



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem

Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique

Département de Mathématiques et Informatique

Filière : Informatique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de **Master en Informatique**

Option : **Réseaux et Systèmes**

Utilisation des méthodes d'aide à la décision multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments

Réalisé par :

Bouhenni Mohammed Elamin

Benaichouba Abdelkader

Encadré par :

Mr. Laaredj Adnan

Co-Encadré par :

Mr. Sabir Mohammedi Taieb

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

En premier lieu, nous exprimons notre profonde gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits, Sa guidance et Sa miséricorde infinie. Que Son aide et Sa bénédiction nous accompagnent à chaque étape de notre vie.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à M. Laaredj Adnan, Enseignant et Chef de spécialité Réseaux et Systèmes à la Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, pour son encadrement de qualité, sa disponibilité constante, et la richesse de ses enseignements. Son expertise dans le domaine des technologies, des réseaux et de l'informatique en général a grandement contribué à notre formation tout au long de ce projet. Sa confiance, ses conseils avisés et son accompagnement bienveillant nous ont permis d'évoluer dans un cadre professionnel particulièrement favorable à la réussite de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur Sabir Mohammadi Taieb, doctorant, pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail, ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils techniques.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement M. Mohammed Seddiki, Docteur en Informatique, pour ses encouragements, son soutien, ainsi que la pertinence de ses recherches, qui nous ont été d'une grande utilité.

Enfin, nous adressons un remerciement tout particulier à nos mères et à nos familles respectives pour leur soutien moral indéfectible, leur patience, et leur appui matériel tout au long de notre parcours. Leur présence et leurs encouragements ont été essentiels à la concrétisation de ce mémoire.

Résumé

Le secteur du bâtiment constitue aujourd'hui le principal consommateur d'énergie à l'échelle mondiale. En région méditerranéenne, et plus particulièrement en Algérie, ce constat s'aggrave du fait d'une conjoncture économique difficile, des engagements climatiques croissants, de la vétusté du parc immobilier et du non-respect, dans de nombreuses constructions récentes, des normes d'isolation thermique. À cela s'ajoutent les risques liés à la préservation du patrimoine bâti, tels que la dégradation des caractéristiques esthétiques ou encore l'apparition de dommages structurels (murs, planchers, toitures) dus à l'humidité. Dans ce contexte, la réduction de la consommation énergétique des bâtiments devient une priorité incontournable, que ce soit par la construction de bâtiments neufs à haute performance énergétique ou par la rénovation du bâti existant. Cependant, la recherche de solutions techniques optimales s'avère particulièrement complexe, dans la mesure où elle doit concilier des critères économiques, environnementaux et sociétaux tout en tenant compte d'une grande diversité de paramètres. Notre analyse des approches d'optimisation multicritère met en évidence plusieurs limites récurrentes, notamment des temps de calcul élevés et des difficultés à assurer la convergence vers des solutions globalement optimales. Ce mémoire propose une démarche méthodologique innovante reposant sur l'usage structuré et intelligent des méthodes d'aide à la décision multicritère. L'objectif est de surmonter les limitations des techniques classiques et de contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, en réponse aux enjeux majeurs auxquels l'Algérie est aujourd'hui confrontée.

Mots-clés : Rénovation thermique, Aide à la décision multicritère, efficacité énergétique, TOPSIS.

Abstract

The building sector currently constitutes the primary energy consumer on a global scale. In the Mediterranean region, and particularly in Algeria, this situation is exacerbated by challenging economic circumstances, increasing climate commitments, the obsolescence of the building stock, and the non-compliance with thermal insulation standards in numerous recent constructions. Additionally, risks associated with the preservation of built heritage emerge, such as the deterioration of aesthetic characteristics and the occurrence of structural damage (walls, floors, roofs) caused by humidity. Within this context, reducing the energy consumption of buildings becomes an unavoidable priority, whether through the construction of new high-energy-performance buildings or through the renovation of existing structures. However, the pursuit of optimal technical solutions proves particularly complex, insofar as it must reconcile economic, environmental, and societal criteria while accounting for a vast diversity of parameters. Our analysis of multi-criteria optimization approaches highlights several recurrent limitations, notably

elevated computation times and difficulties in ensuring convergence toward globally optimal solutions. This dissertation proposes an innovative methodological approach based on the structured and intelligent utilization of multi-criteria decision-making methods. The objective is to overcome the limitations of conventional techniques and contribute to the enhancement of energy efficiency in the building sector, in response to the major challenges that Algeria currently faces.

Keywords : Thermal renovation, Multi-criteria decision aid, energy efficiency, TOPSIS.

Table des matières

Introduction générale	10
1 Problématiques énergétiques, économiques et environnementales des bâtiments et rénovation	12
1.1 Introduction :	12
1.2 Contexte énergétique, économique et environnemental	12
1.2.1 À l'échelle internationale	12
1.2.2 À l'échelle nationale (Algérie)	14
1.3 Réglementation thermique en Algérie	16
1.4 Problématique d'aide à la décision multicritère	17
1.4.1 Définition d'un problème d'aide à la décision	17
1.4.2 Variables d'étude	18
1.5 Conclusion	19
2 Enjeux et Critères de la Décision Multicritère dans le Domaine de l'Énergie Bâtiminaire	20
2.1 Introduction	20
2.2 Structure générale d'un problème multicritère	20
2.3 Typologie des critères de décision	22
2.4 Familles de méthodes multicritères	23
2.4.1 Méthodes de type agrégation de scores	23
2.4.2 Méthodes basées sur la distance à une solution idéale	25
2.4.3 Méthodes de surclassement	27
2.4.4 Méthodes hiérarchiques	28
2.5 Critères de choix d'une méthode AMCD	30
2.5.1 Caractéristiques du problème	30
2.5.2 Caractéristiques des données	31
2.5.3 Attentes et contraintes du décideur	31
2.5.4 Tableau comparatif des méthodes	32
2.5.5 Recommandations pour le domaine de l'efficacité énergétique	32
2.5.6 Choix méthodologique retenu dans cette étude	32
2.6 Conclusion	33
3 Modèles de Décision Multicritère : Étude de TOPSIS, ELECTRE et PROMÉTHÉE	35
3.1 Introduction	35
3.2 Problématique d'aide à la décision multicritère	36
3.2.1 Définition d'un problème d'aide à la décision	36
3.2.2 Formulation d'un problème d'aide à la décision	36
3.3 Présentation des méthodes AMCD	36
3.3.1 Méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	37
3.3.2 Méthode ELECTRE (Élimination Et Choix Traduisant la Réalité)	38

3.3.3	Méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)	42
3.4	Application de l'AMCD à l'efficacité énergétique des bâtiments	44
3.4.1	Études existantes :	44
3.4.2	Analyse des résultats et discussion de leur impact	45
3.5	Technologies Informatiques pour l'Efficacité Énergétique	45
3.5.1	Systèmes de gestion de l'énergie	45
3.5.2	Intégration avec les méthodes AMCD	46
3.6	Conclusion	46
4	Application des méthodes multicritères à l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments	48
4.1	Introduction	48
4.2	Validation des critères par la Technique du Groupe Nominal (TGN)	49
4.2.1	Justification méthodologique	49
4.2.2	Contexte d'application et composition du groupe d'experts	49
4.2.3	Déroulement du processus TGN	49
4.2.4	Résultats obtenus	51
4.2.5	Discussion et implications	51
4.3	Construction de la matrice de performance	53
4.3.1	Définition et rôle de la matrice de performance	53
4.3.2	Étapes méthodologiques de construction	53
4.3.3	Analyse de la matrice	54
4.3.4	Qualité et fiabilité de la matrice	55
4.3.5	Préparation à l'analyse multicritère	55
4.4	Pondération des critères	55
4.4.1	Présentation de la méthode MEREC	55
4.4.2	Application au cas d'étude	56
4.4.3	Analyse par catégorie de critères	56
4.4.4	Discussion et implications	57
4.5	Application des méthodes multicritères	57
4.5.1	Méthode ELECTRE I	58
4.5.2	Méthode PROMÉTHÉE II	58
4.5.3	Méthode TOPSIS	58
4.5.4	Méthode SAW (Simple Additive Weighting)	59
4.6	Visualisation des résultats et outils utilisés	59
4.6.1	Outils utilisés pour la visualisation	59
4.6.2	Visualisation des performances (PROMÉTHÉE II, TOPSIS, ELECTRE I)	61
4.6.3	Analyse GAIA – Visualisation interactive des alternatives	63
4.7	Analyse Comparative Multi-Dimensionnelle	65
4.8	Conclusion	67
	Conclusion générale	68
	Annexe 1 : Application de la méthode MEREC	74
.1	Introduction à la méthode MEREC	74
.2	Principes fondamentaux	74
.3	Données du cas d'étude	74

.4	Extraits de calculs	74
.4.1	Scores globaux	75
.4.2	Distances de Spearman	75
.5	Poids normalisés finaux	75
.6	Synthèse par catégorie	75
.7	Conclusion	75
A	Annexe 2 : Visualisation GAIA interactive	76
	Annexe 2 : Visualisation GAIA interactive	76

Table des figures

1.1	Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2014)	13
1.2	Répartition de la consommation d'énergie en Algérie	14
1.3	Consommation finale du secteur résidentiel en Algérie Par Sonelgaz en 2022	15
1.4	descriptif des déperditions thermiques en hiver et des apports en été conformément aux DTR C3.2 et C 3.4	17
2.1	La structure d'un problème multicritère	21
2.2	Typologie des critères de décision	23
2.3	Types De Méthodes D'agrégation	24
2.4	Tableau comparatif des méthodes	32
4.1	Le groupe de 10 experts pour le processus de validation TGN	49
4.2	Les critères identifiés avec le processus TGN	51
4.3	Construction de la matrice de performance	54
4.4	Résultats des pondérations finales avec l'algorithme MEREC	56
4.5	Analyse par catégorie de critères	57
4.6	Interface principale de l'outil d'aide à la décision multicritère – menu de sélection des modules et des méthodes.	60
4.7	Résultat visual de la méthode PROMÉTHÉE II	61
4.8	Résultat visual de la méthode TOPSIS	62
4.9	Résultat visual de la méthode ELECTRE I	63
4.10	Représentation des alternatives de construction durable dans l'espace PROMETHEE	64
A.1	Capture du plan GAIA interactif — alternatives dans l'espace PROMÉTHÉE	76

Liste des tableaux

4.1	Comparaison multidimensionnelle des méthodes multicritères	66
4.2	Synthèse comparative des classements par méthode	67
3	Poids finaux des critères selon MEREC	75

Introduction générale

La crise énergétique mondiale, conjuguée aux impératifs croissants de durabilité environnementale, place aujourd’hui le secteur du bâtiment au centre des préoccupations internationales. En tant que principal consommateur d’énergie finale et contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre, ce secteur constitue à la fois une source importante de problématiques écologiques et un levier stratégique pour l’atteinte des objectifs de transition énergétique. Dans un monde confronté à la raréfaction des ressources, aux effets du changement climatique et à une urbanisation galopante, l’amélioration de l’efficacité énergétique des bâtiments représente un défi majeur, mais également une formidable opportunité d’innovation et de transformation.

Dans ce contexte global, l’Algérie fait face à des enjeux particulièrement complexes. D’une part, la pression démographique, la croissance urbaine rapide et la demande accrue en confort thermique accentuent la consommation énergétique dans le secteur résidentiel. D’autre part, le parc immobilier national se caractérise par une grande hétérogénéité : il combine des constructions récentes souvent peu conformes aux exigences thermiques, et un patrimoine ancien hérité de la période coloniale, dont la valeur historique et architecturale exige des interventions de rénovation respectueuses et techniquement adaptées. Ce patrimoine, composé notamment d’édifices de styles baroque français, haussmannien et victorien, conçus par des figures marquantes de l’architecture moderne comme Bernard Zehruss, Louis Miquel ou Fernand Pouillon, pose des défis spécifiques de conservation et de mise à niveau énergétique.

Par ailleurs, les pathologies structurelles que présentent de nombreux bâtiments – infiltrations, humidité, dégradations des parois – se trouvent aggravées par l’absence de normes contraignantes et d’une culture réglementaire établie en matière de performance thermique. Alors que de nombreux pays ont institué des politiques thermiques dès les années 1970, l’Algérie enregistre encore un retard notable, tant dans la mise en œuvre de textes normatifs que dans la généralisation des bonnes pratiques de construction durable. Ce décalage se traduit par une surconsommation énergétique préoccupante, une inefficacité des dispositifs passifs de régulation thermique et une dépendance persistante aux énergies fossiles subventionnées.

Face à ce diagnostic, il devient indispensable d’explorer de nouvelles approches capables d’appréhender la complexité intrinsèque de la décision énergétique dans le bâtiment. La multiplicité des paramètres à prendre en compte – économiques, environnementaux, sociaux, techniques et patrimoniaux – rend inopérantes les méthodes traditionnelles de sélection unidimensionnelles. C’est dans cette optique que les méthodes d’aide multicritère à la décision (AMCD) apparaissent comme des outils puissants et adaptés. Leur capacité à structurer des problèmes complexes, à intégrer des critères hétérogènes, à modéliser les préférences du décideur et à fournir des classements robustes, en fait des alliés précieux pour orienter les choix techniques en contexte incertain.

Les méthodes telles que PROMÉTHÉE, ELECTRE ou AHP, utilisées dans ce travail, offrent des cadres d’analyse rigoureux qui prennent en compte les spécificités du contexte algérien : climat contrasté entre zones bioclimatiques (littoral, hauts plateaux, Sahara), diversité des matériaux de construction, contraintes économiques, mais aussi exigences culturelles liées aux modes d’habitation. Elles permettent ainsi d’évaluer des

alternatives non seulement sur leurs performances thermiques ou économiques, mais aussi sur leur faisabilité, leur acceptabilité sociale, et leur contribution à la préservation de l'identité architecturale.

L'enjeu n'est donc pas uniquement technique. Il est également stratégique, territorial et culturel. En mobilisant des méthodes d'analyse multicritère rigoureuses, il devient possible de concevoir des référentiels de décision adaptés à chaque région, de développer des outils d'aide accessibles aux acteurs locaux (collectivités, maîtres d'œuvre, bureaux d'études), et d'accompagner la transition vers une architecture bioclimatique et responsable. Ce mémoire s'inscrit dans cette ambition : il vise à démontrer que la rationalisation de la décision énergétique dans le bâtiment passe nécessairement par l'intégration de démarches multicritères, porteuses d'intelligence méthodologique, de pertinence contextuelle, et d'applicabilité concrète.

Chapitre 1

Problématiques énergétiques, économiques et environnementales des bâtiments et rénovation

1.1 Introduction :

Depuis l'exploitation intensive du charbon, moteur de la révolution industrielle au XIXe siècle, la consommation mondiale d'énergie primaire n'a cessé d'augmenter à un rythme soutenu. Cette croissance énergétique s'est accompagnée de conséquences environnementales préoccupantes, incitant la communauté internationale à réagir. Des accords majeurs, tels que le Protocole de Kyoto en 1997 ou l'Accord de Paris lors de la COP21 en 2015, témoignent de cette prise de conscience collective.

Dans ce contexte, le secteur du bâtiment apparaît comme l'un des leviers les plus prometteurs pour atteindre les objectifs énergétiques, économiques et environnementaux fixés à l'échelle mondiale. Il est aujourd'hui considéré comme un domaine stratégique capable d'apporter des améliorations significatives en matière de performance énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ce chapitre introductif a pour objectif de présenter le cadre général dans lequel s'inscrit notre étude. Il établit un lien entre les problématiques énergétiques, économiques et environnementales actuelles et le rôle que peut jouer le secteur du bâtiment pour y répondre. L'analyse s'articule autour de trois niveaux d'échelle : mondial, régional (zone méditerranéenne, notamment l'Algérie) et national.

Dans un second temps, nous analyserons les principales mesures proposées par les réglementations thermiques ainsi que les dispositifs d'évaluation existants en Algérie, notamment à travers les labels énergétiques. Enfin, nous proposerons un paramétrage des différentes solutions techniques adaptées à ces enjeux.

1.2 Contexte énergétique, économique et environnemental

1.2.1 À l'échelle internationale

L'accès à l'énergie constitue un enjeu majeur pour les sociétés contemporaines. La consommation mondiale d'énergie primaire a plus que doublé en quatre décennies, passant de 6 106 Mtep en 1973 à 13 371 Mtep en 2012 [46]. Cette croissance a été largement portée par l'usage massif des énergies fossiles, qui représentent aujourd'hui plus de 80 % de la consommation mondiale. Le pétrole en constitue la principale source (31,4 %), suivi du charbon (29 %) et du gaz naturel (21,3 %), tandis que les énergies

renouvelables couvrent environ 13,5 % des besoins et le nucléaire 4,8 % [13].

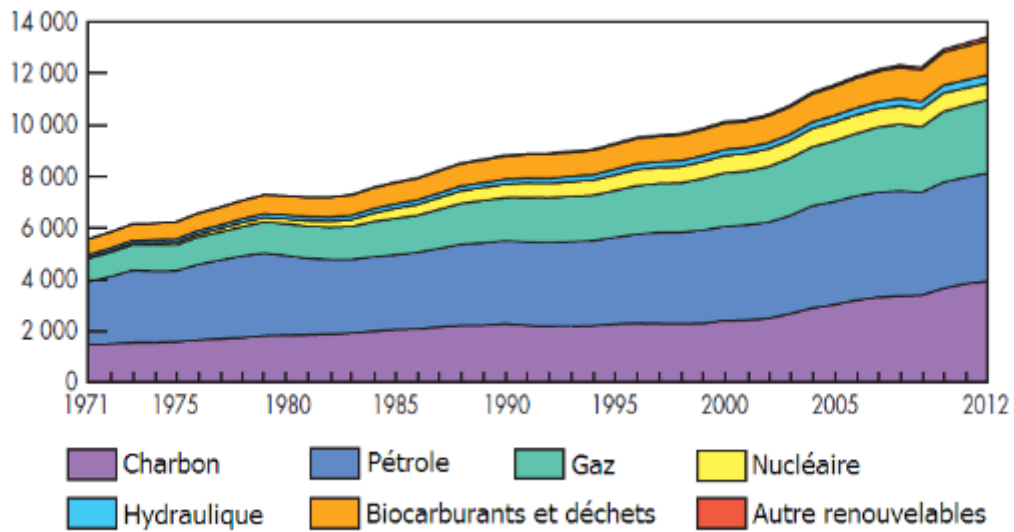


FIGURE 1.1 – Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA, 2014)

Cette dépendance aux énergies fossiles est préoccupante à plusieurs titres : leur approvisionnement est incertain, elles sont en voie d'épuisement et surtout, elles sont responsables d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre. Depuis 1973, ces émissions ont plus que doublé, accompagnant une croissance économique mondiale continue (hors crise de 2009). Si aucune transition majeure n'est amorcée, les prévisions estiment une hausse de la température moyenne mondiale de près de 6 °C d'ici 2100, avec des conséquences potentiellement catastrophiques : inondations, sécheresses, événements climatiques extrêmes [39].

Le secteur du bâtiment représente à lui seul environ 35 % de la consommation d'énergie finale, devant l'industrie (31 %) et les transports (30 %). Il est également à l'origine de près de 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, ce qui en fait un domaine prioritaire pour la transition énergétique [18].

Pourtant, ce secteur recèle un potentiel d'économie d'énergie estimé à 40 %, à travers des mesures à la fois performantes et économiquement viables. Parmi celles-ci, l'amélioration de l'enveloppe thermique des bâtiments (isolation des murs, toitures, planchers) permettrait de réduire jusqu'à 70 % de la consommation énergétique tout en augmentant le confort thermique des occupants. [7]

À cela s'ajoutent d'autres leviers [39] :

- Le remplacement des systèmes de chauffage obsolètes par des équipements plus performants (chaudières à condensation, pompes à chaleur, systèmes hybrides).
- L'optimisation de la ventilation (notamment les systèmes à double flux avec récupération de chaleur).
- L'intégration des énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques, géothermie, biomasse), qui renforce l'autonomie énergétique et réduit l'empreinte carbone des bâtiments

Ces solutions nécessitent une approche globale de la rénovation, mobilisant plusieurs corps de métier et tenant compte des spécificités architecturales et climatiques. Ainsi, les politiques énergétiques doivent être adaptées aux contextes nationaux, en fonction du potentiel local, du mix énergétique disponible et des priorités stratégiques propres à chaque pays.

1.2.2 À l'échelle nationale (Algérie)

L'Algérie se distingue comme un acteur clé dans le panorama énergétique mondial, occupant le rang de 10 producteur de gaz naturel et jouant un rôle prépondérant au sein de l'OPEP. Son économie demeure fortement tributaire des hydrocarbures, qui constituent environ 95 % de ses exportations et 60 % des recettes budgétaires nationales. Cette dépendance expose le pays aux aléas des marchés énergétiques internationaux, comme l'a illustré la crise économique de 2014, suite à l'effondrement des cours pétroliers, qui a sérieusement entamé les réserves de change algériennes [54].

La consommation énergétique intérieure affiche une progression soutenue, avec une hausse annuelle moyenne de 7 % durant les dix dernières années. Cette dynamique s'explique notamment par la démocratisation des climatiseurs, l'expansion du parc automobile, le déploiement du réseau gazier et l'urbanisation galopante. Dans cette configuration, le secteur résidentiel se révèle particulièrement gourmand en énergie, absorbant près de 42 % de la consommation totale, devant les transports (36 %) et l'industrie (22 %) [39].

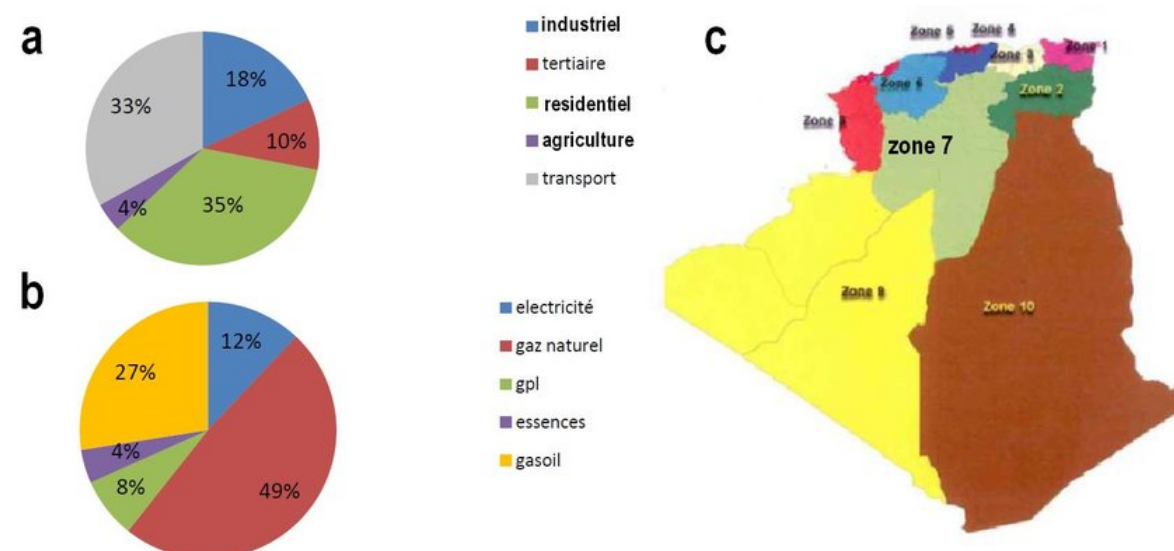


FIGURE 1.2 – Répartition de la consommation d'énergie en Algérie

Les bâtiments représentent le poste de consommation énergétique le plus important en Algérie. Selon les dernières études de l'APRUE, la consommation énergétique du parc immobilier algérien atteint des niveaux alarmants, dépassant de 40 à 50 % les standards internationaux pour des climats similaires. Cette surconsommation s'explique principalement par une conception architecturale inadaptée aux conditions climatiques locales et par l'absence quasi-totale d'isolation thermique dans la majorité des constructions. Comme le constatent amèrement les spécialistes du secteur : « Nos

bâtiments sont conçus comme si l'énergie était une ressource inépuisable, alors même que nous savons qu'elle constitue un enjeu stratégique pour l'avenir du pays » [14].

Pour relever ces défis, les autorités algériennes ont lancé une stratégie de transition énergétique ambitieuse. Le Programme National des Énergies Renouvelables de 2015 projette l'installation de 22 000 MW de capacités renouvelables d'ici 2030, principalement d'origine solaire (13 575 MW) et éolienne (5 010 MW). Ces ambitions ont été rehaussées en 2020, visant désormais une proportion de 27 % d'énergies renouvelables dans le bouquet électrique national [14].

La rénovation thermique des bâtiments existants constitue un axe prioritaire dans cette stratégie nationale. Le programme de réhabilitation énergétique lancé en 2019 vise à intervenir sur plus de 100 000 logements d'ici 2030, avec des mesures d'isolation des façades, de remplacement des menuiseries et de modernisation des systèmes de chauffage et de climatisation. Les premiers projets pilotes réalisés à Alger, Oran et Constantine ont déjà montré des résultats spectaculaires, avec des réductions de consommation énergétique allant jusqu'à 65 % dans certains cas. Cette approche de rénovation thermique globale pourrait transformer radicalement le paysage énergétique algérien si elle était généralisée à l'ensemble du parc immobilier [60].

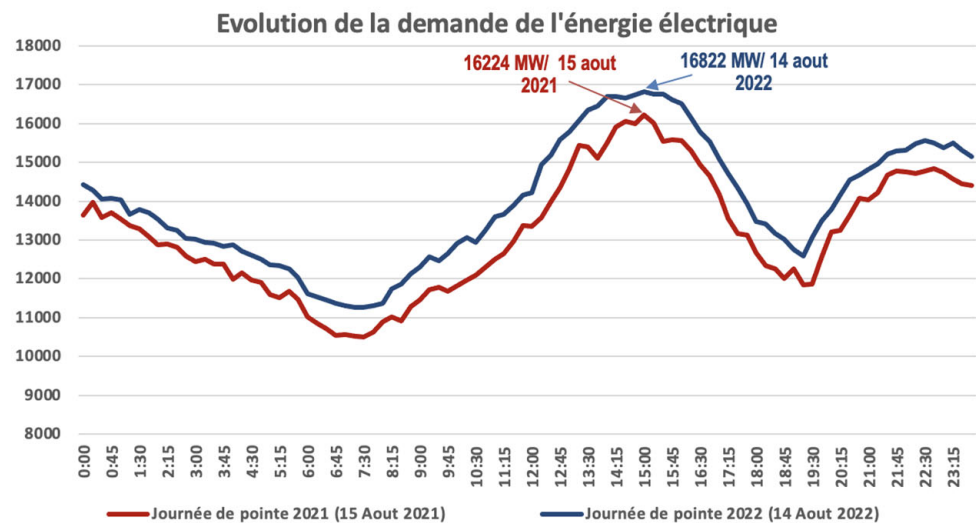


FIGURE 1.3 – Consommation finale du secteur résidentiel en Algérie Par Sonelgaz en 2022

La mosaïque climatique algérienne, allant des zones méditerranéennes au nord aux régions désertiques au sud, en passant par les hauts plateaux semi-arides, nécessite des solutions de rénovation thermique adaptées. Dans les wilayas septentrionales, où alternent hivers humides et étés torrides, la priorité doit être accordée à l'isolation des façades et à l'installation de protections solaires efficaces. Dans les territoires sahariens,

où le mercure peut grimper au-delà de 45 °C en été, les techniques ancestrales de rafraîchissement passif peuvent s'associer aux technologies contemporaines pour diminuer substantiellement les besoins en climatisation.

Sur le front réglementaire, l'Algérie a consolidé son arsenal normatif avec l'instauration en 2016 d'une nouvelle réglementation thermique (DTR C3-2) établissant des critères minimaux d'isolation thermique selon les zones climatiques. Ce dispositif s'accompagne d'un système de certification énergétique des bâtiments en cours de déploiement. Les pouvoirs publics ont également introduit des avantages fiscaux pour les matériaux isolants produits localement et les équipements écoénergétiques, comprenant notamment une exonération de TVA pour certains produits comme les chauffe-eaux solaires et les panneaux photovoltaïques [14].

L'impact économique de la rénovation thermique dépasse largement le cadre de la simple économie d'énergie. Une étude récente du ministère de l'Habitat estime que chaque dinar investi dans la rénovation énergétique génère environ 3,5 dinars de bénéfices socio-économiques, à travers la création d'emplois, la réduction des subventions énergétiques et l'amélioration de la santé publique. Le secteur de la rénovation thermique pourrait créer jusqu'à 50 000 emplois directs et indirects à l'horizon 2030, constituant ainsi un véritable levier de développement économique.

L'Algérie s'oriente également vers la valorisation de matériaux de construction écologiques adaptés au contexte local. Des travaux de recherche explorent l'utilisation de ressources biosourcées comme la paille, le liège (dont l'Algérie est le troisième producteur mondial) et les fibres de palmier dattier. Ces démarches visent à réduire l'empreinte carbone du secteur tout en exploitant les richesses naturelles du pays et en favorisant une économie circulaire dans l'industrie des matériaux de construction.

Dans le domaine environnemental, l'Algérie s'est engagée, dans le cadre de l'Accord de Paris, à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7 % d'ici 2030, avec une possibilité d'atteindre 22 % moyennant un soutien international approprié. Le secteur du bâtiment est considéré comme un levier majeur pour réaliser cet objectif. Selon les projections du ministère de l'Environnement, une généralisation des pratiques de rénovation thermique à l'échelle nationale permettrait d'éviter l'émission de 9 millions de tonnes de CO₂ annuellement, soit l'équivalent de retirer plus de 2 millions de voitures de la circulation [18].

1.3 Réglementation thermique en Algérie

L'Algérie est le premier pays du Maghreb à avoir instauré une réglementation thermique des bâtiments, en vigueur depuis 1997, et rendue obligatoire à partir de l'an 2000. Cette réglementation vise à encadrer les besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments, en définissant deux méthodes principales de calcul des besoins thermiques (D.T.R. C 3-2, 1997) :

- Le calcul statique en thermique du bâtiment : les concepteurs doivent s'assurer que les déperditions thermiques par transmission du logement sont inférieures à des valeurs de référence.
- Le calcul dynamique en régime variable : les concepteurs comparent les besoins dynamiques de chauffage (B_{dyn}), obtenus à l'aide d'un logiciel de simulation thermique dynamique, aux déperditions de base (DB), selon les règles suivantes :
 - Si $B_{dyn} \geq DB$, il faut retenir DB ;

- Si $B_{\text{dyn}} < DB$, deux cas peuvent se présenter :
 - Si $B_{\text{dyn}} \leq 0,8 \times DB$, il faut retenir $0,8 \times DB$;
 - Sinon, il convient de retenir B_{dyn} .

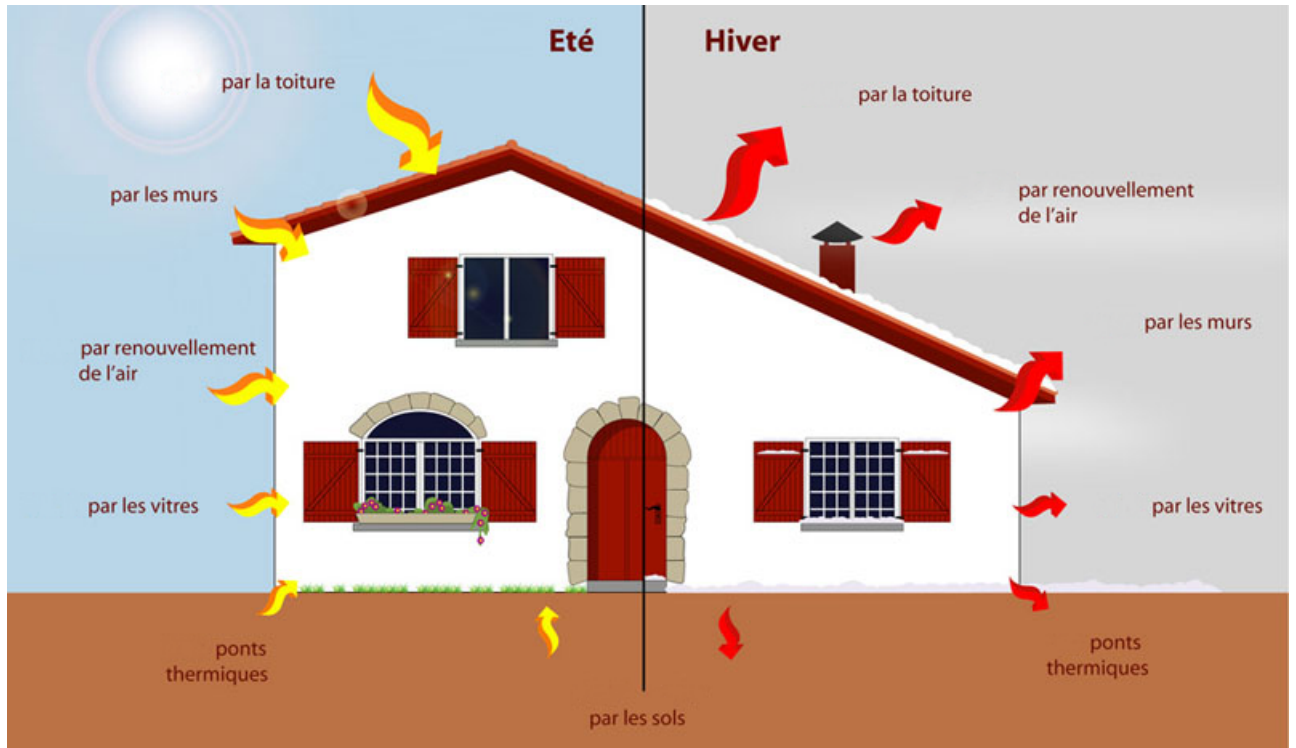


FIGURE 1.4 – descriptif des déperditions thermiques en hiver et des apports en été conformément aux DTR C3.2 et C 3.4

En ce qui concerne les besoins en climatisation, la réglementation propose une méthode de calcul fondée sur les apports calorifiques des bâtiments (D.T.R. C 3-4, 1997). Il est requis de vérifier que la somme des apports calorifiques, issus à la fois des parois vitrées et des parois opaques, soit inférieure aux apports calorifiques de référence. Ces derniers sont calculés pour le mois de juillet à 15 h, avec une température sèche intérieure de 27°C , en fonction de la zone climatique considérée.

1.4 Problématique d'aide à la décision multicritère

1.4.1 Définition d'un problème d'aide à la décision

Par définition, l'aide à la décision regroupe l'ensemble des techniques permettant de choisir la meilleure solution parmi plusieurs alternatives, en fonction de critères préétablis. Ces approches sont considérées comme des outils d'appui aux décideurs, car elles permettent d'identifier les solutions les plus pertinentes tout en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs. En général, une méthode d'aide à la décision suit les étapes suivantes : [63]

- L'identification du problème ;
- L'identification et la définition des variables d'étude ;

- La définition des objectifs ;
- La gestion des conflits entre critères (par exemple : le confort thermique intérieur face aux besoins énergétiques, ou encore la consommation énergétique versus les coûts d'investissement) ;
- L'identification des solutions de compromis et l'analyse de leurs conséquences ;
- La discussion et l'analyse des résultats obtenus ;
- L'aide effective à la prise de décision.

La formulation d'un problème d'aide à la décision repose sur trois éléments fondamentaux : l'espace de recherche, l'espace des objectifs, et la relation qui les lie.

- L'espace de recherche regroupe l'ensemble des solutions envisageables, définies à partir des plages de variation des paramètres intrinsèques du problème. Le nombre et la nature de ces variables (continues ou discrètes) déterminent la dimension et la complexité de cet espace.
- L'espace des objectifs est déterminé par les critères de décision. Ces derniers sont représentés sous forme de fonctions mathématiques permettant d'évaluer, de façon quantitative ou qualitative, les performances des différentes solutions. Le nombre de critères détermine la dimension de cet espace [46].

Dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments, l'espace de recherche est structuré autour de variables d'étude telles que les caractéristiques de l'enveloppe, les systèmes de ventilation ou encore les dispositifs de production d'énergie. Les critères, quant à eux, sont fixés par les décideurs. Pour la conception de bâtiments durables, les critères économiques, sociaux et environnementaux doivent impérativement être pris en compte.

La relation entre ces deux espaces s'établit à travers des méthodes et outils permettant la prédiction du comportement énergétique du bâtiment, ainsi que les calculs économiques et environnementaux associés.

1.4.2 Variables d'étude

La conception de bâtiments à faible consommation énergétique peut s'appuyer sur une stratégie passive ou active, notamment par l'intégration de systèmes de production d'énergie. Le choix des paramètres à optimiser constitue un sujet majeur de recherche dans ce domaine.

Dans le cadre de cette étude, nous avons sélectionné les variables jugées les plus influentes sur la performance énergétique du bâtiment. Il est à noter que la masse de l'enveloppe n'est pas considérée comme variable ici. Cette décision repose sur le fait que, dans le contexte algérien de construction neuve, les matériaux de structure sont généralement identiques, tandis qu'en réhabilitation en Europe, la structure porteuse du bâtiment est rarement modifiée.

Ces paramètres peuvent être de nature continue ou discrète. L'utilisation de variables discrètes rend le problème non convexe et discontinu, ce qui complique sa résolution mathématique (Hemker et al., 2008). De plus, le temps de calcul et le volume de données nécessaires augmentent de manière exponentielle avec le nombre de paramètres discrets. Il est donc souvent recommandé de privilégier les variables continues lors des processus d'optimisation [1].

1.5 Conclusion

Le secteur du bâtiment représente aujourd'hui le principal consommateur d'énergie à l'échelle mondiale. Dans le contexte méditerranéen, où les contraintes économiques coexistent avec les impératifs de lutte contre le changement climatique, la réduction de la consommation énergétique des bâtiments s'impose comme une priorité stratégique, aussi bien pour les constructions neuves que pour la réhabilitation du parc existant.

Cependant, cette ambition se heurte à une complexité croissante lorsqu'il s'agit d'identifier des solutions techniques optimales répondant simultanément à des critères économiques, environnementaux et sociétaux. La multiplicité des paramètres à prendre en compte rend cette tâche particulièrement difficile.

Face à cette problématique, nous avons mené une analyse approfondie des différentes approches d'optimisation multicritère. Il en ressort plusieurs limitations majeures, notamment des temps de calcul très élevés et des difficultés à assurer une convergence efficace vers des solutions réellement optimales au sens global.

Dans une optique de construction ou de rénovation durable, il devient essentiel d'élaborer des solutions intégrant l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, de la conception à la démolition, afin d'optimiser la gestion des ressources et de réduire les impacts environnementaux. Néanmoins, la complexité des interactions entre les multiples variables techniques, économiques et environnementales rend difficile l'identification de compromis satisfaisants parmi l'ensemble des solutions envisageables.

Cela souligne la nécessité de développer des outils d'aide à la décision multicritère performants, capables de fournir des résultats fiables en un temps réduit. De tels outils sont indispensables pour accompagner les concepteurs et les décideurs dans le processus de choix stratégique, en favorisant des décisions éclairées, rationnelles et fondées sur une analyse exhaustive des alternatives disponibles.

Chapitre 2

Enjeux et Critères de la Décision Multicritère dans le Domaine de l'Énergie Bâtiminaire

2.1 Introduction

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue un défi majeur dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement durable. La nécessité de réduire la consommation énergétique, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, tout en assurant un confort optimal aux occupants, impose une prise de décision complexe, où de multiples critères doivent être pris en compte de manière simultanée.

Face à cette complexité, les approches classiques de prise de décision, souvent centrées sur un critère unique (comme le coût ou la performance énergétique), se révèlent insuffisantes. Il devient alors indispensable de recourir à des méthodes d'aide à la décision multicritère (AMCD), qui permettent de modéliser des situations de choix, de classement ou d'évaluation où plusieurs dimensions, parfois contradictoires, entrent en jeu.

Avant de présenter les méthodes spécifiques choisies dans le cadre de cette étude — à savoir TOPSIS, ELECTRE et PROMETHEE — il convient d'introduire les concepts fondamentaux qui structurent un problème multicritère, de discuter les types de critères généralement rencontrés dans le domaine de la performance énergétique du bâtiment, et de catégoriser les différentes familles de méthodes AMCD existantes.

Ce chapitre vise ainsi à poser les fondements théoriques nécessaires à la compréhension des approches multicritères. Après avoir clarifié la structure générale des problèmes de décision multicritère, nous présenterons les typologies de critères, puis nous proposerons une classification des principales familles de méthodes AMCD. Cette analyse permettra de mieux situer les outils méthodologiques mobilisés dans le chapitre suivant, dédié à la présentation détaillée et à la justification des méthodes retenues pour notre étude.

2.2 Structure générale d'un problème multicritère

Un problème d'aide à la décision multicritère se définit comme une situation dans laquelle un décideur doit choisir, classer ou évaluer un ensemble d'alternatives en fonction de plusieurs critères pouvant être de nature hétérogène[33]. Contrairement aux approches mono-objectif, l'analyse multicritère vise à prendre en compte simultanément des dimensions économiques, techniques, environnementales et sociales, souvent contradictoires, pour aboutir à une solution équilibrée et rationnelle[62].

La structure d'un problème multicritère repose sur trois composantes fondamentales [59] :

L'espace de recherche : il correspond à l'ensemble des alternatives possibles. Dans le cadre de la performance énergétique des bâtiments, ces alternatives peuvent représenter des solutions techniques (type d'isolation, système de chauffage, type de vitrage, etc.), des scénarios de rénovation, ou encore des stratégies de gestion énergétique.

L'espace des objectifs : il regroupe l'ensemble des critères sur lesquels les alternatives seront évaluées. Ces critères sont exprimés sous forme de fonctions (objectifs) permettant de quantifier ou qualifier la performance d'une alternative. Par exemple, un critère peut viser à minimiser la consommation d'énergie, à maximiser le confort thermique ou à limiter l'impact environnemental.

La relation de préférence : elle représente le lien entre les alternatives et les critères. Elle permet de comparer les performances de chaque alternative selon les différents critères, et de définir un ordre de préférence en fonction des priorités du décideur.

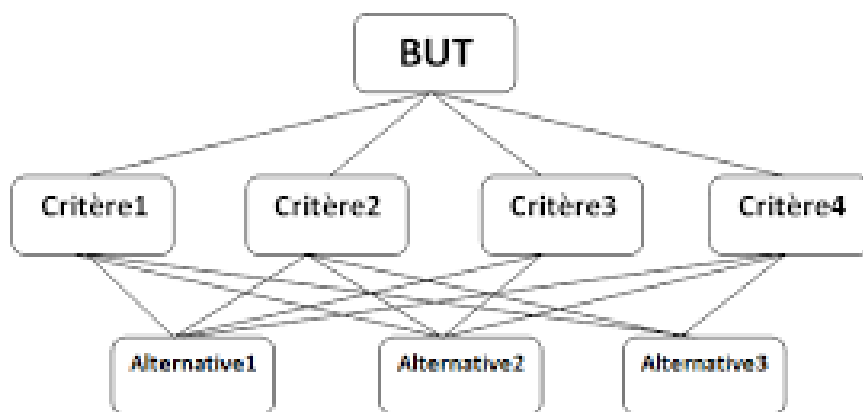


FIGURE 2.1 – La structure d'un problème multicritère

Dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, les problèmes multicritères se caractérisent souvent par :

- Un nombre élevé de critères, parfois interdépendants ;
- Une contradiction entre objectifs (par exemple, entre coût et performance thermique) ;
- Des données de nature différente (quantitatives comme la consommation, qualitatives comme l'esthétique) ;
- Et la nécessité d'un arbitrage fin entre les alternatives, compte tenu des contraintes budgétaires, réglementaires et techniques.

Cette complexité justifie pleinement le recours à des méthodes d'aide multicritère, capables de modéliser ces situations et de fournir une aide objective au processus décisionnel.

2.3 Typologie des critères de décision

Dans un contexte de décision multicritère, les critères constituent la base d'évaluation des alternatives. Ils permettent de mesurer la performance de chaque option par rapport aux différents objectifs du décideur[57]. La qualité du processus décisionnel dépend en grande partie de la pertinence, de la diversité et de la hiérarchisation des critères retenus.

On distingue généralement plusieurs types de critères [61][57] :

Critères quantitatifs : mesurables numériquement, ils permettent des comparaisons précises entre alternatives.

Exemples : coût d'investissement (DA), consommation énergétique annuelle (kWh), taux de retour sur investissement (%), émissions de CO₂ (kg/an).

Critères qualitatifs : souvent basés sur des appréciations subjectives ou expertes.

Exemples : confort perçu par les occupants, esthétique architecturale, facilité d'intégration technique, acceptabilité sociale.

Critères objectifs : indépendants de l'opinion du décideur.

Exemple : la surface habitable d'un bâtiment ou la conductivité thermique d'un matériau.

Critères subjectifs : influencés par les préférences personnelles, les valeurs ou les priorités stratégiques du décideur.

Exemple : importance accordée à l'apparence visuelle ou à l'innovation technologique.

Dans le cadre spécifique de l'efficacité énergétique des bâtiments, une typologie adaptée peut être proposée comme suit :

- Critères économiques :
 - Coût initial des travaux ou des équipements
 - Coût de maintenance et d'exploitation
 - Temps de retour sur investissement
- Critères environnementaux :
 - Consommation énergétique primaire
 - Réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂)
 - Recyclabilité des matériaux
- Critères techniques :
 - Performance thermique des composants
 - Durabilité et fiabilité des équipements
 - Capacité d'adaptation aux conditions climatiques locales
- Critères sociaux et fonctionnels :
 - Confort thermique et acoustique des occupants
 - Esthétique et intégration architecturale
 - Accessibilité ou impact sur la qualité de vie

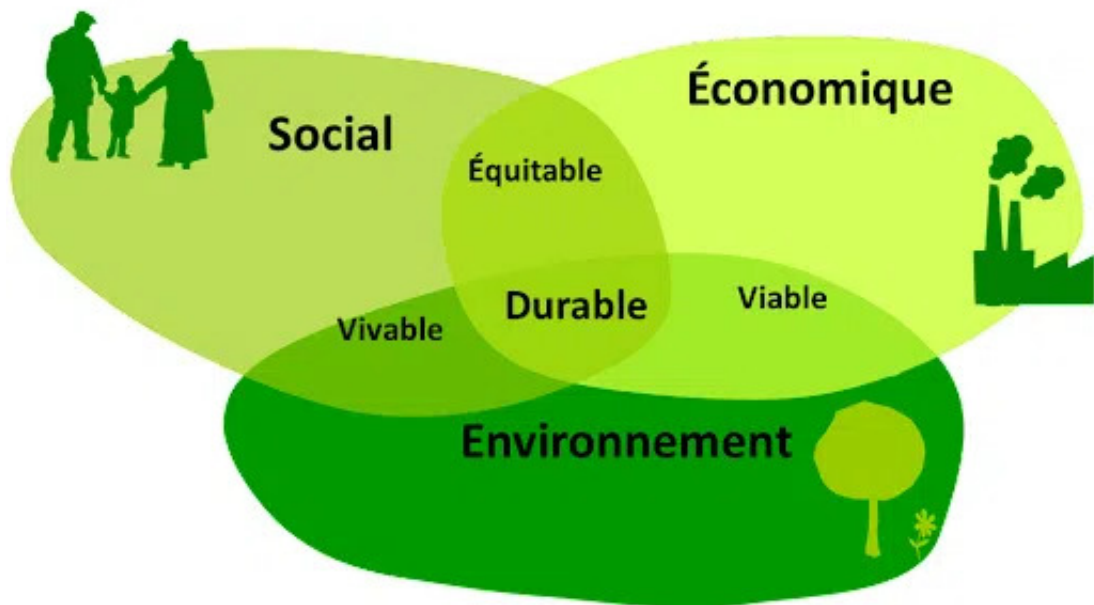


FIGURE 2.2 – Typologie des critères de décision

Le choix et la pondération de ces critères sont essentiels car ils orientent fortement les résultats de l'évaluation multicritère. Dans un contexte de rénovation énergétique, certains critères (comme le confort thermique ou la réduction des charges) peuvent être considérés comme prioritaires selon le type de bâtiment, la zone géographique, ou le profil des usagers[58][56].

Une analyse multicritère bien conduite repose donc sur une sélection rigoureuse des critères, leur pondération en fonction des objectifs du projet, et une prise en compte équilibrée des dimensions économiques, techniques, environnementales et sociales.

2.4 Familles de méthodes multicritères

Après avoir identifié les différents types de critères intervenant dans les processus décisionnels, il convient désormais de s'intéresser aux principales familles de méthodes multicritères, chacune proposant des approches spécifiques pour agréger et traiter ces critères.

Les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMCD) se déclinent en plusieurs familles, chacune reposant sur des principes mathématiques et logiques différents [52]. Le choix d'une méthode adaptée dépend de nombreux facteurs : la nature du problème (choix, classement, affectation), le type de critères, la structure des données, ou encore le niveau d'implication du décideur. Dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, cette diversité permet de s'adapter à des situations décisionnelles complexes, intégrant des critères variés (coût, performance, environnement, confort, etc.)[49][53].

On peut classer les méthodes AMCD en quatre grandes familles :

2.4.1 Méthodes de type agrégation de scores

Les méthodes d'agrégation de scores constituent la famille de techniques multicritères la plus intuitive. Elles consistent à attribuer un score à chaque alternative en

fonction de ses performances sur l'ensemble des critères, puis à combiner ces scores, généralement à l'aide d'une moyenne pondérée. Le résultat obtenu permet de classer les alternatives selon une valeur synthétique globale[21].

Le principe fondamental repose sur la fonction d'utilité additive, dans laquelle chaque critère contribue de manière proportionnelle à l'évaluation finale d'une alternative. Ainsi, une bonne performance sur un critère peut compenser une mauvaise performance sur un autre : on parle alors de compensabilité entre critères.

Parmi les méthodes appartenant à cette famille, on peut citer :

- **SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique)** : une méthode pondérée simple, basée sur des échelles de notation subjectives.
- **UTA (UTilités Additives)** : une méthode fondée sur la construction d'une fonction d'utilité à partir des préférences du décideur.
- **AHP (Analytic Hierarchy Process)** : une méthode qui repose sur des comparaisons par paires et une structuration hiérarchique du problème.

Types de méthodes d'agrégation de données



FIGURE 2.3 – Types De Méthodes D'agrégation

Application dans le contexte énergétique du bâtiment :

Les méthodes d'agrégation de scores peuvent être utilisées pour évaluer des matériaux isolants, des systèmes de chauffage ou des équipements énergétiques selon plusieurs critères : coût, efficacité, durabilité, disponibilité locale, etc. Par exemple, un maître d'ouvrage pourrait comparer trois types de pompes à chaleur en pondérant l'efficacité énergétique à 40 %, le coût à 30 %, la maintenance à 20 %, et l'impact environnemental à 10 %.

Ce type d'approche est particulièrement adapté aux problèmes bien structurés avec peu d'alternatives, ou lorsque les décideurs cherchent à obtenir un classement clair et rapide basé sur des critères bien définis.

Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre : les calculs sont généralement simples et compréhensibles par les non-spécialistes.
- Transparence du processus : les résultats sont directement liés aux pondérations et aux scores attribués.
- Adaptabilité à différents types de critères, à condition qu'ils puissent être normalisés.

Limites :

- Compensabilité excessive : une très bonne performance sur un critère peut masquer une très mauvaise performance sur un autre, ce qui peut être problématique dans des contextes sensibles comme l'énergie ou l'environnement.
- Dépendance forte à la pondération : de petites variations dans les poids peuvent modifier significativement le classement final.
- Peu adaptées aux situations conflictuelles ou aux préférences floues, notamment lorsqu'il existe des critères difficilement comparables.

Les méthodes d'agrégation de scores constituent un premier niveau d'approche multicritère, utile pour des décisions simples ou des pré-sélections. Toutefois, dans des contextes plus complexes comme les projets de rénovation énergétique où les critères sont souvent en tension (par exemple : coût vs confort thermique), elles peuvent s'avérer insuffisantes. C'est pourquoi d'autres familles de méthodes, plus robustes, sont souvent privilégiées.

2.4.2 Méthodes basées sur la distance à une solution idéale

Les méthodes basées sur la distance à une solution idéale font partie des approches les plus répandues dans l'analyse multicritère. Leur principe fondamental repose sur l'idée qu'une bonne alternative est celle qui est la plus proche d'une solution idéale (c'est-à-dire la meilleure possible sur tous les critères) et la plus éloignée d'une solution anti-idéale (la pire possible)[37].

La méthode la plus représentative de cette famille est TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), proposée par Hwang et Yoon en 1981. Elle calcule pour chaque alternative deux distances : l'une vers la solution idéale, et l'autre vers la solution anti-idéale. L'alternative ayant la plus grande proximité relative à l'idéal est alors considérée comme la meilleure.

Le fonctionnement général de ces méthodes suit les étapes suivantes :

1. Construction d'une matrice de décision (alternatives $\times$ critères)
2. Normalisation des valeurs pour rendre les critères comparables
3. Pondération selon l'importance attribuée à chaque critère
4. Identification des solutions idéales et anti-idéales

5. Calcul des distances de chaque alternative à ces deux pôles
6. Classement des alternatives en fonction de leur score de proximité

Application dans le contexte énergétique du bâtiment :

Les méthodes par distance sont particulièrement adaptées aux projets où il existe des performances cibles claires. Dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments, elles permettent par exemple de classer :

- Des scénarios de rénovation thermique (isolation, remplacement des fenêtres, changement de chauffage)
- Des types de matériaux ou de technologies énergétiques
- Des stratégies de gestion énergétique (chauffage, refroidissement, ventilation)

Chaque scénario est évalué selon des critères quantifiables : coût, consommation annuelle d'énergie, confort thermique, émissions de CO₂, etc. La méthode permet alors d'identifier celui qui s'approche le plus d'une solution « parfaite » (économique, performante, respectueuse de l'environnement).

Avantages :

- Clarté et simplicité : les résultats sont compréhensibles, faciles à visualiser et à justifier.
- Calculs rapides : bien adaptés aux outils informatiques et à la prise de décision automatisée.
- Capacité à intégrer plusieurs critères quantitatifs, même contradictoires.
- Utilisation fréquente dans les domaines techniques, ce qui en fait un bon choix pour les ingénieurs et les énergéticiens.

Limites :

- Suppose que tous les critères sont indépendants, ce qui n'est pas toujours le cas dans des systèmes complexes comme le bâtiment.
- Sensible à la méthode de normalisation et à la pondération : un mauvais choix peut fausser les résultats.
- La solution idéale peut ne pas être réaliste, car elle combine les meilleures performances de chaque critère sans tenir compte de leur compatibilité dans la réalité.
- Ne prend pas directement en compte les préférences subjectives ou les seuils d'acceptabilité.

Les méthodes par distance, et en particulier TOPSIS, constituent une solution efficace pour classer des alternatives techniques en fonction de leur performance globale. Elles sont particulièrement bien adaptées à la rénovation énergétique des bâtiments, où les décisions reposent sur des données chiffrées et des objectifs de performance clairement définis. Toutefois, dans les situations où les critères sont difficilement comparables ou lorsque le décideur souhaite modéliser des préférences plus complexes, d'autres familles de méthodes, comme les méthodes de surclassement, peuvent s'avérer plus pertinentes.

2.4.3 Méthodes de surclassement

Les méthodes de surclassement constituent une famille d'approches multicritères développées pour répondre aux limites des méthodes d'agrégation et des méthodes par distance. Leur principe repose non pas sur la recherche d'une solution idéale unique, mais sur la comparaison binaire des alternatives, afin de déterminer si l'une est au moins aussi bonne que l'autre selon une majorité de critères, sans être trop mauvaise sur les autres[34].

Concrètement, une alternative A "surclasse" une alternative B si A est globalement préférable à B selon un ensemble pondéré de critères, et que B ne présente pas de désavantage majeur sur un critère essentiel. Cette logique repose sur deux indices fondamentaux :

- **L'indice de concordance** : mesure le degré d'accord entre les critères en faveur du surclassement de A sur B.
- **L'indice de discordance** : mesure l'opposition d'un ou plusieurs critères défavorables à ce surclassement.

Le résultat n'est pas une simple note globale, mais un graphe de préférences partielles, qui permet de représenter des relations de dominance, d'incomparabilité ou d'indifférence entre alternatives.

Principales méthodes de cette famille :

- **ELECTRE (ÉLimination et Choix Traduisant la Réalité)** : première méthode de surclassement développée dans les années 1960, avec plusieurs versions (ELECTRE I, II, III, IV, TRI...).
- **PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation)** : méthode plus récente (années 1980), utilisant aussi des comparaisons binaires avec une approche plus fluide et des outils graphiques (GAIA).

Application dans le contexte énergétique du bâtiment :

Les méthodes de surclassement sont particulièrement bien adaptées à des situations complexes où les critères sont nombreux, conflictuels, et parfois incomparables ou non compensables.

Exemple d'application :

- Comparaison de scénarios de rénovation énergétique prenant en compte des critères économiques (coût, retour sur investissement), environnementaux (émissions de CO₂, consommation énergétique), sociaux (confort thermique), et techniques (durabilité, faisabilité).
- Sélection d'équipements énergétiques dans un bâtiment (chauffage, ventilation, éclairage), où certaines alternatives sont bonnes sur tous les critères sauf un, ce qui rend difficile un classement simple.

Dans ces cas, ELECTRE ou PROMETHEE permettent de produire :

- Un classement partiel ou complet des alternatives
- Une analyse visuelle des compromis
- Une prise en compte des préférences, seuils et priorités du décideur

Avantages :

- Modélisation fine des préférences : intégration des seuils d'indifférence, de préférence, ou de veto.
- Gestion explicite des conflits entre critères : pas de compensabilité forcée.
- Représentation riche des relations entre alternatives (dominance, équivalence, non-comparabilité).
- Adaptabilité à des contextes décisionnels complexes, avec de nombreuses alternatives et critères.
- Outils d'aide à la visualisation (notamment avec PROMETHEE + GAIA).

Limites :

- Complexité algorithmique plus élevée, notamment dans ELECTRE III et PROMETHEE II.
- Paramétrage sensible (seuils, poids, fonctions de préférence) : nécessite une bonne connaissance du contexte.
- Peut produire des résultats partiels (classement incomplet, ambiguïtés entre alternatives).
- Moins intuitives pour des décideurs non familiers avec l'approche multicritère avancée.

Les méthodes de surclassement, telles qu'ELECTRE et PROMETHEE, offrent une approche robuste et réaliste de la décision multicritère. Elles permettent de prendre en compte la complexité et les contradictions des projets de rénovation énergétique, tout en offrant des outils d'analyse décisionnelle avancés. Ce sont des méthodes de choix pour les contextes où la transparence des préférences, la qualité des compromis, et l'analyse comparative fine sont essentiels.

2.4.4 Méthodes hiérarchiques

Les méthodes hiérarchiques visent à structurer un problème décisionnel complexe en plusieurs niveaux successifs, formant une arborescence logique qui va du but général (au sommet) jusqu'aux critères, sous-critères et alternatives (à la base). Cette structuration permet au décideur d'analyser progressivement chaque dimension du problème, en facilitant la comparaison des éléments à chaque niveau[41].

La méthode la plus emblématique de cette famille est l'AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Thomas Saaty dans les années 1980. Elle repose sur le principe des comparaisons par paires, où le décideur évalue l'importance relative de deux éléments à la fois (par exemple, « le coût est-il plus important que la consommation énergétique ? »), sur une échelle de jugement allant généralement de 1 à 9.

À partir de ces comparaisons, la méthode établit :

- Une matrice de priorités
- Des poids relatifs des critères
- Et un classement global des alternatives

Application dans le contexte énergétique du bâtiment :

L'approche hiérarchique peut être utile lorsque les critères sont nombreux et doivent être organisés en catégories (par exemple : critères économiques, environnementaux, sociaux, techniques). Elle permet au décideur de structurer sa réflexion, notamment dans :

- La planification stratégique (ex : choix d'un type de rénovation à l'échelle d'un quartier)
- La définition d'un cahier des charges (ex : priorisation des exigences dans la conception d'un bâtiment performant)
- L'évaluation de projets concurrents selon des axes multiples

Par exemple, un maître d'ouvrage peut structurer la hiérarchie suivante :

- Objectif global : Améliorer l'efficacité énergétique
- Critères principaux : Économie, Environnement, Confort, Faisabilité
- Sous-critères : coût initial, consommation, CO2, confort d'été, durée de vie, etc.
- Alternatives : scénario A, B, C de rénovation

Avantages :

- Modélisation structurée : décomposition logique du problème
- Adapté aux décisions participatives : possibilité d'impliquer plusieurs experts ou parties prenantes
- Outil pédagogique : aide à clarifier les priorités du décideur
- Capacité à gérer à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs

Limites :

- Nombre de comparaisons croît rapidement avec le nombre de critères → méthode lourde si mal maîtrisée
- Résultats sensibles à la cohérence des jugements : des incohérences peuvent fausser les pondérations

- Moins adaptée aux grands ensembles d’alternatives techniques ou à forte dimension numérique
- Pas toujours robuste face à des conflits forts entre critères

Les méthodes hiérarchiques, et notamment l’AHP, sont très utiles dans la phase de structuration de la décision, en particulier lorsque le problème nécessite une réflexion approfondie sur la priorisation des objectifs. Toutefois, elles montrent leurs limites lorsque les alternatives sont nombreuses et techniquement complexes, comme c’est souvent le cas dans les projets de rénovation énergétique. Dans ce cas, leur usage peut être combiné à d’autres méthodes plus opérationnelles comme TOPSIS ou PROMETHEE.

2.5 Critères de choix d’une méthode AMCD

Le choix d’une méthode d’aide multicritère à la décision (AMCD) ne relève pas d’une simple préférence subjective, mais d’une analyse rigoureuse du contexte décisionnel. Ce choix dépend de plusieurs éléments : la nature du problème, les caractéristiques des données disponibles, les attentes du décideur, mais aussi les contraintes propres au domaine d’application, ici l’efficacité énergétique des bâtiments. Le secteur du bâtiment présente en effet une complexité particulière : multiplicité des critères, diversité des parties prenantes, hétérogénéité des données, et conflits fréquents entre les objectifs économiques, techniques, environnementaux et sociaux.

2.5.1 Caractéristiques du problème

L’un des premiers éléments à considérer est la structure du problème de décision :

Nature du problème : s’agit-il d’un problème de choix (sélection d’une solution optimale), de classement (hiérarchisation des alternatives) ou d’affectation (attribution de ressources à des options) ? Par exemple, la sélection d’un matériau isolant correspond à un problème de choix, tandis que la priorisation de scénarios de rénovation constitue un problème de classement.

Nombre d’alternatives : certaines méthodes, comme l’AHP, deviennent difficiles à appliquer au-delà de quelques alternatives, tandis que d’autres (TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE) sont mieux adaptées à un grand nombre d’options.

Nombre et type de critères : la méthode choisie doit pouvoir intégrer un ensemble varié de critères, tant sur le plan quantitatif (consommation, coût) que qualitatif (confort, esthétique), avec des pondérations adaptées.

Présence de conflits entre critères : lorsque les critères sont en opposition (par exemple, faible coût vs haute performance), les méthodes capables de gérer la non-compensabilité, comme ELECTRE ou PROMETHEE, sont plus appropriées.

Il convient également de noter que dans le secteur du bâtiment, la décision peut évoluer dans le temps (au fil des phases d’un projet). Une méthode souple, capable d’être réajustée, est donc un atout dans les contextes dynamiques.

2.5.2 Caractéristiques des données

Le type et la qualité des données influencent fortement le choix d'une méthode AMCD :

Nature des données : les projets énergétiques manipulent des données hétérogènes : coût en euros, énergie en kWh, émissions de CO₂ en kg, confort en échelle qualitative. Certaines méthodes nécessitent une normalisation stricte (TOPSIS), tandis que d'autres tolèrent mieux cette diversité (ELECTRE, PROMETHEE avec seuils).

Disponibilité des données : les méthodes comme AHP reposent sur des jugements subjectifs, ce qui peut poser problème en l'absence d'expertise. D'autres, comme PROMETHEE, fonctionnent même avec des données partiellement subjectives.

Structure des critères : si les critères sont hiérarchisés ou corrélés, une méthode comme AHP peut être utile pour structurer la réflexion. En revanche, si les critères sont indépendants et conflictuels, les méthodes de surclassement sont plus appropriées.

2.5.3 Attentes et contraintes du décideur

Le choix d'une méthode dépend aussi du profil des utilisateurs et des contraintes organisationnelles :

Transparence et explicabilité : des méthodes comme PROMETHEE, avec des visualisations claires (GAIA), facilitent la communication avec les parties prenantes non techniques.

Simplicité ou robustesse attendue : TOPSIS est facile à mettre en œuvre, alors qu'ELECTRE ou PROMETHEE offrent une analyse plus fine, au prix d'un paramétrage plus technique.

Temps de traitement disponible : pour les projets à échéances courtes, les méthodes simples ou intégrées dans des outils numériques sont préférables.

Compatibilité logicielle : de nombreuses méthodes sont désormais intégrées dans des plateformes telles que Visual PROMETHEE, jELECTRE, ou Decision Lab, ce qui facilite leur déploiement dans des systèmes informatiques de gestion énergétique.

2.5.4 Tableau comparatif des méthodes

Méthode	Type de problème	Données requises	Complexité	Résultats produits	Pertinence dans le bâtiment
AHP	Choix, hiérarchisation	Comparaisons subjectives	Moyenne	Classement hiérarchique	Moyennement adaptée
TOPSIS	Classement	Données numériques	Faible	Classement global	Oui
ELECTRE I/III	Choix, Classement	Données mixtes avec seuils	Élevée	Graphe de surclassement	Très adaptée
PROMETHEE I/II	Classement	Données pondérées	Moyenne à élevée	Classement partiel ou complet	Très adaptée

FIGURE 2.4 – Tableau comparatif des méthodes

2.5.5 Recommandations pour le domaine de l'efficacité énergétique

Le domaine du bâtiment présente plusieurs spécificités :

- Une forte hétérogénéité des critères
- Des conflits fréquents entre objectifs (par exemple entre confort thermique et coût d'investissement)
- La nécessité d'une prise en compte des préférences des parties prenantes
- Une volonté d'intégrer ces outils dans des environnements numériques ou des outils de simulation

Pour ces raisons, les méthodes de surclassement (ELECTRE, PROMETHEE) et les méthodes par distance (TOPSIS) sont particulièrement pertinentes. Elles permettent de traiter une grande variété de critères, de gérer les contradictions, et de produire des classements utiles à la prise de décision technique et stratégique.

2.5.6 Choix méthodologique retenu dans cette étude

Compte tenu de l'analyse précédente, trois méthodes ont été retenues dans le cadre de ce mémoire :

TOPSIS : pour sa simplicité de calcul, sa clarté, et son aptitude à fournir un classement rapide et lisible.

ELECTRE : pour sa robustesse face aux conflits, sa capacité à modéliser des préférences fines, et son aptitude à produire des résultats utiles même en présence d'alternatives difficiles à comparer.

PROMETHEE : pour sa flexibilité, sa compatibilité avec des outils graphiques de visualisation (comme GAIA), et sa capacité à fournir à la fois des classements partiels et complets dans des situations complexes.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation détaillée de ces méthodes, à la justification de leur pertinence pour l'évaluation de scénarios de rénovation énergétique, ainsi qu'à leur mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases théoriques essentielles pour comprendre et structurer la prise de décision dans un contexte multicritère, notamment appliqué à l'efficacité énergétique des bâtiments. Face à la complexité croissante des projets de construction et de rénovation, marquée par la coexistence de critères économiques, techniques, environnementaux et sociaux, les méthodes d'aide à la décision multicritère (AMCD) s'imposent comme des outils indispensables.

Nous avons tout d'abord défini la structure générale d'un problème multicritère, en identifiant les éléments clés : alternatives, critères, espace des objectifs, et relation de préférence. Cette structure permet de formaliser rigoureusement le processus décisionnel dans des contextes techniques complexes.

Nous avons ensuite analysé les différents types de critères susceptibles d'intervenir dans le cadre d'un projet énergétique, en insistant sur leur diversité (quantitatifs/qualitatifs, objectifs/subjectifs), et sur l'importance de leur pondération dans l'évaluation globale des alternatives.

Une typologie des familles de méthodes AMCD a été présentée, distinguant notamment les approches par agrégation de scores, par distance à une solution idéale, par surclassement, et les méthodes hiérarchiques. Cette classification a permis de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque famille, tout en identifiant les situations dans lesquelles elles sont les plus pertinentes.

Enfin, nous avons proposé une grille d'analyse des critères à prendre en compte dans le choix d'une méthode multicritère, en tenant compte des caractéristiques du problème, des données disponibles, et des contraintes propres au décideur. Cette analyse a permis de justifier la sélection, dans le cadre de cette étude, des méthodes TOPSIS, ELECTRE et PROMETHEE, qui répondent aux exigences spécifiques de la rénovation énergétique des bâtiments : pluralité des critères, conflits entre objectifs, et besoin d'un soutien décisionnel clair, robuste et adaptable.

Le chapitre suivant sera donc consacré à la présentation détaillée de ces trois méthodes, à leur mise en œuvre méthodologique, ainsi qu'à l'analyse comparative de leurs performances dans un contexte concret de prise de décision énergétique.

Ce chapitre a permis d'introduire les fondements essentiels de la décision multicritère dans le contexte spécifique de l'efficacité énergétique des bâtiments. Dans un environnement où les projets de construction et de rénovation mobilisent des enjeux économiques, environnementaux, techniques et sociaux, il devient crucial d'adopter une approche structurée et rigoureuse pour guider le processus décisionnel.

Après avoir défini la structure générale d'un problème multicritère, nous avons exploré la nature des critères mobilisés dans ce domaine, ainsi que les principales familles de méthodes d'aide à la décision. Cette analyse a mis en lumière la diversité des approches disponibles, tout en soulignant l'importance de choisir une méthode adaptée aux spécificités du problème posé.

Sans entrer encore dans les détails techniques des algorithmes, nous avons esquissé les principaux critères qui orientent le choix d'une méthode multicritère : type de

données, objectifs visés, contraintes du décideur, ou encore niveau de complexité acceptable. Ces éléments serviront de base à l'examen approfondi des méthodes que nous avons jugées les plus pertinentes dans le cadre de cette étude.

Le prochain chapitre se focalisera ainsi sur l'analyse détaillée de ces méthodes – TOPSIS, ELECTRE et PROMÉTHÉE – en les confrontant à la problématique énergétique qui nous occupe. Ce sera l'occasion de mieux comprendre leur fonctionnement, leurs différences, et leur apport potentiel dans un processus de décision multicritère appliqué à des cas concrets.

Chapitre 3

Modèles de Décision Multicritère : Étude de TOPSIS, ELECTRE et PROMÉTHÉE

3.1 Introduction

Comme présenté dans le chapitre précédent, la prise de décision dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments repose sur des problématiques complexes, impliquant des critères multiples, parfois contradictoires, et une diversité d'alternatives à évaluer. Les approches multicritères, en particulier, se sont imposées comme des outils incontournables pour structurer ces décisions, en intégrant à la fois des dimensions économiques, environnementales, techniques et sociales.

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, qu'il s'agisse de constructions neuves ou de projets de rénovation, nécessite en effet une analyse fine et simultanée de nombreux paramètres. Dès la phase d'étude, il est impératif de réaliser des évaluations paramétriques permettant d'identifier les solutions les plus équilibrées face aux objectifs multiples fixés.

Pour concevoir des bâtiments durables ou réhabiliter efficacement le parc existant, une approche systémique s'impose, prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment — de la fabrication des matériaux jusqu'à la fin de vie des équipements. Cette approche permet une utilisation plus rationnelle des ressources et une réduction des impacts environnementaux.

Toutefois, la complexité des décisions à prendre, l'interdépendance des critères, ainsi que la diversité des profils d'acteurs impliqués, rendent le processus décisionnel particulièrement difficile. C'est dans ce contexte que l'utilisation de méthodes d'aide multicritère à la décision (AMCD) devient essentielle, en offrant des cadres d'analyse rigoureux, flexibles et adaptés à la complexité des enjeux énergétiques.

Ce chapitre est consacré à la présentation approfondie des trois méthodes retenues dans cette étude : TOPSIS, ELECTRE et PROMETHEE. Pour chacune, seront abordés les principes théoriques, les étapes de mise en œuvre, les avantages et limites, ainsi que leur pertinence dans le cadre de l'évaluation de scénarios de rénovation énergétique.

Comme nous l'avons introduit précédemment, les enjeux liés à l'efficacité énergétique des bâtiments appellent des décisions complexes, où de multiples critères doivent être pris en compte simultanément. Pour faire face à cette complexité croissante, les méthodes d'aide à la décision multicritère (AMCD) offrent un cadre structuré et pertinent.

Dans le contexte de projets de construction ou de rénovation, ces méthodes permettent d'évaluer rigoureusement diverses alternatives en conciliant des objectifs souvent divergents : performance énergétique, coûts, contraintes techniques ou encore acceptabilité sociale. Elles s'inscrivent ainsi dans une approche globale, attentive à l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail les trois méthodes d'aide multicritère retenues dans cette étude, à savoir : TOPSIS, ELECTRE et PROMÉTHÉE. Chacune de ces approches sera examinée selon ses fondements théoriques, sa logique de fonctionnement, ses avantages, ainsi que les cas où elle se révèle particulièrement adaptée.

Cette analyse constituera une étape essentielle pour la mise en œuvre d'un cadre décisionnel opérationnel, que nous développerons dans le chapitre suivant, à travers des applications concrètes liées à la rénovation énergétique.

3.2 Problématique d'aide à la décision multicritère

3.2.1 Définition d'un problème d'aide à la décision

Par définition, l'aide à la décision est l'ensemble des techniques permettant de faire le meilleur choix possible parmi les différentes solutions existantes selon des critères prédéfinis. Ces approches peuvent être classées comme étant des outils de soutien pour les décideurs, car elles parviennent à filtrer les meilleures solutions possibles et montrer les avantages et les inconvénients associés à chacune d'elles[49]. Généralement , une méthode d'aide à la décision inclut les étapes suivantes :

- L'identification du problème ;
- L'identification et la définition des variables d'étude ;
- La définition des objectifs ;
- La résolution de la nature contradictoire des différents critères (par exemple le confort intérieur et les besoins énergétiques, la consommation d'énergie et les coûts d'investissement, etc.) ;
- L'identification des solutions compromis et l'analyse des conséquences des solutions ;
- La discussion et l'analyse des résultats obtenus ;
- L'aide à la prise de décision.

3.2.2 Formulation d'un problème d'aide à la décision

La formulation d'un problème d'aide à la décision est définie par l'espace de recherche, l'espace des objectifs et la relation entre les deux. L'espace de recherche représente l'ensemble des solutions possibles qui sont définies à partir des intervalles de variation des paramètres intrinsèques du problème. Le nombre et la nature des variables (continues et/ou discrètes) déterminent la dimension et la nature de cette espace. L'espace des objectifs est caractérisé par les critères de décision. Ces derniers sont définis comme des fonctions mathématiques permettant d'évaluer quantitativement ou qualitativement les performances des solutions du problème. La dimension de cet espace dépend du nombre des critères de décision.

3.3 Présentation des méthodes AMCD

Dans le cadre de ce projet, nous avons sélectionné trois méthodes principales d'aide multicritère à la décision (AMCD) qui répondent à nos objectifs d'analyse des per-

performances énergétiques des bâtiments : TOPSIS, ELECTRE, et PROMETHEE. Ces méthodes offrent des approches complémentaires pour évaluer des alternatives en fonction de plusieurs critères souvent contradictoires, comme le coût d'investissement, la consommation énergétique, ou encore le confort thermique. La sélection de ces méthodes est motivée par leur pertinence dans des environnements décisionnels complexes et leur compatibilité avec des outils numériques spécialisés (comme GAIA).

3.3.1 Méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

La méthode TOPSIS est l'une des techniques d'aide à la décision multicritère les plus populaires. Proposée par Hwang et Yoon en 1981, elle repose sur un principe simple mais efficace : "La meilleure alternative est celle qui se trouve la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale."[\[22\]](#)"

Cette approche est parfaitement adaptée à des problématiques d'optimisation énergétique des bâtiments, car elle permet de comparer des scénarios selon plusieurs critères conflictuels (exemple : coût, consommation d'énergie, confort thermique).

Étapes détaillées de la méthode TOPSIS

1. Construction de la matrice de décision

On commence par une matrice où chaque ligne est une alternative, et chaque colonne un critère.

2. Normalisation de la matrice

La normalisation est nécessaire pour comparer des critères de nature différente :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

3. Pondération de la matrice normalisée

Chaque critère est pondéré en fonction de son importance :

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

Où w_j est le poids du critère.

4. Détermination de la solution idéale (A) et anti-idéale (A)

Solution idéale A : maximise les bénéfices, minimise les coûts.

Solution anti-idéale A : minimise les bénéfices, maximise les coûts.

5. Calcul des distances aux solutions idéales et anti-idéales

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

6. Calcul du score de similarité

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Plus le score est proche de 1, meilleure est la solution.

7. Classement des alternatives

On classe les alternatives selon les scores S_i .

Avantages de TOPSIS

- Facilité d'implémentation, compatible avec Excel, Python, ou des logiciels spécialisés (ex : GAIA, Visual PROMETHEE, MCDMTTools).
- Prise en compte simultanée de critères de nature différente.
- Donne un classement clair et lisible des alternatives.

Inconvénients

- Sensibilité aux poids des critères : une mauvaise pondération peut fausser les résultats.
- Suppose que les critères sont indépendants (pas toujours le cas dans des systèmes énergétiques).
- Ne traite pas directement les incertitudes (contrairement à d'autres méthodes comme l'analyse de robustesse).

3.3.2 Méthode ELECTRE (ÉLImination Et Choix Traduisant la REalité)

La méthode ELECTRE (acronyme de ELimination Et Choix Traduisant la REalité) est une famille de méthodes d'aide multicritère à la décision, développée dans les années 1960 par Bernard Roy. Contrairement à des méthodes de type compensatoire comme TOPSIS, qui supposent une substitution possible entre critères, ELECTRE repose sur le principe de surclassement.

L'idée centrale est que dans des contextes complexes (comme l'efficacité énergétique des bâtiments, où des critères techniques, économiques et environnementaux interagissent), il n'est pas toujours pertinent d'agréger les critères en une seule fonction globale[16][53]. ELECTRE permet alors de raisonner par comparaison binaire entre les alternatives pour établir des relations de domination partielle ou de rejet.

La famille des méthodes ELECTRE se décline en plusieurs versions, chacune adaptée à des contextes décisionnels spécifiques. Parmi celles-ci, nous approfondirons ELECTRE I et ELECTRE II, qui sont particulièrement adaptées aux problématiques de sélection et de classement des alternatives.

Principes fondamentaux d'ELECTRE

La méthode repose sur deux concepts clés :

1. La concordance : on dit que le critère C est un critère concordant avec l'hypothèse de surclassement si l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action a_k selon le critère C , c'est-à-dire :

$$c(a_i) \geq C(a_k)$$

2. La discordance : mesure l'opposition forte sur certains critères qui pourrait invalider le surclassement proposé par la concordance.

L'objectif est d'établir des relations de surclassement, c'est-à-dire dire si une alternative est au moins aussi bonne qu'une autre pour une majorité suffisante de critères, sans être fortement dominée sur un critère particulier.

ELECTRE I — Méthode d'élimination par surclassement pour la sélection

ELECTRE I est principalement conçu pour la sélection d'un ensemble restreint d'alternatives, en éliminant les solutions dominées selon la logique de surclassement.

Étapes méthodologiques détaillées :

1. Construction de la matrice de performance
On liste toutes les alternatives et leurs performances sur chaque critère.
2. Normalisation des critères
Pour rendre les critères comparables, une normalisation est appliquée (min-max ou autre).
3. Affectation des poids aux critères
Chaque critère se voit attribuer un poids reflétant son importance relative.
4. Calcul des indices de concordance
Pour chaque paire d'alternatives (A, B) , on calcule la somme pondérée des critères pour lesquels A est au moins aussi bon que B .

$$C(A, B) = \frac{\sum_{i \in F} w_i}{\sum_i w_i}$$

Où F est l'ensemble des critères favorables à A par rapport à B .

5. Calcul des indices de discordance
On évalue, pour chaque critère, l'importance d'un éventuel désavantage d'A par rapport à B.
6. Définition des seuils de concordance et de discordance
Ces seuils permettent de valider ou non la relation de surclassement.
7. Établissement de la relation de surclassement
Une alternative A surclasse B si son indice de concordance dépasse le seuil fixé et que l'indice de discordance est inférieur au seuil critique.
8. Élimination des alternatives dominées

Avantages :

- Très robuste dans les cas où les critères sont contradictoires.
- Méthode qualitative prenant en compte l'incomparabilité des alternatives.

Limites :

- Ne fournit pas un classement complet.
- Sensibilité aux choix des seuils et des poids.

ELECTRE II — Extension pour le classement des alternatives

Contrairement à ELECTRE I, ELECTRE II est conçu pour classer l'ensemble des alternatives, du meilleur au moins bon.

Approche méthodologique :

ELECTRE II repose sur une double analyse :

1. Analyse ascendante (du plus mauvais au meilleur)
2. Analyse descendante (du meilleur au moins bon)

Cette double approche permet de raffiner le classement final et de limiter les risques d'erreur dus aux cas d'indifférenciation ou de conflit entre les critères.

Étapes détaillées :

1. Calculer les indices de concordance A chaque couple d'actions (a_i, a_k) ; on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j: e(ij) > e(kj)} \pi_j \text{ avec } \sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

2. Calculer les indices de discordance (par critère) A chaque couple d'actions (a_i, a_k) ; et pour tout critère j, on associe l'indice de discordance suivant :

$$d(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{ij} \leq e_{kj} \\ e_{kj} - e_{ij} & \text{si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

3. Construire les relations de surclassement : On conclut au surclassement fort de a_k par a_i ($a_i \text{ Sf } a_k$) si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

SI

$$\frac{\sum_{j:\Delta_j > 0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j < 0} \pi_j} > 1$$

ET

$$\begin{cases} \text{si } C(a_i, a_k) \geq c_1 \text{ et } D(a_i, a_k) \leq d_{j2} \\ \text{ou} \\ \text{si } C(a_i, a_k) \geq c_2 \text{ et } D(a_i, a_k) \leq d_{j1} \end{cases}$$

ALORS

$$a_i \text{ } S^F \text{ } a_k$$

On conclut au surclassement faible de a_k par a_i ($a_i \text{ Sf } a_k$) si les tests de concordance et de non discordance suivants sont satisfaits :

$$\text{si } \frac{\sum_{j:\Delta_j > 0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j < 0} \pi_j} > 1 \text{ et } C(a_i, a_k) \geq c_3 \text{ et } D(a_i, a_k) \leq d_{j2} \Leftrightarrow (a_i \text{ } S^F \text{ } a_k)$$

Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions a_i et a_k ($a_k \text{ R } a_i$).

4. Exploiter les relations de surclassement : On établit deux préordres totaux $P1$ et $P2$, ainsi qu'un préordre partiel p

- (a) Le premier préordre total $P1$ est obtenu par "classement direct" en utilisant uniquement les surclassements forts : la première classe est celle des actions non surclassées ; c'est-à-dire celles auxquelles aboutit un chemin de longueur nulle. La deuxième classe est celle des actions auxquelles aboutit un chemin de longueur 1, et ainsi de suite. Par longueur d'un chemin, on entend le nombre d'arcs constituant ce chemin. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.

- (b) Le second préordre P2 est obtenu par "classement inverse" : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins toujours en surclassement fort qui en sont issus. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.
- (c) Le préordre P est l'intersection de P1 et P2.

Avantages :

- Permet d'obtenir un classement complet des alternatives.
- Approche plus nuancée grâce à l'utilisation de seuils différenciés.
- Très adapté aux contextes complexes avec des critères contradictoires.

Limites :

- Complexité de mise en œuvre plus élevée qu'ELECTRE I.
- Sensibilité au choix des seuils et à la qualité des données d'entrée.

3.3.3 Méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)

La méthode PROMÉTHÉE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) appartient à la famille des méthodes d'aide multicritère à la décision fondées sur des comparaisons par paires. Développée par Jean-Pierre Brans dans les années 1980[12], cette méthode est aujourd'hui largement utilisée pour des problématiques complexes où les critères sont à la fois nombreux, souvent conflictuels, et pas nécessairement exprimés dans les mêmes unités.

Contrairement aux méthodes de type « agrégation pondérée », PROMÉTHÉE se distingue par une approche relationnelle et incrémentale de la préférence. Cela permet d'aboutir à un classement des alternatives en tenant compte de la supériorité d'une solution par rapport à une autre, critère par critère, avec une pondération mais aussi avec la notion subtile d'intensité de préférence.

La pertinence de PROMÉTHÉE dans le contexte de l'efficacité énergétique des bâtiments repose sur sa capacité à gérer des critères contradictoires tels que :

- la minimisation de la consommation énergétique,
- la maximisation du confort utilisateur,
- la minimisation des coûts d'investissement,
- la réduction de l'empreinte carbone, etc.

Fonctions de préférence

Il existe plusieurs types de fonctions de préférence que le décideur peut choisir selon la nature du critère[35] :

- La fonction type I (Critère usuel) est généralement employée lorsque les différences entre les alternatives sont immédiatement significatives, comme dans le cas de données discrètes ou de décisions de type tout ou rien.

- La fonction type II (U-Shape) est utilisée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement identifiés dans les données, ce qui permet de négliger les écarts considérés comme non pertinents.
- La fonction type III (V-Shape) est particulièrement adaptée lorsque les écarts entre les alternatives sont de nature continue, ou lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les écarts maximaux et minimaux sont envisageables.
- La fonction type IV (Palier) s'emploie lorsqu'il est possible d'affirmer qu'une alternative n'est ni strictement préférée, ni strictement indifférente par rapport à une autre, introduisant ainsi une zone de préférence faible.
- La fonction type V (Linéaire) est pertinente lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont bien définis dans le cadre du problème multicritère à traiter, permettant une progression régulière de la préférence.
- La fonction type VI (Distribution gaussienne) est la plus couramment utilisée dans les applications pratiques, notamment lorsque le nombre d'alternatives est suffisamment élevé. Dans ce cas, le paramètre clé repose sur le calcul de l'écart-type de la distribution.

Fondements méthodologiques de PROMÉTHÉE I et II

1. Nous fixons pour chaque critère, une des six formes de courbes proposées dans PROMETHEE ainsi que le paramètre seuil et les poids de critères.
2. Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) nous calculons la préférence globale (degré de surclassement) de la manière suivante :

$$P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot F_j(a_i, a_k)$$

3. Calculer les flux entrants et sortant pour chaque action a_i

$$\Phi^+ = \sum_{a_k \in A, a_i \neq a_k} P(a_i, a_k)$$

$P(a_i, a_k)$ flux positif qui exprime la force de flux sortant.

$$\Phi^- = \sum_{a_k \in A, a_i \neq a_k} P(a_k, a_i)$$

$P(a_i, a_k)$, flux négatif qui exprime la faiblesse de flux entrant.

4. Déterminer les 2 pré-ordres totaux et procéder au rangement des actions :
 - Le premier pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre décroissant des Φ^+ .
 - Le second pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre croissant des Φ^- .

- L'intersection des deux pré-ordres totaux fournit le pré-ordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité) de la méthode PROMETHEE I.
- L'intersection des deux pré-ordres totaux fournit le préordre total de la méthode PROMETHEE II : cette méthode consiste à ranger les actions, en ordre total, selon l'ordre décroissant des scores définis comme suit :

$$\Phi^- = \sum_{a_k \in A, a_i \neq a_k} \dots$$

Avantages :

- Gestion intuitive des préférences et des seuils de décision ;
- Adaptabilité à des situations de décision complexes multi-critères avec conflits entre objectifs ;
- Visualisation graphique via l'outil GAIA, facilitant l'analyse des compromis ;
- Disponibilité de nombreux outils logiciels (Visual PROMÉTHÉE, D-Sight, Decision Lab, etc.) ;
- Classement clair et robuste avec PROMÉTHÉE II.

Inconvénients

- Sensibilité au choix des fonctions de préférence et des seuils ;
- Complexité potentielle dans l'interprétation des résultats lorsque le nombre d'alternatives est élevé ;
- Nécessite un effort initial de calibration méthodologique pour garantir la pertinence des résultats.

3.4 Application de l'AMCD à l'efficacité énergétique des bâtiments

Après avoir détaillé les principales méthodes multicritères, il est pertinent d'examiner comment elles ont été appliquées concrètement dans des projets liés à l'efficacité énergétique des bâtiments.

3.4.1 Études existantes :

Les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMCD) sont largement mobilisées dans le secteur de l'énergie, notamment pour optimiser la performance énergétique des bâtiments. Plusieurs études démontrent leur pertinence pour évaluer des scénarios de rénovation thermique, sélectionner des matériaux isolants, ou encore hiérarchiser des systèmes de production d'énergie renouvelable.

Par exemple, une étude menée par Mardani et al. (2015)[28] a comparé des scénarios d'efficacité énergétique de bâtiments résidentiels en appliquant la méthode TOPSIS. Les

critères considérés incluait le coût initial, les économies d'énergie annuelles, le retour sur investissement et les émissions de CO₂. L'étude a révélé que TOPSIS permet de hiérarchiser efficacement les options en tenant compte simultanément des performances économiques et environnementales.

De même, la méthode ELECTRE a été appliquée dans des projets de sélection de matériaux d'isolation thermique, en tenant compte de critères tels que la conductivité thermique, le coût, la durabilité, et l'impact environnemental. Les travaux de Siksnelyte et al. (2018) [59] ont montré que ELECTRE offre une analyse robuste lorsqu'il s'agit de départager des options comportant des critères conflictuels.

Quant à PROMETHEE, il a été utilisé dans des contextes de rénovation énergétique à l'échelle urbaine. Une étude conduite par Goumas et Lygerou (2000) [20] a appliqué PROMETHEE II pour prioriser les quartiers devant bénéficier d'interventions d'efficacité énergétique, en considérant des paramètres tels que la vétusté des bâtiments, les caractéristiques climatiques locales, et le potentiel d'intégration des énergies renouvelables. PROMETHEE a permis de visualiser efficacement les compromis à travers des outils tels que la visualisation GAIA (GAIA est un module graphique de PROMETHEE).

3.4.2 Analyse des résultats et discussion de leur impact

L'analyse des résultats issus de ces différentes études confirme l'efficacité des méthodes AMCD pour traiter la complexité des décisions en matière de performance énergétique des bâtiments. Elles permettent non seulement de structurer le processus de décision, mais également d'intégrer des paramètres techniques, économiques et environnementaux qui sont souvent contradictoires.

Ces méthodes offrent également une grande flexibilité. Par exemple, TOPSIS est apprécié pour sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité dans les contextes nécessitant une évaluation rapide de scénarios. ELECTRE, quant à lui, est particulièrement adapté lorsque les alternatives présentent des performances très proches, et que des relations de surclassement permettent d'affiner la décision. PROMETHEE, enfin, se distingue par la richesse de ses visualisations, offrant aux décideurs une meilleure compréhension des compromis entre critères.

Ces résultats soulignent que l'intégration des méthodes AMCD dans les projets de rénovation énergétique contribue à des choix plus transparents et mieux justifiés. Elles facilitent l'adhésion des parties prenantes (ingénieurs, architectes, décideurs publics), améliorent la qualité des décisions prises, et accélèrent la mise en œuvre de solutions efficaces dans la lutte contre la surconsommation énergétique du secteur du bâtiment.

3.5 Technologies Informatiques pour l'Efficacité Énergétique

3.5.1 Systèmes de gestion de l'énergie

Les systèmes de gestion de l'énergie (SGE), ou Building Energy Management Systems (BEMS), jouent aujourd'hui un rôle crucial dans l'optimisation de la consommation énergétique des bâtiments. Ces systèmes s'appuient sur des capteurs, des actionneurs, et des logiciels avancés pour surveiller en temps réel les flux énergétiques,

détecter les anomalies, et ajuster les consommations aux besoins réels.

Grâce aux progrès du numérique, les SGE intègrent des fonctions d'analyse prédictive et de maintenance préventive, permettant de réduire la consommation énergétique jusqu'à 30 % dans certains cas. Ils permettent, par exemple, de réguler automatiquement l'éclairage, la ventilation, ou encore la climatisation en fonction des conditions d'occupation et des données climatiques.

Des logiciels tels que EnergyPlus, TRNSYS, ou encore RETScreen, sont souvent intégrés dans ces systèmes pour simuler les performances énergétiques et évaluer les impacts des différentes stratégies de gestion. Ils offrent aux gestionnaires et aux concepteurs une meilleure maîtrise de la consommation énergétique du bâtiment, tout en facilitant la prise de décision lors des phases de conception ou de rénovation.

3.5.2 Intégration avec les méthodes AMCD

L'intégration des méthodes d'aide multicritère à la décision avec les systèmes de gestion de l'énergie permet de franchir un cap supplémentaire en matière d'optimisation énergétique[6]. En effet, les données collectées en temps réel par les SGE peuvent alimenter les modèles multicritères afin de proposer des scénarios de gestion énergétique toujours plus performants et adaptés aux spécificités du bâtiment.

Par exemple, les méthodes comme TOPSIS ou PROMETHEE peuvent être couplées aux logiciels de simulation énergétique pour classer les différentes stratégies de gestion (chauffage, refroidissement, ventilation) en fonction des critères définis par les utilisateurs (coût d'exploitation, confort thermique, impact environnemental). De plus, ELECTRE peut être utilisé pour sélectionner les équipements énergétiques les plus adaptés parmi plusieurs alternatives technologiques en fonction de critères pondérés.

Cette intégration ouvre la voie à des systèmes de décision autonomes et intelligents capables d'adapter en continu les stratégies de gestion énergétique. Elle permet également d'accompagner les concepteurs et les décideurs publics dans la mise en œuvre de politiques énergétiques locales, en s'appuyant sur des analyses multicritères robustes pour optimiser l'efficacité énergétique à l'échelle du bâtiment ou d'un quartier.

En définitive, le croisement des SGE avec les méthodes AMCD favorise l'émergence d'un bâtiment intelligent, capable d'allier efficacité énergétique, respect des contraintes environnementales, et amélioration du confort des occupants.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondations essentielles de l'aide multicritère à la décision dans le contexte de l'efficacité énergétique des bâtiments. Nous avons commencé par définir les concepts fondamentaux d'un problème d'aide à la décision, en précisant les différentes étapes de sa structuration : de l'identification des objectifs jusqu'à la sélection des solutions optimales, en passant par la gestion des critères parfois contradictoires qui caractérisent ce type de problématique.

Nous avons poursuivi avec la formulation du problème de décision, en décrivant la structuration de l'espace de recherche et de l'espace des objectifs, ainsi que la manière dont ils interagissent pour permettre une évaluation cohérente des différentes alternatives. Cette clarification conceptuelle a permis de mieux comprendre la complexité inhérente aux projets de rénovation énergétique, où les choix techniques doivent intégrer des critères économiques, environnementaux, techniques et de confort.

Ensuite, nous avons détaillé les trois méthodes multicritères retenues pour cette étude : TOPSIS, ELECTRE, et PROMETHEE. Pour chacune, nous avons exposé les principes de fonctionnement, les étapes clés de mise en œuvre, ainsi que les avantages et les limites dans le cadre spécifique de l'optimisation énergétique des bâtiments. Ces méthodes offrent des approches complémentaires et adaptées à la diversité des décisions à prendre dans des contextes de rénovation ou de construction durable.

Nous avons enfin illustré l'application concrète de ces méthodes à travers des études de cas et démontré la manière dont elles peuvent être intégrées dans les systèmes informatiques de gestion de l'énergie pour enrichir la prise de décision. L'intégration de ces outils avec les méthodes AMCD permet de construire des systèmes intelligents, capables d'analyser en temps réel les performances énergétiques et de recommander les meilleures actions d'optimisation.

Cette analyse théorique constitue ainsi la base méthodologique de notre travail. Dans le chapitre suivant, nous préciserons les critères retenus pour notre étude, justifierons le choix de la méthode multicritère la plus appropriée à notre problématique, et concevrons un système informatique dédié à la prise de décision énergétique. Ce cadre méthodologique nous permettra de proposer une solution concrète et adaptée aux enjeux de la performance énergétique des bâtiments.

Chapitre 4

Application des méthodes multicritères à l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments

4.1 Introduction

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue aujourd'hui une priorité stratégique, tant pour des raisons environnementales qu'économiques. Après avoir étudié les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM) dans le chapitre précédent, ce quatrième chapitre propose leur application concrète dans le contexte spécifique de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels en Algérie.

Avant toute application des méthodes multicritères, il est indispensable de disposer d'un ensemble d'informations fiables et pertinentes. En effet, la qualité des résultats produits par ces méthodes dépend étroitement de la validité des critères retenus, de l'exactitude des données de performance des alternatives, ainsi que de la justesse de la pondération attribuée à chaque critère. Ce processus repose donc sur plusieurs étapes préalables : la validation des critères, la construction de la matrice de performance, puis la pondération des critères.

Dans cette étude, la Technique du Groupe Nominal (TGN) a été mobilisée afin de valider de manière rigoureuse et participative les critères jugés pertinents pour évaluer les différentes solutions de rénovation énergétique. Une fois ces critères définis, une matrice de performance a été élaborée à partir d'estimations formulées par des ingénieurs spécialisés dans le domaine. Cette matrice sera ensuite complétée par une pondération des critères, permettant d'ajuster leur influence dans le processus de décision.

L'ensemble de ces éléments sera ensuite utilisé pour appliquer quatre méthodes multicritères : ELECTRE I, PROMÉTHÉE II, TOPSIS, et SAW (Simple Additive Weighting). Si les trois premières ont été détaillées précédemment, la méthode SAW est introduite ici comme une approche comparative complémentaire, fondée sur un principe de somme pondérée.

Enfin, une visualisation GAIA sera proposée pour illustrer les relations entre critères et alternatives, avant de présenter une application logicielle de traitement des données via un fichier Excel. Une analyse comparative des résultats permettra de mettre en évidence les convergences ou divergences entre les différentes méthodes, et de discuter leur pertinence respective dans le contexte étudié.

4.2 Validation des critères par la Technique du Groupe Nominal (TGN)

4.2.1 Justification méthodologique

Avant d'appliquer une méthode multicritère, il est impératif de disposer d'un ensemble de critères pertinents, validés et acceptés par les acteurs du domaine concerné. Dans ce travail, la Technique du Groupe Nominal (TGN), développée initialement par Delbecq et al. (1975), a été retenue pour assurer cette validation de manière structurée, participative et rigoureuse.

La TGN constitue une méthode qualitative permettant d'identifier, valider, clarifier et consolider des critères pertinents à travers un processus de concertation encadrée, évitant les biais cognitifs souvent observés dans les discussions non structurées. Cette méthode ne produit pas de pondération mais permet de sélectionner les critères les plus significatifs, formant ainsi une base solide pour toute analyse multicritère ultérieure.

4.2.2 Contexte d'application et composition du groupe d'experts

L'application de la TGN s'inscrit ici dans le contexte spécifique de la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels en Algérie, caractérisé par :

- une vétusté importante du parc immobilier,
- une faible application des normes thermiques,
- un contexte économique contraint,
- des engagements climatiques nationaux à respecter.

Pour garantir la diversité et la pertinence des points de vue, un panel de 10 experts a été constitué, incluant des ingénieurs en énergie, des architectes, un informaticien, des décideurs publics, un spécialiste du patrimoine, et un universitaire en environnement du bâtiment. Ce panel permet de couvrir les dimensions techniques, économiques, réglementaires, patrimoniales et environnementales.

Profil	Nombre	Expertise apportée
Ingénieurs en énergie	3	Maîtrise des aspects techniques énergétiques
Architectes	2	Connaissance des contraintes constructives et esthétiques
Ingénieur en informatique	1	Expertise en IT modélisation et simulation thermique
Décideurs publics	2	Compréhension des mécanismes d'aides et subventions
Spécialiste en patrimoine	1	Préservation des caractéristiques architecturales
Universitaire en environnement du bâtiment	1	Approche scientifique et implications environnementales

FIGURE 4.1 – Le groupe de 10 experts pour le processus de validation TGN

4.2.3 Déroulement du processus TGN

Le processus s'est déroulé en quatre étapes, conformément à la méthode canonique :

Étape 1 — Génération silencieuse des idées Conformément aux principes fondateurs de la Technique du Groupe Nominal (TGN), les participants ont été invités à identifier, de manière individuelle et en silence, les critères qu'ils considéraient comme pertinents pour l'évaluation des solutions de rénovation énergétique. Cette phase, d'une durée approximative de quinze minutes, s'est déroulée sans aucune interaction entre les membres du groupe.

Cette étape revêt une importance méthodologique essentielle, dans la mesure où elle permet d'atténuer les biais d'ancrage cognitif généralement observés lorsqu'une idée exprimée en début de séance influence de manière disproportionnée le reste des échanges. De plus, elle favorise une réelle diversité de points de vue, en limitant l'impact des rapports hiérarchiques ou des dynamiques de groupe, et en permettant l'expression d'opinions minoritaires qui pourraient être étouffées dans un contexte de discussion libre.

Étape 2 — Tour de table Dans un second temps, un tour de table a été organisé selon un protocole rigoureux : chaque participant énonçait à son tour un seul critère parmi ceux qu'il avait listés, sans apporter d'explication ni justification à ce stade. Ce processus itératif s'est poursuivi jusqu'à épuisement de l'ensemble des propositions individuelles.

Le rôle du facilitateur était ici central : il a assuré la retranscription fidèle et visible de tous les critères énoncés, garantissant ainsi une totale transparence du processus. Ce déroulement structuré permet d'assurer une participation équitable de l'ensemble des membres du groupe, tout en évitant l'apparition prématurée de jugements ou de débats susceptibles de biaiser la formulation libre des propositions.

Étape 3 — Discussion de clarification Une fois l'ensemble des critères collectés, une phase de discussion collective a été engagée. Elle visait à clarifier la signification de chaque critère, à éliminer les redondances éventuelles, et à affiner les formulations afin de garantir une compréhension commune et opérationnelle.

Cette étape s'est révélée particulièrement importante pour distinguer des notions proches mais non équivalentes, et pour statuer sur la pertinence des critères émergents par rapport aux enjeux du contexte algérien. L'encadrement méthodologique de la discussion a permis d'éviter les dérives vers des débats subjectifs, en maintenant le dialogue dans un cadre constructif et équilibré.

Étape 4 — Vote pour validation La dernière étape a consisté à valider collectivement les critères jugés les plus pertinents. Pour cela, chaque expert disposait de dix jetons à répartir librement entre les différents critères identifiés. Ce système d'allocation libre permet de mesurer le degré de consensus sans imposer de hiérarchie stricte.

Un critère était retenu s'il obtenait un soutien d'au moins 50% des participants (soit 5 votes sur 10). Ceux atteignant exactement ce seuil faisaient l'objet d'un vote complémentaire unanime pour confirmer leur inclusion, tandis que les critères en deçà étaient écartés. Ce processus garantit que seuls les critères bénéficiant d'un appui substantiel et partagé sont retenus dans le référentiel final, assurant ainsi la solidité méthodologique de l'analyse multicritère à venir.

4.2.4 Résultats obtenus

Le processus de validation mené via la Technique du Groupe Nominal (TGN) a permis de dégager un ensemble structuré de critères pertinents pour l'analyse multicritère de l'efficacité énergétique des bâtiments. Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des critères identifiés durant les phases de génération et de discussion, avec leur code, le nombre de votes reçus, et le statut final décidé collectivement.

Critère	Code	Votes reçus	Statut
Réduction consommation énergétique	RCE	10/10	Validé
Performance isolation thermique	PIT	10/10	Validé
Coût initial d'investissement	CII	9/10	Validé
Qualité de l'air intérieur	QAI	8/10	Validé
Empreinte carbone des matériaux	ECM	7/10	Validé
Temps de retour sur investissement	TRI	7/10	Validé
Étanchéité à l'air du bâtiment	EAB	6/10	Validé
Accès aux subventions et aides	ASA	6/10	Validé
Matériaux biosourcés/recyclés	MBR	6/10	Validé
Intégration énergies renouvelables	IER	5/10	A Valider
Facilité de mise en œuvre	FMO	5/10	A Valider
Impact sur confort thermique	ICT	3/10	Non retenu
Risques de dégradation du bâti	RDB	2/10	Non retenu
Acceptabilité sociale	ASO	1/10	Non retenu

FIGURE 4.2 – Les critères identifiés avec le processus TGN

4.2.5 Discussion et implications

Définition des critères validés

Les définitions suivantes reprennent l'ensemble des critères formulés par les experts durant les phases de la TGN, qu'ils aient été validés ou non, afin de garantir une traçabilité complète du processus de sélection.

Critères validés pour l'analyse multicritère

RCE – Réduction de la consommation énergétique Ce critère évalue la capacité d'une solution à diminuer les besoins énergétiques globaux du bâtiment, généralement exprimée en pourcentage de réduction par rapport à une situation de référence. Il reflète directement l'impact de la rénovation sur la facture énergétique et sur l'empreinte environnementale du bâtiment.

- PIT – Performance de l’isolation thermique** Il s’agit de la capacité d’un système constructif ou d’un matériau à limiter les pertes de chaleur et à maintenir une température intérieure stable. Cette performance est souvent mesurée à travers des indicateurs comme la résistance thermique (R) ou la conductivité thermique λ , et conditionne à la fois le confort thermique et l’efficacité énergétique.
- CII – Coût initial d’investissement** Ce critère représente l’ensemble des dépenses nécessaires à la mise en œuvre d’une solution de rénovation, incluant les matériaux, la main-d’œuvre, la logistique et les équipements. Il est déterminant dans la prise de décision, car il reflète l’accessibilité financière du projet.
- QAI – Qualité de l’air intérieur** Il mesure l’effet de la solution envisagée sur la santé et le bien-être des occupants, en lien avec le contrôle de l’humidité, la filtration des polluants et le renouvellement de l’air. Une bonne qualité de l’air intérieur est essentielle à la fois pour des raisons sanitaires et de confort.
- ECM – Empreinte carbone des matériaux** Ce critère quantifie les émissions de gaz à effet de serre (exprimées en kg CO₂ équivalent) générées lors de la production, du transport et de la mise en œuvre des matériaux utilisés dans la rénovation. Il permet d’évaluer l’impact environnemental global de la solution sur l’ensemble de son cycle de vie.
- TRI – Temps de retour sur investissement** Il s’agit de la durée nécessaire pour amortir le coût initial de la solution grâce aux économies d’énergie générées. Ce critère est calculé en divisant l’investissement par les économies annuelles estimées, ce qui donne un indicateur de rentabilité à moyen ou long terme.
- EAB – Étanchéité à l’air du bâtiment** L’étanchéité mesure la capacité de l’enveloppe du bâtiment à limiter les infiltrations d’air non contrôlées. Elle est généralement évaluée par un test d’infiltrométrie (par exemple, le test n50). Une bonne étanchéité améliore l’efficacité du chauffage, réduit les pertes thermiques et évite certains désordres comme la condensation.
- ASA – Accès aux subventions et aides** Ce critère évalue la facilité avec laquelle une solution permet de bénéficier des dispositifs publics de financement (subventions, crédits à taux bonifiés, programmes d’incitation, etc.). Il a un impact direct sur le coût net de l’investissement pour le porteur de projet.
- MBR – Matériaux biosourcés ou recyclés** Il désigne la proportion et la qualité des matériaux d’origine végétale, animale ou issus du recyclage intégrés dans la solution. Ces matériaux, en plus de leur performance technique, contribuent à la réduction de l’empreinte carbone et favorisent l’économie circulaire.
- IER – Intégration des énergies renouvelables** Ce critère mesure le degré d’inclusion de sources d’énergie renouvelable (solaire, géothermie, biomasse, etc.) dans la solution proposée. L’évaluation repose sur une échelle qualitative allant d’une intégration symbolique à une autonomie énergétique quasi complète. Il constitue un levier stratégique dans la transition vers des bâtiments bas carbone.

Critères non retenus

- FMO – Facilité de mise en œuvre** Ce critère mesure la complexité technique de l’installation, les besoins en main-d’œuvre spécialisée, les délais de réalisation, ainsi que les contraintes logistiques. Bien qu’il ait été jugé pertinent dans le

contexte algérien – notamment dans les zones à faibles ressources techniques – il a finalement été exclu pour limiter la surcharge du modèle multicritère.

ICT – Impact sur le confort thermique Ce critère évalue l’amélioration de la stabilité hygrothermique intérieure, la réduction des sensations d’inconfort (parois froides, courants d’air), et l’homogénéité de la température ambiante. Après délibération, les experts ont estimé qu’il était déjà substantiellement couvert par la combinaison des critères PIT et QAI, et qu’un ajout séparé aurait introduit une redondance inutile.

RDB – Risques de dégradation du bâti Il s’agit ici de la probabilité que certaines solutions induisent des pathologies structurelles (moisissures, fissures, condensation). Bien que reconnu comme important, ce critère a été considéré comme une contrainte technique intégrée à l’évaluation des alternatives, et non comme un critère autonome.

ASO – Acceptabilité sociale Ce critère reflète le degré d’adhésion des occupants aux solutions proposées, en tenant compte de leur perception culturelle, esthétique ou comportementale. Les experts ont souligné sa pertinence, notamment pour les bâtiments à valeur patrimoniale, mais ont jugé sa quantification difficile dans le cadre d’une évaluation purement technique. Il est toutefois recommandé de l’intégrer dans des études complémentaires à visée participative.

4.3 Construction de la matrice de performance

4.3.1 Définition et rôle de la matrice de performance

La matrice de performance, également appelée matrice de décision, est l’élément central de toute démarche d’analyse multicritère (MCDA). Elle prend la forme d’un tableau à double entrée dans lequel chaque alternative est évaluée selon un ensemble de critères préalablement définis et validés.

Formellement, cette matrice peut être représentée par : $X = [x_{ij}]_{n \times m}$

où :

- n est le nombre d’alternatives considérées (lignes),
- m est le nombre de critères (colonnes),
- x_{ij} représente la performance de l’alternative i selon le critère j .

La qualité de cette matrice influence directement la pertinence et la robustesse des résultats obtenus par les méthodes MCDA.

4.3.2 Étapes méthodologiques de construction

La construction de la matrice de performance suit une série d’étapes rigoureuses :

Identification du problème décisionnel Le problème étudié est : « Sélectionner la solution la plus efficace en matière d’efficacité énergétique pour le secteur résidentiel dans un contexte méditerranéen (Algérie) ». Cette problématique intègre des contraintes économiques, techniques, environnementales et sociales.

Génération des alternatives Cinq alternatives ont été définies à partir d’une analyse documentaire, de simulations techniques et de consultations d’experts :

- A : Solutions standard
- B : Solutions haute performance
- C : Solutions écologiques
- D : Solutions à énergies renouvelables
- E : Solutions progressives

Définition des critères d'évaluation Les dix critères retenus ont été validés via la TGN et couvrent trois dimensions :

- Environnementale : ECM, MBR, QAI
- Technique : RCE, PIT, EAB, IER
- Économique : CII, TRI, ASA

Caractérisation des critères Tous les critères sont de type maximisation : plus la valeur est élevée, meilleure est la performance. Une échelle commune de 1 (très faible) à 9 (excellente performance) est utilisée pour garantir l'homogénéité de la représentation.

Collecte des données Les données ont été obtenues à partir de :

- Analyses techniques (performances énergétiques, étanchéité, etc.)
- Études économiques (coûts, retours sur investissement)
- Jugements d'experts (évaluation qualitative convertie en notes)

Construction de la matrice finale La matrice de performance est résumée ci-dessous :

Alternative	ECM	MBR	QAI	RCE	PIT	EAB	IER	CII	TRI	ASA
A : Solutions standard	5	3	5	5	5	4	2	7	6	5
B : Solutions haute performance	4	5	8	8	9	9	6	3	5	7
C : Solutions écologiques	8	9	7	7	7	6	7	5	5	8
D : Solutions énergies renouvelables	6	6	7	9	8	7	9	2	4	9
E : Solutions progressives	5	4	6	6	6	5	5	8	7	6

FIGURE 4.3 – Construction de la matrice de performance

4.3.3 Analyse de la matrice

1. Caractéristiques générales

- Nombre d'alternatives : $n=5$
- Nombre de critères : $m=10$
- Évaluations totales : $5 \times 10 = 50$

2. Points saillants des alternatives

- **Alternative A** : Performances globalement moyennes, point fort sur le coût (CII = 7), point faible sur l'intégration des énergies renouvelables (IER = 2).
- **Alternative B** : Excellente sur les performances techniques (PIT et EAB = 9), mais pénalisée par un coût élevé (CII = 3).
- **Alternative C** : Très bon profil environnemental (ECM = 8, MBR = 9), performances équilibrées et bon accès aux aides (ASA = 8).

- **Alternative D** : Leader sur l'aspect renouvelable ($IER = 9$) et subventions ($ASA = 9$), mais coûteuse ($CII = 2$).
- **Alternative E** : Solution économique optimisée ($CII = 8$, $TRI = 7$), performances techniques modérées.

4.3.4 Qualité et fiabilité de la matrice

- **Cohérence** : aucune contradiction logique détectée.
- **Complétude** : toutes les évaluations (50/50) sont renseignées.
- **Pertinence** : l'ensemble des critères couvre les dimensions clés du problème.
- **Représentativité** : les alternatives reflètent une diversité de solutions réalistes et comparables.

4.3.5 Préparation à l'analyse multicritère

Cette matrice constitue désormais le socle des étapes suivantes :

1. **Normalisation** des données si nécessaire ;
2. **Pondération** des critères selon leur importance (à venir en section 4.4) ;
3. **Application des méthodes MCDM** : ELECTRE I, PROMÉTHÉE II, TOPSIS, SAW ;
4. **Classement des alternatives** ;
5. **Analyses de sensibilité** sur les résultats obtenus.

La construction de cette matrice de performance s'est appuyée sur une méthodologie rigoureuse et structurée, garantissant la fiabilité des données mobilisées. Sa robustesse en fait une base solide pour l'application des méthodes d'aide à la décision multicritère et pour le choix optimal d'une solution d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments dans le contexte algérien.

4.4 Pondération des critères

La pondération des critères constitue une étape déterminante dans toute méthode d'aide à la décision multicritère (MCDA). Elle permet de traduire l'importance relative de chaque critère dans le processus d'évaluation et conditionne directement le classement final des alternatives. Contrairement aux approches subjectives basées sur les préférences des décideurs, ce travail a adopté une méthode objective de pondération : la méthode MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria).

4.4.1 Présentation de la méthode MEREC

La méthode MEREC repose sur un principe fondamental : plus le retrait d'un critère modifie le classement des alternatives, plus ce critère est important. Ainsi, elle évalue l'impact individuel de chaque critère en analysant les perturbations induites par son absence.

Les principales étapes de la méthode sont :

1. **Normalisation** de la matrice de performance.
2. **Calcul d'un score global initial** pour chaque alternative avec des poids égaux.
3. **Retrait successif de chaque critère**, puis recalcul des scores.
4. **Mesure de l'effet du retrait** via la distance de Spearman entre les classements.
5. **Calcul des poids relatifs** en fonction de ces distances.

4.4.2 Application au cas d'étude

1. **Données utilisées** La méthode a été appliquée à la matrice de performance contenant 5 alternatives et 10 critères (voir section 4.3). Les critères incluent :
 - **Environnementaux** : ECM, MBR, QAI
 - **Énergétiques** : RCE, PIT, EAB, IER
 - **Économiques** : CII, TRI, ASA
2. **Résultats des pondérations finales** Après application complète de l'algorithme MEREC, les poids finaux normalisés obtenus sont les suivants :

Critère	Poids	Interprétation
IER – Intégration d'énergies renouvelables	0.216 (21.6%)	 Plus influent
CII – Coût initial d'investissement	0.216 (21.6%)	 Plus influent
RCE – Réduction consommation énergétique	0.162 (16.2%)	Très important
QAI – Qualité de l'air intérieur	0.108 (10.8%)	Important
TRI – Temps de retour sur investissement	0.108 (10.8%)	Important
MBR – Matériaux biosourcés ou recyclés	0.054 (5.4%)	Moyen
ASA – Accès subventions et aides	0.054 (5.4%)	Moyen
ECM – Empreinte carbone des matériaux	0.027 (2.7%)	Faible
PIT – Performance isolation thermique	0.027 (2.7%)	Faible
EAB – Étanchéité à l'air du bâtiment	0.027 (2.7%)	Faible

FIGURE 4.4 – Résultats des pondérations finales avec l'algorithme MEREC

Les calculs détaillés de la méthode MEREC, appliquée pour déterminer les pondérations objectives des critères multicritères, sont disponibles en Annexe 1.

4.4.3 Analyse par catégorie de critères

En regroupant les poids par familles, on obtient la répartition suivante :

Catégorie	Critères associés	Poids cumulé
Critères énergétiques	RCE, PIT, EAB, IER	43.2 %
Critères économiques	CII, TRI, ASA	37.8 %
Critères environnementaux	ECM, MBR, QAI	18.9 %

FIGURE 4.5 – Analyse par catégorie de critères

Ces résultats montrent que les critères énergétiques dominent, ce qui est cohérent avec les priorités stratégiques de l'étude. Les aspects économiques occupent également une place centrale, tandis que les considérations environnementales, bien que présentes, ont un poids global plus faible.

4.4.4 Discussion et implications

L'application de la méthode MEREC a mis en évidence des disparités importantes dans l'influence des critères :

- L'intégration des énergies renouvelables (IER) et le coût initial (CII) sont les critères les plus déterminants.
- Des critères techniques comme la performance de l'isolation thermique (PIT) ou l'étanchéité (EAB), bien que fondamentaux en ingénierie, ont eu peu d'impact sur le classement global.
- L'empreinte carbone des matériaux (ECM) a également montré un poids réduit, ce qui pose question sur sa prise en compte dans les priorités locales.

Cette pondération objective apporte une base méthodologique rigoureuse pour l'application des méthodes multicritères. Elle garantit que le classement final des alternatives ne dépend pas d'un choix arbitraire de poids, mais reflète l'impact réel de chaque critère dans la différenciation des solutions.

4.5 Application des méthodes multicritères

L'ensemble des données préparatoires – critères validés, matrice de performance et pondérations – permet désormais d'appliquer différentes méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDA). L'objectif est de comparer les cinq alternatives identifiées dans le contexte de la rénovation énergétique des bâtiments, et d'obtenir un classement cohérent et justifiable.

Quatre méthodes complémentaires sont mises en œuvre :

- **ELECTRE I** : méthode d'élimination par surclassement,
- **PROMÉTHÉE II** : méthode à base de flux multicritères,
- **TOPSIS** : méthode fondée sur la distance à une solution idéale,
- **SAW** (Simple Additive Weighting) : méthode additive pondérée.

4.5.1 Méthode ELECTRE I

a) Principe général

ELECTRE I repose sur la construction de relations de surclassement entre alternatives. Une alternative A est dite "surclasser" une alternative B si, globalement, elle est au moins aussi bonne que B sur un nombre significatif de critères, et ne lui est pas trop inférieure sur les autres.

b) Étapes appliquées

- Construction de la matrice de concordance (en tenant compte des pondérations)
- Calcul de la matrice de discordance
- Détermination du noyau de surclassement

4.5.2 Méthode PROMÉTHÉE II

a) Principe général

PROMÉTHÉE II classe les alternatives en calculant deux types de flux :

- **Flux de sortie** : degré selon lequel une alternative surclasse les autres,
- **Flux d'entrée** : degré selon lequel une alternative est surclassée par les autres.

Le flux net permet un classement complet des alternatives.

b) Étapes appliquées

- Définition des fonctions de préférence pour chaque critère (souvent linéaires)
- Calcul des indices de préférence et des flux
- Détermination du classement net

4.5.3 Méthode TOPSIS

a) Principe général

TOPSIS classe les alternatives selon leur proximité à la solution idéale (meilleure performance sur chaque critère) et à la solution anti-idéale (pire performance sur chaque critère). L'alternative la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de l'anti-idéale est considérée comme la meilleure.

b) Étapes appliquées

- Normalisation de la matrice de performance
- Pondération des critères
- Détermination des solutions idéales et anti-idéales
- Calcul des distances et du score de similarité

4.5.4 Méthode SAW (Simple Additive Weighting)

a) Principe général

SAW est une méthode simple et directe, consistant à additionner les performances pondérées de chaque alternative sur l'ensemble des critères. Elle nécessite une normalisation préalable des données.

b) Étapes appliquées

- Normalisation linéaire des critères (par max ou min)
- Application des pondérations issues de MEREC
- Calcul du score total SAW pour chaque alternative

4.6 Visualisation des résultats et outils utilisés

4.6.1 Outils utilisés pour la visualisation

Pour faciliter l'analyse des résultats des méthodes multicritères appliquées (PRO-MÉTHÉE II, TOPSIS, ELECTRE I), plusieurs outils de visualisation décisionnelle ont été utilisés. Ces outils permettent de mieux comprendre les performances relatives des alternatives, d'identifier visuellement les compromis entre critères, et de renforcer la robustesse de la décision finale.

Les principaux outils mobilisés sont :

Application de visualisation développée

Une application interactive a été développée pour permettre la consultation dynamique des résultats. Cette application offre plusieurs fonctionnalités, notamment :

- Génération automatique de graphes radar pour comparer les performances par critère ;
- Affichage des scores finaux pour chaque méthode de décision ;
- Présentation de la hiérarchie des alternatives à travers des graphes de surclassement ou de distance à la solution idéale.

L'application permet également de comparer les méthodes entre elles et d'identifier les alternatives les plus robustes. Elle facilite ainsi la prise de décision multicritère dans un cadre opérationnel.

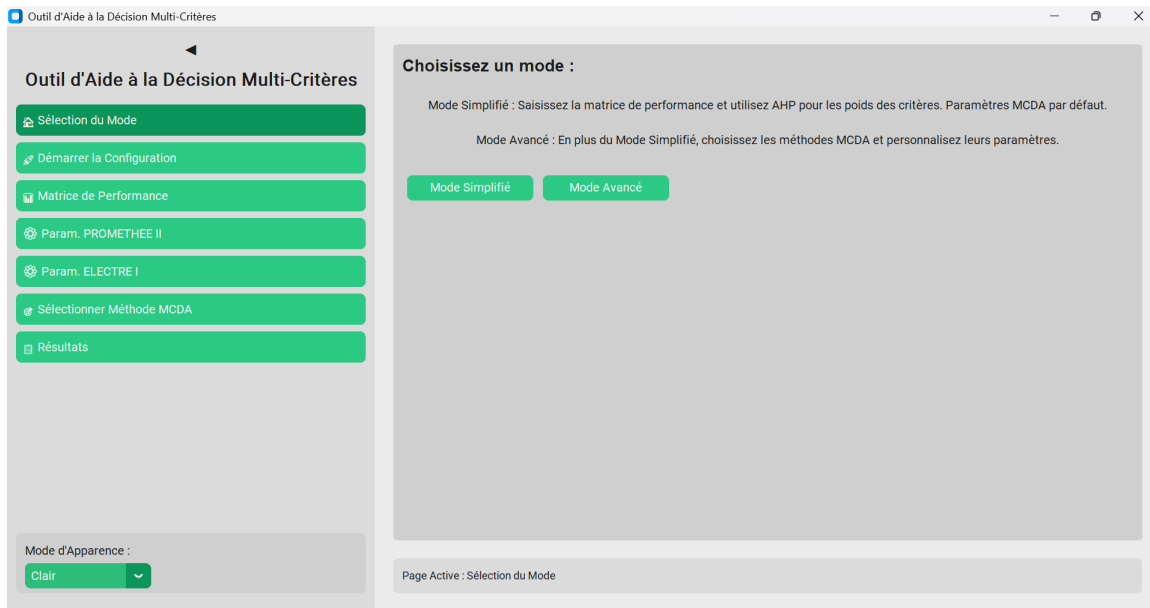


FIGURE 4.6 – Interface principale de l’outil d’aide à la décision multicritère – menu de sélection des modules et des méthodes.

L’application propose deux modes d’utilisation :

1. **Mode simplifié**, destiné aux utilisateurs souhaitant générer rapidement des résultats à partir d’une matrice de performance unique avec pondération AHP automatique.
2. **Mode avancé**, qui autorise la personnalisation des méthodes MCDA et l’ajustement des paramètres associés.

L’interface intuitive de l’outil, illustrée dans la figure ci-dessus, guide l’utilisateur à travers les différentes étapes du processus décisionnel, de la configuration initiale à la visualisation des résultats.

(Les captures d’écran des interfaces applicatives sont présentées dans les sections suivantes.)

Outil GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid)

Le plan GAIA est un outil complémentaire intégré à la méthode PROMÉTHÉE, permettant de représenter graphiquement les alternatives et les critères dans un espace multidimensionnel réduit.

Il permet de :

- Visualiser les conflits ou convergences entre critères ;
- Identifier les alternatives proches de l’axe de décision (qui représentent un bon compromis global) ;
- Mieux comprendre le profil de décision du décideur, notamment à travers la direction du vecteur (axe décisionnel).

Ce support est particulièrement utile pour accompagner une analyse exploratoire ou participative, en mettant en lumière les tensions entre objectifs (coût, impact environnemental, performance, etc.).

4.6.2 Visualisation des performances (PROMÉTHÉE II, TOP-SIS, ELECTRE I)

Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats obtenus via les différentes méthodes multicritères utilisées, une application décisionnelle a été mise en œuvre afin de générer des représentations graphiques des alternatives évaluées. Ces visualisations incluent :

- Des graphes radar représentant les performances normalisées des alternatives par critère ;
- Des graphes de surclassement illustrant la hiérarchie globale entre les options.

a) PROMÉTHÉE II – Résultat visuel

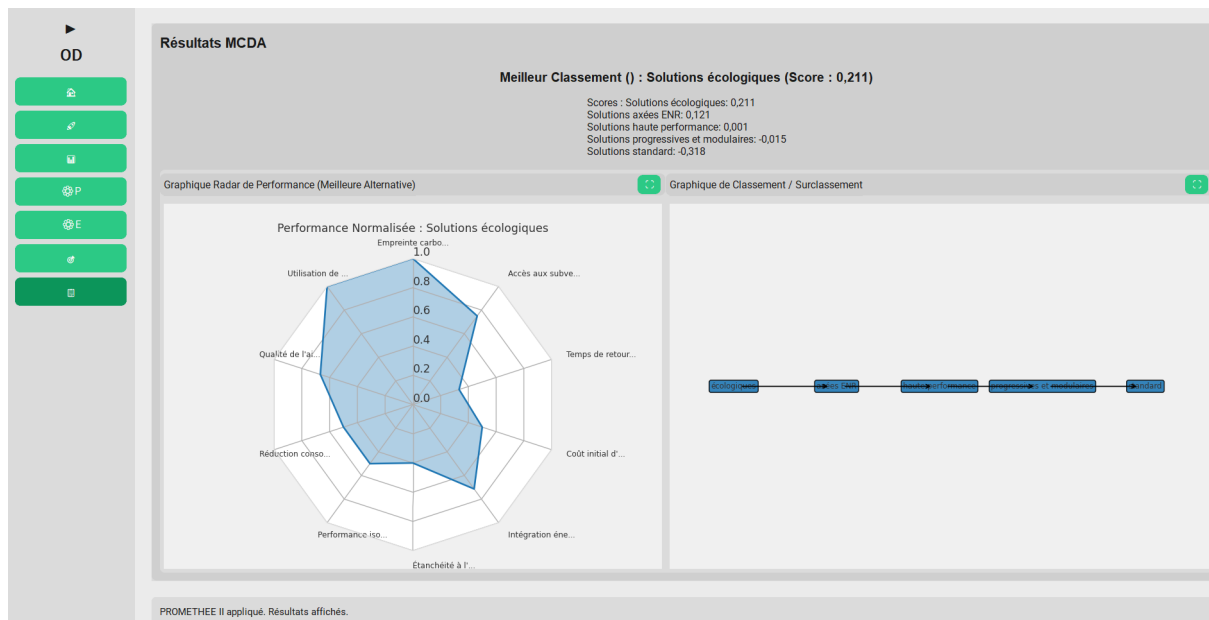


FIGURE 4.7 – Résultat visuel de la méthode PROMÉTHÉE II

La méthode PROMÉTHÉE II permet de classer les alternatives en tenant compte à la fois des préférences positives et négatives. Le classement final positionne l'alternative « Solutions écologiques » en tête avec un score de 0.211, surpassant nettement les autres alternatives.

Le graphe radar associé montre que cette alternative présente :

- Une empreinte carbone réduite,
- Une bonne intégration énergétique,
- Un accès avantageux aux subventions.

En revanche, ses performances sont plus modestes en matière de coût initial et de temps de retour sur investissement.

Le graphe de surclassement illustre visuellement la supériorité de cette alternative par rapport aux autres, en la plaçant à l'extrémité gauche du graphe.

b) TOPSIS – Résultat visuel

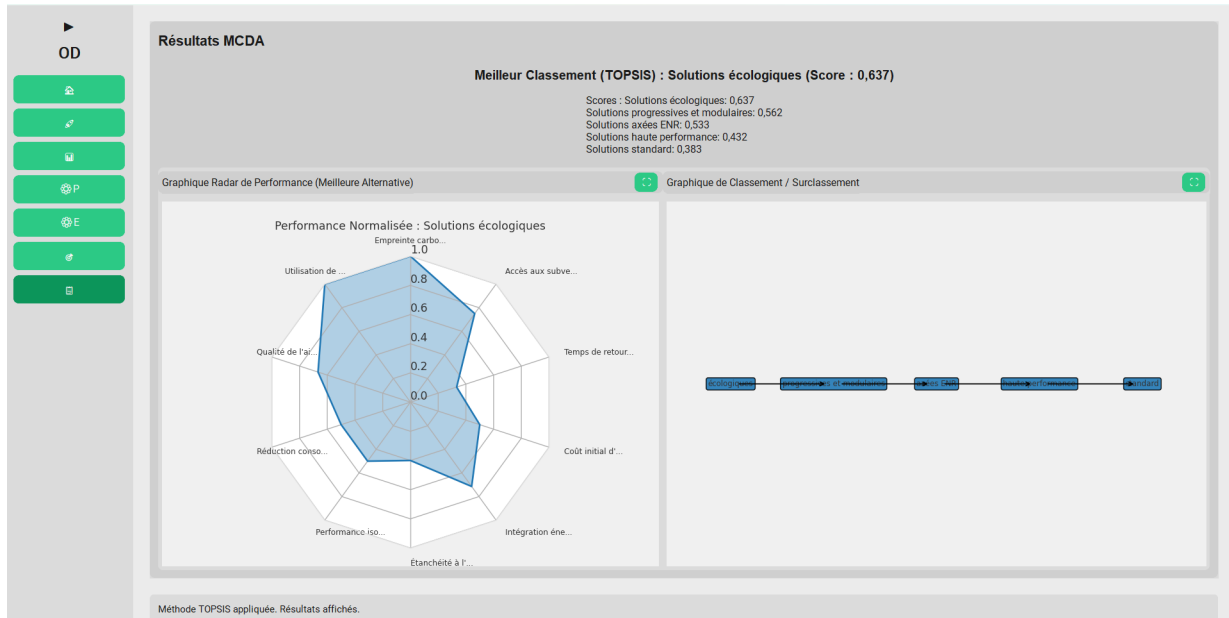


FIGURE 4.8 – Résultat visuel de la méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS, qui repose sur la distance aux solutions idéales (meilleure et pire), classe également « Solutions écologiques » en première position, avec un score de 0.637.

Elle est suivie par :

- « Solutions progressives et modulaires » : 0.562,
- « Solutions axées ENR » : 0.533,
- « Solutions haute performance » : 0.432,
- « Solutions standard » : 0.383.

Le profil multicritère (graphe radar) souligne une performance globale équilibrée sur la majorité des critères, confirmant ainsi la dominance écologique, tout en maintenant des valeurs acceptables sur les autres aspects.

c) ELECTRE I – Résultat visuel

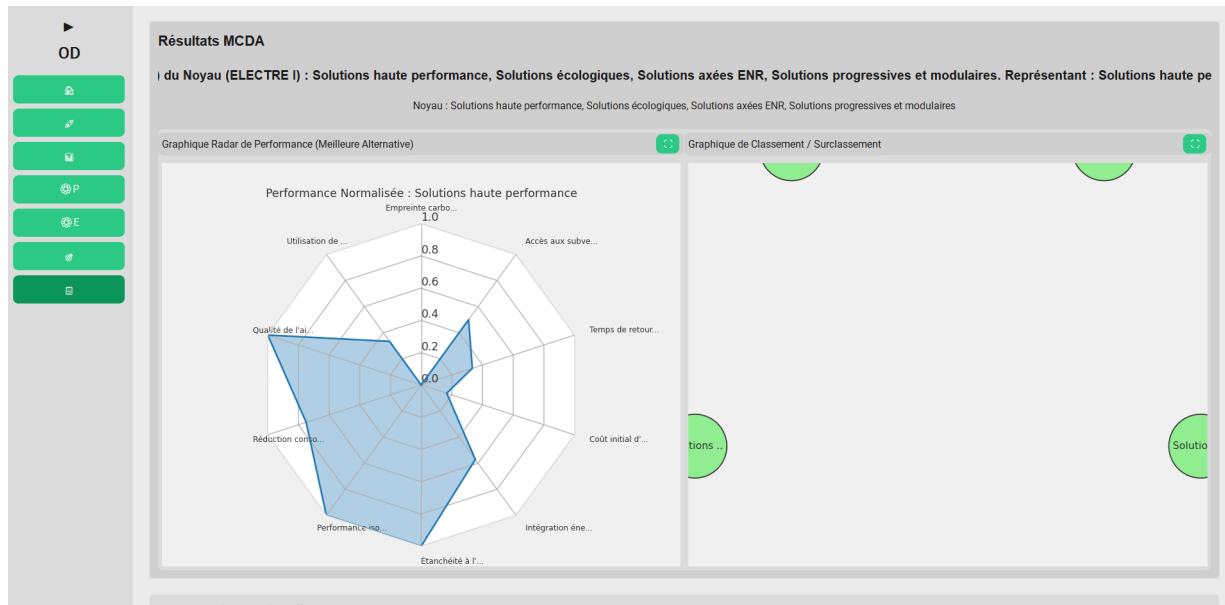


FIGURE 4.9 – Résultat visuel de la méthode ELECTRE I

La méthode ELECTRE I identifie un noyau de solutions non dominées, à savoir :

- Solutions haute performance,
- Solutions écologiques,
- Solutions axées ENR,
- Solutions progressives et modulaires.

Parmi celles-ci, « Solutions haute performance » est désignée comme solution représentative du noyau, notamment grâce à ses performances remarquables sur :

- La réduction de la consommation énergétique,
- La qualité de l'air intérieur,
- L'isolation thermique et l'étanchéité.

Cependant, ses scores sont plus faibles sur les critères économiques (coût initial et subventions), ce qui peut expliquer sa position légèrement inférieure dans PROMÉTHÉE II et TOPSIS.

Les trois méthodes convergent vers des résultats similaires, mettant en avant les « Solutions écologiques » comme alternative la plus performante dans un contexte d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Le recours à plusieurs méthodes multicritères enrichit l'analyse et permet une prise de décision plus robuste et mieux justifiée.

4.6.3 Analyse GAIA – Visualisation interactive des alternatives

Dans le prolongement de l'approche multicritère appliquée via PROMÉTHÉE II, une analyse géométrique GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) a été réalisée

afin d'offrir une visualisation plus fine des relations entre les alternatives et les critères. Le plan GAIA projette les données multicritères dans un espace à deux dimensions (PC1 et PC2), permettant d'illustrer visuellement :

- Les préférences nettes (flux net) de chaque alternative,
- Les directions des critères (vecteurs),
- Le vecteur (axe de décision global) représentant la direction de l'alternative la plus équilibrée selon l'ensemble des critères.

L'illustration ci-dessous montre clairement que l'alternative "Solutions Écologiques" (C) se situe dans la direction du vecteur $\vec{v}$, indiquant un compromis optimal. Elle présente un flux net positif, ce qui signifie qu'elle est globalement préférable. Les alternatives "Énergies Renouvelables" (D) et "Haute Performance" (B) suivent, avec des positions relativement proches mais légèrement moins alignées avec l'axe de décision.

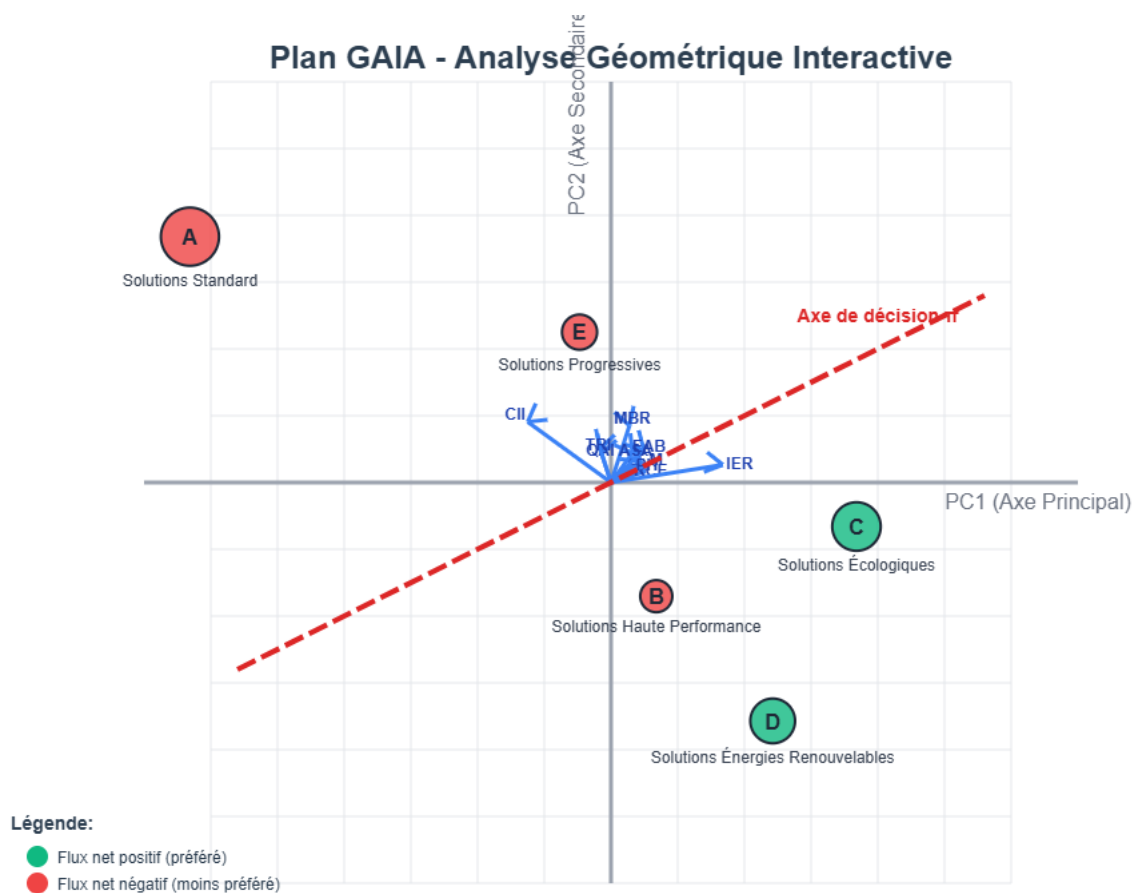


FIGURE 4.10 – Représentation des alternatives de construction durable dans l'espace PROMETHEE

Une interface HTML dynamique de visualisation GAIA a été générée à l'issue de l'analyse multicritère. Cette interface, illustrant les vecteurs de critères et la répartition des alternatives dans l'espace décisionnel, est consultable en Annexe 2.

L'interprétation du graphe confirme les résultats obtenus par PROMÉTHÉE II et TOPSIS :

- C (Solutions écologiques) : équilibre global, performance soutenue sur la majorité des critères.
- D (Solutions énergies renouvelables) : très bon score sur l'intégration énergétique, mais un coût initial plus élevé.
- B (Solutions haute performance) : très bonnes performances techniques, mais impactées par un retour sur investissement plus long.
- E (Solutions progressives) : alternatives intermédiaires.
- A (Solutions standard) : peu performantes sur la majorité des axes.

Les vecteurs bleus représentant les critères permettent de visualiser les éventuels conflits : par exemple, les critères coût initial (CII) et accès aux subventions (ASA) sont parfois opposés à la performance énergétique (IER), ce qui met en évidence les arbitrages que doit effectuer le décideur.

Résultats finaux et comparaison

Ce chapitre a permis d'illustrer concrètement l'apport des méthodes multicritères à la décision (MCDA) dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. En mobilisant les approches PROMÉTHÉE II, TOPSIS et ELECTRE I, il a été possible d'évaluer de manière rigoureuse un ensemble d'alternatives selon plusieurs critères économiques, environnementaux et techniques.

Les résultats obtenus confirment la robustesse de certaines alternatives, en particulier les **Solutions Écologiques**, qui se positionnent systématiquement parmi les premières selon les différentes méthodes. Cette convergence valide la pertinence des critères sélectionnés ainsi que la cohérence des méthodes MCDA appliquées.

L'outil développé a permis non seulement d'automatiser l'évaluation, mais également de générer des visualisations interactives telles que les graphes radar, les représentations GAIA et les classements par surclassement. Ces supports facilitent l'interprétation des compromis entre critères et permettent une communication claire des résultats auprès des parties prenantes.

4.7 Analyse Comparative Multi-Dimensionnelle

L'analyse comparative multi-dimensionnelle des méthodes multicritères utilisées dans ce mémoire permet de mieux cerner leurs spécificités, leurs forces et leurs limites dans le contexte particulier de l'optimisation énergétique du bâtiment.

Sur le plan épistémologique, les méthodes divergent par leur conception de la rationalité décisionnelle. ELECTRE I adopte une approche procédurale rigoureuse et admet explicitement l'existence d'incomparabilités entre alternatives. PROMÉTHÉE II combine rationalité procédurale et substantive en introduisant des fonctions de préférence paramétrables. À l'inverse, TOPSIS et SAW s'inscrivent dans une logique optimisatrice plus rigide, postulant l'existence d'une solution idéale unique et niant les situations d'incomparabilité.

Sur le plan méthodologique, ELECTRE I se distingue par sa robustesse face aux variations de pondérations grâce à ses seuils de concordance et discordance. PROMÉTHÉE II offre une bonne flexibilité, bien que sensible aux paramètres choisis. TOPSIS

présente une sensibilité marquée dans les zones de compétition serrée, tandis que SAW est particulièrement vulnérable aux variations, du fait de son modèle linéaire direct.

Du point de vue applicatif, l'adéquation des méthodes dépend fortement du profil du décideur et du niveau de complexité du projet. ELECTRE I est adaptée aux situations complexes et incertaines, mais nécessite une expertise avancée. PROMÉTHÉE II s'avère bien équilibrée pour des études techniques détaillées. TOPSIS est efficace dans les contextes nécessitant une optimisation rapide, et SAW reste la méthode la plus accessible pour une première exploration ou pour des présentations vulgarisées.

En somme, aucune méthode ne peut être considérée comme universellement supérieure. Leur complémentarité suggère l'intérêt d'une approche hybride, combinant simplicité exploratoire (SAW), finesse analytique (PROMÉTHÉE II) et validation robuste (ELECTRE I), pour répondre aux multiples exigences des projets énergétiques en contexte méditerranéen.

Critère de comparaison	ELECTRE I	PROMÉTHÉE II	TOPSIS	SAW
Type de méthode	Méthode d'outranking** (surclassement)	Surclassement avec fonctions de préférence	Méthode de la solution idéale	Méthode de pondération additive simple
Prise en compte des incomparabilités	Oui	Partiellement	Non	Non
Paramétrage requis	Seuils de concordance et discordance	Fonctions de préférence et poids	Normalisation, distance	Pondération et normalisation
Robustesse aux variations de poids	Élevée	Moyenne	Moyenne à faible	Faible
Simplicité de mise en œuvre	Moyenne à faible	Moyenne	Moyenne	Très élevée
Capacité d'interprétation	Bonne mais technique	Très bonne avec GAIA	Moyenne	Bonne pour débutant
Contexte d'utilisation recommandé	Situations complexes avec incertitudes	Analyse technique approfondie	Décision rapide avec peu d'alternatives	Pré-analyse ou vulgarisation

TABLE 4.1 – Comparaison multidimensionnelle des méthodes multicritères

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques différenciatrices des méthodes utilisées dans ce mémoire, selon des critères épistémologiques, méthodologiques et pratiques.

4.8 Conclusion

Alternative	PROMÉTHÉE II	TOPSIS	ELECTRE I (Noyau)
Solutions Écologiques	1 ^{re} (score : 0.211)	1 ^{re} (score : 0.637)	✓
Solutions ENR (Énergies Renouvelables)	2 ^e	3 ^e	✓
Solutions Haute Performance	3 ^e	4 ^e	✓ (représentant)
Solutions Progressives et Modulaires	4 ^e	2 ^e	✓
Solutions Standard	Dernière	Dernière	

TABLE 4.2 – Synthèse comparative des classements par méthode

Réflexion critique

Malgré la convergence générale des classements, de légères divergences apparaissent entre les méthodes, en particulier entre PROMÉTHÉE II et TOPSIS concernant les positions intermédiaires. Cela illustre le fait que chaque méthode met l'accent sur des aspects différents du problème : PROMÉTHÉE est sensible aux flux de préférences, tandis que TOPSIS évalue la proximité aux solutions idéales.

Par ailleurs, bien que les critères aient été définis de manière experte, une pondération participative aurait pu améliorer encore davantage la représentativité des résultats, notamment en intégrant les attentes spécifiques des usagers finaux.

Perspectives applicatives

L'approche présentée dans ce chapitre ouvre la voie à plusieurs extensions possibles :

- L'élargissement du modèle à d'autres alternatives ou typologies de bâtiments, en zones urbaines et rurales.
- L'intégration de l'analyse multicritère à des plateformes SIG (systèmes d'information géographique) pour cartographier les priorités d'intervention.
- Le déploiement du logiciel développé comme outil de support à la décision pour les collectivités locales, agences énergétiques ou bureaux d'études.
- L'ajout de modules dynamiques permettant de simuler l'évolution des critères dans le temps (ex. : variation du coût de l'énergie, dégradation thermique).

En somme, ce chapitre met en évidence le potentiel considérable des méthodes multicritères pour guider des décisions complexes dans le domaine de l'efficacité énergétique. Il offre un socle méthodologique solide pour des applications futures à plus grande échelle.

Conclusion générale

La transition énergétique s'impose aujourd'hui comme une priorité stratégique au cœur des politiques de développement durable, tant à l'échelle mondiale que nationale. Le secteur du bâtiment, en tant que principal consommateur d'énergie, incarne un levier d'action déterminant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, améliorer l'efficacité énergétique, et répondre aux exigences croissantes en matière de confort, de performance et de résilience climatique. Dans le contexte spécifique de l'Algérie, cette problématique est d'autant plus cruciale qu'elle s'inscrit dans un environnement fortement tributaire des énergies fossiles, confronté à une urbanisation rapide et à des lacunes notables en matière de réglementation thermique.

C'est dans ce cadre que le présent mémoire a proposé une démarche intégrée, fondée sur l'usage structuré et comparatif des méthodes d'aide multicritère à la décision (AMCD), afin de formaliser, objectiver et guider le choix des solutions visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. À travers l'analyse approfondie de trois méthodes phares — TOPSIS, PROMÉTHÉE II et ELECTRE I — ce travail a démontré leur pertinence pour modéliser des situations décisionnelles complexes, impliquant des critères hétérogènes et parfois conflictuels. Ces méthodes se sont révélées particulièrement utiles pour hiérarchiser les alternatives disponibles, mettre en lumière les compromis nécessaires, et ainsi accompagner une prise de décision rationnelle, équilibrée et contextualisée.

L'approche adoptée a été renforcée par la mise en œuvre d'une application interactive de visualisation, qui a constitué une véritable interface d'exploitation des résultats multicritères. Grâce à des outils graphiques tels que les profils radar, les graphes de surclassement ou encore la représentation GAIA, cette application a permis une meilleure compréhension des performances des alternatives étudiées et une diffusion plus lisible et accessible des résultats auprès des différents acteurs concernés — décideurs institutionnels, ingénieurs, urbanistes ou architectes. Elle constitue ainsi un pont entre la rigueur analytique et l'opérationnalisation des choix dans des projets concrets de rénovation ou de construction durable.

Le mémoire a permis de construire une méthodologie rigoureuse, allant de la définition du problème décisionnel à la visualisation des résultats, tout en validant un ensemble de critères pertinents pour le contexte algérien grâce à l'implication d'un groupe d'experts mobilisé via la méthode du Groupe Nominal. Il a également permis de confronter et de croiser les résultats issus de plusieurs approches AMCD afin d'augmenter la robustesse de la recommandation finale, et d'élaborer un prototype d'outil décisionnel pouvant à terme être intégré dans des dispositifs institutionnels plus larges.

Néanmoins, certaines limites méritent d'être soulignées. L'analyse repose sur un nombre restreint d'alternatives, ce qui limite la généralisation des résultats à d'autres contextes ou typologies de bâtiments. L'approche reste également statique, sans intégration des évolutions temporelles des critères tels que le coût de l'énergie, les avancées technologiques ou les mutations comportementales des usagers. En outre, les préférences subjectives des utilisateurs finaux n'ont pas été pleinement intégrées dans la modélisation, alors qu'elles peuvent influencer fortement la performance réelle d'une solution adoptée.

Au vu de ces constats, plusieurs recommandations peuvent être formulées. Il serait souhaitable de généraliser l'usage des méthodes AMCD dans les procédures d'appel d'offres publiques liées à la performance énergétique, tout en les intégrant dans des plateformes de gestion territoriale telles que les systèmes d'information géographique (SIG). Il conviendrait également de former les acteurs locaux — notamment les responsables des collectivités et les décideurs techniques — à l'usage et à l'interprétation de ces outils. Par ailleurs, l'ouverture à des processus participatifs, impliquant les citoyens, les usagers et les professionnels du bâtiment, permettrait d'enrichir la pondération des critères et de garantir une meilleure acceptabilité des solutions proposées.

Plusieurs perspectives de recherche s'ouvrent à la suite de ce travail. Il serait pertinent d'explorer des modèles décisionnels dynamiques intégrant l'évolution des paramètres dans le temps, notamment le coût de l'énergie, l'obsolescence technologique ou encore les impacts du changement climatique. Le couplage des méthodes AMCD avec des logiciels de simulation thermique pourrait également affiner la précision des évaluations techniques. Une application élargie à d'autres régions du pays, en particulier les zones sahariennes ou à climat extrême, permettrait de construire des référentiels territorialisés. À un niveau plus avancé, l'intégration d'intelligence artificielle pour automatiser la génération de recommandations selon des profils de bâtiments et de contextes locaux pourrait transformer profondément les pratiques décisionnelles dans ce domaine. Enfin, la création d'un observatoire national de la performance énergétique, fédérant données, indicateurs, méthodes et retours d'expérience, renforcerait la capitalisation et le suivi des efforts déployés dans ce domaine stratégique.

En définitive, ce mémoire montre que la prise de décision dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments ne peut plus se limiter à des approches intuitives ou purement économiques. Elle requiert une structuration rigoureuse, fondée sur la science de la décision, sur une connaissance fine des contextes locaux, et sur des outils d'aide technologique et visuelle. À l'échelle de l'Algérie, cela suppose un changement de paradigme dans la manière d'envisager la conception, la rénovation et la gestion du patrimoine bâti. Les méthodes AMCD, telles que celles explorées dans cette étude, offrent un potentiel considérable en tant qu'instruments d'analyse stratégique, de planification territoriale et de pilotage énergétique.

Ce travail ne clôt pas la réflexion, mais en pose les fondations. Il appelle à une mobilisation collective, réunissant chercheurs, ingénieurs, architectes, décideurs publics et citoyens, pour transformer cette approche en politiques publiques concrètes, en outils pratiques et en solutions durables au service d'un habitat plus intelligent, plus résilient et plus respectueux de l'environnement.

Bibliographie

- [1] A mixed-integer simulation-based optimization approach with surrogate functions in water resources management. https://www.researchgate.net/publication/225741176_A_mixed-integer_simulation-based_optimization_approach_with_surrogate_functions_in_water_resources_management. Consulté le 21 avril 2025.
- [2] Document technique réglementaire - règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments. Technical report, Ministère de l'Habitat, Algérie, 1997. DTR C 3-4.
- [3] Document technique réglementaire - réglementation thermique des bâtiments d'habitation. Technical report, Ministère de l'Habitat, Algérie, 1997. DTR C 3-2.
- [4] architecture post haussmannienne et baroque en algérie - recherche google. <https://www.google.com/search?q=architecture+posy+haussmanienne+et+baroqur+en+algerie>, 2025. Consulté le 21 avril 2025.
- [5] Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE). Rapport sur la consommation énergétique en algérie. Technical report, APRUE, Alger, 2020.
- [6] İsmail Özgür Baykal. L'application des méthodes de prise de décision à multicritères au problème de sélection de personnel. Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] D BEAUDRY. B. url. 1995.
- [8] Gheorghe Boldur. L'analyse multicritère en perspective d'une théorie générale de la gestion des entreprises modernes. *RAIRO-Operations Research*, 16(1) :1–19, 1982.
- [9] D Bouyssou and M Pirlot. Sur les liens entre deux familles de méthodes de surclassement.
- [10] Jean-Pierre Brans and Bertrand Mareschal. The promcalc gaia decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, 12(4-5) :297–310, 1994.
- [11] Jean-Pierre Brans, Bertrand Mareschal, and Philippe Vincke. Promethee : A new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research*, 84(1) :477–490, 1986. Introduction de la méthode PROMETHEE.
- [12] Jean-Pierre Brans, R Nadeau, and M Landry. L'ingénierie de la décision. *Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. In l'Aide à la Décision : Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*, pages 183–213, 1982.
- [13] Centre de Développement des Energies Renouvelables. Bulletin n°5 - consommation d'énergie et ressources renouvelables en algérie. Technical report, Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), 2012. Consulté le 20 avril 2025.
- [14] Centre de Développement des Energies Renouvelables. Article consommation d'énergie. <https://www.cder.dz/bulletin/bull5/ber5.pdf>, 2025. Consulté le 20 avril 2025.

- [15] Salem Chakhar. *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*. PhD thesis, Université Paris Dauphine-Paris IX, 2006.
- [16] Albert David and Sébastien Damart. Bernard roy et l’aide multicritère à la décision. *Revue française de gestion*, 214(5) :15–28, 2011.
- [17] A. Nait et al. Effect of thermal insulation on energy efficiency of the building envelope - semi dry climates. *Journal of Building Engineering*, 2018.
- [18] K. Ferradji. Évaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l’habitat : Cas des logements hpe de l’opgi de blida. Master’s thesis, Université Mohamed Khider - Biskra, 2017. Consulté le 20 avril 2025.
- [19] M. Ferradji. Évaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l’habitat : Cas des logements hpe de l’opgi. Master’s thesis, Université d’Alger, 2022.
- [20] M. Goumas and V. Lygerou. Evaluation of alternative energy exploitation schemes using the promethee multicriteria method. *Energy Policy*, 28(5) :333–338, 2000. Exemple concret d’utilisation de PROMETHEE dans l’énergie.
- [21] Michel Grabisch and Patrice Perny. Agrégation multicritère. *Logique floue, principes, aide à la décision*, pages 81–120, 2003.
- [22] C.L. Hwang and K. Yoon. Multiple attribute decision making : Methods and applications. *Springer-Verlag*, 1981. Introduction de la méthode TOPSIS.
- [23] International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2014, 2014.
- [24] Ignacy Kaliszewski and Dmitry Podkopaev. Simple additive weighting—a meta-model for multiple criteria decision analysis methods. *Expert Systems with Applications*, 54 :155–161, 2016.
- [25] Elena Kornyshova and Rébecca Deneckère. Famille de méthodes : une approche de construction de méthodes situationnelles. In *INFORSID*, 2011.
- [26] Nadia Lehoux and Pascale Vallée. Analyse multicritère. *Ecole Polytechnique de Montréal : Montréal*, 2004.
- [27] Mirjana D Mančev. The application of the topsis method in selecting the best academic library at the university of niš/l’application de la méthode topsis en vue d’un choix de la meilleure bibliothèque académique de l’université de niš. *Canadian Journal of Information and Library Science*, 40(1) :81–96, 2016.
- [28] Abbas Mardani, Edmundas K. Zavadskas, Zulkefli Khalifah, Ahmad Jusoh, and Khaled G. Nor. Sustainability evaluation of energy systems using multi-criteria decision-making : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 :1863–1877, 2015. Revue des méthodes AMCD appliquées à l’énergie.
- [29] Bertrand Mareschal and Jean-Pierre Brans. Geometrical representations for mcda. *European Journal of Operational Research*, 34(1) :69–77, 1988.
- [30] Jean-Marc Martel. L’aide multicritère à la décision : méthodes et applications. *CORS-SCRO Bulletin*, 31(1) :6–16, 1999.
- [31] Lucien Y. Maystre, Jean Pictet, and Jean Simos. *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d’application à la gestion environnementale*. PPUR presses polytechniques, 1994.
- [32] Lucien Yves Maystre, Jacques Pictet, and Jean Simos. *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d’application à la gestion environnementale*, volume 8. EPFL Press, 1994.

- [33] Luc LUMANJI MBUNGA and Patrick MUKONKI MAYEKELA. Utilisation d'une méthode multicritère d'aide à la décision pour le choix d'une structure de données dans un problème de gestion. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 20(2) :711–723, 2017.
- [34] Sami Ben Mena. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *BASE*, 2000.
- [35] Sami Ben Mena. Méthodes de surclassement et analyse de robustesse. *BASE*, 2001.
- [36] S.B. Mena. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4(2) :83–93, 2000.
- [37] Mohamed Ali Mezabia et al. *Les influences de plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritères sur le choix du site d'une centrale solaire*. PhD thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [38] Sylvain Moisan. Aide à la decision dans le choix de conception, 2000.
- [39] N. Nait, F. Bourbia, and Y. Bouchahm. Effect of thermal insulation on energy efficiency of the building envelope - semi dry climates. *Advances in Sustainable Cities and Building Development*, 2017. Consulté le 20 avril 2025.
- [40] Imed Othmani. *Optimisation multicritère : fondements et concepts*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1998.
- [41] Anabela Ramos, Lúcio Cunha, and Pedro P Cunha. Application de la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du portugal : Figueira da foz-nazaré. *Geo-Eco-Trop*, 38(1) :33–44, 2014.
- [42] Sylvie Rascol-Boutard and Pascale Amans. Critères de qualité de la relation de service : une proposition de typologie. *Revue Sciences de Gestion*, (79), 2011.
- [43] Rôlin Gabriel Rasoanaivo. *La méthode PROMETHEE pour l'aide à la décision multicritère : application à la gestion d'attribution de logements universitaires*. PhD thesis, Université de Toamasina, 2020.
- [44] M. Rivallain. *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2021.
- [45] M. Romani. Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants. Master's thesis, Université de Tétouan, 2020.
- [46] Zakaria Romani. *Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle; Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 2015. Consulté le 20 avril 2025.
- [47] Bernard Roy. Electre iii : Un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences. *Cahiers du CERO*, 20(1) :3–24, 1978.
- [48] Bernard Roy. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, 1985.
- [49] Bernard Roy. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Springer, Boston, 1996. Ouvrage de référence sur la théorie de l'aide multicritère.

- [50] Bernard Roy and Pierre Bertier. La méthode electre ii : une méthode de classement en présence de critères multiples. *Inconnu, ?(?) : ?*, 1971.
- [51] Bernard Roy and Denis Bouyssou. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, volume 695. Economica Paris, 1993.
- [52] Bernard Roy and Denis Bouyssou. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Economica, 1993.
- [53] Bernard Roy and Daniel Vanderpooten. The european school of mcda : Emergence, basic features and current works. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(1) :22–38, 1996.
- [54] Réglementation Thermique Algérienne RETA - Centre de Développement des Energies Renouvelables. Site officiel. <https://reta.cder.dz/>, 2025. Consulté le 21 avril 2025.
- [55] Thomas L. Saaty. The analytic hierarchy process. *McGraw-Hill*, 1980. Méthode hiérarchique AHP.
- [56] Thomas L. Saaty. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1) :83–98, 2008.
- [57] Alain Schärli. *Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère*, volume 1. EPFL Press, 1985.
- [58] Damien Serre. *Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique*. PhD thesis, Université de Marne la Vallée, 2005.
- [59] Indre Siksnyte, Edmundas K. Zavadskas, Dalia Streimikiene, and Ravindra Sharma. Multi-criteria decision-making (mcdm) for sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 :2126–2142, 2018. Application des méthodes ELECTRE et TOPSIS dans le domaine énergétique.
- [60] Sonelgaz. Site officiel. <https://www.sonelgaz.dz/fr/5526/demande-en-electricite-2>, 2025. Consulté le 20 avril 2025.
- [61] Yamina Tadjeddine. Les prises cognitives de la rationalité. une typologie des décisions spéculatives. *Politix. Revue des sciences sociales du politique*, 13(52) :57–71, 2000.
- [62] C Tahon and D Trentesaux. Aide à la décision en gestion de production. *Organisation et gestion de production*, pages 171–218, 2001.
- [63] Wikipédia. Aide à la décision multicritère. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Aide_%C3%A0_la_d%C3%A9cision_multicrit%C3%A8re&oldid=224980738, 2025. Consulté le 21 avril 2025.

Annexe 1 : Application de la méthode MEREC pour la pondération des critères

.1 Introduction à la méthode MEREC

La méthode MEREC (*Method based on the Removal Effects of Criteria*) est une approche d'objectivisation des poids des critères dans l'analyse de décision multicritère (MCDA). Elle se fonde sur l'analyse des effets du retrait de chaque critère sur le classement global des alternatives. Contrairement aux approches subjectives, MEREC détermine les poids en fonction de l'impact réel de chaque critère sur les résultats.

.2 Principes fondamentaux

Un critère est jugé d'autant plus important que son retrait modifie fortement le classement des alternatives. Les étapes sont :

1. Normalisation de la matrice de décision
2. Calcul du score global avec tous les critères (poids égaux)
3. Retrait successif de chaque critère et recalcul des classements
4. Mesure des variations (distances de Spearman)
5. Attribution des poids normalisés proportionnels à l'effet du retrait

.3 Données du cas d'étude

Cinq alternatives sont évaluées selon dix critères :

- **Environnementaux** : ECM (min), MBR (max), QAI (max)
- **Énergétiques** : RCE, PIT, EAB, IER (à maximiser)
- **Économiques** : CII, TRI (min), ASA (max)

.4 Extraits de calculs

Normalisation

Chaque critère est normalisé selon qu'il soit à maximiser ou à minimiser :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{maximisation}) \qquad r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{minimisation})$$

.4.1 Scores globaux

Avec des poids égaux (0.10), les scores initiaux sont :

$$— S_D = 0,802, S_B = 0,765, S_C = 0,570, S_E = 0,263, S_A = 0,125$$

.4.2 Distances de Spearman

Pour chaque critère, on calcule l'écart entre le classement initial et celui obtenu après retrait. Exemple pour IER : distance = 8.

.5 Poids normalisés finaux

Poids calculés après renormalisation (ajustement des poids nuls) :

TABLE 3 – Poids finaux des critères selon MEREC

Critère	Poids
Empreinte carbone (ECM)	0.027
Matériaux biosourcés (MBR)	0.054
Qualité de l'air (QAI)	0.108
Consommation énergétique (RCE)	0.162
Isolation thermique (PIT)	0.027
Étanchéité à l'air (EAB)	0.027
Énergies renouvelables (IER)	0.216
Coût initial (CII)	0.216
Retour investissement (TRI)	0.108
Subventions/aides (ASA)	0.054

.6 Synthèse par catégorie

- Critères énergétiques : 43.2%
- Critères économiques : 37.8%
- Critères environnementaux : 18.9%

.7 Conclusion

La méthode MEREC a mis en évidence l'importance des critères IER et CII (21.6% chacun), suivis de la RCE (16.2%). Les critères ECM, PIT et EAB ont un impact limité (2.7%). Cette approche objective renforce la robustesse de la pondération multicritère dans le cadre de la prise de décision en efficacité énergétique du bâti.

Annexe A

Annexe 2 : Visualisation GAIA interactive

Cette annexe présente l'outil de visualisation interactive GAIA développé dans le cadre de ce mémoire. L'objectif est de fournir une représentation géométrique intuitive des alternatives dans l'espace PROMÉTHÉE, à l'aide d'un graphique projeté sur deux axes principaux (PC1 et PC2).

L'outil est conçu sous forme d'un fichier HTML interactif, intitulé : `gaia_png_generator.html`, disponible dans les annexes numériques. Il permet :

- De visualiser les alternatives selon leurs flux nets (positifs ou négatifs) ;
- D'afficher dynamiquement les poids des critères issus de la méthode MEREC ;
- D'analyser la position des alternatives par rapport à l'axe de décision π ;
- D'exporter le graphe GAIA au format PNG ;
- D'examiner les conflits et les compromis multicritères.

Ci-dessous, une capture d'écran du rendu graphique généré par l'application :

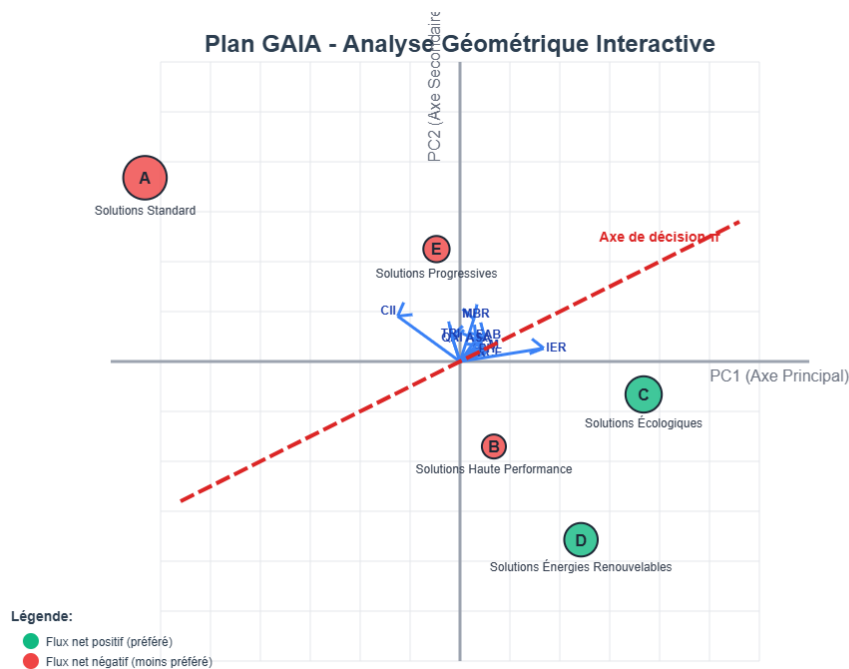


FIGURE A.1 – Capture du plan GAIA interactif — alternatives dans l'espace PROMÉTHÉE

L'alternative **C (Solutions Écologiques)** apparaît comme la plus favorable, avec un flux net positif important. L'axe π (en rouge) indique la direction optimale agrégée des critères. Les vecteurs bleus représentent les préférences associées à chaque critère.

Ce type de visualisation permet aux décideurs de mieux interpréter les compromis entre alternatives et de valider visuellement la cohérence du classement.

Pour accéder à la version interactive complète, voir le fichier : `gaia_png_generator.html` (Annexe électronique n°2).

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الحميد بن باديس-مستغانم-
كلية العلوم الاجتماعية و الإنسانية

تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية
لإنجاز البحث

أنا الممضي أدناه،

الطالب(ة): Boutenni Mottammed Elamin رقم التسجيل

الجامعي: 202034037353

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 409950967001050003 والصادرة بتاريخ:

..... 2024 - 06 - 24

عن مستديرة مستغانم

المسجل بكلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي / قسم Math et Informatique

شعبة Informatique / التخصص

..... Réseaux et Systeme

والمكلف بإنجاز مذكرة ماستر بعنوان:

Utilisation des méthodes d'aide à la décision multicritères
pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات العلمية
والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث ، وأتحمل المسؤولية الشخصية عن كل
المحتوى المتضمن في البحث المذكور أعلاه .

التاريخ: 23-06-2025

إمضاء المعني

* ملحق القرار الوزاري رقم 933 المؤرخ في 28 جويلية 2016 الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الحميد بن باديس-مستغانم-
كلية العلوم الاجتماعية و الإنسانية

تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية
لإنجاز البحث

أنا الممضي أدناه،
الطالب(ة): Benaïchouba ABdelkader رقم التسجيل
الجامعي: 1919370307 16
الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 414062883 والصادرة بتاريخ:
..... 2025/01/16
عن MOSTAGANEM
المسجل بكلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي / قسم Math et informatique
شعبة informatique / التخصص
..... Réseaux et Système
والمكلف بإنجاز مذكرة ماستر بعنوان:
..... utilisation des methodes multicritere pour l'amelioration
..... de l'efficacité energetique des batiments
.....

أصرح بشرفي أنني ألتم بمرعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات العلمية
والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث ، وأتحمل المسؤولية الشخصية عن كل
المحتوى المتضمن في البحث المذكور أعلاه .

التاريخ: 23/06/2025
.....

إمضاء المعني



* ملحق القرار الوزاري رقم 933 المؤرخ في 28 جويلية 2016 الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.