



AUTHOR(S):

TITLE:

YEAR:

Publisher citation:

OpenAIR citation:

Publisher copyright statement:

This is the _____ version of an article originally published by _____
in _____
(ISSN _____; eISSN _____).

OpenAIR takedown statement:

Section 6 of the "Repository policy for OpenAIR @ RGU" (available from <http://www.rgu.ac.uk/staff-and-current-students/library/library-policies/repository-policies>) provides guidance on the criteria under which RGU will consider withdrawing material from OpenAIR. If you believe that this item is subject to any of these criteria, or for any other reason should not be held on OpenAIR, then please contact openair-help@rgu.ac.uk with the details of the item and the nature of your complaint.

This publication is distributed under a CC _____ license.

Evaluation multicritère pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie

M. Seddiki ^{1,2*}, K. Anouche ¹, et A. Bennadji ^{2†}

¹ Département d'Architecture, Faculté d'Architecture et de Génie Civil
Université de la Science et de la Technologie Mohamed Boudiaf, USTO-MB
El Mnaouar, BP 1505, Bir El Djir 31000, Oran, Algérie

² Scott Sutherland School of Architecture and Built Environment
Robert Gordon University, Aberdeen, Scotland

(reçu le 10 Janvier 2016 – accepté le 30 Mars 2016)

Résumé - En Algérie, le secteur résidentiel et tertiaire est le secteur le plus énergivore avec une consommation de 34 % de l'énergie finale, pour réduire cette consommation, l'état prévoit un programme de rénovation thermique des bâtiments existants. Sachant que le parc existant compte 1.050.000 habitations en maçonnerie construits avant 1945 et que ces mêmes habitations sont sujettes à un programme de réhabilitation; la rénovation thermique de ces derniers permettrait à la fois, leurs préservations et la réduction de leurs consommations énergétiques. La rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie est une décision complexe, elle nécessite une approche globale car elle implique simultanément une multitude de critères (consommation d'énergie, le coût d'investissement, etc), y compris des risques liés à la préservation du patrimoine tel que la perte des caractéristiques esthétiques des bâtiments et des dommages structurels au niveau des murs, du plancher, ou de la toiture en raison de l'accumulation de l'humidité. Cet article propose une méthode d'aide à la décision basée sur les méthodes Promethee (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale. Le but de cette méthode est de classer les différentes solutions de rénovation thermique. La méthode utilise une approche multicritères qui prend en compte les risques liés à la préservation du patrimoine. Une étude de cas a été menée afin de tester la méthode, comme espéré la méthode fonctionne, il a été possible d'obtenir un classement complet des solutions de rénovation thermique.

Abstract - In Algeria, the residential and tertiary sectors are the ones with the highest energy consumption, making use of 34% of the total energy; consequently, the government has launched a thermal renovation program for existing buildings to reduce this consumption. Knowing that the existing stock has 1.050.000 of masonry dwelling built before 1945 and that these same dwellings are subject to a rehabilitation program, thermal renovation of these would both guarantee their preservations and reduce energy consumption. Thermal renovation of masonry buildings is a complex decision, it needs a comprehensive approach as it simultaneously involves a multitude of criteria (energy consumption, investment cost, etc) including risks related to the heritage preservation as the loss of building historic aesthetic features and the fabric decay in the walls, floor or roof due to moisture accumulation. This paper presents a decision aid method based on the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, Promethee methods for the thermal renovation of masonry buildings with a heritage value. The aim of this method is to rank the different thermal renovation solution. The method uses a multi-criteria approach that includes risks related to the heritage preservation. A case study was investigated to test the method, as expected the method works, it was possible to get a full ranking of the thermal renovation.

* seddikimohamed25@hotmail.fr , kanouche.univ@gmail.com

† a.bennadji@rgu.ac.uk

Mot clés: Rénovation thermique - Préservation du patrimoine - Bâtiments en maçonnerie
- Méthodes Promethee - Aide à la décision multicritère.

1. INTRODUCTION

Pour réduire la consommation élevée dans le secteur résidentiel, le gouvernement Algérien a lancé en 2016 un programme national de maîtrise de l'énergie mené par l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie, APRUE. Ce programme a pour objectif l'isolation thermique de 100.000 logement/ans. 80 pour cent des coûts liés à ces opérations seront assurés par le Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie (FNME) [1].

Le parc de logements existant en Algérie a atteint les 6.500.000 d'unités en 2012 [2] dont 1.050.000 habitations datent d'avant 1945. La majorité de ces habitations correspond au bâti construit en maçonnerie et réalisé durant la période coloniale française. Ils représentent un précieux patrimoine architectural témoignant d'une époque et d'un savoir-faire ancien. Ils ont été construits selon des techniques et matériaux traditionnels, avec des murs porteurs en maçonnerie de pierre, des planchers en voûtains de brique et des solives métalliques [3]. Du point de vue de la thermique le bâti en maçonnerie possède une inertie très lourde et des matériaux de gros œuvre hygroscopique, ces priorités induisent un comportement thermique très différent du bâti moderne, en été comme en hiver [4]. Les bâtiments en maçonnerie font l'objet en Algérie d'un large programme de préservation. En effet de nombreuses réhabilitations sont actuellement en cours à travers tout le pays. Pour 2016, l'état prévoit le diagnostic de 300.000 habitations suite à cela, des travaux de réhabilitation seront lancés. Ces travaux seront conduits et financés par l'état, ils ne concernent que les parties communes des immeubles, tels que les façades extérieures, les cours, les zones communes intérieures (caves, halls d'entrée et cages d'escalier), les terrasses accessibles et inaccessibles, et les toitures en pente [5].

Le contexte Algérien actuel, spécialement avec le programme de maîtrise de l'énergie dans le secteur résidentiel et celui de la réhabilitation des bâtiments en maçonnerie, offre une formidable opportunité pour effectuer la rénovation thermique de ces derniers, elle permettrait de concilier entre l'amélioration des performances thermique du parc existant et la persévérance de ces bâtiments. Cela dit le choix des alternatives d'améliorations, lors de leurs rénovations thermiques est une décision complexe, elle nécessite une approche globale, car elle implique simultanément une multitude de critères y compris des risques liés à la préservation du patrimoine [6]. Etant donné le caractère multicritères du problème de la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie en Algérie il est très difficile de trouver des solutions d'amélioration qui optimisent tous les critères à la fois, par conséquent il serait plus intéressant d'arriver à trouver des solutions de compromis. L'aide à la décision multicritère est un outil pratique pour ce type de problème, elle évalue les différentes solutions en prenant en compte les différents critères. Elle a été très souvent utilisée dans la littérature dans le domaine de la rénovation thermique mais rarement pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale. On constate aussi au niveau de la littérature aucune application des méthodes d'aide à la décision multicritère Promethee [7] dans ce domaine.

Cet article propose une méthode d'aide à la décision basée sur les méthodes Promethee pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale. L'objectif de cette recherche est de classer les différentes solutions de rénovation thermique selon une base multicritères. Les critères considérés dans cette recherche sont la réduction de la consommation énergétique, le coût de l'investissement,

le risque de dommages structurels et le risque de la perte des caractéristiques esthétiques des bâtiments. Cet article est structuré en cinq parties, la partie suivante et seconde présentent un état de l’art concernant l’application des méthodes d’aide à la décision multicritère dans le domaine de la rénovation thermique, la troisième partie développe la méthode utilisée dans ce travail, la quatrième partie fournit le résultat de l’application de la méthode sur un cas d’étude, et finalement la partie cinquième présente nos conclusions et des orientations pour de futures recherches.

2. ETAT DE L’ART

Le **Tableau 1** résume les principaux travaux scientifiques disponibles dans la littérature étudiant l’application des méthodes d’aide à la décision multi critères (MCDA: Multi Criteria Decision Analysis) dans la rénovation thermique des bâtiments en mettant en évidence les auteurs, le champ d’application, la méthode utilisée, et sa catégorie.

Tableau 1: Principaux travaux scientifiques étudiant l’application des méthodes MCDA dans la rénovation thermique des bâtiments

Auteurs	Champ d’application	Méthode	Catégorie
[8]	Rénovation thermique des immeubles de bureaux	ELECTRE	Agrégation Partielle
[9]	Etude des systèmes de conditionnement d’air	ELECTRE	Agrégation Partielle
[10]	Rénovation thermique des bâtiments résidentiels	ELECTRE	Agrégation Partielle
[11]	Rénovation thermique des immeubles de bureaux	Méthode de classement	Agrégation complète
[12]	Stratégies de ventilation d’été	MAUT	Agrégation complète
[13]	Rénovation thermique des bâtiments résidentiels	AHP,SAW, EW, COPRAS	Agrégation complète
[14]	Rénovation thermique des bâtiments	knapsack model	Agrégation complète
[15]	Sélection du système de chauffage pour des bâtiments résidentiels	SMAA	Agrégation complète
[6]	Sélection d’option d’isolation pour les bâtiments historiques	TOPSIS	Agrégation complète
[16]	Conservation de l’énergie dans un bâtiment	FAHP	Agrégation complète

ELECTRE : Elimination and Choice Expressing the Reality; MAUT : Multi-Attribute Utility Theory; AHP: Analytical Hierarchy Process; SAW: Simple Additive Weighting; COPRAS: Complex Proportion Assessment; SMAA: Stochastic Multi-criteria Acceptability Analysis; TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution; FAHP; Fuzzy AHP.

Les méthodes MCDA ont souvent été utilisées dans la littérature pour la rénovation thermique des bâtiments. Ils peuvent être classés en deux familles différentes en fonction de leur approche d’agrégation:

- Les méthodes à agrégation partielle-

L’avantage de ces approches est de permettre la prise en compte simultanément de critères qualitatifs et quantitatifs sans avoir à effectuer de codage. Elles n’autorisent pas

de compensation entre les critères, par exemple face à deux actions 'a' et 'b', elles se basent sur l'hypothèse que 'a' surclasse 'b' si 'a' est au moins aussi bon que 'b' sur une majorité de critères sans être trop mauvais dans un critère en particulier.

■ Les méthodes à agrégation complète-

Ces approches donnent une note déterminée à tous les scénarios et présentent la particularité que le score est basé sur les critères les plus importants. Cependant, elles présentent plusieurs limites. Elles permettent la compensation de faibles scores dans des critères par de bons résultats dans d'autres critères, aussi il est nécessaire de réaliser un codage pour prendre en compte des critères quantitatifs qualitatifs simultanément.

Il est possible de dire à partir du **Tableau 1** que les méthodes MCDA ont rarement été appliquées pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale. Aussi, la plupart des méthodes MCDA proposée pour la rénovation thermique des bâtiments étudient l'application de méthodes à agrégation complète ou des méthodes à agrégation partielle Electre.

Par conséquent, il est possible d'affirmer que les méthodes d'aide à la décision multicritères à agrégation partielle, Promethee n'ont jamais été utilisées pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale.

Cet article propose une méthode d'aide à la décision basée sur les méthodes Prométhée pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie à valeur patrimoniale.

L'avantage des méthodes Promethee est qu'elles utilisent l'agrégation partielle. Elles sont pratiques dans le cas où le nombre d'alternatives à classer est fini. Dans cette approche, la technique consiste à comparer les actions deux à deux et à vérifier si selon certaines conditions préétablies, l'une des deux actions surclasse l'autre ou pas de façon claire et nette. [7] ont fourni un large état de l'art concernant l'application des méthodes Promethee dans divers disciplines. Les méthodes Promethee II et Promethee V sont appliquées dans cet article, elles font partie des méthodes Promethee.

Promethee II suppose que l'utilisateur est en mesure de donner un poids et une fonction de préférence à chaque critère. Ces informations vont être utilisées pour comparer les actions entre elles, et établir un classement complet des actions [7]. Ce processus sera expliqué plus en détails dans la section méthodologie. Promethee V, quant à elle, permet de prendre en compte des contraintes additionnelles exigées par l'utilisateur, par exemple le nombre d'actions à sélectionner, le budget maximum alloué à l'opération et bien d'autres types de contraintes [17].

3. METHODOLOGIE

Cette section présente une méthode d'aide à la décision basée sur les méthodes Promethee pour classer les différentes solutions de rénovation thermique. La méthode présentée consiste en plusieurs étapes. En premier lieu, l'utilisateur de la méthode a effectué une investigation complète du bâtiment. Ensuite les solutions de rénovation thermiques ont été déterminées. Après l'utilisateur de la méthode a évalué toutes les solutions au regard des critères sectionnés dans cet article. Finalement le reste des calculs est à effectuer à l'aide de Promethee II et Promethee V. Les détails de la méthode proposée sont présentés comme suit-

3.1 Investigation complète du bâtiment

Une documentation complète du bâtiment a été effectuée, les données recueillies concernent:

- La zone climatique et l’organisation intérieure (plans, coupes, et façades du bâtiment).
- Le mode constructif: type de structure, éléments porteurs, nature des liaisons. (plancher – mur refend – façade), et le type d’ouverture et de vitrage.
- L’aspect esthétique du bâtiment (élément architectonique, façade exceptionnelle).
- La consommation énergétique et les équipements techniques.
- Le scénario d’occupation: présence – absence sur différentes périodes.

3.2 Génération d’alternatives

Une fois l’investigation sur le bâtiment terminée, l’utilisateur de la méthode a formulé un ensemble de solutions de rénovation thermique. La méthode proposée prend en compte seulement l’isolation de l’enveloppe du bâtiment (l’isolation de toiture, l’isolation des murs, le changement des fenêtres etc.)

3.3 Critère d’évaluation

Chaque action a été évaluée au regard de la réduction de la consommation énergétique, le cout de l’investissement, le risque de la perte des caractéristiques esthétiques, et le risque de dommages structurels. Ces évaluations étaient quantitatives et ont été obtenues à partir d’outil de simulation hygrothermique dynamique et de calculs comptables, ou qualitatifs obtenues à l’aide de jugements subjectifs. Les évaluations ont été effectuées comme suit:

- Le coût de l’investissement a été exprimé en dinars Algérien, intégrant les coûts des fournitures et des mises en œuvre [18].
- La réduction de la consommation énergétique est exprimée en pourcentage de réduction sur les besoins annuels d’énergie pour le chauffage et la climatisation [14]. L’évaluation de ces gains a été faite sous TRANSYS [19] qui est un logiciel de simulation thermique dynamique. La température de base pour les calculs des besoins chauffage était de 21 °C et de 26 °C pour les besoins en climatisation.
- Le risque de la perte des caractéristiques esthétiques du bâtiment a été évalué au moyen de jugements subjectifs et exprimée avec une échelle qualitative (**Tableau 2**)
- Le risque de dommages structurels dans les parois est provoqué par l’accumulation de l’humidité (figure 1), cela peut se produire lorsque les solutions de rénovations thermiques ne sont pas adaptées à la construction en maçonnerie [6]. Dans cette recherche, toutes les solutions d’isolation thermique ont été évaluées en termes de l’accumulation de l’humidité sous le logiciel WUFI [20]. WUFI permet de faire la simulation de transferts couplés de masse et de chaleur [21]. Par la suite, le risque de dommages structurels de chaque solution a été exprimé par une échelle qualitative (**Tableau 2**).

Tableau 2: Echelle qualitative pour l’évaluation des risques

Echelle	Niveau de risque
1	Très bas
2	Bas
3	Modéré
4	Elevé
5	Très élevé

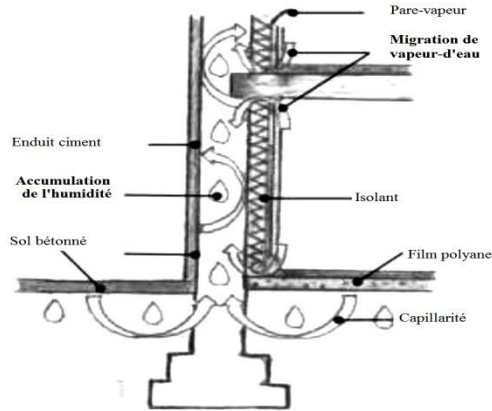


Fig. 1: Ensemble de travaux pouvant causer l'accumulation de l'humidité, adapter de [22]

3.4 Définition des poids et des fonctions de préférence

L'utilisateur de la méthode a fourni des informations entre les critères exprimées par des poids (w_j). Un poids w_j peut-être attribuer à un critère j , il peut varier de 0 à 100 selon l'importance de ce critère, le poids 100 représente l'importance maximale, pour chaque autre critère, le poids est ensuite déterminé par rapport au critère j . Des informations au sein du même critère ont également été exprimées par la fonction de préférence ($P_j(a, b)$) représentant pour chaque paire d'alternatives 'a', 'b', l'intensité de préférence de 'a' sur 'b', un indice de préférence multicritères a été défini comme l'indique l'Eq. (1):

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k \omega_j \times P_j(a, b) \quad (1)$$

Où $\pi(a, b)$ exprime le degré de préférence de 'a' sur 'b' par rapport à l'ensemble des critères, ce nombre varie de 0 à 1.

Il existe six différents types de critères selon leurs fonctions de préférence [23]. Aussi des valeurs seuils ont été déterminées pour chaque critère: le seuil de préférence stricte (p) (dans le cas où l'écart de la valeur entre deux actions 'a' et 'b' est jugé très fort et très important) et le seuil d'indifférence q (dans le cas où l'écart de la valeur entre les actions 'a' et 'b' est jugé trop faible pour avoir une signification).

3.5 Classement Promethee

Les informations obtenues précédemment ont été utilisées pour comparer les actions entre elles et établir un classement complet des actions. Dans un premier temps, le flux sortant et le flux entrant ont été calculés respectivement à l'aide des {Eq. (2)} et {Eq. (3)}.

Le flux sortant $\Phi^+(\phi^+)$ est une mesure de force, c'est un nombre compris entre 0 et 1, cela signifie que pour une action donnée si le flux sortant est égal à 1, l'action est préférable à toutes les autres actions sur tous les critères et si le flux est égal à 0 cela signifie que l'action ne représente aucun avantage par rapport aux autres actions.

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a, b) \quad (2)$$

Le flux entrant $\Phi^-(\phi^-)$, quant à lui représente une mesure de faiblesse. Ce nombre compris entre 0 et 1 ou 0 représente la meilleure solution et 1 représente la solution la moins bonne.

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a,b) \tag{3}$$

Dans un second temps, le flux net $\Phi(\phi)$ a été calculé comme l'indique l'Eq. (4), il représente la différence entre les deux flux, le flux net a permis d'établir un classement complet des actions.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \tag{4}$$

Des contraintes supplémentaires ont été introduites à l'aide de Promethee V. Une variable binaire (0-1) x_i a été associée à chaque action 'a': $x_i = 1$ signifie que l'action est sélectionnée, alors que $x_i = 0$ signifie qu'elle n'est pas sélectionnée. L'objectif est de sélectionner les actions de manière à ce que la somme des valeurs (Φ) des actions sélectionnées soit aussi grande que possible comme indiqué dans l'Eq. (5):

$$\max \sum_{i=1}^n \phi(a_i) x_i \tag{5}$$

4. CAS D'ETUDE

Dans cette partie, un cas d'étude théorique est présenté. C'est un appartement situé au dernier étage de l'immeuble N°11, Boulevard Matta, Oran, Algérie. L'immeuble est un bâtiment collectif colonial de style néoclassique construit en maçonnerie de moellon entre la fin du 19^{ème} siècle et début de 20^{ème} siècle. Il compte 04 appartements, deux pour chaque palier. L'objectif de ce cas d'étude était de tester l'applicabilité de la méthode proposée dans cet article. Le volume de l'appartement est de 580 m³, la surface est de 145 m², il est habité par une famille de cinq personnes. La consommation annuelle d'énergie est de 16.583 kWh, elle est bien au-dessus de la consommation nationale moyenne d'un logement qui est d'environ de 12.180 kWh [2]. Le logement est équipé d'un chauffage à gaz, un système de production d'eau chaude à gaz, un climatiseur électrique, les murs extérieurs sont en maçonnerie de moellon avec une épaisseur de 55 cm et ont une valeur U égale à 1.19 W/m²K, la toiture terrasse est construite en voutain de brique avec profilé métallique, elle a une valeur U de 1.69 W/m²K, les fenêtres sont toutes en simple vitrage avec une valeur U de 5.68 W/m²K.

Tableau 3: Evaluation des actions au regard des critères

Code	Actions (solutions rénovation thermique)	de	C1 %	C2 Dinar algérien	C3 Qualitative	C4 Qualitative
A1	Isolation extérieur de la façade principale avec 10 cm de polystyrène expansé	11		50000	Très élevé	Très élevé
A2	Isolation extérieur de la façade principale avec 10 cm de béton cellulaire	11		70000	Très élevé	Bas
A3	Isolation extérieur de la façade principale avec 10 cm de fibre de bois	11		55000	Très élevé	Bas
A4	Isolation extérieur de la façade principale avec un enduit isolant chaux-chanvre de 6 cm	7		60000	Très bas	Très bas
A5	Isolation extérieur de la façade secondaire et de la cour avec 10 cm de polystyrène expansé	9		40200	Modéré	Très élevé

A6	Isolation extérieur de la façade secondaire et de la cour avec 10 cm de béton cellulaire	9	56280	Modéré	Bas
A7	Isolation extérieur de la façade secondaire et de la cour avec 10 cm de de fibre de bois	9	44220	Modéré	Bas
A8	Isolation extérieur de la façade secondaire et de la cour avec un enduit isolant chaux-chanvre de 6 cm	6	48240	Très bas	Très bas
A9	Isolation par-dessus de la toiture avec 10 cm polystyrènes expansé.	26	145000	Très bas	Bas
A10	Isolation par-dessus de la toiture avec 10 cm de fibres de bois	26	159500	Très bas	Bas
A11	Isolation par-dessus de la toiture avec 15 cm polystyrènes expansé	29	217500	Très bas	Bas
A12	Isolation par-dessus de la toiture avec 15 cm de fibres de bois	29	232000	Très bas	Bas
A13	Installation de fenêtre double vitrage argent.	21	227500	Modéré	-
A14	Installation d'une double fenêtre	19	233400	Très bas	-
A15	Installation d'un survitrage	9	70000	Très bas	-

C1 la réduction de la consommation énergétique, C2 le coût de l'investissement, C3 le risque de la perte des caractéristiques esthétiques des bâtiments, C4 le risque de dommages structurels.

Suivant la théorie Promethee (étape 5), l'utilisateur de la méthode a fourni des informations au sein du même critère exprimées par les fonctions de préférences $P_j(a, b)$. Les fonctions de préférences de type I et types IV (Tableau 3 et Tableau 4) ont été choisies.

Tableau 4: Forme des deux fonctions de préférences utilisées dans cet article, adapter de [23]

Type de critère	Fonction de préférence (H(d)), $d = g_j(a) - g_j(b)$
Type I: Critère Usuel. $H(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d = 0 \\ 1 & \text{si } d \neq 0 \end{cases}$	
Type IV: Critère a palier (adapté aux critères qualitatifs) $H(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q \\ \frac{1}{2} & \text{si } q < d \leq p \\ 1 & \text{si } p < d \end{cases}$	

$g_j(a)$ représente la performance de l'alternative 'a' au regard du critère 'j'. 'q' représente le seuil d'indifférence et 'p' représente le seuil de préférence triste.

Sous le logiciel Visual Promethee [24], il était possible d'obtenir un classement complet Promethee II (Tableau 5). Pour cela, trois contraintes supplémentaires (nombre d'actions à sélectionner, les incompatibilités entre les actions, le budget maximal disponible) ont été ajoutées car il y avait 15 alternatives et seulement 4 ont pu être sélectionnées simultanément, le budget maximal disponible était d'environ 549.200

Dinar Algériens. Ces contraintes ont été prises en compte à l'aide de la méthode Promethee V.

La contrainte du nombre d'actions à sélectionner est indiquée dans l'Eq. (7).

$$\sum_{i=1}^n x_i = 4 \tag{7}$$

Où 4 représente le nombre d'actions à sélectionner, et x_i est une variable binaire (0-1) associée à chaque a_i : $x_i = 1$ signifie que l'action a_i est sélectionnée alors que $x_i = 0$ signifie qu'elle ne l'est pas.

Les contraintes des incompatibilités entre les actions (A) sont indiquées dans l'Eq. (8), {Eq. (9)}, {Eq. (10)} et {Eq. (11)}.

$$A1 + A2 + A3 + A4 = 1 \tag{8}$$

$$A5 + A6 + A7 + A8 = 1 \tag{9}$$

$$A9 + A10 + A11 + A12 = 1 \tag{10}$$

$$A13 + A14 + A15 = 1 \tag{11}$$

La contrainte du budget maximal disponible est exprimée dans l'Eq. (12):

$$\sum_{i=1}^n b_i \times x_i \leq 549.200 \tag{12}$$

Le nombre de 594.000 représente le budget maximal disponible (en Dinar Algérien), et b_i correspond au coût d'investissement de chaque action a_i

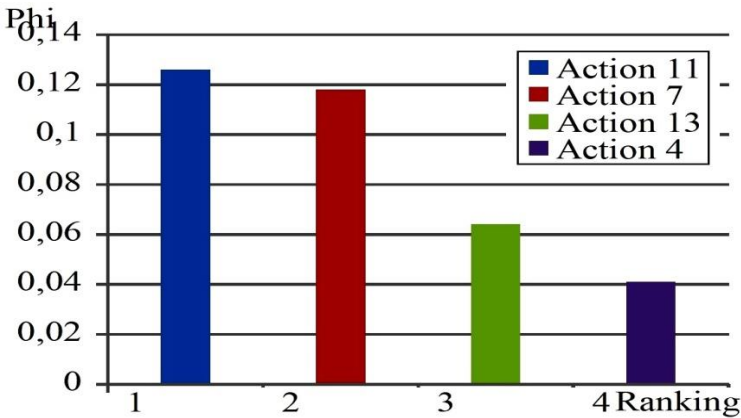


Fig. 2: Classement complet Promethee II sous contraintes

Les résultats démontrent (figure 2) que les actions A11 avec un flux net de 0.211, A7 avec un flux net de 0.148, action 13 avec un flux net 0.016 et A4 avec un flux net de -0.088 sont respectivement préférables à toutes les autres actions. Ces actions permettent de réduire de 60 % la consommation totale d'énergie du bâtiment tout en garantissant la préservation du bâtiment.

Comme indiqué sur la figure 3, les détails du Phi flux net permettent de mettre en évidence les bonnes et les faibles caractéristiques de chaque action avec une barre. Ces barres ont été colorées différemment pour différencier chaque critère au sein d'une même action. Chaque partie colorée exprime l'influence d'un critère sur le flux net de l'action. Les parties positives (en haut) correspondent à de bonnes caractéristiques

tandis que les parties négatives (en bas) correspondent à des faiblesses. La somme des parties positives et négatives d'une même action est égale au score Phi. Les actions ont été classées de gauche à droite selon le classement complet Promethee (sans les contraintes supplémentaires).

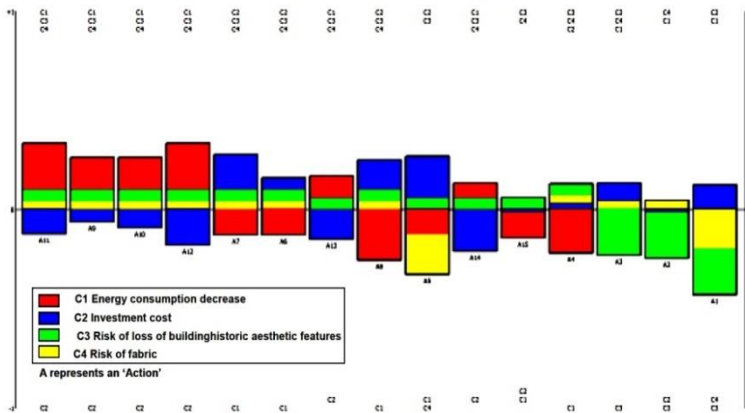


Fig. 3: Détails du flux net Phi pour toutes les actions

Comme illustré dans la figure 2, l'action (A11) présente de très bonnes caractéristiques, en ce qui concerne la réduction de la consommation énergétique (C1), de bonnes caractéristiques pour le risque de la perte des caractéristiques esthétiques du bâtiment (C3) et pour le risque de dommages structurels (C4). Par contre, elle présente de très mauvaises caractéristiques pour le coût de l'investissement (C2). Aussi, l'action (A7) présente de très bonnes caractéristiques au regard du coût de l'investissement (C2), de bonne caractéristique pour le risque de la perte des caractéristiques esthétiques du bâtiment (C3) et le risque de dommages structurels (C4).

Cependant elle présente de très mauvaises caractéristiques pour la réduction de la consommation énergétique (C1). L'action (A13) révèle de très bonnes caractéristiques en termes de réduction de la consommation énergétique (C1), de bonnes caractéristiques pour le risque de la perte des caractéristiques esthétiques du bâtiment (C3) et des caractéristiques très faibles pour le coût de l'investissement (C2).

Enfin l'action (A4) démontre de bonnes caractéristiques au regard du coût de l'investissement (C2), du risque de la perte des caractéristiques esthétiques du bâtiment (C3) et du risque de dommages structurels (C4). Néanmoins, elle révèle de très mauvaises caractéristiques concernant la réduction de la consommation énergétique (C1).

5. CONCLUSION

Le problème de la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie en Algérie est d'une importance cruciale pour réduire la consommation énergétique et préserver le patrimoine culturel. Il existe très peu d'étude concernant les méthodes et les techniques de rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie. La plupart des recherches se concentrent essentiellement sur les constructions nouvelles.

Cet article considère la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie comme une décision **complexe** impliquant différents critères, y compris les risques liés à la préservation du patrimoine. La valeur innovatrice de cet article est la proposition d'une méthode d'aide à la décision basée sur les méthodes Promethee afin de classer les

différentes solutions de rénovation thermique selon une base multicritères. La méthode prend en compte seulement les solutions d'isolation de l'enveloppe du bâtiment.

La méthode utilise Promethee II et Promethee V pour respectivement obtenir un classement complet des solutions, et introduire des contraintes supplémentaires. Les résultats montrent que la méthode fonctionne et qu'il est possible d'obtenir un classement complet des solutions de rénovation.

Les meilleures solutions de compromis sont respectivement l'isolation par-dessus de la toiture avec 15 cm polystyrènes expansé (A11), l'isolation extérieure de la façade secondaire et de la cour avec 10 cm de de fibre de bois (A7), l'installation de fenêtres double vitrage argent (A13), et l'isolation extérieure de la façade principale avec un enduit isolant chaux-chanvre de 6 cm (A4). Ces mesures permettent d'économiser jusqu'à 60 % de la consommation totale d'énergie d'un bâtiment tout en garantissant sa préservation.

La méthode proposée est universelle et peut toujours être appliquée pour la sélection de solutions d'isolation de l'enveloppe du bâtiment. Toutefois, la méthode proposée présente plusieurs limites. Elle nécessite de travailler sur un ensemble de solutions de rénovation thermique connues. Elle évalue chaque solution thermique individuellement, mais ne prend pas en compte la combinaison des solutions. La méthode ne prend pas en compte les incertitudes dues à l'évaluation des solutions. Pour de futures recherches, toutes ces limitations pourraient être prises en compte.

NOMENCLATURE

<u>AHP</u> : Analytical Hierarchy Process	<u>FAHP</u> : Fuzzy AHP
<u>ELECTRE</u> : Elimination and Choice Expressing the Reality	<u>COPRAS</u> : Complex Proportion Assessment
<u>MAUT</u> : Multi-Attribute Utility Theory	<u>SAW</u> : Simple Additive Weighting
<u>MCDA</u> : Multi Criteria Decision Analysis	<u>SMAA</u> : Stochastic Multi-criteria Acceptability Analysis
<u>PROMETHEE</u> : Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation	<u>TOPSIS</u> : Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

REFERENCES

- [1] B. Abdelkader, 'Lancement du nouveau programme d'efficacité énergétique en 2016', 2015, <http://www.carrefouralgerie.com/archive/pdf/2015/04/16-04-2015>.
- [2] A. Denker, S.M.K. El Hassar and S. Baradiy, 'Pour la Construction Eco-Energétique en Algérie', 2014.
- [3] A. Heraou, 'Evolution des Politiques de l'Habitat en Algérie, le L.S.P comme Solution à La Crise Chronique du Logement, Cas d'Etude La Ville de Chelghoum Laid', Université de Sétif, 2011.
- [4] 'Maison Paysanne de France', CETE de l'Est. ATHEBA. 2010. <http://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/07/ATHEBA-complet.pdf>.
- [5] M. Addab, 'Réhabilitation du Vieux Bâti: Diagnostic de plus de 300.000 logements', 2015. http://www.lequotidienoran.com/index.php?news=5214534&archive_date=2015-06-03.

- [6] J. Zagorskas, E. Zavadskas, Z. Turskis, M. Burinskiene, A. Blumberga, D. Blumberga, 'Thermal Insulation Alternatives of Historic Brick Buildings in Baltic Sea Region', Energy and Building, Vol. 78, pp. 35 – 42, 2014.
- [7] C. Macharis, J. Springael, K. De Brucker and A. Verbeke, 'Promethee and AHP: The design of Operational Synergies in Multicriteria Analysis: Strengthening Promethee with Ideas of AHP', European Journal of Operational Research, Vol. 153, N°1, pp. 307 - 317, 2004.
- [8] E Rey, 'Office Building Retrofitting Strategies: Multicriteria Approach of an Architectural and Technical Issue', Energy and Building, Vol. 36, N°4, pp. 367 – 372, 2004.
- [9] E. Rutman, C. Inard, A. Bailly and F. Allard, 'A Global Approach of Indoor Environment in an Air-Conditioned Office Room', Building and Environment, Vol. 40, N°1, pp. 29 – 37, 2005.
- [10] M. Thorel, 'Aide à la Décision Multicritère pour la Prescription de Scénariis d'Amélioration Energétique via une Approche Globale', Université Savoie France; 2006.
- [11] C.A. Roulet, F. Florentzou, H.H. Labben, M. Santamouris, I. Koronaki, E. Dascalaki and V. Richalet, 'ORME: A Multicriteria Rating Methodology for Buildings', Building and Environment, Vol. 37, N°6, pp. 579 - 586, 2002.
- [12] P. Blondeau, M. Spérandio and F. Allard, 'Multicriteria Analysis of Ventilation in Summer Period', Building and Environment, Vol. 37, N°2, pp. 165 – 176, 2002.
- [13] M. Medineckiene and F. Björk, 'Owner Preferences Regarding Renovation Measures – The Demonstration of Using Multi-Criteria Decision Making', Journal of Civil Engineering And Management, Vol. 17, N°2, pp. 284 – 295, 2011
- [14] K. Alanne, 'Selection of Renovation Actions using Multi-Criteria "Knapsack" Model', Automation in Construction, Vol. 13, N°3, pp. 377 – 391, 2004.
- [15] K. Kontu, S. Rinne, V. Olkkonen, R. Lahdelma and P. Salminen, 'Multicriteria Evaluation of Heating Choices for a New Sustainable Residential Area', Energy and Building, Vol. 93, pp. 169 – 179, 2015.
- [16] G. Zheng, Y. Jing, H. Huang, X. Zhang and Y. Gao, 'Application of Life Cycle Assessment (LCA) and Extenics Theory for Building Energy Conservation Assessment', Energy Vol. 34, N°11, pp. 1870 – 1879, 2009.
- [17] J.P. Brans, 'Promethee V: MCDM Problems with Segmentation Constraints', Information Systems and Operational Research, Vol. 30, N°2, pp. 85 - 96, 1992.
- [18] Y. Rosenfeld and I.M. Shohet, 'Decision Support Model for Semi-Automated Selection of Renovation Alternatives', Automation in Construction, Vol. 8, N°4, pp. 503 – 510, 1999.
- [19] Solar Energy Lab, University of Wisconsin-Madison, 'TRANSYS 16', 2005.
- [20] The Fraunhofer Institute for Building Physics, WUFI light 5.3.
- [21] H.M. Künzle, 'Effect of Interior and Exterior Insulation on the Hygrothermal Behavior of Exposed Walls', Matériaux et Constructions, Vol. 31, N°2, pp. 99 – 103, 1998.
- [22] J.P. Oliva and S. Courgey, 'L'isolation Thermique Ecologique, Conception Matériaux et Mise en Oeuvre', Ed. France: terre vivante, 2010.
- [23] J.P. Brans, P. Vincke and B. Mareschal, 'How to Select and How to Rank Projects: the Promethee Method', European Journal of Operational Research, Vol. 24, N°2, pp. 228 – 238, 1986.
- [24] B. Mareschal, 'The Visual Promethee', Academic Edition, VP Solutions, 2012.