04014063.

Elkington, J., 1998. Accounting for the Tripple Bottom Line. *Meas. Bus. Excell.* 2, 18–22.

European Parliament, 2008. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings

Ferreira, J., Pinheiro, M.D., Brito, J. de, 2013. Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. *Energy Policy* 62, 1453–1460.

Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M., Phillip, M., Lowry, C., 2017. BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential. *Energy Build.* 144, 218–228.

Habibi, S., 2017. The promise of BIM for improving building performance. *Energy Build.* 153, 525–548.

Jafari, A., Valentin, V., 2018. Selection of optimization objectives for decision-making in building energy retrofits. *Build. Environ.* 130, 94–103.

Kadziński, M., Rocchi, L., Miebs, G., Grohmann, D., Menconi, M.E., Paolotti, L., 2018. Multiple Criteria Assessment of Insulating Materials with a Group Decision Framework Incorporating Outranking Preference Model and Characteristic Class Profiles. *Group Decis. Negot.* 27, 33–59.

Laguna-Salvadó, L., Lauras, M., Okongwu, U., Comes, T., 2018. A multicriteria Master Planning DSS for a sustainable humanitarian supply chain. *Ann. Oper. Res.*

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., Ledo, L., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy Build.* 55, 889–902.

Mjörnell, K., Boss, A., Lindahl, M., Molnar, S., 2014. A Tool to Evaluate Different Renovation Alternatives with Regard to Sustainability. *Sustainability* 6, 4227–4245.

Nielsen, A.N., Jensen, R.L., Larsen, T.S., Nissen, S.B., 2016. Early stage decision support for sustainable building renovation – A review. *Build. Environ.* 103, 165–181.

van Bueren, E.M., Priemus, H., 2002. Institutional Barriers to Sustainable Construction. *Environ. Plan. B Plan. Des.* 29, 75–86.

Villeneuve, É., Béler, C., Pérès, F., Geneste, L., Reubrez, E., 2017. Decision-Support Methodology to Assess Risk in End-of-Life Management of Complex Systems. *IEEE Syst. J.* 11, 1579–1588.

Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2263–2278.

Zavadskas, E.K., Kaklauskas, A., Gulbinas, A., 2004. Multiple criteria decision support web-based system for building refurbishment. *J. Civ. Eng. Manag.* 10, 77–85.