

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté TECHNOLOGIE
Département GENIE CIVIL
Laboratoire de Génie de la Construction et Architecture (LGCA)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIES Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : GENIE CIVIL

Présentée par
LANSEUR HAMZA

Thème

**Optimisation multicritère de la conception des
bâtiments parasismiques en béton armé en Algérie**

Soutenue le : 23/02/2026

Devant le Jury composé de :

Mr. TAHAKOURT Abdelkader	Professeur	Univ de BEIAIA	Président
Mr. CHERRARED Marzouk	Professeur	USTHB d'ALGER	Rapporteur
Mr. BOURZAM Abdelkrim	Professeur	ENP d'ALGER	Examineur
Mr BOUZIDI Mohamed Amin	Professeur	Univ de BEIAIA	Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur Marzouk CHERRARED, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE d'Alger. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour ses conseils avisés, son intérêt constant et sa vaste culture scientifique, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet de recherche.

J'associe à ces remerciements les membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail de thèse. Puissent leurs commentaires, critiques et observations, issus de leurs expériences et compétences diverses, nous être précieux et constructifs pour la suite de nos recherches.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à toute l'équipe des doctorants, enseignants et personnels du département de Génie Civil, avec qui j'ai tissé des liens amicaux et professionnels solides.

Je remercie infiniment mes parents, ma femme, mes frères et sœurs, pour leurs sacrifices et leur soutien indéfectible qui ont rendu possible la réalisation de ce travail, certes passionnant, mais exigeant en temps et en énergie.

Enfin, que toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce projet trouvent ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

DEDICACES

À mes parents
À ma femme
À mes frères et sœurs

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des abréviations	x
Résumé.....	xi
Abstract.....	xii
المخلص	xiii

Introduction générale	1
Contexte de la recherche.....	2
Problématique de la recherche.....	3
Objectifs, motivations et démarche	4
Structure de la thèse	5

CHAPITRE I : LA CONCEPTION DES BATIMENTS EN BA : VERS DE NOUVELLES METHODES ET OUTILS DE CONCEPTION

I.1 Introduction.....	7
I.2 Le bâtiment, un système constructif complexe.....	8
I.2.1 Partie architecturale.....	9
I.2.2 Partie structurale.....	10
I.3 Processus de conception d'un bâtiment.....	13
I.3.1 La phase esquisse (ESQ).....	14
I.3.2 L'avant-projet sommaire (APS).....	15
I.3.3 L'avant-projet détaillé (APD).....	16
I.3.4 Etude détaillé du projet (EDP).....	16
I.4 Principes et exigence pour une conception parasismique des bâtiments en BA.....	17
I.4.1 Principe générale pour la planification	17
I.4.2 Principes pour la conception.....	18

I.4.3 Le contexte réglementaire en génie parasismique.....	20
I.5 Contexte des bâtiments en BA en Algérie : focus sur les bâtiments à usage d'habitation.....	22
I.5.1 Le secteur résidentiel : Données et indicateurs.....	23
I.6 Besoins en outils et méthodes de conception pour optimiser la compétitivité des bâtiments en BA.....	26
I.7 Etude bibliographique de quelques approches multicritères pour la conception des bâtiments en BA.....	27
I.7.1 Choix du système structural.....	27
I.7.2 Choix du type de fondation.....	29
I.7.3 Estimation des coûts de construction de bâtiments.....	30
I.8 Conclusion et discussion.....	31

CHAPITRE II : METHODES ADOPTEES EN CONCEPTION MULTICRITERE DU BATIMENT

II.1 Introduction.....	33
II.2 La conception multicritère d'un bâtiment en BA : un problème d'optimisation multi objectif.....	34
II.3 Formulation des problèmes d'optimisation multicritère dans le bâtiment.....	35
II.3.1 Les critères.....	36
II.3.2 Les variables de décision.....	37
II.3.3 Les contraintes.....	38
II.4 De l'optimisation à la décision et vice-versa.....	39
II.4.1 La décision multicritère à priori.....	39
II.4.2 L'optimisation à posteriori.....	40
II.4.3 La prise de décision s'effectue durant l'optimisation.....	46
II.5 Méthodes d'optimisation multicritères utilisées en conception de BA.....	47
II.5.1 Méthodes d'optimisation exacte par énumération exhaustive.....	47
II.5.2 Méthodes d'optimisation approchées.....	47
II.6 Synthèse et méthodologie de conception adoptée.....	50

CHAPITRE III : ANALYSE MULTICRITERE : CHOIX DES CRITERES PERTINENTS ET SELECTION DES VARIABLES DE DECISION

III.1 Introduction.....	53
III.2 Pourquoi l'analyse au stade de l'avant-projet sommaire (APS) ?.....	53
III.3 Analyse multicritères.....	54
III.3.1 Critère économique « coût de construction ».....	55
III.3.2 Méthodologie d'évaluation du critère vulnérabilité sismique.....	62
III.3.3 Critère -état prévisible de l'interaction sol-structure-.....	63

III.3.4 Critère « degré prévisible de liquéfaction du sol ».....	67
III.3.5 Autres critères.....	68
III.4 Les contraintes.....	71
III.4. Les contraintes urbanistiques.....	71
III.4.2 Les contraintes architecturales.....	74
III.4.3 Contraintes techniques règlementaires.....	75
III.5 Conclusion (synthèse sur l'analyse multicritères des bâtiments en BA).....	77

CHAPITRE IV : MISE EN ŒUVRE DE LA METHODOLOGIE DEVELOPPEE-ÉTUDE DE CAS -

IV.1 Introduction.....	79
IV.2 Critères de conception retenus.....	79
IV.2.1 Pourquoi le cout de construction ?.....	80
IV.2.2 Pourquoi le critère vulnérabilité sismique ?.....	81
IV.2.3 Conclusion partielle.....	85
IV.3 Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème.....	86
IV.3.1 Caractéristiques du problème d'optimisation à traiter.....	87
IV.3.2 Choix de la méthode d'optimisation.....	90
IV.3.3 Présentation de l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis.....	92
IV.4 Présentation de cas d'étude.....	96
IV.4.1 Étude statistique et condition d'arrêt.....	98
IV.4.2 Résultats et discussions.....	99
IV.4.3 Classement des solutions obtenues à l'aide de la méthode AHP.....	104
IV.4.4 Comparaison du classement obtenu avec les méthodes PROMETHEE et TOPSIS.....	109
IV.4.5 Résultats des méthodes PROMETHEE et TOPSIS.....	114
IV.4.6 Comparaison des solutions obtenues par l'ACO à l'aide des méthodes AHP, PROMETHEE et TOPSIS.....	115
IV.4.7 Analyse de sensibilité sur les poids des critères.....	117
IV.5 Conclusion.....	119

Conclusion générale et perspectives.....121

Conclusions d'ordre générale.....	122
Conclusions spécifiques.....	123
Pistes de recherches futures – Perspectives.....	124

Bibliographie.....126

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1. Structure fonctionnelle d'un bâtiment en six sous-ensembles constitutifs	8
Figure I.2 .Organigramme descriptif d'un bâtiment en BA.....	9
Figure I.3. Description architecturale d'un bâtiment.....	10
Figure I.4. Typologie des fondations	13
Figure I.5. Processus d'un projet de construction.....	14
Figure I.6. Paramètres nécessaires à la conception du bâtiment en phase ESQ....	15
Figure I.7. Schéma de collaboration entre le Maître d'Ouvrage, l'Architecte et l'Ingénieur Civil dans le processus de conception.....	18
Figure I.8. Principes de base pour la conception parasismique.....	19
Figure I.9. Analyse multicritère pour le choix d'un système structurel	27

Chapitre II

Figure II. 1. Illustration de la conception multicritère du bâtiment.....	34
Figure II.2. Évolution du nombre de publications dans le domaine de l'optimisation multiobjectif de bâtiments.....	35
Figure II.3. Choix des fonctions-objectif à optimiser	37
Figure II.4. Diagramme des différents types de variables	38
Figure II.5. Illustration de la dominance au sens de Pareto :	41
Figure II.6. Démarche multicritère	42
Figure II.7. Approche intermédiaire.....	43
Figure II.8. Méthodes d'aide à la décision multicritères.....	45
Figure II.9. L'utilisation des différents algorithmes d'optimisation dans le domaine de l'optimisation du bâtiment d'après.....	49
Figure II.10. Méthodologie de conception : une première phase d'optimisation multicritère suivi d'une phase de décision	52

Chapitre III

Figure III.1. L'importance de l'APS dans le processus de conception des bâtiments	54
Figure III.2. Critères de conception	54
Figure III.3. Principe de calcul du coût d'un bâtiment selon le degré de	56
Figure III.4. Présentation graphique de la corrélation entre C_{tot} et A_l	60
Figure III. 5. Comparaison entre le coût total réel et le coût total ajusté.	61
Figure III. 6. Principes des schémas adoptés pour modéliser l'ISS.....	64
Figure III.7. Influence de K_{ss} sur la fréquence fondamentale de la structure.....	66
Figure III.8. Degré d'influence de l'interaction sol-structure sur la 1ère fréquence fondamentale du bâtiment	67
Figure III.9. Volume constructible limité par l'alignement, le gabarit, et la hauteur maximale	72
Figure III.10. Volume constructible limité par l'alignement, le gabarit, et la hauteur maximale	73
Figure III.11. Distance des baies vitrées a la limite mitoyenne.....	74

Chapitre IV

Figure IV.1. Problématique de l'optimisation, en conception parasismique	86
Figure IV.2. Chemins possibles empruntés par les fourmis pour la construction de solutions optimales	93
Figure IV.3. Algorithme d'optimisation du modèle ACO (Ant Colony Optimization) proposé	96
Figure IV.4. Vues en plan et en élévation des bâtiments étudiés	97
Figure IV.5. Optimums et conditions d'arrêts.....	98
Figure IV.6. Types de fonctions de préférence.	111
Figure IV.7. Comparaison des solutions obtenues avec les méthodes AHP, PROMETHEE et TOPSIS.	116
Figure IV.8. Sensibilité aux poids des critères (AHP).....	117
Figure IV.9. Sensibilité aux poids des critères (PROMETHEE).....	118
Figure IV.10. Sensibilité aux poids des critères (TOPSIS).....	118

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1. Description des éléments structuraux en BA (poteaux, poutres, voiles)	11
Tableau I.2. Description des éléments structuraux en BA (<i>Suite</i>)	12
Tableau I.3. Comparaison des principales réglementations parasismiques mondiales.....	20
Tableau I.4. Comparaison entre : RPA 2003 et RPA 2024 (Différences clés)	22
Tableau I.5. Nombre de logements livrés entre 2000-2024	24
Tableau I.6. Diverses formules de logements livrés entre 2000-2024	24
Tableau I.7. Travaux sur la sélection multicritère des systèmes structurels (2014–2024)	28
Tableau I.8. Sélection multicritère et optimisation du type de fondation (2020–2024)	29
Tableau I.9. Estimation des coûts de construction (2015–2025)	30

Chapitre II

Tableau II. 1. Les problématiques multicritères	43
Tableau II.2. Matrice d'évaluation Actions/Critères	44
Tableau II.3. Fréquence d'application des méthodes d'aide à la décision dans les publications scientifiques entre 2000 et 2024	46

Chapitre III

Tableau III.1. Codage numérique des expressions qualitative.....	55
Tableau III. 2. Formulation du critère économique à travers les différentes phases de conception.....	58
Tableau III.3. Caractéristiques architecturales des bâtiments étudiés	59
Tableau III.4. Coûts de construction des bâtiments étudiés	60
Tableau III. 5. Description du critère coût de réalisation	62
Tableau III.6. Niveaux de vulnérabilité sismique	63
Tableau III. 7. Les coefficients de raideur	65
Tableau III.8. Évaluation du risque de liquéfaction	68

Tableau III.9. Autres critères pouvant être utilisés dans l'analyse multicritère d'un bâtiment en BA	69
Tableau III.10. Le choix de type de contreventement en fonction de la zone sismique et le nombres de niveaux.....	75
Tableau III.11. Le choix de type de contreventement en fonction de la zone sismique et le nombres de niveaux (<i>Suite</i>)	76
Tableau III.12. Le choix de type de fondation.....	76

Chapitre IV

Tableau IV.1. Nombre de logements construits en Algérie (2000–2024).....	80
Tableau IV.2. Historique des principaux séismes en Algérie.....	82
Tableau IV.3. Indice VI^* en fonction de la typologie du bâtiment	84
Tableau IV.4. Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en béton armé	84
Tableau IV.5. Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie	85
Tableau IV.6. Description des variables de décision.....	87
Tableau IV. 7. Formulation des contraintes d'optimisation	88
Tableau IV.8. Paramètres de réglage des algorithmes d'optimisation à population	91
Tableau IV.9. Caractéristiques architecturales des bâtiments étudiés	97
Tableau IV.10. Informations sur le coût et la vulnérabilité des bâtiments étudiés.....	98
Tableau IV.11. Les valeurs du facteur heuristique (η).....	99
Tableau IV.12. Paramètres utilisés pour résoudre le problème	99
Tableau IV.13. Taux de phéromone déposée.....	99
Tableau IV.14. Les solutions (500 itérations)	100
Tableau IV.15. Les solutions (750 itérations).....	101
Tableau IV.16. Les solutions (1000 itérations)	102
Tableau IV.17. La comparaison par paires pour les préférences dans la méthode AHP	104
Tableau IV.18. Valeurs de l'indice aléatoire RI	107
Tableau IV.19. Classement des solutions	108
Tableau IV.20. Classement des solutions obtenues selon les méthodes PROMETHEE et TOPSIS	115

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ESQ	Phase esquisse
APS	Avant-projet sommaire
APD	Avant-projet détaillé
EDP	Etude détaillé du projet
RPA	Règlement Parasismique Algérien
RADP	République Algérienne Démocratique et Populaire
MHUV	Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme et de la ville
ONS	Office Nationale des Statistiques
AND	Agence nationale des déchets
CNESE	Conseil national économique, social et environnemental
LPL	Logement Public Locatif
LPA	Logement Promotionnel Aidé
AADL	Agence Nationale de l'Amélioration et du Développement du Logement
LPP	Logement Public Promotionnel
PIB	Produit intérieur brut
MATLAB	MATrix LABoratory
MAMD	Méthode d'Analyse Multicritère de Décision
ACO	Ant Colony Optimisation
SH	Surface habitable
F_i	Type d'appartemnt ou i indique le nombre de pieces, séjour inclu
MDZD	Méga Dinar Algérien
ISS	Interaction sol-structure
C.O. S	Coefficient d'occupation du sol
EMP	Emprise au sol
AHP	Analytic Hierarchy Process
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

RÉSUMÉ

La conception d'une structure parasismique optimale est un problème complexe puisqu'elle doit tenir compte à la fois des exigences de sécurité, prescrites par les règlements, et du souci d'économie, pour satisfaire les contraintes budgétaires. L'objectif de cette étude de doctorat consiste à mettre au point une méthodologie permettant d'aider à définir un bâtiment parasismique optimal à l'étape d'avant-projet.

Pour ce faire, une analyse multicritère du problème a été faite. Cette analyse a permis d'identifier différents critères de conception, définis et formulés sur la base des retours d'expérience dans le domaine et en fonction des modalités d'optimisation prévus dans ce travail. Ensuite, nous avons effectué une optimisation du problème en considérant deux critères pertinents : coût de réalisation et vulnérabilité sismique. Le problème est traité à l'étape de l'avant-projet sommaire (APS) en utilisant la méthode d'optimisation par colonie de fourmis (ACO). Le classement des solutions optimales est effectué en utilisant la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP). Une étude comparative est menée avec deux méthodes de classement bien connues : PROMETHEE et TOPSIS.

La méthodologie proposée et la base de données collectées ont été appliquées sur des cas réels de bâtiments d'habitation algériens en considérant les aspects économique et sismique. Les résultats obtenus, basés sur des mesures locales, sont très intéressants et soulignent l'intérêt d'une telle approche. L'optimisation proposée à travers l'algorithmes colonie de fourmis a abouti à des résultats très satisfaisants et a conduit à des meilleures solutions en terme du coût de réalisation tout en respectant les exigences de sécurité parasismique.

La méthodologie proposée peut être utilisée comme outil approprié pour la prise de décision dans les processus de conception des projets.

Mots-clés

Avant-projet sommaire, analyse multicritère, coût de construction, vulnérabilité sismique, colonie de fourmis (ACO), méthodes (AHP, PROMETHEE, TOPSIS), bâtiments résidentiels en BA.

ABSTRACT

Designing an optimal earthquake-resistant structure is a complex challenge, as it must simultaneously meet safety requirements imposed by regulations and address economic constraints. The objective of this doctoral research is to develop a methodology to assist designers in defining an optimal earthquake-resistant building at the preliminary design stage.

To this end, a multi-criteria analysis of the problem was conducted to identify and define the various design criteria, based on field experience and tailored to the optimization framework adopted in this study. Optimization was carried out considering two key criteria : construction cost and seismic vulnerability. The problem was addressed at the conceptual design stage using the Ant Colony Optimization (ACO) method. The ranking of the optimal solutions was then performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. A comparative study was also conducted using two well-known ranking methods : PROMETHEE and TOPSIS.

The proposed methodology and the compiled database were applied to real-world cases of concrete residential buildings in Algeria, taking into account both economic and seismic aspects. The results obtained, based on local data, demonstrate the relevance and effectiveness of this approach. The optimization via the ant colony algorithm yielded highly satisfactory solutions, leading to reduced construction costs while ensuring compliance with earthquake safety requirements.

Therefore, the developed methodology proves to be a valuable decision-making tool for designers during the preliminary design phase of earthquake-resistant building projects.

Keywords

Preliminary design, multi-criteria analysis, construction cost, seismic vulnerability, Ant Colony Optimization (ACO), methods (AHP, PROMETHEE, TOPSIS), reinforced concrete residential buildings.

تصميم هيكل مقاوم للزلازل بشكل أمثل يُعدّ مشكلة معقدة؛ إذ يتعيّن عليه تلبية متطلبات السلامة التي تفرضها القوانين، مع الأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والقيود الميزانية. يهدف هذا البحث لنيل شهادة الدكتوراه إلى تطوير منهجية تساعد المصممين في تحديد المبنى المقاوم للزلازل الأمثل خلال مرحلة ما قبل المشروع.

ولهذا الغرض، تم إجراء تحليل متعدد المعايير، أتاح تحديد وصياغة معايير التصميم المختلفة، وذلك استناداً إلى الخبرات الميدانية، مع مراعاة أساليب التحسين المعتمدة في هذا البحث. بعد ذلك، تم تنفيذ عملية التحسين مع التركيز على معيارين أساسيين: تكلفة الإنجاز وقابلية المبنى للتأثر بالزلازل. تمت معالجة المشكلة في مرحلة الدراسات الأولية للمشروع (APS) باستخدام خوارزمية تحسين مستوحاة من خوارزميات مستعمرة النمل (ACO). كما تم ترتيب الحلول المثلى باستخدام طريقة Analytic Hierarchy Process (AHP) كذلك أُجريت دراسة مقارنة باستخدام طريقتين معروفتين لتصنيف الحلول: PROMETHEE و TOPSIS.

تم تطبيق المنهجية المقترحة وقاعدة البيانات التي جُمعت على حالات حقيقية لمبانٍ سكنية خرسانية في الجزائر، مع الأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والزلزالية. أظهرت النتائج المستخلصة من البيانات المحلية فاعلية وجدوى هذه المقاربة. وقد أفضى التحسين باستخدام خوارزمية مستعمرة النمل إلى نتائج مُرضية للغاية، وأدى إلى حلول أفضل من حيث تكلفة الإنجاز مع المحافظة على متطلبات السلامة الزلزالية.

بالتالي، تُعدّ المنهجية المقترحة أداة فعّالة ومناسبة لدعم اتخاذ القرار في عمليات التصميم الأولية لمشاريع المباني المقاومة للزلازل.

الكلمات المفتاحية

مرحلة الدراسات الأولية، التحليل متعدد المعايير، تكلفة البناء، القابلية الزلزالية، خوارزمية مستعمرة النمل (ACO)، الطرق (AHP، PROMETHEE، TOPSIS)، المباني السكنية الخرسانية المسلحة.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les bâtiments jouent un rôle central et structurant dans le développement des sociétés humaines, en offrant des espaces indispensables à la vie quotidienne : logements, lieux de travail, infrastructures commerciales et culturelles, et espaces publics. Au-delà de leur simple fonction d'abri, ils constituent des éléments clés du tissu urbain et social, influençant directement la santé, le confort, la sécurité, et plus globalement, la qualité de vie des citoyens (Lowe & Ponce, 2009). Leur conception et leur réalisation représentent également des enjeux économiques et stratégiques majeurs, mobilisant des ressources humaines, matérielles et financières considérables.

Le secteur du bâtiment résidentiel est un système complexe et multidimensionnel qui mobilise de nombreux acteurs tels que les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les entreprises de construction et divers autres intervenants (Feige, Wallbaum & Krank, 2011). Pour accompagner efficacement les décisions de ces parties prenantes, il est aujourd'hui essentiel de disposer d'évaluations scientifiques précises et pertinentes, tant pour les bâtiments existants que pour les nouvelles constructions. L'utilisation d'un ensemble de critères fiables permet ainsi de guider les choix en matière de conception, de performance et de durabilité, en constituant un outil d'aide à la décision crédible et structurant pour le développement du secteur.

En outre, au cours de la dernière décennie, un mouvement majeur a émergé, visant à considérer les bâtiments comme des éléments clés du tissu social et économique des villes. Cette vision s'est progressivement intégrée aux itérations successives de nombreuses normes, outils et méthodologies de conception. Le principal défi dans ce domaine réside dans la nécessité de concilier simultanément des critères économiques, environnementaux et sociaux. Cette complexité représente un enjeu majeur pour les concepteurs et les décideurs impliqués dans les projets de construction ou de réhabilitation des bâtiments résidentiels.

Depuis longtemps, les concepteurs de bâtiments ainsi que les occupants accordent une attention particulière à la performance globale des bâtiments, notamment en termes de sécurité, de confort et de durabilité (Finnveden & Moberg, 2005). Cette préoccupation a conduit à des efforts significatifs dans le développement de systèmes et d'outils permettant d'évaluer de manière précise la performance sismique des structures. Ces travaux intègrent à la fois les aspects réglementaires (en veillant notamment au respect des normes parasismiques en

vigueur) et les avancées technologiques dans les matériaux et les méthodes de construction. Ainsi, la prise en compte simultanée des contraintes réglementaires et technologiques s'impose comme une exigence incontournable dès les premières phases de conception et tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Lors de la phase d'avant-projet sommaire de l'étude d'un bâtiment en béton armé, le concepteur est amené à élaborer plusieurs variantes de conception. Celles-ci doivent respecter à la fois les réglementations en vigueur et les différents critères techniques de conception, tels que les contraintes sismiques et les considérations économiques. Il est alors essentiel d'aborder simultanément l'ensemble de ces critères, non pas en les optimisant individuellement, mais en recherchant un équilibre global qui permet d'atteindre la meilleure solution possible dans son ensemble.

Les méthodes d'optimisation multicritères apparaissent particulièrement pertinentes pour répondre à cette complexité : elles fournissent aux concepteurs des outils efficaces d'aide à la décision, notamment pour la gestion des données et la visualisation des résultats. Ces méthodes permettent ainsi d'identifier des solutions de compromis, c'est-à-dire des conceptions qui répondent de manière satisfaisante à l'ensemble des critères considérés (Al-Hajjar, 1989). La décision prise à cette étape joue un rôle déterminant pour la suite du projet, puisqu'elle conditionne la qualité, la sécurité et la performance globale du bâtiment tout en réduisant les risques d'erreurs souvent observés dans les phases préliminaires (antérieures) du processus de conception.

Le cadre général du présent travail concerne le développement d'une méthodologie d'aide à la décision multicritère pour la conception parasismique des bâtiments en béton armé dans le contexte algérien.

Contexte de la recherche

Depuis son indépendance, l'Algérie a mis en place, dans l'ensemble de ses villes, un vaste programme de logements publics, essentiellement constitués de grands ensembles collectifs. Ces opérations de construction ont souvent été motivées par un seul critère prioritaire : répondre à l'urgence de construire le maximum de logements dans des délais très courts pour satisfaire la demande croissante de la population. Cette approche, principalement axée sur la rapidité d'exécution, a parfois laissé de côté d'autres aspects importants de la qualité du bâti, tels que la durabilité, la sécurité (notamment vis-à-vis des risques sismiques), et le confort des habitants. Aujourd'hui, la nécessité d'intégrer des critères de conception plus globaux, prenant en compte à la fois les exigences réglementaires, les performances structurelles et les considérations économiques, apparaît comme un enjeu majeur pour améliorer la qualité des logements construits et pour mieux répondre aux défis du développement urbain durable.

Problématique de la recherche

Le Règlement Parasismique Algérien a été établi la première fois en 1988 en préconisant deux méthodes pour le calcul dynamique des structures : la méthode statique équivalente et la méthode dynamique approchée. En 1999, de nouvelles règles parasismiques ont été établies sur le modèle Américain. Ces règles préconisent une méthode dynamique spectrale et un classement des sites en quatre catégories en fonction des propriétés des sols qui les constituent. Chaque catégorie de site est caractérisée par deux périodes propres de vibration. A chaque type de site est associé un spectre de réponse élastique calculé en fonction des caractéristiques du site considéré et de celles de la structure étudiée. En outre, depuis le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003, des règles de conception plus strictes ont été prescrites (sur le contreventement, les dimensions de éléments structuraux, etc.). Les nouvelles règles parasismiques algériennes (RPA 2024) s'orientent vers une démarche de conception des structures par voile en béton armé en particulier dans les zones de forte sismicité. Dans le cadre de ces normes diversifiées et plus strictes, la structure parasismique devient plus couteuse et sa vulnérabilité et sa durabilité sismiques restent toujours difficilement évaluables. L'objet de cette étude consiste à mettre au point une méthodologie permettant d'aider à définir la structure parasismique optimale en considérant d'une part, les différentes règles parasismiques algériennes, et d'autre part, les critères de coût, de site, de vulnérabilité sismique, et autres éventuels à définir.

Il s'agit donc de résoudre la problématique de la conception multicritère des bâtiments en béton armé dans le contexte algérien à travers l'élaboration d'une méthodologie basée sur l'analyse multicritère. Ce processus structuré comprend plusieurs étapes clés, que l'on peut résumer comme suit :

- **La première problématique** porte sur l'identification et la formulation des critères essentiels pour l'analyse multicritère d'une structure parasismique. Ces critères incluent notamment le coût de conception, la vulnérabilité sismique, les caractéristiques du site, ainsi que la géométrie de la structure. Chacun de ces critères doit être soigneusement défini, avec la détermination de ses paramètres caractéristiques, ses méthodes de calcul et ses contraintes d'application, afin d'assurer une intégration rigoureuse dans l'analyse globale.
- **La deuxième problématique** concerne l'élaboration proprement dite d'une méthodologie d'optimisation multicritère. Celle-ci doit permettre de combiner de manière pertinente et équilibrée l'ensemble des critères identifiés, afin d'aboutir à une solution de conception optimisée et adaptée

aux spécificités locales (notamment les exigences réglementaires et les contextes socio-économiques).

- **La troisième problématique** vise à valider la méthodologie élaborée. Cette étape consiste à appliquer la méthode sur des cas réels de bâtiments en béton armé, afin de vérifier sa pertinence et son efficacité. Elle permettra ainsi d'ajuster les paramètres du modèle et de confirmer la robustesse des résultats obtenus.

Ainsi, ce processus structuré et progressif constitue la base d'un outil d'aide à la décision multicritère, apportant aux concepteurs une approche intégrée et fiable pour la conception parasismique des bâtiments en Algérie.

Objectifs, motivations et démarche

Les objectifs principaux de cette recherche visent à développer une méthodologie d'aide à la décision multicritère permettant d'optimiser la conception des bâtiments résidentiels en béton armé tout en respectant les exigences réglementaires algériennes et en répondant aux besoins économiques et techniques des acteurs du secteur. Plus spécifiquement, il s'agit d'intégrer simultanément des critères de performance sismique, de coûts de construction, de faisabilité technique et d'autres paramètres (comme l'adaptabilité au site et aux contraintes environnementales) dans une approche globale et cohérente.

Les motivations de cette recherche sont étroitement liées à l'importance stratégique de la construction d'habitations en Algérie pour le développement socio-économique du pays. La forte demande en logements, associée aux défis de la sécurité parasismique, de la maîtrise des coûts et de l'amélioration des conditions de vie, nécessite des outils d'aide à la décision performants et adaptés au contexte local. De plus, les enseignements tirés des événements sismiques passés ont révélé des vulnérabilités importantes dans le bâti existant, soulignant la nécessité de revoir et d'optimiser les pratiques de conception.

La démarche adoptée repose sur une approche scientifique rigoureuse, structurée en plusieurs phases :

- Une revue bibliographique approfondie des méthodes multicritères appliquées au domaine du bâtiment, permettant d'identifier les approches existantes et leurs limites.
- Une identification des critères pertinents à prendre en compte dans le contexte algérien et une définition claire de leurs paramètres caractéristiques.

- Le développement d'une méthodologie d'optimisation multicritère intégrant l'ensemble des critères identifiés, accompagnée d'outils d'analyse et de visualisation des résultats.

Structure de la thèse

Nous devons proposer un schéma de travail adapté, simple et précis pour définir une méthodologie d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments en béton armé en Algérie (Figure 0.1). Cette méthodologie devra être intégrée dans un outil d'aide à la décision afin de faciliter, pour les décideurs et gestionnaires, la mise en place d'une stratégie efficace et cohérente de conception multicritère des bâtiments d'habitation.

Depuis la définition de la problématique jusqu'à la validation de la méthodologie proposée, le présent manuscrit est composé de quatre chapitres suivis d'une conclusion générale et de quelques perspectives de recherches futures.

Le premier chapitre, à caractère théorique, est consacré à la compréhension des principaux concepts et notions liés à notre sujet de recherche. Il traite notamment du processus de conception des bâtiments en BA, en détaillant les différentes phases (avant-projet, conception préliminaire, conception détaillée, etc.) et en précisant les tâches à accomplir à chaque étape. Nous avons également décrit les bâtiments, en mettant en lumière leurs caractéristiques architecturales et structurelles. En outre, nous avons réalisé une étude bibliographique approfondie des approches multicritères appliquées à la conception des bâtiments en BA, en abordant notamment le choix du système structural, le choix du type de fondation ainsi que l'estimation des coûts de construction. Nous avons souligné l'intérêt de ces approches pour accompagner la prise de décision dans un contexte complexe et multidisciplinaire.

Dans la continuité du chapitre I, **le deuxième chapitre** est consacré à la présentation des méthodes multicritères utilisées dans la conception des bâtiments. Il propose une synthèse des points essentiels dégagés de l'état de l'art. Enfin, une méthodologie d'optimisation multicritère adaptée aux bâtiments en béton armé est présentée ; elle constituera la base de la suite de l'étude.

Dans **le troisième chapitre**, nous avons réalisé une analyse multicritère. Chaque critère est défini à partir des retours d'expérience du domaine et en tenant compte des modalités d'optimisation envisagées dans la suite de l'étude. Nous avons proposé une fonction et une échelle d'évaluation pour chacun de ces critères. Nous avons présenté ensuite les contraintes techniques et réglementaires liées à la conception des bâtiments en béton armé. Enfin, nous avons ramené le problème d'optimisation multicritère à deux critères pertinents, permettant d'évaluer la qualité de la conception parasismique des bâtiments en béton armé, en utilisant un nombre restreint de données disponibles dès la phase APS.

Dans **le quatrième chapitre**, nous avons validé la méthodologie développée en l'appliquant à des cas réels de bâtiments d'habitation en Algérie. Nous commencerons par présenter ces cas d'étude, en détaillant les caractéristiques des bâtiments choisis. Ensuite, nous avons exposé les différents résultats obtenus et les étapes de calculs suivies pour chaque cas. Enfin, une discussion et une analyse approfondie des résultats viendront conclure ce chapitre.

Ce mémoire de thèse sera conclu en mettant en lumière l'intérêt et les apports majeurs de ce travail par rapport aux problématiques soulevées dans le contexte de la conception parasismique des bâtiments en béton armé. Nous proposerons également des pistes concrètes pour la validation et l'application pratique de la méthodologie proposée, ainsi que des perspectives de recherche et de développement pour les travaux futurs.

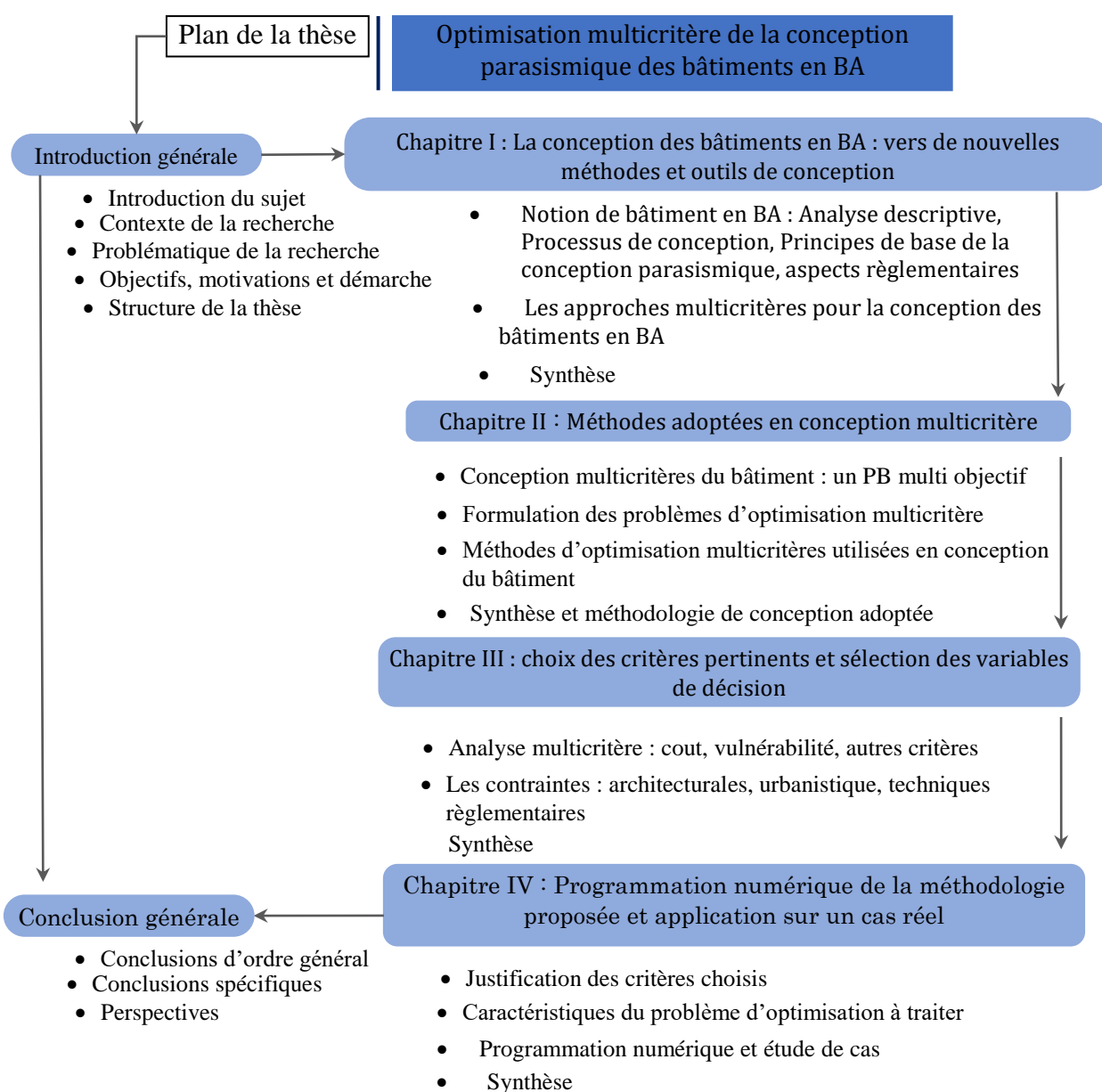


Figure 0.1 : Structure de la thèse

Chapitre I La conception des bâtiments en BA : vers de nouvelles méthodes et outils de conception

Ce chapitre dresse une analyse détaillée du contexte de la construction en béton armé (BA). Nous y présentons le processus de conception des bâtiments en BA, en détaillant les différentes phases (avant-projet, conception préliminaire, conception détaillée, etc.) et en précisant les tâches à réaliser à chaque étape. Nous décrivons les bâtiments en BA notamment leurs caractéristiques architecturales et structurelles. Ensuite, nous soulignons l'importance du secteur résidentiel courant en Algérie pour le développement socio-économique du pays tout en soulignant les défis liés à la demande croissante de logements. Enfin, nous menons une étude des approches multicritères appliquées à la conception des bâtiments en BA, notamment le choix du système structural, le choix des fondations et l'estimation des coûts de construction, en soulignant l'intérêt de ces approches pour guider la prise de décision dans un contexte complexe et multidisciplinaire.

I.1 Introduction

Un bâtiment constitue un espace intermédiaire entre ses occupants et l'environnement extérieur. Sa fonction première est de répondre de manière optimale aux besoins spécifiques liés à son usage, qu'il s'agisse de logements, de bureaux, d'établissements industriels ou d'équipements publics. Tout en s'intégrant harmonieusement dans son environnement urbain ou paysager. Il ne s'agit donc pas seulement de créer un volume bâti, mais de concevoir un cadre de vie ou de travail adapté, confortable, sécurisé et durable.

La production d'un bâtiment de qualité repose sur une démarche de conception globale et intégrée, qui s'étend tout au long du processus de conception, depuis les premières esquisses jusqu'à la réalisation. Cette approche systémique implique de prendre simultanément en compte l'ensemble des composantes du projet : structurelle, architecturale, environnementale, technique, économique et réglementaire. Cette vision globale multi-technique du bâtiment nécessite une gestion rigoureuse de données hétérogènes tout au long du processus de conceptions, depuis les études préliminaires jusqu'à la livraison du bâtiment.

Concevoir un bâtiment aujourd'hui ne relève plus uniquement d'un acte architectural et/ou technique, mais d'une *synthèse intelligente de multiples compétences*, dans une logique de durabilité, d'efficacité et de performance globale.

En effet, l'utilisation d'outils numériques devient alors essentielle pour centraliser, coordonner et simuler les choix techniques et architecturaux à chaque étape du projet.

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte général de la conception des bâtiments, en mettant en lumière les enjeux, les contraintes et les exigences actuelles qui influencent ce domaine. Nous précisons également le positionnement de cette étude dans le processus global de conception d'un bâtiment, afin de situer clairement son rôle et ses apports à chaque étape du projet, de la phase d'esquisse à la réalisation.

Par la suite, nous identifions et analysons les principaux problèmes auxquels cette étude doit répondre. Ces problématiques peuvent être d'ordre technique (dimensionnement des éléments porteurs, résistance aux sollicitations sismiques), économique (optimisation des coûts), ou encore organisationnel (coordination entre les différents acteurs du projet).

Enfin, nous soulignons la nécessité d'intégrer de nouvelles méthodes et des outils d'aide à la décision pour améliorer la qualité et l'efficacité de la conception, notamment dans le cadre de la conception des bâtiments en béton armé (BA). Ces

outils, qu'ils soient numériques (tels que, les logiciels de simulation structurelle) ou méthodologiques (démarche de conception intégrée, analyse multicritère, approche life cycle), permettent de prendre en compte plus efficacement la complexité croissante des projets tout en favorisant une meilleure prise de décision.

Les conclusions de ce premier chapitre serviront de base pour l'exploration des différentes approches de conception ainsi que des outils et méthodes d'analyse multicritère disponibles dans la littérature. Cette analyse permettra de mieux cerner notre problématique et de dégager les axes majeurs du travail de recherche mené.

I.2 Le bâtiment, un système constructif complexe

Le bâtiment constitue un système constructif intégré, servant d'interface entre ses occupants et l'environnement extérieur. Bien plus qu'un simple abri, il est le fruit d'un processus de conception évolutif, où chaque décision impacte l'ensemble du système. Le bâtiment est donc un système constructif complexe. Selon (Gobin, 2003), le bâtiment peut être décrit comme la combinaison de six sous-ensembles fonctionnels, représentés dans la Figure I.1

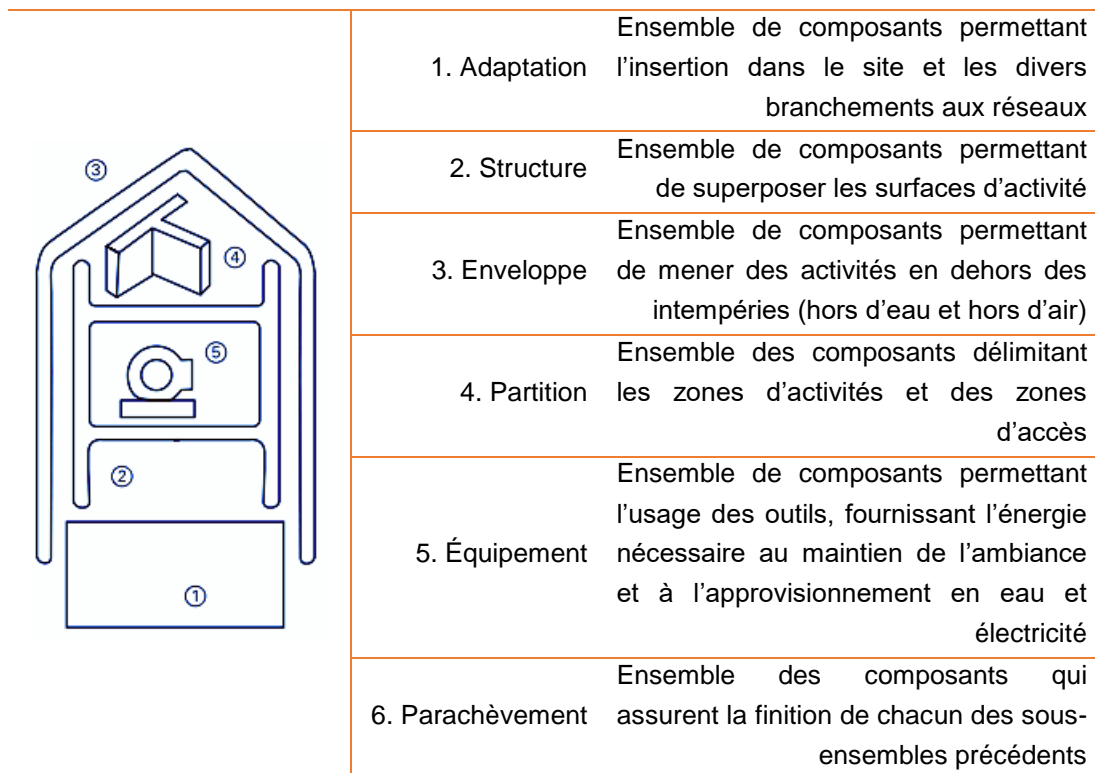


Figure I.1. Structure fonctionnelle d'un bâtiment en six sous-ensembles constitutifs

La complexité du bâtiment réside dans l'interdépendance de ses nombreuses composantes : structure, enveloppe, fondations réseaux techniques, performances thermiques, acoustiques et environnementales, etc. Ces éléments ne peuvent être

étudiés isolément, car une modification dans l'un peut avoir des conséquences importantes sur les autres (Messabhia, 1989).

Cette interdépendance est particulièrement marquée dans le cas des bâtiments en béton armé, où la conception de la superstructure c'est-à-dire l'ensemble des éléments porteurs verticaux et horizontaux (poteaux, poutres, dalles, voiles) est étroitement liée à celle de l'infrastructure, notamment le choix du système de fondation (Santos et al., 2021). Le comportement global du bâtiment dépend de cette cohérence structurelle entre le haut et le bas de l'édifice, en interaction avec les contraintes du sol, les charges appliquées et les exigences réglementaires, notamment sismiques (Najar et al., 2025) (Figure I.2).

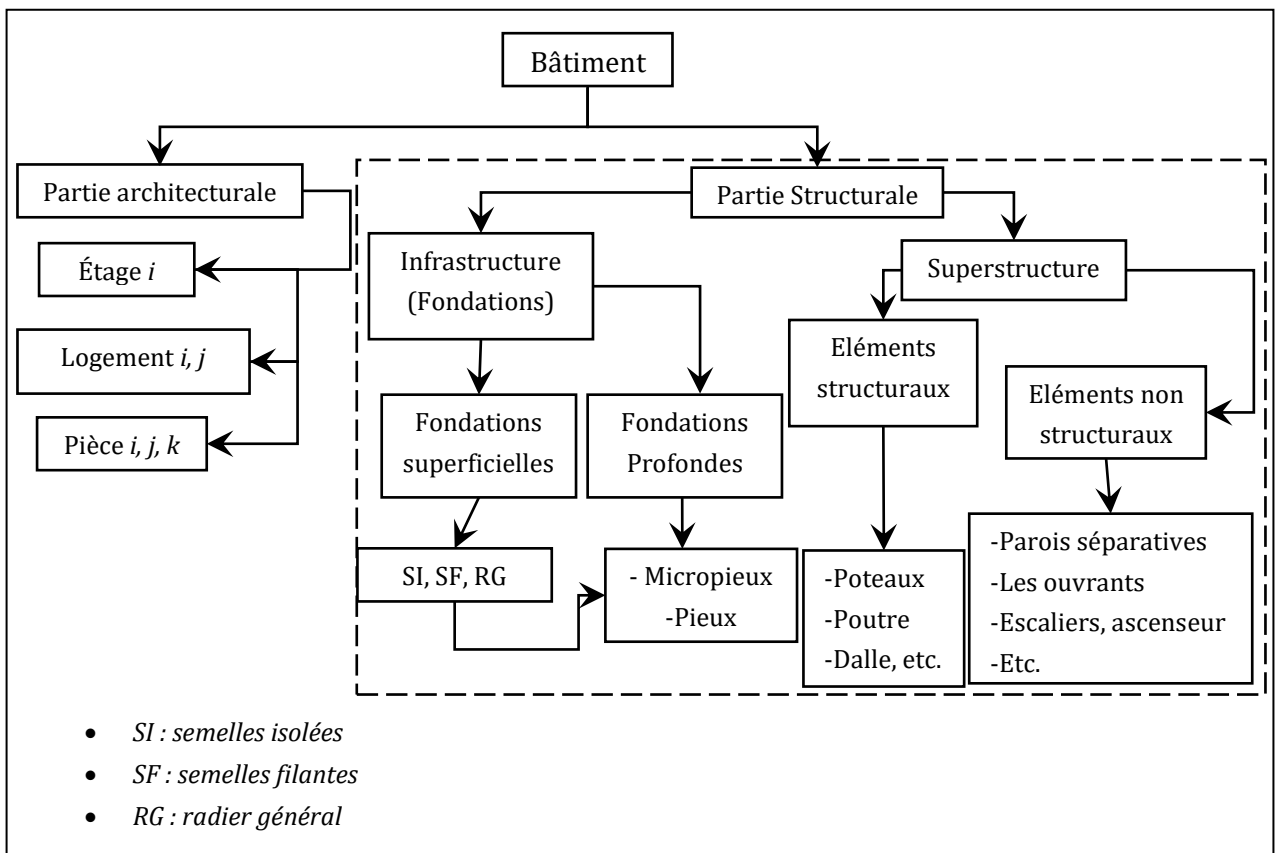


Figure I.2 .Organigramme descriptif d'un bâtiment en BA

I.2.1 Partie architecturale

L'esquisse architecturale constitue la première étape concrète de la conception d'un bâtiment. Elle est élaborée par l'architecte à partir du plan de masse, en tenant compte des contraintes du site, du programme fonctionnel et des intentions architecturales initiales (Fang et al., 2025). À ce stade, le bâtiment est décrit de manière encore sommaire, mais suffisamment structurée pour en dégager les grandes lignes : il est généralement décomposé en étages, logements, cellules fonctionnelles ou unités d'usage selon la nature du projet (Figure I.3).

Cette phase préliminaire est cruciale, car elle conditionne l'organisation générale du bâtiment et oriente les choix techniques futurs. Les informations produites lors de l'esquisse sont nombreuses, hétérogènes (volumes, surfaces, affectations des espaces, accès, orientations, interactions spatiales, etc.) et souvent incomplètes, mais elles servent de base à l'ensemble des disciplines intervenant dans le projet (structure, thermique, acoustique, réseaux techniques, économie de la construction...) (Calixte et al., 2022).

L'un des enjeux majeurs de cette phase réside dans la gestion et l'organisation de ces données. En effet, une grande partie des informations nécessaires aux étapes ultérieures du projet, notamment pour le dimensionnement structurel, les études de faisabilité proviennent directement de l'esquisse architecturale (Ampanavos et al., 2021). Une mauvaise structuration ou une perte d'information à ce stade peut entraîner des incohérences ou des retards dans le processus de conception global.

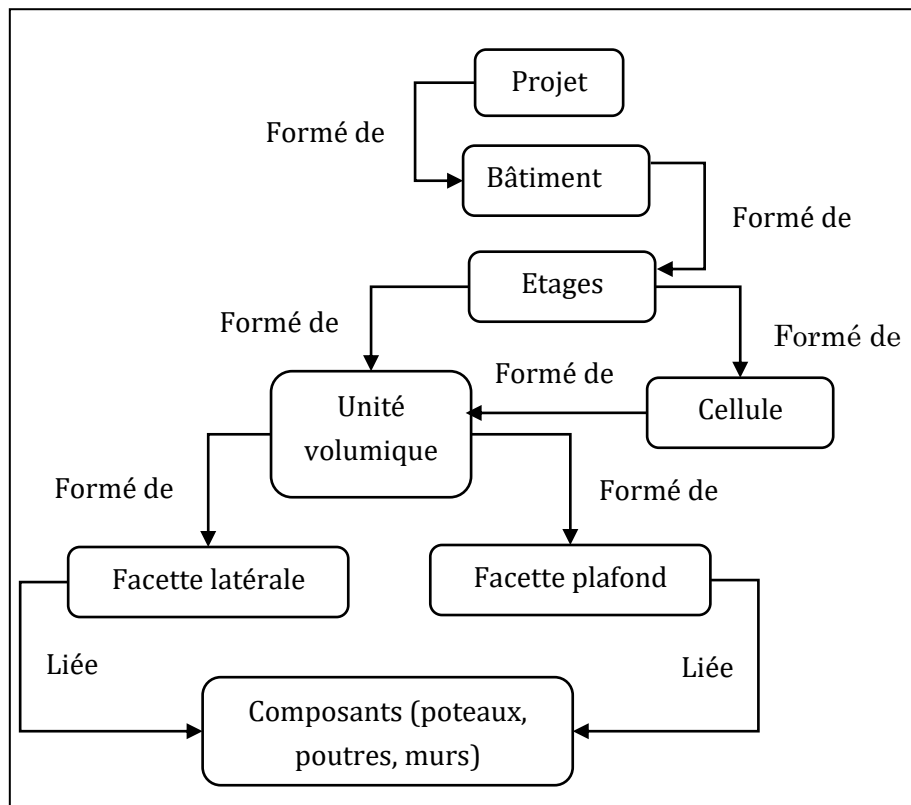


Figure I.3. Description architecturale d'un bâtiment

I.2.2 Partie structurale

La partie structurale d'un bâtiment désigne l'ensemble des éléments porteurs qui assurent sa stabilité, sa résistance aux sollicitations (charges permanentes, charges d'exploitation, actions climatiques ou sismiques), et sa pérennité dans le temps. Elle constitue l'ossature du bâtiment sur laquelle reposent toutes les

autres composantes (enveloppe, cloisons, équipements techniques, etc.) (Saura-Gómez et al., 2022; Chang et al., 2023)

Généralement, selon le type de construction elle peut être décomposée en deux composantes :

1- Superstructure

Composée de :

- *Éléments structuraux* : poteaux, poutres, dalles, voiles, murs porteurs, planchers, etc., qui forment les étages du bâtiment et assure la tenue de celui-ci sous l'action des charges c'est-à-dire : la stabilité de l'ensemble, la résistance aux efforts sismiques, et la rigidité à supporter les efforts sans risque de déformation (Tableau I.2).

Tableau I.1. Description des éléments structuraux en BA (poteaux, poutres, voiles)

Type d'élément	Description géométrique	Caractéristiques géométriques
Poteaux		<p>h_l : hauteur libre du poteau h_e : hauteur d'étage $a \times b$: section transversale de poteau a : longueur de la section b : largeur de la section</p>
Poutres		<p>l_p : portée de la poutre b_p : largeur de la poutre h_p : hauteur de la poutre $b_p \times h_p$: section de la poutre</p>

Tableau I.2. Description des éléments structuraux en BA (*Suite*)

Type d'élément	Description géométrique	Caractéristiques géométriques
Voiles	<p>Coupe3-3</p>	<p>h_v : hauteur libre du voile h_{ve} : la hauteur de l'étage l_v : longueur du voile e_v : épaisseur du voile</p>

- *Éléments non structuraux* : qui n'ont pas une fonction porteuse ou de contreventement. Leur rôle est d'assurer la fonctionnalité des espaces intérieurs du bâtiment ainsi que leurs protections de l'agressivité du milieu extérieur (isolation acoustique et thermique, protection contre l'incendie...) (Figure I.2).

2- Infrastructure

L'infrastructure représente la partie enterrée du bâtiment, c'est-à-dire l'ensemble des éléments situés en dessous du niveau du terrain naturel. Sa fonction principale est de transmettre les charges de la superstructure vers le sol, tout en garantissant la stabilité, la durabilité et la résistance aux mouvements du terrain (notamment en zone sismique ou sur sols instables) (Tripathi et al., 2021 ; Dos Santos et al., 2025). Elle est généralement composée des éléments suivants :

- **Les fondations** : ce sont les composants essentiels qui assurent l'ancrage du bâtiment dans le sol. Elles peuvent être superficielles (semelles isolées, filantes, radiers) ou profondes (pieux, micropieux), selon la nature du sol et les charges à reprendre (Figure I.4).
- **Les voiles périphériques** : ces murs enterrés assurent le contreventement du bâtiment au niveau inférieur et peuvent également

jouer un rôle de protection contre les poussées de terre et les infiltrations d'eau.

- **Les longrines** : éléments linéaires horizontaux qui relient les fondations entre elles et/ou répartissent les charges sous les murs porteurs. Elles participent également à la stabilité générale de l'infrastructure.

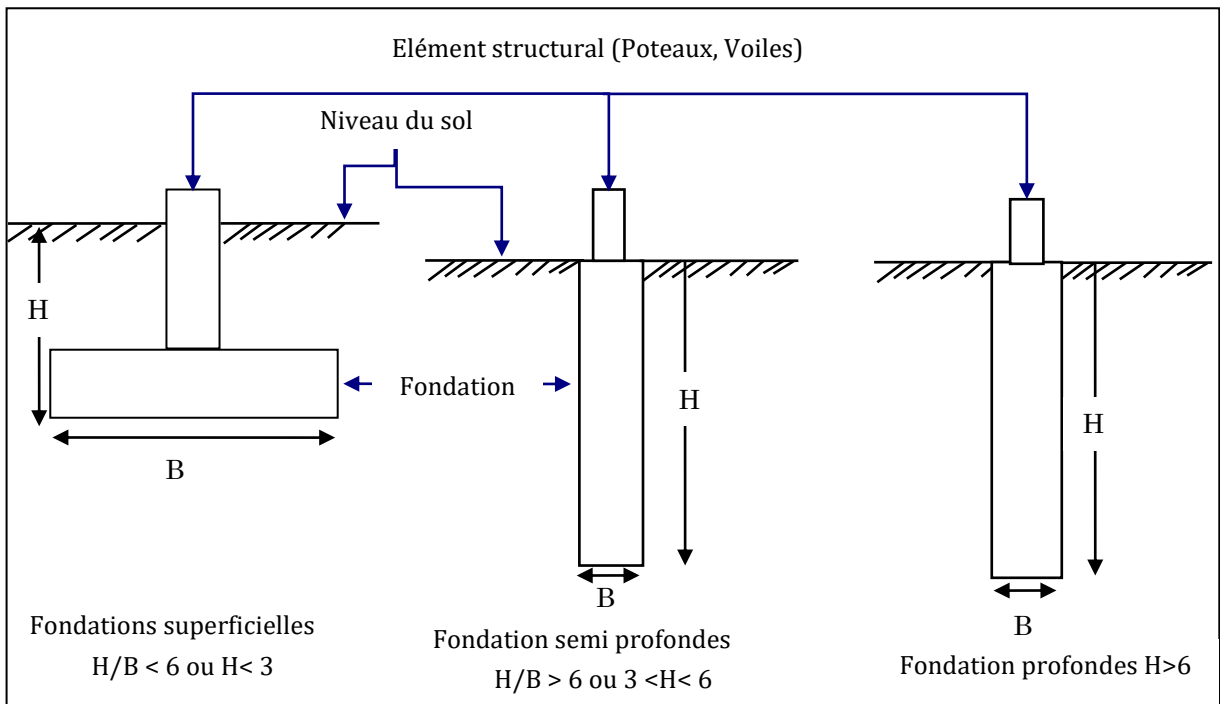


Figure I.4. Typologie des fondations

I.3 Processus de conception d'un bâtiment

Dans un projet de bâtiment, le passage de l'idée à la réalisation est un processus long, complexe et structuré. Il s'organise généralement en trois grandes étapes successives : la programmation, la conception et la réalisation (Figure I.5). Chacune de ces phases constitue le socle de la suivante et contribue à la construction progressive du projet.

La première étape, la programmation, est assurée par le maître d'ouvrage. Elle consiste à élaborer un cahier des charges clair et structuré, dans lequel sont formalisés les besoins fonctionnels, les objectifs de performance, les contraintes techniques, ainsi que les règles de qualité et les normes réglementaires à respecter (Jin, S., & Tu, H., 2024). Cette phase est cruciale, car elle oriente l'ensemble des décisions à venir.

Vient ensuite la conception, pilotée par le maître d'œuvre (souvent un architecte accompagné d'ingénieurs). Cette phase est elle-même décomposée en plusieurs sous-phases normalisées (esquisse, avant-projet, projet, etc.). Le maître d'œuvre

apporte une réponse architecturale, technique et économique au cahier des charges défini par le maître d'ouvrage, en veillant à la faisabilité, à la cohérence des choix et au respect des contraintes du projet (Antunes & Gonzalez, 2015).

Enfin, la phase de réalisation consiste à exécuter les travaux conformément aux plans et documents techniques validés. Elle doit respecter un délai imparti, un budget défini, et les exigences de qualité et de sécurité. Cette étape mobilise plusieurs corps de métier et nécessite une coordination rigoureuse entre les différents intervenants (Alaloul et al., 2016).

Tout au long du projet, le maître d'ouvrage peut s'entourer d'assistants à maîtrise d'ouvrage (AMO) ou de consultants spécialisés, afin de bénéficier des compétences spécifiques requises dans divers domaines : performance environnementale, accessibilité, réglementation, gestion des coûts, durabilité, etc. (Suwandi et al., 2024).

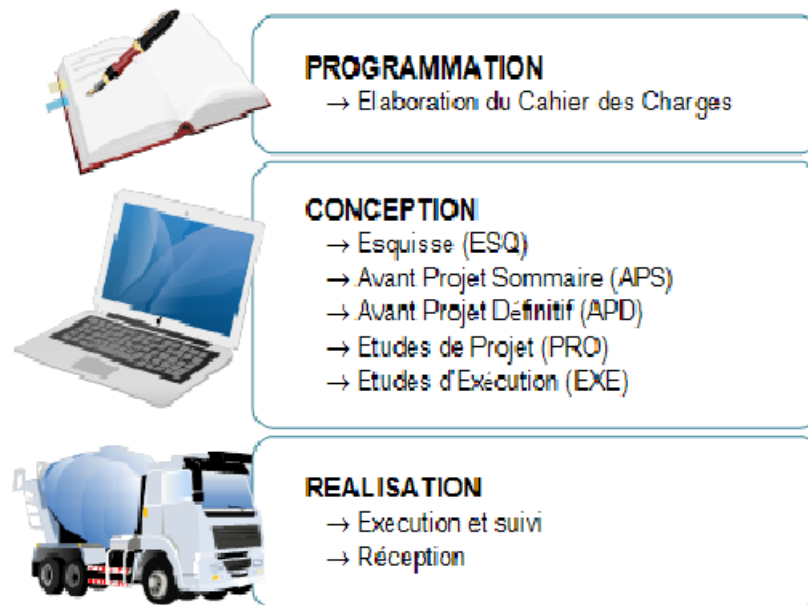


Figure I.5. Processus d'un projet de construction

I.3.1 La phase esquisse (ESQ)

Elle traduit les éléments majeurs du programme et vérifie la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes réglementaires, techniques, économiques et organisationnelles contenues dans le programme. Dès le début de la phase de conception, la phase esquisse permet de fixer à partir du programme un certain nombre de paramètres nécessaires à la conception du bâtiment (Ampanavos et al., 2021). Ces paramètres peuvent être classés selon quatre catégories (Figure I.6):

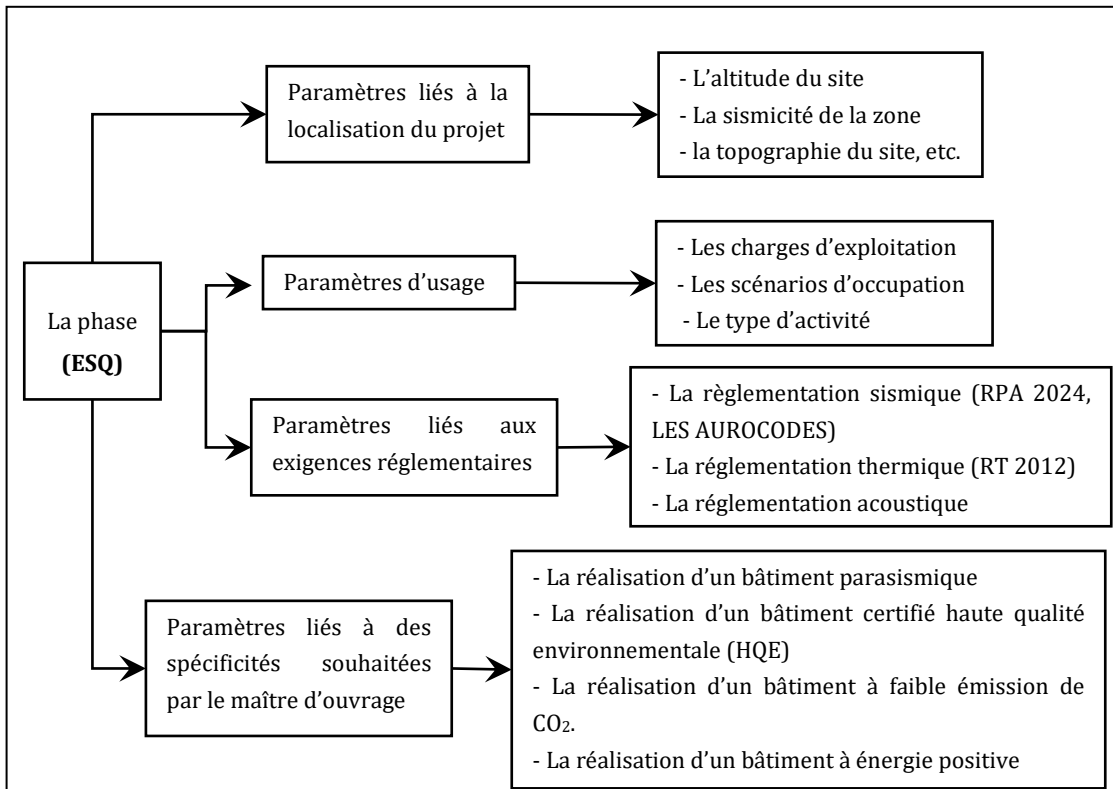


Figure I.6. Paramètres nécessaires à la conception du bâtiment en phase ESQ

I.3.2 L'avant-projet sommaire (APS)

L'avant-projet sommaire (APS) constitue une étape clé dans la phase de conception d'un bâtiment. Il vise à définir les principales caractéristiques du projet, tant sur le plan architectural que technique. À ce stade, le projet prend forme à travers la détermination de sa composition générale, en plan et en volume, l'organisation des espaces intérieurs, ainsi que l'apparence extérieure de l'ouvrage (Koltveit & Grønhaug, 2004 ; Ampanavos et al., 2021).

L'APS permet également de proposer des solutions techniques envisageables, sans toutefois entrer encore dans le détail de leur mise en œuvre. En parallèle, cette phase comprend une première estimation du coût global des travaux (donc une 1^{ère} estimation des paramètres dimensionnels nécessaire).

L'objet de notre étude se situe dans la phase de l'Avant-Projet Sommaire (APS). C'est à ce stade que les outils d'aide à la décision jouent un rôle essentiel en permettant au concepteur d'explorer un large éventail de variantes du projet. Grâce à ces outils, il est possible d'évaluer, comparer et sélectionner les solutions les plus pertinentes, en fonction de critères architecturaux, techniques, économiques ou environnementaux (étude de scénarios). L'objectif est de réduire au maximum les incertitudes avant d'engager la phase suivante de conception.

I.3.3 L'avant-projet détaillé (APD)

Il constitue une phase d'approfondissement du projet, visant à confirmer et compléter les choix établis lors de l'Avant-Projet Sommaire (APS). À ce stade, il s'agit de préciser les principes de construction, en définissant plus clairement les solutions architecturales, techniques et fonctionnelles retenues.

L'APD permet notamment de définir les principes constructifs, ainsi que les premières hypothèses concernant les fondations et la structure du bâtiment. Un prédimensionnement indicatif des éléments porteurs est généralement réalisé, afin d'assurer la cohérence globale du projet et d'en vérifier la faisabilité.

Par ailleurs, cette phase inclut la détermination détaillée des coûts prévisionnels des travaux, avec une ventilation par lots techniques, ce qui constitue une base essentielle pour la préparation des consultations d'entreprises et la planification des travaux à venir. Parfois, cette phase est intégrée dans l'étude détaillée (phase suivante) (Safaa Eldin et al., 2024).

I.3.4 Etude détaillée du projet (EDP)

Cette phase se concrétise par l'élaboration des plans d'exécution et la rédaction des spécifications techniques détaillées. Elle vise à définir avec précision l'ensemble des éléments constitutifs de l'ouvrage, tant sur le plan architectural que technique.

Les plans, coupes et élévations permettent de représenter les formes exactes des différents éléments de la construction, tandis que la nature, les caractéristiques des matériaux et les conditions de leur mise en œuvre sont clairement spécifiées. L'implantation ainsi que l'encombrement des éléments de structure et des équipements techniques (réseaux d'alimentation, d'évacuation, ventilation, etc.) sont également détaillés, garantissant une coordination optimale entre les différents corps d'état.

À ce stade, les coûts prévisionnels de réalisation de l'ouvrage sont arrêtés avec précision. Une estimation des coûts d'exploitation peut également être effectuée,

en vue d'anticiper les performances économiques du bâtiment à long terme. Enfin, le délai global de réalisation est défini, permettant d'établir un planning prévisionnel des travaux (Deng et al., 2024).

I.4 Principes et exigence pour une conception parasismique des bâtiments en BA

L'objectif principal d'un projet d'ossature parasismique est de concevoir une structure capable de résister aux effets d'un séisme sans s'effondrer, en absorbant les déformations induites par l'action sismique. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de mettre en œuvre une démarche de conception parasismique globale tout au long du processus de construction. Cette démarche repose sur trois piliers fondamentaux:

- *Une conception architecturale adaptée aux contraintes sismiques, garantissant une configuration géométrique régulière et symétrique, ainsi qu'une répartition cohérente des masses et des rigidités ;*
- *Une mise en œuvre rigoureuse et de qualité, assurant le respect des prescriptions techniques et le bon assemblage des éléments structuraux ;*
- *L'application stricte de la réglementation parasismique en vigueur, afin de se conformer aux normes de sécurité et de performance établies.*

I.4.1 Principe générale pour la planification

La collaboration entre l'architecte et l'ingénieur civil dès les premières étapes d'un projet de construction s'avère particulièrement bénéfique. Il est nettement plus avantageux de concevoir conjointement (projeter ensemble), afin de garantir une cohérence optimale entre l'architecture et la structure.

Dans cette approche intégrée, l'architecte et l'ingénieur conçoivent ensemble une structure porteuse polyvalente, capable à la fois de supporter les charges verticales et de résister aux forces sismiques. Ils déterminent également, de manière concertée, l'implantation des cloisons intérieures et le choix des éléments non porteurs en adéquation avec la structure retenue.

Ce mode de travail collaboratif permet non seulement d'optimiser la performance globale du bâtiment, mais aussi d'éviter des surcoûts importants liés à des modifications tardives ou à une mauvaise coordination entre les différentes disciplines (Wagiri et al., 2024) (Figure I.7).

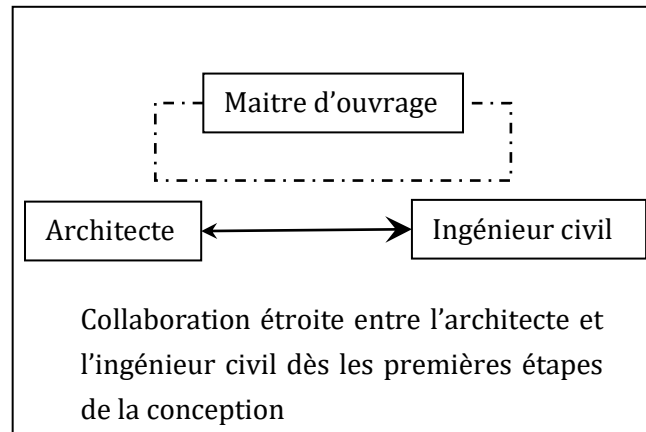


Figure I.7. Schéma de collaboration entre le Maître d'Ouvrage, l'Architecte et l'Ingénieur Civil dans le processus de conception

I.4.2 Principes pour la conception

Le respect des principes de conception permet principalement de limiter les surcoûts associés à l'adaptation sismique. Il facilite la transition d'une structure classique à une structure parasismique, tout en optimisant les ressources mises en œuvre (Figure I.8).

De plus, la sécurité globale du bâtiment repose davantage sur la qualité de la conception que sur la complexité des calculs. Une structure bien pensée, respectant des règles simples et efficaces, offre souvent de meilleures garanties qu'une structure mal conçue, même si elle fait l'objet de simulations complexes. En effet, la complexité des modèles augmente l'incertitude sur leur représentativité, ce qui peut compromettre la fiabilité des résultats obtenus.

Ainsi, une conception rigoureuse et bien structurée demeure la clé de la sécurité sismique, en assurant une performance optimale tout en maîtrisant les coûts et les incertitudes (Gkimprixis et al., 2020).

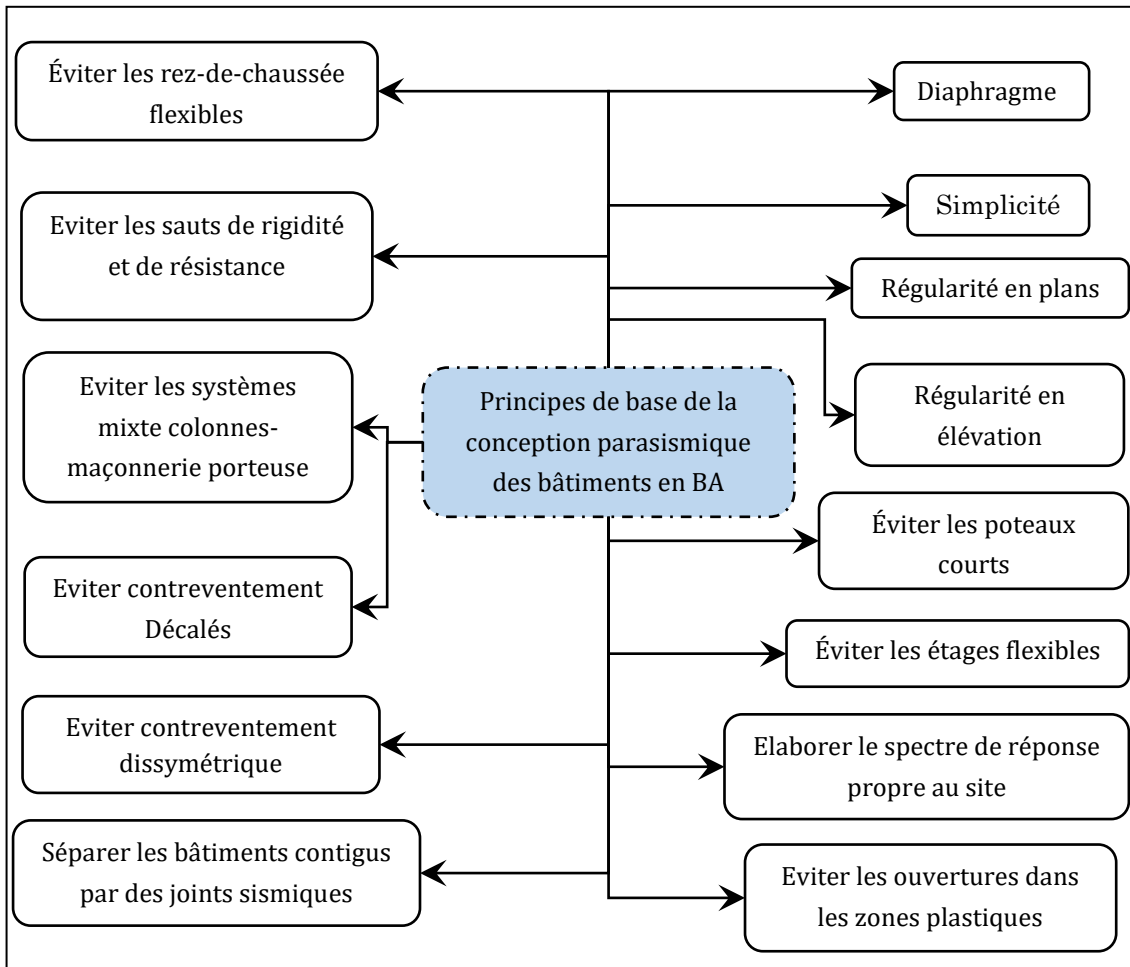


Figure I.8. Principes de base pour la conception parasismique

I.4.3 Le contexte réglementaire en génie parasismique

Le contexte réglementaire en génie parasismique est un cadre essentiel qui régit la manière dont les constructions doivent être conçues et réalisées afin de résister aux effets des séismes. Ce contexte est structuré autour de normes nationales et internationales, qui évoluent en fonction de l'avancée des connaissances scientifiques, des retours d'expérience après des séismes majeurs, et des innovations technologiques

I.4.3.1 Dans les autres pays du monde

Les réglementations parasismiques varient d'un pays à l'autre en fonction du niveau de risque sismique, des ressources disponibles, des connaissances scientifiques locales et des expériences passées (Arroyo et al., 2018 ; Lu et al., 2021 ; Abate et al., 2024 ; Pavel, 2023). Voici un aperçu des principales réglementations parasismiques dans le monde, regroupées dans le Tableau I.3 :

Tableau I.3. Comparaison des principales réglementations parasismiques mondiales
(Giri et al., 2019)

Région/Pays	Norme principale	Caractéristiques	Remarques
Union Européenne	Eurocode 8 (EN 1998)	Norme harmonisée pour tous les États membres. Basée sur des concepts de performance (ELS/ELU).	Obligatoire pour les marchés publics. La France, l'Italie, l'Espagne, la Grèce l'appliquent.
États-Unis	ASCE/SEI7+IBC (International Building Code)	Normes très détaillées, mises à jour fréquemment. Intègrent des scénarios de sol très précis (site-specific design).	Très influentes dans le monde (notamment en Amérique latine et en Asie).
Japon	Building Standard Law (BSL)	Très avancée technologiquement, exige des structures résistantes aux séismes fréquents. Encourage l'usage de l'amortissement et de l'isolation sismique.	Révisée après chaque grand séisme (notamment 1995 et 2011).
Chili	NCh433 (Norme chilienne sur les charges sismiques)	Conçue pour des séismes très fréquents et puissants. Fortes exigences en matière de ductilité.	Le Chili est un modèle en matière de construction parasismique en Amérique latine.
Turquie	Turkish Earthquake Code (TBEC 2018)	Inspirée des normes américaines. Intègre le zonage sismique à jour et des exigences modernes.	Renforcée après les séismes meurtriers de 1999 (Izmit).
Nouvelle-Zélande	NZS 1170.5	Norme très stricte, tient compte des risques secondaires (glissements de terrain, liquéfaction).	Suivie de près par l'Australie et d'autres pays du Pacifique.
Chine	GB 50011	Règlement spécifique basé sur les zones sismiques chinoises	Moins ouvert à l'international, mais en évolution constante.
Inde	IS 1893	Norme de base pour les charges sismiques. Encore peu appliquée en zones rurales.	Besoin d'une meilleure mise en œuvre sur le terrain.

I.4.3.2 En Algérie – Règles parasismiques algériennes (RPA 2003, nouvelle version 2024)

L'Algérie est un pays à sismicité modérée à élevée, notamment dans la région nord du pays. Pour faire face à ce risque, elle s'est dotée dès les années 1980 d'une réglementation parasismique spécifique, connue sous le nom de Règlement Parasismique Algérien (RPA). La version la plus utilisée jusqu'à récemment était le RPA 99 modifié en 2003 (RPA 2003). Ce document fixait les bases du dimensionnement des structures, selon un zonage sismique national, des classes d'importance des bâtiments et des types de sols. Il imposait des dispositions constructives pour améliorer la ductilité, la symétrie et la régularité des structures (Abderrachid et al., 2019 ; Madi et al., 2019).

En 2024, une nouvelle version du RPA a été introduite, tenant compte des retours d'expérience récents, des avancées scientifiques et de l'évolution du bâti en Algérie (MHUV, 2024) (Tableau I.4). Cette mise à jour introduit plusieurs améliorations majeures, telles que :

- Un zonage sismique actualisé basé sur de nouvelles études géophysiques et sismotectoniques.
- Une meilleure prise en compte des sols liquéfiables, des effets de site et des réponses spectrales locales.
- L'introduction de nouvelles classes de performance des bâtiments, avec des niveaux de sécurité différenciés selon l'importance de l'ouvrage (logements, écoles, hôpitaux...).
- Un accent renforcé sur les détails d'armature, les nœuds structuraux, et l'amélioration du comportement des bâtiments en béton armé ou en maçonnerie.

Le RPA 2024 se rapproche ainsi des pratiques internationales modernes, telles que celles de l'Eurocode 8 ou de l'ASCE 7, tout en restant adapté aux réalités du territoire algérien. Sa mise en œuvre effective reste un enjeu crucial, notamment dans les zones rurales ou périurbaines, où la surveillance de l'application et la formation des professionnels du bâtiment sont parfois insuffisantes.

Avec cette nouvelle version, l'Algérie vise non seulement à améliorer la résilience de son parc bâti, mais aussi à renforcer une culture du risque sismique chez les ingénieurs, architectes et décideurs publics.

Tableau I.4. Comparaison entre : RPA 2003 et RPA 2024 (Différences clés)

Critère	RPA 2003	RPA 2024
Zonage sismique	Basé sur l'ancienne cartographie, en 3 zones (I, II, III)	Zonage actualisé avec données géophysiques récentes. Intègre plus de précisions (microzonage possible).
Spectres de réponse	Génériques, peu adaptés aux particularités locales	Spectres spécifiques selon le type de sol et effets de site (plus proche de l'Eurocode 8).
Typologie des sols	3 types de sols généraux (S1, S2, S3)	Classification plus détaillée des sols. Meilleure prise en compte des effets de site et du risque de liquéfaction
Méthode de calcul	Approche statique équivalente (majoritairement utilisée), simplifiée	Maintien des méthodes statiques et dynamiques, avec des exigences accrues pour les bâtiments importants
Niveaux de performance	Sécurité à l'état limite ultime (ELU) seulement	Introduction des concepts de niveaux de performance (ELS, ELU), selon la destination du bâtiment.
Types de bâtiments	Classification basique selon usage (résidentiel, administratif...)	Introduction de classes d'importance plus précises (comme dans l'Eurocode 8).
Détails constructifs	Dispositions générales pour béton armé et maçonnerie	Détails plus rigoureux pour nœuds, ferrailage, murs de contreventement
Conception basée sur la ductilité	Moins développée	Ductilité mieux prise en compte, notamment pour les structures en béton
Mise à jour post-séisme	Peu réactif aux retours d'expérience	Inspiré des pratiques internationales : intégration des leçons tirées de séismes récents (ex. Mila 2020).
Formation et contrôle	Application inégale, surtout en zones rurales	Appel renforcé à la formation des professionnels et au contrôle qualité sur chantier.

I.5 Contexte des bâtiments en BA en Algérie : focus sur les bâtiments à usage d'habitation.

Durant ces dernières années, l'Algérie a connu une croissance démographique soutenue, entraînant une forte demande en logements, notamment dans les zones urbaines. Ce besoin pressant de logements a transformé le secteur de la construction en l'un des principaux moteurs de la croissance économique nationale. Conscientes du rôle stratégique de l'habitat dans toute politique de développement économique et social, les autorités algériennes ont mis en place

de nombreuses initiatives pour résoudre ce problème structurel. Parmi celles-ci, on note la mise en œuvre de vastes programmes de logements, tant individuels que collectifs, ainsi qu'un encouragement accru des initiatives privées de construction, tout en veillant à encadrer ces dernières dans un cadre réglementaire précis.

Cependant, l'approche traditionnelle de conception des bâtiments résidentiels en béton armé s'est longtemps concentrée quasi exclusivement sur le *critère de résistance structurelle*, en particulier face aux sollicitations sismiques, sans accorder une attention suffisante au critère économique (coût global de la construction, optimisation des matériaux, durabilité). Cette approche, héritée d'anciennes pratiques et renforcée par la nécessité de répondre rapidement aux besoins en logement, mérite aujourd'hui d'être revisitée à la lumière des nouvelles exigences de performance, de durabilité et d'efficacité économique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous mettons en lumière la situation actuelle des bâtiments d'habitation en Algérie, en la replaçant dans le cadre de la politique nationale de logement. Malgré les efforts considérables déployés par l'État algérien, notamment en termes d'investissements financiers, la situation reste préoccupante. En effet, malgré la réalisation de nombreux programmes de construction de logements collectifs et individuels, le pays est encore confronté à un déficit persistant, exacerbé par une urbanisation rapide, une forte pression démographique et l'évolution constante des besoins sociaux.

Le parc immobilier existant présente de nombreuses faiblesses : une qualité de construction souvent hétérogène, un entretien insuffisant, des problèmes récurrents de confort thermique et acoustique, ainsi qu'une vulnérabilité marquée aux risques sismiques. Par ailleurs, le manque d'homogénéité dans l'application des réglementations techniques (notamment le RPA pour la conception parasismique) contribue à fragiliser un parc immobilier déjà soumis à des pressions multiples.

I.5.1 Le secteur résidentiel : Données et indicateurs

Selon les données du ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, entre 2020 et 2024, environ 1,7 million de logements ont été livrés à travers le pays, toutes formules confondues. Cette performance a été rendue possible grâce à des investissements publics significatifs, estimés à 35 milliards de dollars sur la même période (MHUV,2024).

Le parc immobilier national a ainsi atteint 10,5 millions d'unités fin 2022, avec des projections dépassant les 12 millions dans les années à venir, compte tenu des projets en cours. Parallèlement, le taux de surpeuplement a connu une baisse,

passant de 4,46 personnes par logement en 2019 à 4,25 en 2023, avec une prévision de 4,18 fin 2024 (ONS, 2024).

Malgré ces avancées, la demande annuelle en logements reste élevée, estimée à 200 000 unités, en raison d'un taux de croissance démographique de 2,2 % et d'une population jeune majoritaire. Cette pression constante sur le marché du logement a conduit à l'émergence de marchés informels, représentant près de 80 % des transactions immobilières (MHUV, 2024). Le Tableau I.5 et le Tableau I.6 respectivement illustre l'évolution des livraisons des logements entre 2000 et 2024.

Tableau I.5. Nombre de logements livrés entre 2000-2024 (MHUV, 2024)

Année	Nombre de logements livrés	Investissement (en milliards USD)
2000-2017	Près de 3.6 millions	136
2017-2020	Près de 1.00 million	25
2020	200 000	7
2021	320 000	8
2022	400 000	9
2023	330 000	5
2024	449 832	6
TOTAL	6 299 832	196

Tableau I.6. Diverses formules de logements livrés entre 2000-2024 (MHUV, 2024)

Formule de logement	2020-2024	2000-2019
Logement Public Locatif (LPL)	48 000	491 000
Logement Promotionnel Aidé (LPA)	13 000	84 000
Agence Nationale de l'Amélioration et du Développement du Logement (AADL)	69 000	522 000
Logement Public Promotionnel (LPP)	3 053	9 000
Logements ruraux	33 000	580 000
Lotissements sociaux	31 320	126 280
Aides diverses	2 283	11 475

Ces chiffres témoignent de l'engagement continu de l'État algérien à améliorer les conditions de logement de sa population. Cependant, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la qualité des constructions, la conformité aux normes parasismiques, et la régulation du marché immobilier informel. Une approche intégrée, combinant efforts publics et privés, est essentielle pour assurer un développement durable du secteur résidentiel en Algérie.

I.5.1.1 Impacts socio-économiques

La construction d'habitations en Algérie joue un rôle stratégique dans le développement économique et social du pays. En mobilisant d'importants investissements publics, notamment dans les programmes de logements publics locatifs (LPL), ruraux, et promotionnels, l'État a favorisé la création massive d'emplois directs et indirects, dynamisant ainsi des secteurs clés tels que l'industrie des matériaux de construction, les services et les transports. Ce secteur contribue également de manière significative au produit intérieur brut (PIB), représentant environ 12,9 % du PIB en 2023, tout en réduisant les inégalités sociales en améliorant les conditions de vie des ménages et en réduisant le taux de surpeuplement dans les logements (Benrachi & Lezzar, 2014). Par ailleurs, la promotion des matériaux de construction locaux a stimulé l'industrie nationale et renforcé la balance commerciale par la réduction des importations et la stimulation des exportations (Dallaa & Belhaoues, 2024).

I.5.1.2 Autre impact

Au-delà de ses effets directs sur l'économie et l'emploi, la construction d'habitations en Algérie génère d'autres impacts significatifs, notamment en termes *d'aménagement du territoire et de cohésion sociale*. Par exemple, entre 2010 et 2019, plus de 350 nouvelles cités urbaines ont vu le jour, permettant de désengorger des villes comme Alger, Oran et Constantine, et de redistribuer la croissance démographique vers les régions intérieures (Riadh & Osman, 2021 ; Bouteche & Bougdah, 2023). Cette dynamique a favorisé l'émergence de nouveaux pôles urbains équipés d'infrastructures modernes : 4500 écoles primaires, 3200 centres de santé et plus de 2000 kilomètres de routes ont été réalisés ou modernisés dans le cadre des programmes de logements publics. *Sur le plan environnemental*, la demande accrue de logements a conduit à une exploitation massive de carrières et de ressources naturelles, avec une consommation annuelle moyenne de 22 millions de tonnes de ciment en 2022, dont près de 3 millions ont été exportées (Tebbouche et al., 2017 ; Merzouk et al., 2025). Cette pression met en évidence la nécessité d'intégrer les normes de construction durable et les préoccupations environnementales, comme le recyclage des déchets de chantier et l'utilisation d'énergies renouvelables (Dris & Benyahia, 2024). Enfin, la construction d'habitations a permis de reloger environ 800 000 familles issues des bidonvilles et de l'habitat précaire depuis 2000, renforçant ainsi le sentiment d'appartenance et de sécurité des bénéficiaires, tout en réduisant considérablement les taux d'exclusion sociale (Bounoua et al., 2017 ; Derriche et al., 2025 ; Moussaoui et al., 2017).

I.6 Besoins en outils et méthodes de conception pour optimiser la compétitivité des bâtiments en BA

Pour renforcer la compétitivité des bâtiments en BA en Algérie, il est essentiel d'adopter des outils et des méthodes de conception innovants et performants. Actuellement, la conception des bâtiments résidentiels en BA repose souvent sur des approches conventionnelles axées principalement sur la résistance mécanique, ce qui peut conduire à des structures lourdes, coûteuses et peu optimisées (Bourahla et al., 2023 ; Yavan et al., 2024 ; Negrin et al., 2021 ; Tafraout et al., 2019). Une meilleure compétitivité passe par l'intégration d'outils numériques avancés, tels que les logiciels de modélisation tridimensionnelle, qui permettent une meilleure visualisation des interactions structurelles, une coordination plus fluide entre les différents intervenants (architectes, ingénieurs et entrepreneurs) et une réduction des erreurs de conception (Datta et al., 2021 ; Azhar, 2011 ; Alsofiani, 2024). Par ailleurs, des méthodes d'optimisation structurelle basées sur des critères de performance multiples (sécurité sismique, économie de matériaux et durabilité) devraient être adoptées pour rationaliser la consommation des ressources et réduire les coûts de construction. L'utilisation de techniques modernes de calcul dynamique et de simulation parasismique, associée à une approche plus rigoureuse de la qualité de l'exécution, contribuerait à produire des bâtiments plus compétitifs, plus sûrs et plus adaptés aux besoins du marché algérien (Jin et al., 2021 ; Dehchar et al., 2023 ; Zakian, & Kaveh, 2024). Ainsi, l'innovation technologique et l'amélioration des processus de conception et de construction constituent aujourd'hui des leviers stratégiques pour moderniser et dynamiser le secteur du bâtiment en Algérie.

C'est dans ce contexte actuel de la construction en béton armé que s'inscrivent les travaux de cette thèse. L'objectif principal est de développer une méthode de conception multicritère des bâtiments en béton armé, intégrant à la fois les exigences réglementaires et les caractéristiques multidisciplinaires inhérentes au secteur de la construction. Cette méthode vise à répondre simultanément à plusieurs critères essentiels tels que la sécurité structurelle, la performance sismique, le coût économique, la durabilité environnementale et la qualité architecturale.

Dans les sections suivantes, nous présentons une revue bibliographique des études récentes et des travaux de recherche qui ont proposé des méthodes et des outils de conception multicritère adaptés aux bâtiments en béton armé, en mettant l'accent sur les approches intégrant la sécurité sismique, l'optimisation structurelle, la minimisation des coûts et l'évaluation environnementale. Cette revue permettra de situer les travaux de cette thèse dans le cadre scientifique et technique actuel.

I.7 Etude bibliographique de quelques approches multicritères pour la conception des bâtiments en BA

Les premiers projets visant à résoudre des problèmes d'optimisation multicritère dans le domaine du bâtiment ont émergé dans les années 1980 et 1990. Ces travaux pionniers se sont d'abord intéressés à la réduction des consommations de chauffage (Radford & Gero, 1980), l'optimisation des coûts d'investissement (Gero et al., 1983) et l'intégration de critères architecturaux tels que le confort visuel (D'Cruz & Radford, 1987), puis l'aide à la conception des fondations des bâtiments (Al-Hajjar, 1989) et le confort thermique (Marks, 1997). Ces contributions ont permis d'élargir le champ d'application des outils de conception en intégrant progressivement plusieurs critères essentiels à la performance globale des bâtiments.

Cette section présente une revue bibliographique de certaines travaux existants, en mettant en évidence les principales méthodes et outils développés pour répondre simultanément à plusieurs objectifs.

I.7.1 Choix du système structural

Le problème de la sélection d'un système structural approprié dans un projet de multi-logements n'est pas un problème facile. La difficulté réside dans la prise en compte de plusieurs critères multiples. (Balali et al., 2014) ont utilisés un nouvel algorithme combinant deux techniques bien connues de prise de décisions multicritères pour la sélection du système structural à savoir *ELECTRE* et *PROMETHEE*. La méthodologie proposée est basée sur plusieurs critères (qualitatif et quantitatif) (Figure I.9), des alternatives (actions) pertinentes sont considérées dans le processus du jugement.

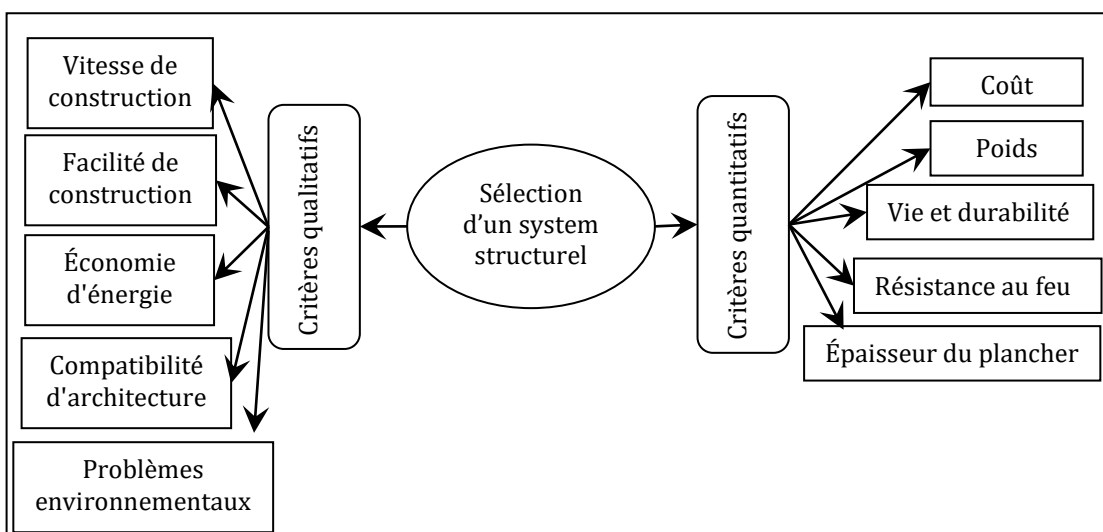


Figure I.9. Analyse multicritère pour le choix d'un système structural

Le Tableau I.7 regroupe divers travaux de recherche récents ayant abordé la problématique du *choix du système structurel* dans les projets de construction. Ces études s'appuient sur des approches multicritères pour évaluer et comparer différentes alternatives structurelles (béton armé, béton préfabriqué, acier, bois, structures mixtes, etc.) en fonction de divers critères de performance, notamment le *coût de construction*, la *durabilité*, la *résistance sismique*, le *temps de réalisation*, ou encore *l'impact environnemental*. L'objectif commun de ces travaux est de proposer des méthodes d'aide à la décision permettant d'identifier le système structurel le plus adapté au contexte spécifique de chaque projet (logements collectifs, bâtiments industriels, maisons individuelles, etc.).

Tableau I.7. Travaux sur la sélection multicritère des systèmes structurels (2014–2024)

Référence	Méthodes	Application	Observation
(Lotfi et al.,2024)	fuzzy-AHP + fuzzy-TOPSIS	Mass housing (Iran)	Permet d'évaluer des typologies structurelles selon critères multiples (sismique, coût, durabilité).
(Bayram Zumur et al., 2022)	AHP + TOPSIS	Projet industriel (Turquie)	Démontre l'intérêt du MCDM, adaptable aux logements collectifs.
(Salimian et al., 2023)	fuzzy logic MCDM	Bâtiments durables génériques	Approche robuste à l'incertitude ; transposable à l'analyse structurelle.
(Sánchez-Garrido et al., 2021)	Neutrosophic MCDM	Maisons individuelles	Méthodes avancées pour évaluer durabilité et performances structurelles selon divers contextes.
(Wen et al., 2021)	Revue des méthodes MCDM (AHP, Fuzzy-AHP, TOPSIS, DEMATEL...)	Divers systèmes de construction	Coûts, durabilité, risques, performances globales.
(Taylan et al., 2014)	Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS	Logements collectifs	Projets complexes (Risques, faisabilité, performance, coût).
(Loron & Loron., 2015)	Fuzzy AHP + FDEA	Systèmes de bâtiments intelligents	Bâtiment intelligent (Consommation énergétique, confort, coût).

I.7.2 Choix du type de fondation

L'intégration de la composante « adaptation au sol », et plus particulièrement des fondations, pose souvent des difficultés lors de l'étude d'un projet de bâtiment. En effet, un sol de fondation peut être décrit à travers de multiples paramètres, sous différentes formes et avec des niveaux de précision variables. Or, les conséquences d'un mauvais choix du système de fondation peuvent compromettre l'intégrité de l'ouvrage, engendrant des sinistres coûteux et longs à résoudre. Il est donc indispensable d'intégrer dès les premières phases de conception la conception et le dimensionnement des fondations pour prévenir ces risques.

Pour parvenir à un choix optimal du système de fondation, le décideur propose alors une ou plusieurs options, souvent sous forme de recommandations : par exemple, un radier est préconisé si le sol est compressible ou si la descente de charges est trop importante pour envisager des semelles isolées ou filantes. Cette première proposition peut être affinée grâce à une évaluation technique et économique, permettant de comparer les différentes solutions possibles. Dans cette démarche, le décideur prend en compte des critères de sécurité et de coût, qui constituent les deux éléments principaux du processus de décision. (Al-Hajjar, 1989) a d'ailleurs défini en détail ces différents critères, contribuant ainsi à une meilleure prise en compte des exigences techniques et économiques dans le choix des fondations. Le Tableau I.8 présente une sélection de travaux récents traitant du choix optimal du système de fondation dans les projets de construction.

Tableau I.8. Sélection multicritère et optimisation du type de fondation (2020–2024)

Référence	Méthodologie	Alternatives / Contexte	Critères évalués
(Alsanabani et al., 2023)	AHP-SWARA + WASPAS	7 types : semelles isolées/préfabriquées, radier, pieux,	Sécurité, Constructibilité, architecturale, Impact environnemental
(Başarı et al., 2020)	AHP + VIKOR/PROMETHEE + FEM	Pieux (diamètre, type, longueur, disposition)	Performance structurelle, coût, durabilité
(Kafkas, 2023)	Analyse comparative + modélisation Pareto optimal	Semelle isolée, filante, radier selon nombres d'étages et classes de sol	Coût de construction, hauteur bâtiment
(Dachowski & Gałek, 2020)	PROMETHEE II	Pieux, méga-pieux, etc.	Capacité portante, vibrations, bruit, coût, durabilité
(Pujadas-Gispert et al., 2021)	Pareto-front multicritères	28 fondations (pieux, radier, semelles...)	Coût, performance géotechnique

I.7.3 Estimation des coûts de construction de bâtiments

Le coût est l'un des principaux critères de décision au début du processus de conception d'un bâtiment (Akintoye, 2000 ; Günaydın & Doğan, 2004 ; Sonmez, 2008), et son influence sur l'ensemble du processus de conception est particulièrement importante. L'évaluation précise du coût d'un projet de construction ne peut être réalisée correctement qu'à la phase de conception, lorsque des données et des informations détaillées sont disponibles. À ce stade, plusieurs méthodes traditionnelles et techniques sont utilisées pour estimer les coûts, telles que : l'estimation détaillée traditionnelle par postes, l'estimation simplifiée par postes, l'estimation des coûts par activité, l'estimation basée sur des fonctions de coût, les estimations par indices, ainsi que les systèmes experts (Cheng et al., 2010 ; Pettang et al., 1997 ; Wilmot et Mei, 2005 ; Zhang & Fuh, 1998 ; Zima, 2015).

Une évaluation précise des ressources financières nécessaires est indispensable pour aider les chefs de projet à prendre des décisions éclairées. Cela leur permet de comparer les différentes alternatives possibles et d'éviter des choix inadaptés ou sous-optimaux (Arafa & Alqedra, 2011). Le Tableau I.9 présente une sélection de travaux récents portant sur l'estimation optimale des coûts de construction dans les projets de bâtiment, en s'appuyant sur des approches méthodologiques variées allant des modèles statistiques aux techniques d'intelligence artificielle.

Tableau I.9. Estimation des coûts de construction (2015–2025)

Référence	Méthodologie / Approche	Domaine d'application	Aspects clés
(Chen et al., 2025)	Modèles ML supervisés (régression, SVM) pour bâtiments de bureaux	Coûts détaillés en phase conceptuelle	>88 % de précision
(Alshibani et al., 2025)	Régression multiple + analyse de sensibilité	Structures acier industrielles	Précision ≥ 88 %
(AlTalhani & Abudayyeh, 2024)	Modèles statistiques prédictifs par séries chronologiques	Indices de coûts, prévisions	Analyse tendances & facteurs influents
(Jassim et al., 2025)	Support Vector Machine, variables projet telles que surface et hauteur	Estimation en phase de planification	Intègre inflation, MAPE optimisé
(Hyari et al., 2015)	Modèle conceptuel paramétrique pour services d'ingénierie	Bâtiments publics	Estimations fiables en phase APS
(Bayram & Al-Jibouri, 2016)	Comparaison régression, réseau de neurones pour estimation	Projets de bâtiment	Priorise méthode NN selon précision
(Fazil et al., 2020)	Revue des méthodes : fuzzy logic, BIM, Monte-Carlo, ANN	Estimation des coûts globaux	Identification des lacunes & leviers

Plusieurs autres travaux de recherche ont exploré l'optimisation multicritère appliquée à la conception des bâtiments, en intégrant notamment des paramètres tels que la performance énergétique, la performance acoustique, le choix du système structurel et la réhabilitation des structures existantes. Ces études se sont attachées à concilier les exigences de sécurité, de confort et d'efficacité économique tout en respectant les réglementations et les contraintes environnementales. Parmi ces travaux, on trouve des contributions significatives sur l'intégration des critères acoustiques dans la conception des bâtiments, l'optimisation des enveloppes pour améliorer la performance énergétique et la recherche de solutions structurelles adaptées aux contextes sismiques. La plupart de ces recherches seront présentées en détail dans le chapitre II, qui sera entièrement consacré aux méthodes multicritères appliquées à la conception des bâtiments, en mettant en évidence les outils méthodologiques et les approches pratiques permettant d'équilibrer efficacement les différents objectifs de conception.

I.8 Conclusion et discussion

Les principales points forts déduits de ce chapitre concernent trois parties essentielles et sont énumérés ci-dessous.

- Partie I

L'analyse descriptive du bâtiment consiste à présenter les principales caractéristiques techniques, fonctionnelles et architecturales de l'ouvrage étudié. Elle débute généralement par l'identification de ses dimensions globales (nombre de niveaux, surface totale, hauteur). Cette description inclut ensuite la structure porteuse (portique-auto stable, voile-portique, voile), les systèmes de fondation (semelles isolées, radier, pieux) (section I.2).

Le processus de conception d'un bâtiment est une démarche complexe et multidisciplinaire visant à satisfaire simultanément des exigences techniques, économiques, environnementales et réglementaires. Il requiert une planification rigoureuse, une collaboration étroite entre les différents intervenants (architectes, ingénieurs, maîtres d'ouvrage) ainsi que l'utilisation d'outils adaptés pour optimiser les décisions dès les premières étapes. Dans ce travail, nous avons détaillé chaque phase de conception en précisant clairement les tâches à accomplir à chaque étape (section I.3).

Cette analyse descriptive s'attache à recenser les aspects réglementaires et environnementaux pris en compte lors de la conception, tels que les normes parasismiques (RPA) (section I.4). Cette démarche permet ainsi de poser les bases nécessaires à une évaluation technique et économique approfondie du projet.

- **Partie II**

La construction d'habitations en Algérie constitue un levier essentiel pour le développement socio-économique du pays. Elle contribue significativement à la croissance économique, à la création d'emplois, à l'amélioration des conditions de vie et à la cohésion sociale (section I.5).

La modernisation de l'approche de conception des bâtiments résidentiels en Algérie, notamment à travers la mise en œuvre des nouvelles versions de la réglementation parasismique et des méthodes d'optimisation structurelle (section I.6), représente un enjeu majeur pour répondre durablement à la demande croissante de logements tout en maîtrisant les coûts et en améliorant la qualité des constructions dans les futurs programmes de logement.

- **Partie III**

Dans Ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique des principales approches multicritères utilisées dans la conception des bâtiments en (BA). Cette étude met en évidence la diversité et la richesse des travaux réalisés dans ce domaine. Ces approches permettent d'intégrer de manière systématique plusieurs critères (sécurité, performance, coût, durabilité) pour guider les choix techniques et économiques des concepteurs dès les premières phases du projet. *Concernant le choix du système structural*, elles favorisent la sélection des solutions les plus adaptées aux contraintes sismiques et aux exigences de qualité. *Pour le choix du type de fondation*, elles permettent de mieux gérer l'interaction sol-structure et de minimiser les risques de sinistre. Enfin, *pour l'estimation des coûts*, elles offrent des outils méthodologiques permettant une prévision plus réaliste et plus fiable des dépenses à engager. Ces différentes approches constituent ainsi des outils précieux pour améliorer la qualité, la performance et la durabilité des bâtiments en BA dans un contexte où la compétitivité et la sécurité sont des enjeux majeurs.

Chapitre II Méthodes adoptées en conception multicritère du bâtiment

Dans ce chapitre, nous nous proposons de faire une synthèse aussi riche que possible sur l'état de l'art concernant les méthodes multicritères adoptées en conception du bâtiment. Nous présenterons, aussi, les différents travaux et méthodes appliquées. Cette étude bibliographique enrichira notre base de données et par conséquent élargira le champ d'application de notre méthodologie et étayera ses orientations. Enfin on présentera une synthèse de l'ensemble des points essentiels relevés dans cet état de l'art. Une méthodologie d'optimisation multicritère de bâtiments en béton armé est proposée, cette dernière sera adoptée dans la suite de l'étude.

II.1 Introduction

Le projet de construction d'un bâtiment s'inscrit dans une problématique de conception complexe, puisqu'il doit répondre à plusieurs objectifs de conception et d'exploitation (résistance, coût minimum, consommation idéale d'énergie, etc.). Il s'inscrit donc dans le cadre de l'optimisation multicritère. Plus précisément, il implique la prise en compte simultanée de plusieurs dimensions interdépendantes telles que la performance d'usage (fonctionnalité, confort, sécurité), la rentabilité économique (coût de construction, d'exploitation et de maintenance), la faisabilité industrielle (techniques de mise en œuvre, disponibilité des matériaux, délais), les considérations architecturales (esthétique, intégration urbaine, spatialité), ainsi que les aspects environnementaux (impact écologique, consommation énergétique, durabilité).

Ces critères, souvent conflictuels (contradictoires) – par exemple, entre performance structurelle et économie, ou entre liberté architecturale et rigidité parasismique- rendent la recherche de la solution optimale particulièrement difficile et délicate. Le concepteur se trouve ainsi confronté à un vaste espace de solutions, défini par un ensemble de variables de décision : géométrie du bâtiment, système structurel, choix des matériaux, implantation sur le site, etc. Ce vaste ensemble constitue l'«espace de conception» ou «espace de recherche» dans lequel il doit identifier, à l'aide d'outils d'analyse et de modélisation, les configurations les plus adaptées.

L'objectif est de déterminer la ou les solutions qui offrent le meilleur compromis entre les différentes exigences du projet, en tenant compte des priorités et des contraintes fixées par le maître d'ouvrage (ou décideur). Celui-ci joue un rôle déterminant en orientant les choix selon sa vision stratégique, qu'il s'agisse de privilégier le coût, la qualité architecturale, la sécurité, ou encore la durabilité. Dès lors, l'optimisation multicritère devient un outil d'aide à la décision indispensable pour éclairer ces arbitrages, et garantir une conception cohérente, rationnelle et performante (Figure II. 1).

Ce chapitre est dédié à l'état de l'art des méthodes adoptées en conception multicritère dans le domaine du bâtiment et plus particulièrement en optimisation multicritère d'un bâtiment.

La première section de ce chapitre explique comment la conception multicritère d'un bâtiment doit passer par la résolution de problèmes d'optimisation multiobjectif. La première partie référence les caractéristiques des principaux problèmes d'optimisation multiobjectif de bâtiments traités dans la littérature. Ensuite, des méthodes de couplage entre les méthodes d'optimisation multiobjectif avec les méthodes de prise de décision sont présentées et détaillées.

Enfin, une dernière partie synthétise l'ensemble des points essentiels relevés dans cet état de l'art et propose une méthodologie d'optimisation multicritère de bâtiments en béton armé cette méthodologie sera adopté dans la suite de l'étude.

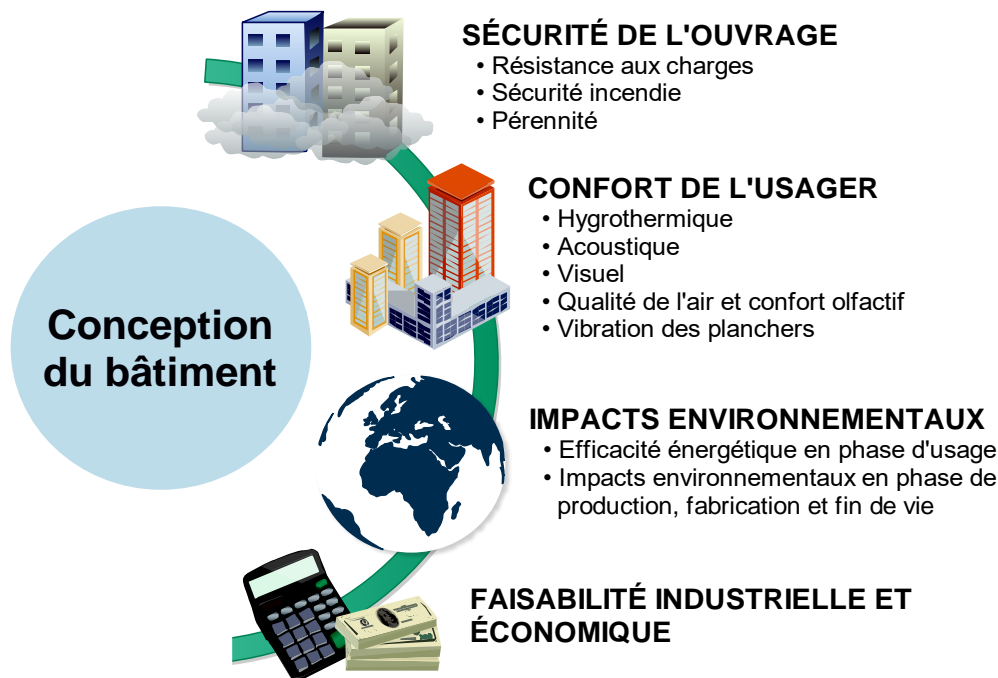


Figure II. 1. Illustration de la conception multicritère du bâtiment

II.2 La conception multicritère d'un bâtiment en BA : un problème d'optimisation multi objectif

Traditionnellement, la conception multicritère d'un bâtiment s'effectue en traitant les disciplines indépendamment et successivement. La méthode utilisée dans la conception des bâtiments vise ainsi l'optimisation d'une solution de référence par itérations successives, mais se limite à son amélioration (Yang et al., 2020 ; Marcher et al., 2020). Cette recherche itérative est généralement réalisée à partir d'une solution de référence et de l'utilisation de l'expertise pour chaque discipline traitée. Seules quelques solutions sont alors testées. (Flager & Haymaker, 2007) ont réalisé une étude portant sur l'efficacité de la conception traditionnelle des bâtiments par recherche itérative. L'un des buts de leur étude était de déterminer approximativement le nombre d'itérations réalisables au cours d'un projet de durée standard. Sur une période de 12 semaines, seules deux itérations ont intégralement été réalisées. Ainsi, à l'issue d'une recherche itérative, très peu de solutions sont proposées, les choix possibles sont donc restreints et la solution finale n'est pas nécessairement optimale et est le plus souvent basée sur l'expérience du concepteur.

L'approche de recherche itérative se résume donc le plus souvent à l'amélioration d'une solution (Stevanović, 2013). Ce sont ordinairement les contraintes (le système structurel, contraintes liées au site,) et le seul critère économique qui orientent alors ce processus.

Aujourd'hui, la recherche scientifique dans le domaine de l'optimisation multi objectif des bâtiments est en plein essor. Une consultation et une analyse de la base bibliographique internationale Scopus, montre une tendance croissante du nombre de publications annuelles retracé sur la Figure II.2. Près de 1 604 articles, avec une augmentation continue depuis 2015. Cette expansion est visible à travers la prolifération des publications dédiées aux algorithmes évolutionnaires, à l'analyse du cycle de vie, au confort thermique, à l'impact carbone et à l'intégration d'outils de simulation modernes. La montée en puissance des travaux scientifiques dans ce domaine est attestée par la parution de plusieurs articles qui font le point sur le thème traité dans cette thèse et plus spécifiquement dans la construction durable (Sizirici et al., 2021 ; Merabet et al., 2020 ; Wang et al., 2023 ; Eleftheriadis et al., 2017).

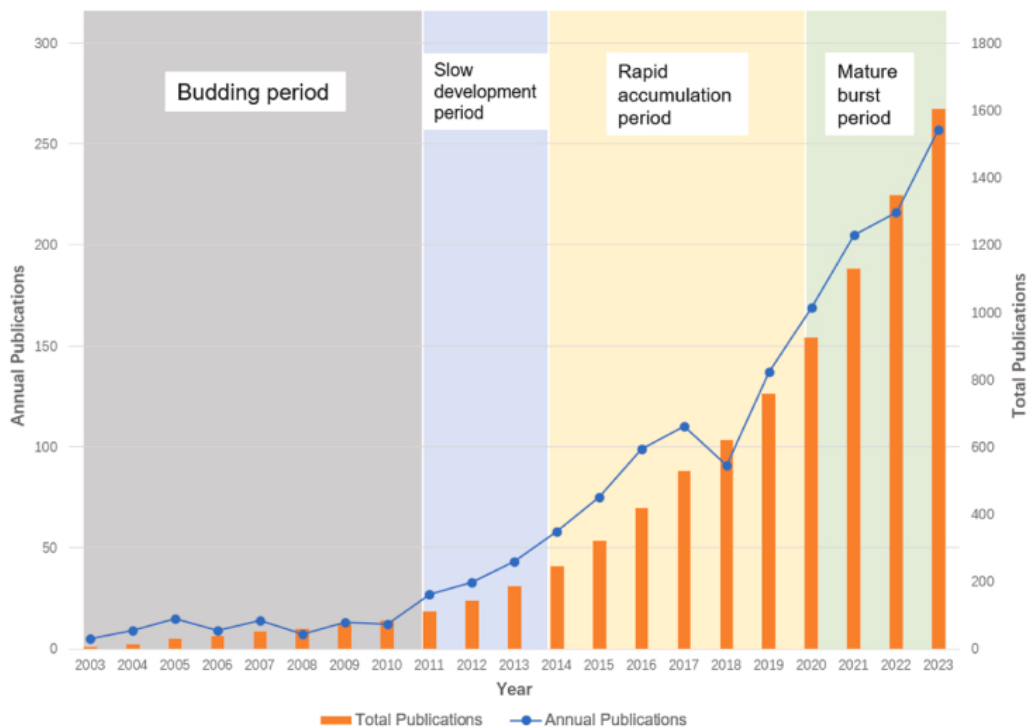


Figure II.2. Évolution du nombre de publications dans le domaine de l'optimisation multiobjectif de bâtiments (Decker, 2015 ; Izadi et al., 2023)

II.3 Formulation des problèmes d'optimisation multicritère dans le bâtiment

D'après (Roy et al., 2008) la classification des problèmes d'optimisation dépend du type de variables, des critères à optimiser, des contraintes, des disciplines

considérées et du contexte de conception. Une phase préliminaire cruciale consistant à la formulation du problème d'optimisation est nécessaire pour choisir la méthode d'optimisation appropriée (Wright et al., 2002). Cette phase préliminaire vise la caractérisation et la détermination de la complexité du problème d'optimisation à résoudre. Les critères de l'optimisation doivent être choisis, les variables de décision dont ils dépendent sélectionnées et les contraintes de conception fixées (Bel Hadj Ali et al., 2009).

II.3.1 Les critères

Les critères d'optimisation sont les moyens de mesure qui permettent de juger de la satisfaction des objectifs. Un critère peut être associé à une seule dimension, tel un critère poids, ou à plusieurs dimensions, comme le critère coût associé aux quantités des matériaux, au temps d'exécution, etc. (Monghasemi et al., 2015 ; Hussein et al., 2018).

Un critère peut être qualitatif traduisant un ordre de préférence du concepteur ou quantitatif traduisant une intensité des préférences de celui-ci.

Les critères à optimiser sont évalués à partir de fonctions objectif, qui sont des modèles mathématiques ou algorithmiques pouvant être minimisés ou maximisés. Le nombre de critères, la nature des fonctions objectifs correspondantes et leur interdépendance impactent la complexité de la conception (Lin et al., 2016). Le type des fonctions-objectif dépend du niveau de connaissance des phénomènes. Si la connaissance disponible est complète et quantitative les fonctions seront algébriques quantitatives, si la connaissance est quantitative et qualitative pour partie les fonctions seront des algorithmes incluant la connaissance qualitative (N. PIEGAY, 2015). Les fonctions-objectif quantitatives peuvent être le résultat de simulations numériques, de calculs analytiques ou empiriques. Les fonctions-objectif qualitatives sont généralement moins utilisées, car elles nécessitent le développement d'une algèbre qualitative au préalable. Lorsque c'est possible, il est préférable de les convertir en fonctions quantitatives moyennant des codes ou une échelle d'évaluation numérique (Zhang et al., 2021 ; Moustapha et al., 2022).

Dans le domaine de la conception des bâtiments en BA, les critères considérés sont le plus souvent de minimiser la consommation énergétique, et le coût économique d'un bâtiment (Nguyen et al., 2020). Les objectifs sont donc couramment de minimiser les consommations ou besoins énergétiques (utilisés dans 60% des cas d'après (Evins., 2013) et de minimiser les coûts d'investissement, d'usage ou de cycle de vie. La maximisation du confort thermique arrive en troisième position suivi de la minimisation des émissions de dioxyde de carbone et de diverses considérations liées à la maximisation du

confort lumineux. D'autres objectifs à optimiser plus occasionnels sont liés à des aspects de structure, de compacité et d'énergie grise (Figure II.3).

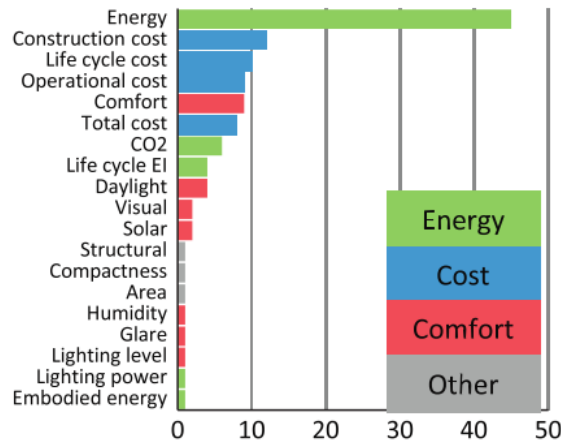


Figure II.3. Choix des fonctions-objectif à optimiser (Evins 2013)

Concernant l'optimisation des structures porteuses d'autres critères peuvent être considérées en plus de la minimisation du coût telles que la minimisation du poids de la structure ou de la longueur cumulée des éléments qui la constituent (Negrin et al., 2021 ; Kashani et al., 2022 ; Keivanian et al., 2023).

Dans les constructions métalliques, il est à noter que généralement un seul critère est optimisé et que le but consiste à minimiser le coût de la structure tout en respectant des contraintes mécaniques (Kassapoglou et al., 2021).

II.3.2 Les variables de décision

Les variables de décisions sont les paramètres sur lesquels le concepteur peut agir pour optimiser le bâtiment. Le nombre de variables, leur nature, leur domaine de validité et leurs dépendances affectent la complexité générale de la conception (Bel Hadj Ali et al., 2009).

Deux types de variables peuvent être distingués (Pelissari et al., 2021) : les variables qualitatives qui s'expriment en modalité et les variables quantitatives qui s'expriment en valeurs. Parmi les variables qualitatives, il y a les variables qualitatives nominales (aucun ordre précis, ex : type de plancher, type de contreventement) et les variables qualitatives ordinales (contiennent un ordre, ex : petit/moyen/grand). Parmi les variables quantitatives, il y a les variables quantitatives discrètes et quantitatives continues (Figure II.4).

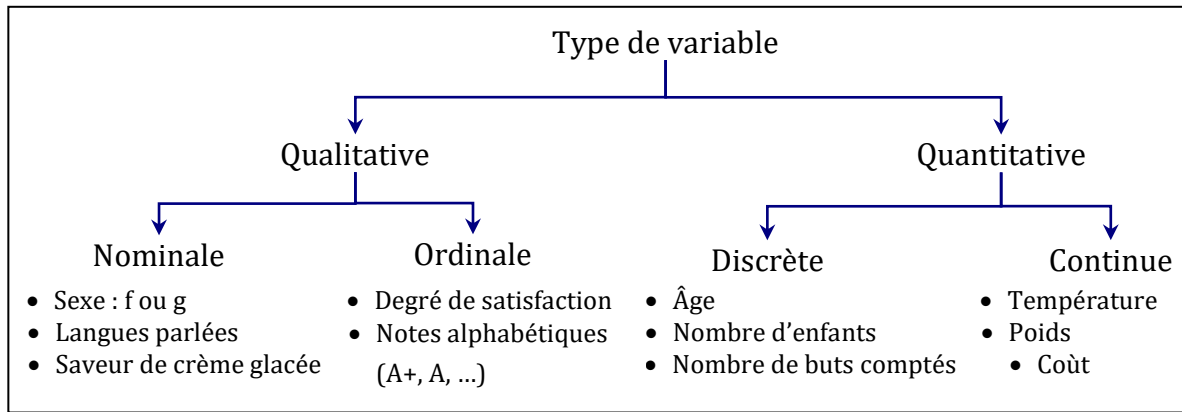


Figure II.4. Diagramme des différents types de variables

Lorsqu'un problème de conception comprend des variables discrètes et continues, il est qualifié de problème à variables mixtes et son espace de solution est discontinu (Nguyen et al., 2014). Dans le domaine du bâtiment il est très courant que certaines variables soient discrètes et d'autres continues.

Dans la construction des structures porteuses en BA. Des variables telles que les caractéristiques dimensionnelles des différents éléments, le type de fondation, type de contreventement, type des assemblages et le type des appuis peuvent par exemple être considérées. D'autres variables d'ordre géométriques peuvent également être considérées (Pierott et al., 2014).

II.3.3 Les contraintes

Les problèmes d'optimisation de bâtiment en BA doivent respecter des exigences spécifiques exprimées à partir de contraintes. Ces contraintes peuvent être sur les variables et d'autres sur les critères et /ou les objectifs.

Les contraintes sur les variables sont généralement traitées dans la définition de leur domaine de variation. Par exemple, une variable discrète prend un certain nombre de valeurs données parlent alors de contraintes de sélection (selection constraints) (Wang et al., 2006). Pour une variable continue, ce sont les valeurs prises par les bornes de son intervalle de variation qui constituent des contraintes de seuil.

Lorsque les exigences d'un problème d'optimisation nécessitent la satisfaction d'un ensemble de relations entre les variables de décision, elles sont exprimées sous forme d'équations et d'inéquations (Sana Ben Hamida 2014). Un problème d'optimisation multicritères peut alors être formulé suivant (l'équation1).

$$\text{Optimiser } \vec{F} = [F_1(\vec{X}), F_2, \dots, F_m(\vec{X})]$$

sous les contraintes $G_i(\vec{X}) \leq 0$ et $H_j(\vec{X}) = 0$

Où : (eq. 1)

- $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$ le vecteur des variables de décision ;
 - $F_q : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $q = 1, \dots, m$, les fonctions-objectif ;
 - $G_i, H_j : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $i = 1, \dots, s$, et $j = 1, \dots, l$, les contraintes.
-

Tout comme les variables de décision, les contraintes peuvent être très différentes d'un problème à l'autre. Néanmoins dans la majorité des cas, Les problèmes d'optimisation de structure porteuse en BA font généralement intervenir des contraintes par des normes règlementaires. D'autres contraintes plus rares peuvent être trouvées comme des contraintes d'empaquetage utilisées par [\(Quaglia et al., 2014\)](#) pour l'optimisation de tentes militaires et habitats d'urgence.

II.4 De l'optimisation à la décision et vice-versa

Pour mener à terme la résolution d'un problème d'optimisation multicritère, cette dernière doit être associée à une étape de prise de décision. Selon la combinaison des étapes d'optimisation et de prise de décision, trois méthodologies d'optimisation multicritères se distinguent [\(Pajasmaa et al., 2025\)](#) :

- **Les méthodes d'optimisation à priori** : où l'aide à la décision précède l'optimisation,
- **Les méthodes d'optimisation à posteriori** : où la décision succède à l'optimisation, et ;
- **Les méthodes d'optimisation progressives** : où l'aide à la décision s'effectue au cours de l'optimisation.

II.4.1 La décision multicritère à priori

Dans cette méthodologie, les fonctions-objectif sont combinés en une seule fonction appelée fonction objectif globale. Les critères de préférence du décideur sont alors implicitement inclus dans l'étape d'optimisation. Le compromis désiré est ainsi déterminé avant d'exécuter la méthode d'optimisation.

Généralement, les fonctions-objectif et critères de choix sont regroupés en une seule fonction objective par agrégation complète ou par agrégation partielle. Il s'agit alors d'optimiser une fonction unique où chaque objectif peut être considéré comme étant une variable d'optimisation .

Le problème est ainsi ramené à un problème d'optimisation mono-objectif. L'avantage de cette méthode est sa flexibilité dans le choix d'un algorithme d'optimisation mono-objectif. De plus, si la méthode d'agrégation et les pondérations sont bien choisies, cette méthode a l'avantage d'être rapide à exécuter puisqu'elle ne nécessite qu'une seule exécution pour obtenir le compromis souhaité (N. PIEGAY, 2015).

Néanmoins, cette méthode présente quelques difficultés. L'une d'entre elles concerne l'hétérogénéité des fonctions-objectif considérées. Les unités et les ordres de grandeur peuvent être très différents d'une fonction-objectif à l'autre. Le choix des pondérations nécessite non seulement la prise en compte de cet aspect, mais également une bonne connaissance du problème à optimiser et donc un niveau d'expertise élevé. Les résultats dépendent alors largement de la méthode d'agrégation et des pondérations utilisées. Enfin, la finalité de cette méthode, qui est de conduire à une solution unique, ne permet pas de revenir sur un des critères de décision sans une nouvelle exécution. Un niveau d'expertise élevé est donc requis lors de la phase de décision multicritère pour limiter le nombre de répétitions (Kou et al., 2021 ; Papadopoulos & Miettinen, 2022).

II.4.2 L'optimisation à posteriori

Cette méthodologie vise l'obtention d'un ensemble de solutions optimales parmi lesquelles le décideur effectue un choix. Aucun critère de préférence n'est alors incorporé dans l'étape d'optimisation. Cette étape vise ainsi l'obtention des solutions qui constituent les meilleurs compromis entre les différents critères.

Le principal avantage de cette méthode est son potentiel d'analyse des compromis obtenus permettant d'accroître la connaissance et la compréhension du problème à optimiser. Il est ainsi possible d'observer l'influence des variables de décisions sur les objectifs à optimiser. Cette méthodologie permet non seulement de se passer d'un niveau d'expertise élevé durant l'étape d'optimisation, mais aussi d'en acquérir durant l'étape d'analyse multicritère. L'inconvénient principal est que l'espace des solutions conserve sa complexité après l'étape d'optimisation. Le développement et l'usage de méthodes d'analyse multicritère spécifiques sont alors nécessaires pour orienter le choix d'un compromis adapté à un contexte donné (Deb et al., 2020 ; Li et al., 2021).

II.4.2.1 Recherche des compromis optimaux au sens de Pareto

Un compromis est optimal au sens de Pareto, s'il n'est pas possible d'améliorer un objectif sans en dégrader un autre, la solution est dite non-dominée. À l'inverse, si l'un des critères peut être amélioré sans n'en dégrader aucun autre, c'est que le compromis n'est pas optimal. Le compromis est dominé au moins par la solution que représente sa propre amélioration. Les solutions optimales au sens de Pareto (solutions non dominées) sont les solutions qui dominent les autres, mais ne se

dominant pas entre elles. Elles forment ainsi une surface de compromis appelée front de Pareto (Emmerich & Deutz, 2018) (Figure II.5).

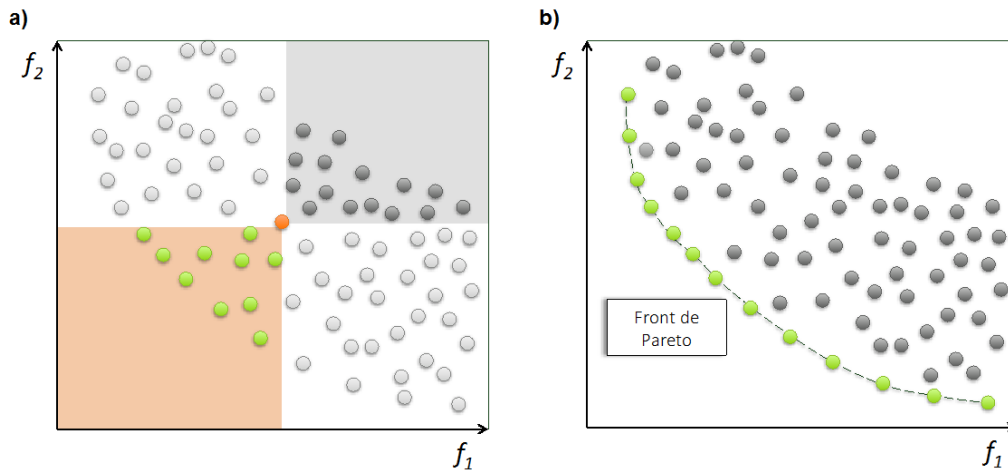


Figure II.5. Illustration de la dominance au sens de Pareto :

Le sens de préférence ici est une minimisation de f_1 et f_2 (Decker, 2015)

II.4.2.2 Aide à la décision par analyse multicritère

Afin d'effectuer un choix parmi un ensemble de solutions, plusieurs travaux de recherche s'orientent vers des méthodes d'analyse multicritère. Elles s'appuient sur plusieurs critères préalablement fixés. Des étapes essentielles sont nécessaires à leur réalisation telles que la définition des critères de performance, l'évaluation des alternatives, le choix de la méthode d'analyse multicritère. Dans un premier temps, il s'agit de dresser la liste des actions ou alternatives potentielles puis de dresser la liste des critères à prendre en considération. Une fois la méthode d'analyse multicritère choisie il s'agit de déterminer les seuils et pondérations et de passer à l'évaluation des alternatives. La phase de décision est ensuite abordée.

Plusieurs acteurs interviennent durant ces étapes : le décideur (ou les décideurs) à qui il revient de faire le choix final, l'analyste qui va poser le problème selon les besoins du décideur et les évaluateurs lorsque la connaissance nécessaire à l'évaluation des différents critères requiert un certain niveau d'expertise.

Une approche multicritère a comme principale caractéristique de formaliser (ou modéliser) la préparation des décisions. Tout d'abord, elle améliore la transparence du processus de décision. Ensuite, elle définit, précise et met en évidence la responsabilité du décideur (Reis et al., 2020 ; Hashemi et al., 2021).

A- Difficulté d'un problème multicritère

En général, Il n'existe pas, d'action meilleure que toutes les autres simultanément pour les critères : le concept de solution optimale n'a donc pas de sens dans un contexte multicritère. De même, un problème de rangement n'aura une solution

objective que si tous les critères donnent le même rangement, ce qui est tout à fait exceptionnel. Résoudre un problème de décision multicritère ne consiste donc pas à rechercher une sorte de vérité cachée (alors que c'est le cas dans un problème d'optimisation classique), mais à aider le décideur à maîtriser les données (souvent complexes) de son problème et à progresser vers une solution « meilleure ». Celle-ci sera donc plutôt une action de compromis et il faut accepter qu'elle dépende fortement de la personnalité du décideur, des circonstances dans lesquelles se fait l'aide à la décision, de façon dont on formule le problème et de la méthode d'aide à la décision qui est utilisée. Ces caractéristiques sont évidemment gênantes pour des scientifiques habitués à résoudre des problèmes dont la solution existe indépendamment d'eux (Mousseau et al., 2020 ; Roy & Vanderpooten, 2020).

B- Démarche multicritère

Il existe différentes démarches pour faire face à la situation de décision multicritère. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépens d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients (Entani, 2016) :

- **Une approche de "bas vers le haut" (bottom-up approach) :**
Il s'agit d'une approche visant à identifier l'ensemble des conséquences pouvant découler de la mise en œuvre des actions envisagées. Ces conséquences sont ensuite organisées selon différentes dimensions et regroupées autour d'axes de signification qui servent de base pour élaborer les critères d'évaluation.
- **Une approche du "haut vers le bas" (top-down approach)**
C'est une approche qui consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est éclaté en sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs (Figure II.6).

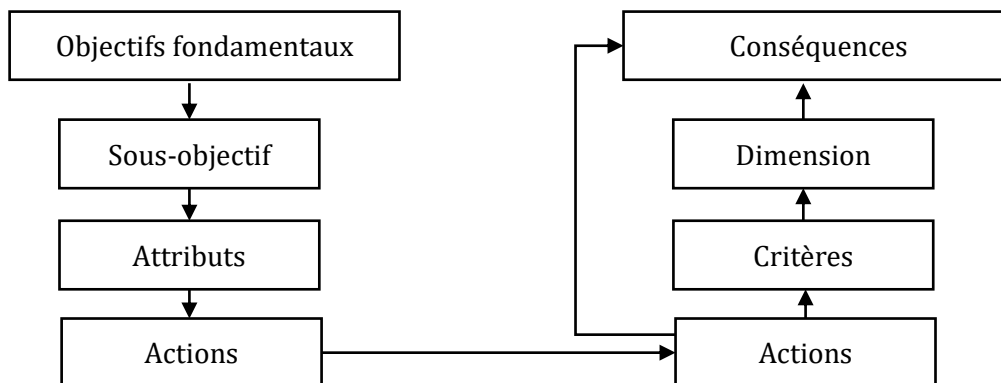


Figure II.6. Démarche multicritère

Il existe une approche intermédiaire : Partant d'une situation de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères. Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble d'actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement en un ensemble de critères qui permettent de procéder à une évaluation des actions ou des scénarios (Belton & Stewart, 2012). Une fois l'évaluation effectuée, on procédera à l'investigation par une procédure d'agrégation multicritère appropriée afin de parvenir à une recommandation (Figure II.7).

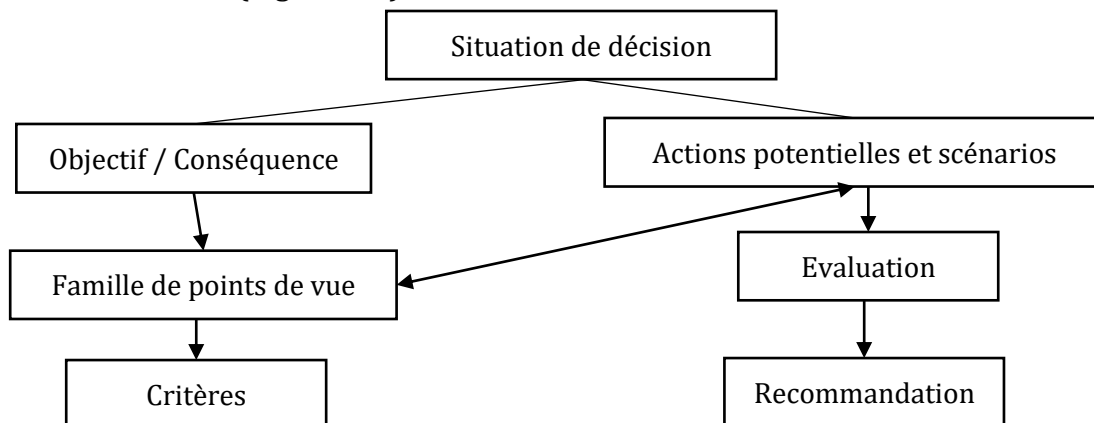


Figure II.7. Approche intermédiaire

C- Les différentes problématiques multicritères

La problématique peut être perçue comme étant une orientation de l'investigation qu'on adopte pour un problème de décision donné. Elle exprime les termes dans lesquels le décideur ou l'homme d'étude pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir. D'après (Roy et al., 2008) on distingue quatre problématiques (Tableau II. 1).

Tableau II. 1. Les problématiques multicritères

Problématique	Objectif	Résultats
P. a	Choix d'un sous-ensemble contenant les meilleures actions ou, à défaut « satisfaisantes »	Aider à choisir une « meilleur » action ou à élaborer une procédure de sélection
P.β	Tri par affectation des actions a des catégories prédéfinies	Un tri ou une procédure d'affectation
P.γ	Rangement de classe d'équivalence, composées des actions, ces classes étant ordonnées de façon complète ou partielle	Un rangement ou une procédure de classement
P.δ	Description dans un langage approprié des actions et leurs conséquences	Description ou élaborer une procédure cognitive

D- Formulation multicritère d'un problème de décision

La formulation multicritère d'un problème de décision peut être définie comme suite :

$$\max = \{C(a) = (C_1(a), \dots, C_N(a)), a \in A\}$$

Où :

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, m \geq 2$ est l'ensemble des m actions potentielles $a_i, i = 1 \dots, m$ (eq.2)
- $C(a) = (C_1(a), \dots, C_N(a))$ une fonction vectorielle à N critères, avec $C_j(a)$ est l'évaluation de l'action a_i sur le critère C_j

Pour garantir une bonne représentation de ces préférences, l'ensemble des critères doit répondre à des exigences d'exhaustivité, de cohésion et de non redondance. Lorsque ces exigences sont vérifiées, la famille de critères est dite cohérente. L'évaluation des alternatives se fait sur la famille des critères.

Les données relatives à un tel problème peuvent être présentées sous forme d'un tableau comprenant $m \times N$ évaluations appelé tableau de performances. On remarquera que cette représentation permet de considérer chaque action de A comme un vecteur de dimension N dans l'espace des critères. De plus, le Tableau II.2 peut être enrichi par des informations supplémentaires comme les éventuels « poids ». On notera (eq. 3) :

$(w_j), j \in \{1, \dots, N\}$ Les poids représentant l'importance relative de chaque critère, avec :

- $\sum_{j=1}^N w_j = 1,$ (eq. 3)
- et $w_j > 0, j = 1, N$

Tableau II.2. Matrice d'évaluation Actions/Critères

		Critères					
		C1 ()	C2 ( )	....	Cj ( )	....	CN ()
Alternatives (Actions)	a1	y _{ij}					
	a2						
	...						
	a _i						
	...						
	A _m						
		W ₁	W ₂	....	W _j	....	W _N
		Poids					

II.4.2.3 Méthodes d'aide à la décision multicritères

Il existe différentes méthodes d'analyse multicritère, leur objectif étant de trouver la solution la plus adéquate pour un contexte donné qui dépend des parties prenantes de l'opération. Ces méthodes d'aide à la décision multicritère peuvent se regrouper en trois grandes familles (Figure II.8). La diversité de ces méthodes réside dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information contenue dans chaque critère. La solution s'appuie sur plusieurs critères préalablement fixés, elle peut prendre diverses formes (choix, affectation, classement) (Mardani et al., 2015).

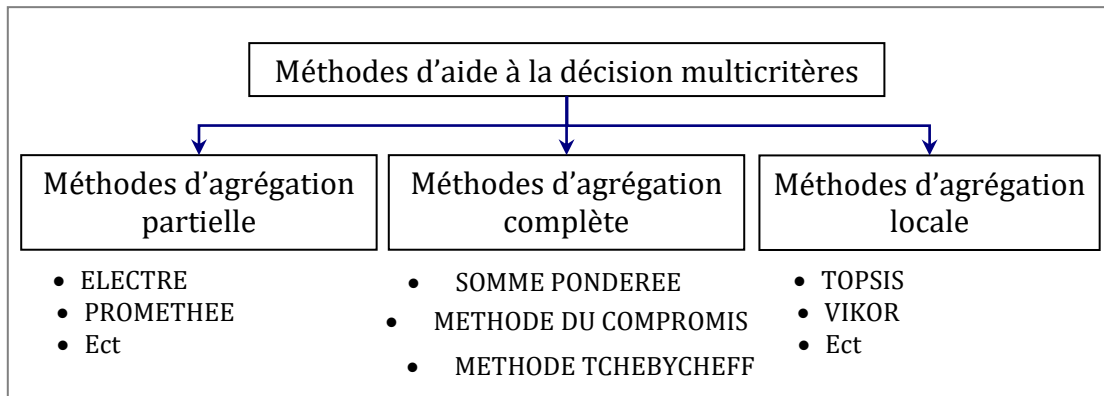


Figure II.8. Méthodes d'aide à la décision multicritères

A- Les méthodes à critère unique de synthèse (méthodes d'agrégation complète)

Les méthodes appartenant à cette catégorie sont généralement désignées sous le nom des méthodes d'agrégation complète. Elles consistent à agréger l'ensemble des critères, de manière à obtenir une fonction critère unique qui synthétise cet ensemble. Un système de pondération peut alors être utilisé pour tenir compte de l'importance des différents critères relativement les uns aux autres. Les valeurs de chacun des critères d'une alternative sont alors agglomérées en une valeur unique (ce qu'on appellerait en mathématique une fonction d'utilité ou d'agrégation globale). Ces méthodes qui se basent sur la construction d'une fonction d'utilité/de valeur ont été parmi les premières à être utilisées dans le domaine de l'aide multicritère à la décision. En raison de la difficulté de construire une telle fonction d'utilité globale (critères à dimensions différentes et hétérogènes) et avec l'évolution de la recherche relative à l'analyse multicritère, d'autres méthodes plus récentes sont apparues (De la Fuente & Fernández-Ordóñez, 2018).

B- Les méthodes de surclassement de synthèse (L'agrégation partielle)

Les méthodes appartenant à cette approche (d'inspiration française), sont appelées également les méthodes d'agrégation partielle. A l'inverse de la première catégorie, cette classe de méthodes vise la construction de relations de

surclassement entre les différentes alternatives. Elles permettent de sélectionner les solutions qui sont comparables entre elles, sans pour autant proposer une unique solution. Des échelles non cardinales peuvent être utilisées et les incertitudes liées aux choix des pondérations sont plus limitées que pour les méthodes à critère unique. Il est à souligner qu'en général, ce type de méthodes s'applique aux cas où l'ensemble des actions est fini. Parmi les méthodes de surclassement les plus connues, nous retrouvons la méthode ELECTRE de Roy ainsi que les divers développements qu'elle a connus et la méthode PROMETHEE de Brans (Roy, 1985 ; Brans & Bertrand, 2003).

C- Les méthodes par itération (d'agrégation locale)

L'application des méthodes de cette approche nécessite la détermination d'une solution de départ. Elles consistent à explorer les solutions voisines et à les comparer à la solution initiale. Ces méthodes permettent à chaque itération de type essai-erreur d'éliminer les solutions les plus éloignées de l'objectif fixé. Toute la difficulté réside justement dans le choix de cet objectif et de l'initialisation du problème. Depuis leur apparition aux alentours des années 70, plusieurs méthodes interactives ont été développées. Nous pouvons en citer quelques-unes : somme pondérée, produit pondéré, VIKOR, TOPSIS (Tableau II.3), la méthode STEM de Benayoun et Al, la méthode GDF de Geoffrion et Al, et la méthode du point de référence de Wierzbicki (Izadikhah, & Alikhani, 2018 ; Geoffrion et Al., 1972 ; Makowski & Wątróbski, 2024).

Tableau II.3. Fréquence d'application des méthodes d'aide à la décision dans les publications scientifiques entre 2000 et 2024 (Kaya, 2024)

MAMD	Fréquence d'application	Pourcentage
AHP	600	30.56
Hybrid MCDM	86	4.38
Aggregation DM methods	66	3.36
TOPSIS	350	17.82
ELECTRE	88	4.48
ANP	39	1.98
PROMETHEE	400	20.37
VIKOR	320	16.30
DEMATEL	14	0.74
Total	1963	100.00

II.4.3 La prise de décision s'effectue durant l'optimisation

Cette méthode est similaire à la précédente mise à part qu'elle réitère les étapes alternativement jusqu'à l'obtention d'une solution unique. Le décideur est donc questionné au cours de l'optimisation. Une première optimisation est effectuée

pour permettre au décideur d'avoir une idée des compromis à réaliser. Le décideur peut donc fixer des variables de décision et ainsi réduire l'espace des solutions avant de relancer une nouvelle étape d'optimisation. Cette méthode a donc l'avantage d'être progressive. L'inconvénient de cette méthode est la disponibilité requise du décideur tout au long de l'optimisation (Köksalan & Karasakal, 2006).

II.5 Méthodes d'optimisation multicritères utilisées en conception de bâtiments

De nombreuses méthodes d'optimisation multicritères existent. Un grand nombre de ces méthodes ont été recensées et décrites dans l'ouvrage de (Collette & Siarry, 2011). Seul un nombre limité de ces méthodes, spécifiquement utilisées en conception de bâtiments, sont explicitées dans la suite de cette section.

II.5.1 Méthodes d'optimisation exacte par énumération exhaustive

L'optimisation par énumération exhaustive ou brute-force, consiste à évaluer l'intégralité des alternatives pour l'ensemble des fonctions-objectif prises simultanément dans un domaine de conception fini ou discrétisé. Partant d'un modèle de calcul thermique statique, ont utilisé cette méthode pour optimiser simultanément les coûts d'investissement, les besoins de chauffage et la surface utile en faisant varier la géométrie d'un bâtiment et les propriétés des parois vitrées. Le principal avantage de cette méthode est la garantie d'obtention de l'ensemble des meilleurs compromis se situant sur le front de Pareto (Gan & Guo, 2019 ; Baidar et al. 2021).

II.5.2 Méthodes d'optimisation approchées

L'optimisation exhaustive nécessite un grand nombre d'évaluations pour obtenir de nombreuses solutions proches des compromis Pareto-optimums globaux. Afin de limiter le nombre d'évaluations des fonctions-objectif dans la recherche des solutions non-dominées, d'autres méthodes d'optimisation peuvent être utilisées. La finalité des méthodes d'optimisation approchées est de trouver dans le domaine de conception le ou les compromis Pareto optimums globaux sans évaluer l'intégralité des solutions. Le choix d'un algorithme d'optimisation n'est pas trivial et dépend des caractéristiques du problème à optimiser (Sharifi et al., 2021) :

- La nature des variables de décision : continues, discrètes ou mixtes ;
- La présence de contraintes sur les fonctions-objectif ;
- Le nombre et la nature des fonctions-objectif (linéarité, continuité, convexité, existence de minimums locaux...)

- La dérivabilité des fonctions-objectif.

Trois catégories de méthodes d'optimisation approchées se distinguent : les méthodes déterministes, les heuristiques spécialisées et les métaheuristiques. Les méthodes heuristiques sont des méthodes d'optimisation développées pour résoudre un seul et unique type de problème. Au contraire, les métaheuristiques peuvent s'adapter à différents types de problèmes (Zaki & Zaied, 2019). Le terme métaheuristique a été utilisé pour la première fois par (Glover, 1986) pour distinguer la méthode de recherche Tabou des heuristiques spécifiques. Compte tenu de leurs spécificités, les heuristiques spécialisées ne sont pas abordées dans la suite de ce chapitre.

II.5.2.1 Les méthodes déterministes en optimisation de bâtiments

Les méthodes déterministes ne reposent pas sur un processus stochastique pour la recherche de l'optimum, mais sur la formulation mathématique des fonctions-objectif. Pour converger, ces méthodes requièrent des fonctions continues et dérivables. Elles sont donc rarement appropriées pour les problèmes d'optimisation de bâtiments qui sont généralement discontinus de par la nature des variables de décision dont certaines sont continues et d'autres discrètes. De plus, l'utilisation de modèles numériques en tant que boîte noire dans la formulation des fonctions-objectif induit une méconnaissance de leur nature et de leur dérivabilité (Wetter & Wright, 2004 ; Kvasov & Sergeev, 2015 ; Larson et al., 2019).

II.5.2.2 Les métaheuristiques en optimisation de bâtiments

Les métaheuristiques, contrairement aux méthodes déterministes, ne nécessitent pas la continuité et dérivabilité des fonctions-objectif, ce sont des méthodes directes. Ces méthodes sont basées sur un processus stochastique. L'inconvénient majeur des méthodes stochastiques est leur non-garantie d'optimalité absolue pour un nombre de simulations limité (Evins, 2013). La méthode d'optimisation sélectionnée doit néanmoins assurer l'obtention rapide d'un ensemble de solutions proches des optimums globaux.

D'après une étude réalisée sur plusieurs travaux, (Nguyen et al., 2014) rapportent que les algorithmes stochastiques à population sont les méthodes les plus employées dans le domaine de l'optimisation de bâtiments performants (Figure II.9). Parmi eux les algorithmes génétiques arrivent en première position suivie par l'optimisation par essaim particulière inspirée des vols d'oiseaux.

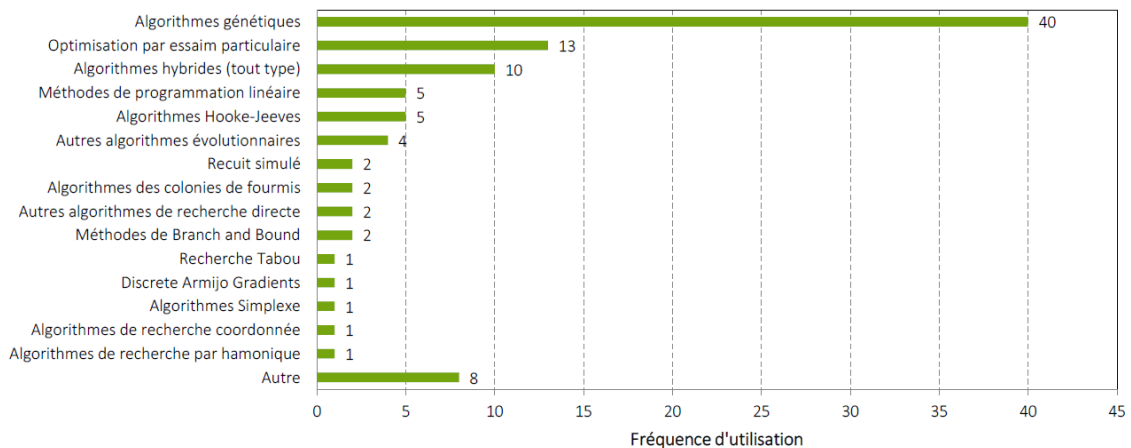


Figure II.9. L'utilisation des différents algorithmes d'optimisation dans le domaine de l'optimisation du bâtiment d'après (Nguyen et al. 2014).

Selon le «no free lunch theorem » (McDermott, 2019), une méthode stochastique ne peut pas être meilleure que les autres sur l'ensemble des problèmes d'optimisation qui existent. La recherche aléatoire est en moyenne plus performante. Bien choisie et paramétrée, une méthode stochastique peut néanmoins être plus efficace et robuste que la recherche aléatoire sur un type de problème donné. Une des méthodes efficaces de résolution de problème d'optimisation difficile est l'usage de métaheuristiques. Ce sont des stratégies permettant de guider la recherche d'une ou de plusieurs solutions optimales pouvant s'adapter à un problème complexe. Les métaheuristiques fonctionnent selon une structure de voisinage. L'exploration de l'espace des solutions évolue alors par itérations successives et par comparaison avec le voisinage, selon des règles propres à chaque métaheuristique. La recherche de l'optimum se termine lorsqu'un critère d'arrêt est atteint : il peut s'agir d'une durée d'exécution préalablement définie ou de l'obtention d'un niveau de précision requis.

Une grande partie des travaux d'optimisation de bâtiments utilisent des métaheuristiques (Evins, 2013). Plusieurs exemples d'utilisation de métaheuristiques dans le domaine du bâtiment :

(Aparicio et al., 2014) emploient un algorithme de « recherche Tabou » pour optimiser l'enveloppe d'un bâtiment résidentiel afin de minimiser le coût de cycle de vie du bâtiment qui comprend les coûts d'investissement, de consommations annuelles et des coûts liés aux émissions de CO₂. (Chantrelle et al., 2011) utilisent un algorithme génétique évolué (NSGA-II pour Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) qui est capable de réaliser des optimisations multiobjectifs en s'appuyant sur le principe de Pareto-optimalité et en tenant compte de variables discrètes et continues. (Yang & Wang, 2012) utilisent un algorithme d'optimisation multiobjectif par essaim particulaire (MOPSO pour MultiObjective Particle Swarm Optimisation) pour optimiser la consommation énergétique et le

confort thermique d'un bâtiment en faisant varier le système de contrôle de l'ambiance thermique du bâtiment. Enfin, un algorithme d'optimisation multiobjectif par colonie de fourmis (MACO pour Multiobjective Ant Colony Optimisation) a été utilisé pour l'optimisation combinatoire d'une façade modulaire de bâtiment par (Shea et al., 2006) pour l'optimisation simultanée du confort visuel et des coûts d'investissement.

II.6 Synthèse et méthodologie de conception adoptée

La conception multicritère d'un bâtiment est un problème d'optimisation multicritère dont les critères à optimiser sont parfois contradictoires. Plusieurs travaux sont ainsi étudiés dans la littérature tels que l'enveloppe (section II.2), les systèmes énergétiques, les systèmes porteurs des structures en BA, les assemblages des constructions métalliques, des études allant jusqu'à a étudiés le bâtiment que ce soit en construction neuve ou rénovation.

Les critères le plus souvent abordés sont : la minimisation des consommations énergétiques, le coût financier engendré par les différentes phases de vie du bâtiment, la minimisation du poids des structures métalliques, D'autres critères relatifs aux performances mécaniques ou environnementales, sont rarement employés (section II.3). Enfin, l'optimisation de plusieurs critères soit a minimisés ou a maximisés simultanément est rare.

Selon le nombre et les différents types de variables de décision, le problème d'optimisation peut vite devenir un problème complexe dont l'espace des solutions est de très grande dimension. La conception consiste alors à rechercher et choisir la meilleure solution qui réponde à un contexte donné. Deux étapes sont nécessaires : une étape d'optimisation et une étape de prise de décision (section II.4). Ces étapes peuvent présentées de plusieurs façons ce qui engendrera des contraintes différentes concernant le choix et l'utilisation des méthodes d'optimisation et d'aide à la décision

Dans la méthode où l'optimisation multiobjectif suit l'analyse multicritère, l'agrégation des fonctions-objectif en une seule fonction-objectif nécessite des niveaux d'expertise et de connaissance du problème à optimiser difficilement accessibles. D'autre part, le fait qu'une solution unique soit obtenue à l'issue du processus ne permet ni d'observer l'impact d'un objectif sur un autre objectif ni celui des variables de conceptions sur les objectifs. Lorsque le décideur souhaite analyser un ensemble de solutions optimales pour accroître sa connaissance et conforter sa décision, cette méthode est donc à proscrire.

Cherchant à présenter une grande diversité d'alternatives (solutions), l'approche retenue dans les travaux de cette thèse doit permettre de proposer un ensemble de solutions optimales au sens de Pareto parmi lesquelles le ou les décideurs

pourront choisir, dans un contexte donné, la solution souhaitée. Le processus de recherche doit donc précéder le processus de décision et mener vers un ensemble de solutions optimales. La méthode avec prise de décision progressive n'est pas retenue en raison de son inconvénient principal qui est la nécessité de présence permanente du décideur durant l'optimisation.

Enfin, pour limiter le niveau d'expertise requis durant l'optimisation et favoriser une grande diversité de solutions sur le front de Pareto, la catégorie des méthodes d'optimisation appelée dans la littérature « true optimisation » ou « Pareto optimisation » est choisie dans ce travail. Le choix de la méthode d'optimisation s'oriente donc a priori vers une métaheuristique à population (section II.5). Ce choix nécessite de déterminer les spécificités du problème à optimiser et donc de l'avoir formulé au préalable. La méthode d'optimisation employée dans ce travail sera donc adoptée dans le Chapitre IV, qui porte sur la « Mise en œuvre de la méthodologie proposée sur un cas réel ».

Au regard des choix effectués, la méthodologie adoptée est alors composée d'un ensemble d'étapes nécessaires à la résolution des problèmes d'optimisation et de décision multicritère présentées dans la Figure II.10. Cette méthodologie peut non seulement s'appliquer à l'optimisation des bâtiments en BA, objet des travaux de ce manuscrit, mais également être étendue à d'autres types du bâtiment.

Des travaux ont déjà abordé l'aide à la décision multicritère visant le choix de systèmes constructifs (enveloppe, systèmes énergétiques, structure porteuse, type de fondation, type d'assemblage pour les structures métalliques). Toutefois peu des travaux visant l'optimisation de la conception multicritère des bâtiments en BA ont été recensés. La suite de ces travaux et de ce manuscrit se focalise donc uniquement sur l'optimisation multicritère de la conception des bâtiments en BA.

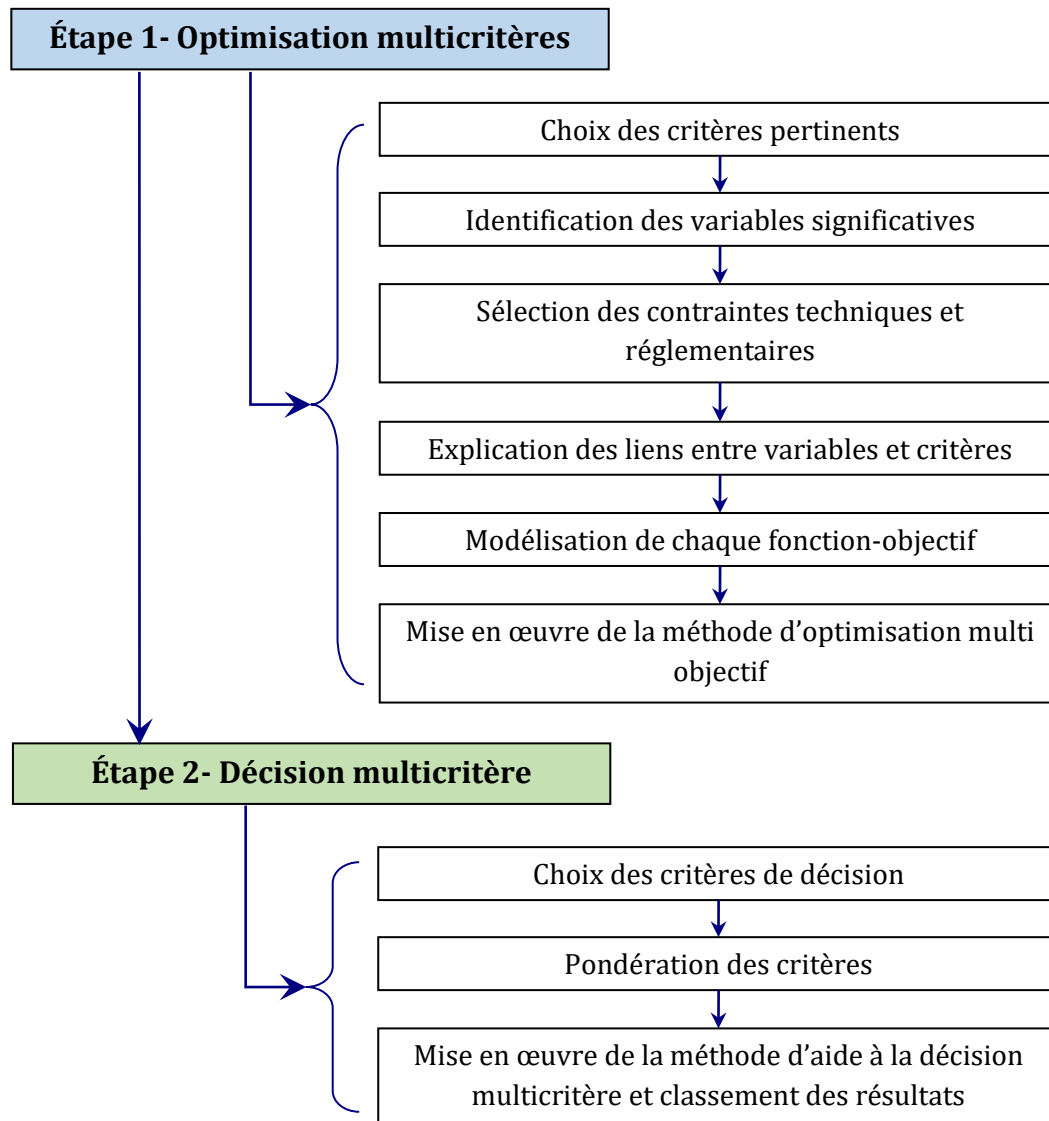


Figure II.10. Méthodologie de conception : une première phase d'optimisation multicritère suivi d'une phase de décision

Chapitre III Analyse multicritère :

Choix des critères pertinents et sélection des variables de décision

Dans la continuité de ce travail, nous effectuons dans ce chapitre une analyse multicritères. Chaque critère, est défini sur la base de retour d'expérience dans le domaine et en fonction des modalités d'optimisation prévue dans la suite de l'étude, nous proposerons une fonction et une échelle d'évaluation pour chaque critère. Nous proposerons, ensuite, les contraintes techniques et réglementaires liées au problème de la conception des bâtiments en BA. Finalement, - pour des raisons de disponibilité des données - nous nous proposons de ramener le problème d'optimisation de plusieurs critères à deux critères pertinents, permettant d'évaluer la qualité de la conception parasismique des bâtiments en BA à partir d'un faible nombre de données disponible à la phase APS, dont le surcout d'étude sera assez faible et la proposition de plusieurs solutions est possible.

III.1 Introduction

La modélisation fonctionnelle d'un bâtiment permet de décrire les concepts nécessaires à l'établissement d'un constat-qualité. Le bâtiment est considéré comme un système complexe, composé d'un grand nombre d'objets, chacun étant représenté par sa morphologie (géométrie et technologie) et les fonctions pour lesquelles il est conçu.

Etablir le constat-qualité du projet, ou d'une partie du projet consiste à évaluer à partir des critères jugeant les objets techniques spécifiques, générés par les concepteurs spécialisés (architectes, ingénieurs structure, thermiciens, acousticiens, ...).

La formulation du problème d'optimisation lié à la conception des bâtiments en béton armé, passe d'abord par une analyse multicritères pour définir des critères de conception fiables et indépendants.

Les critères retenus pour évaluer les performances des solutions proposées, découlent des conséquences des actions élémentaires, c'est-à-dire « tout effet ou attribut de l'action susceptible d'interférer avec les objectifs ou avec le système de valeurs d'un acteur du processus de décision, en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences ».

Dans la continuité de ce travail, nous proposons les critères d'évaluation de la solution globale, en proposant pour chaque critère une fonction d'évaluation qui permet d'apprécier la performance de chaque solution ainsi de définir les différents types de contraintes qui limitent la faisabilité de l'opération. Nous choisissons, finalement, les critères adoptés pour notre cas d'étude, c.-à-d. l'optimisation de la conception des bâtiments en BA au stade de l'avant-projet sommaire.

III.2 Pourquoi l'analyse au stade de l'avant-projet sommaire (APS) ?

L'APS est le moment privilégié de la conception ; c'est-à-dire le moment où sont effectués les principaux choix conditionnant la suite de l'étude. C'est à ce moment que l'étude des variantes peut s'effectuer avec le maximum d'efficacité : le nombre d'éléments ou d'informations manipulées ou directement sous-entendues n'est encore pas très important, l'homogénéité est ainsi plus facile à vérifier. Plus tard, au niveau de l'avant-projet détaillé, il sera trop tard pour remettre en cause des décisions prises auparavant, le temps d'études supplémentaire et leur coût constituent le plus souvent des éléments rédhibitoires. C'est donc dès ce stade que l'on doit faire porter les efforts de l'aide à la conception (Figure III.1).

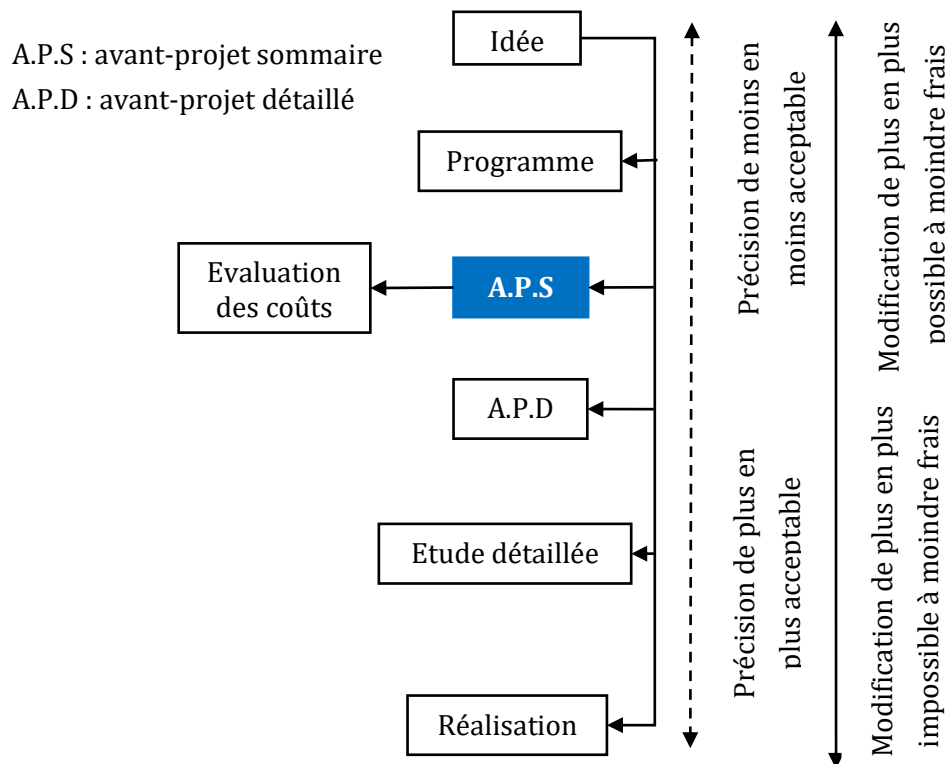


Figure III.1. L'importance de l'APS dans le processus de conception des bâtiments

III.3 Analyse multicritères

La formulation du problème d'optimisation, lié à la conception des bâtiments en béton armé, passe d'abord par une analyse multicritères pour définir des critères de conception fiables et indépendants (Figure III.2).

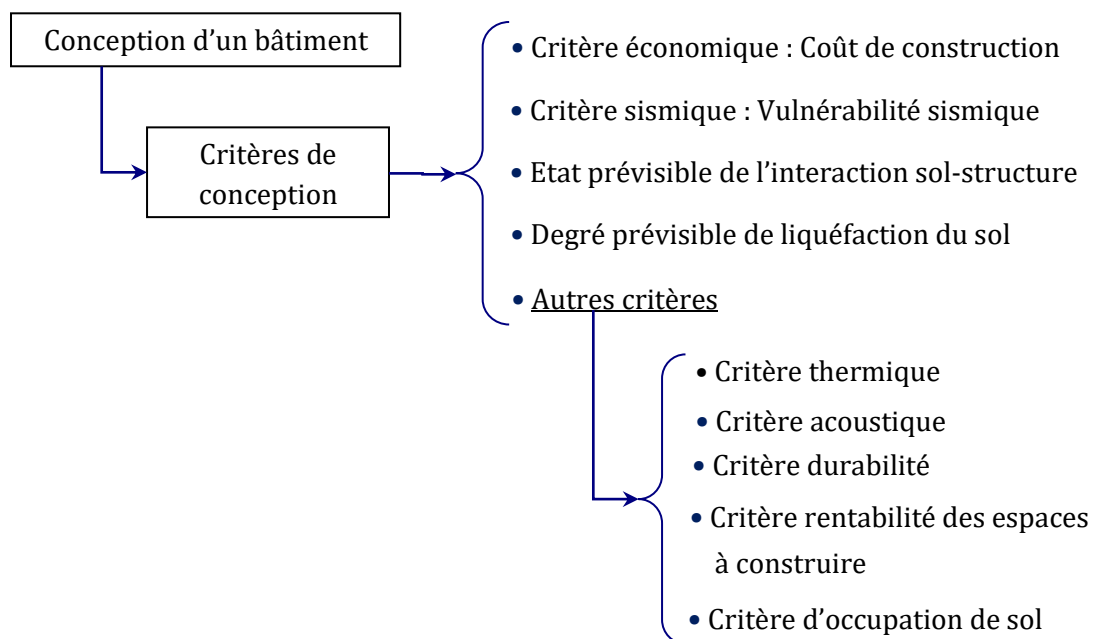


Figure III.2. Critères de conception

Ce choix multicritère présente une difficulté particulière malgré l'existence de méthodes de résolution dédiées à ce type de problème (Abdelli, 2007). La difficulté de considérer tous les critères réside dans le fait qu'ils n'ont pas la même dimension et sont parfois de nature qualitative, donc difficiles à évaluer (Bel Hadj Ali, 2003).

Cependant, pour certains critères dont on dispose uniquement d'une évaluation qualitative, il est nécessaire d'attribuer des notes permettant de transformer l'expression qualitative en expression quantitative (Tableau III.1). Les notes attribuées suivent plus souvent une échelle arithmétique (Roy, 1985).

Tableau III.1. Codage numérique des expressions qualitative

Evaluation qualitative	Evaluation chiffrée (note)
Très bon	10
Bon	8
Moyen	6
Mauvais	4
Très Mauvais	2

III.3.1 Critère économique « coût de construction »

Ce critère intervient tout au long du processus de conception. Il consiste à apprécier les performances de chaque solution faisable, en évaluant le coût du projet (coût de réalisation des différents éléments constituant le bâtiment, ...). Cependant, selon le niveau de précision dans le calcul du coût de réalisation d'un bâtiment, différentes méthodes de calcul peuvent être employées de la plus sommaire à la plus détaillée (Bayram & Al-Jibouri, 2016). La Figure III.3 illustre le principe de calcul du coût selon le degré de précision souhaité.

Le principe des méthodes de plus en plus sommaires consiste en une estimation de plus en plus globale, basée sur l'utilisation de ratios de plus en plus sommaires de prix unitaires (PUB, PUC) et de quantités d'éléments de dépense (NB, NPD, ...). Cette approche est utilisée en phase d'APS dont les données connues sont souvent insuffisantes ou estimées grossièrement par des méthodes approchées. Par contre, l'approche de plus en plus détaillée correspond à une estimation faite à partir d'informations plus précises (puisque l'étude est plus avancée), tel que le devis quantitatif (Valentini et al., 2017 ; Dobrucali & Demir, 2021).

L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces méthodes dépend de la précision et de la rapidité souhaitées ainsi que de la quantité et de la nature d'informations disponibles (Al-Hajjar, 1989). Mais, le maître de l'ouvrage a besoin de chiffrer le coût de construction très tôt dans le processus de conception (méthode des

ratios), donc une étude plus détaillée (ou plus exacte) est non réalisable à ce stade.

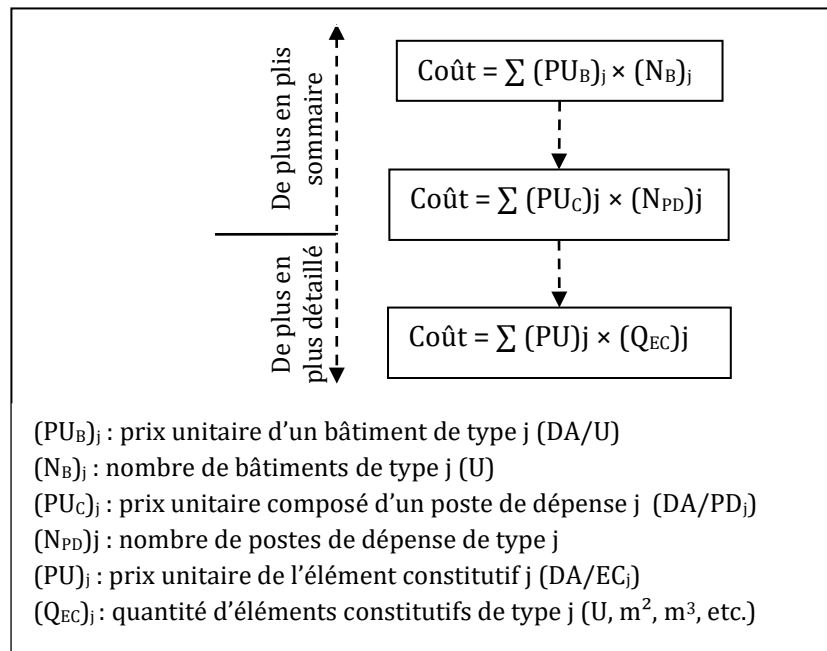


Figure III.3. Principe de calcul du coût d'un bâtiment selon le degré de précision désirée

III.3.1.1 le critère économique dans le processus de conception

La conception économique et financière d'une opération a pour objectif spécifique la maîtrise complète des coûts de construction depuis l'origine des projets ou idées de projets, jusqu'au décompte définitif (Tableau III. 2).

Rappelons que le choix d'une méthode d'évaluation dépend de l'état d'avancement du projet et donc de sa place dans le niveau de conception :

- Avant réalisation : afin de chiffrer le coût des travaux envisagés.
- En cours de réalisation : afin de définir le montant des situations mensuelles.
- Après réalisation : dans le cas des modifications ainsi que pour le suivi de l'entretien et de l'exploitation.

III.3.1.2 Notion de coût objectif

En ce qui nous concerne, la connaissance du montant total est primordiale. Dans le cas de la réforme de l'ingénierie, il est prévu que le maître de l'ouvrage demande au maître d'œuvre de lui indiquer le coût de l'ouvrage et de s'engager à étudier et faire réaliser l'ouvrage au coût fixé comme étant le coût objectif.

Comme il sera vu plus loin, le cout estimé des travaux reste une quantité essentiellement approximative. De ce fait, le cout objectif est considéré seulement comme une estimation prévisionnelle assortie d'une marge d'incertitude fixée par le maitre d'ouvrage : c'est l'écart toléré.

Lorsque l'opération lancée par le maitre de l'ouvrage risque de comporter des écarts importants, le maitre de l'ouvrage peut avoir recours à deux procédés :

- Soit il confie à quelque maitre d'œuvre son programme et leur demande d'étudier un A.P.S assorti d'un engagement sur le cout d'objectif.
- Soit dans le cas, où le maitre de l'ouvrage demande à chaque concepteur de s'engager sur un cout objectif ; il choisit la meilleure proposition et le maitre d'œuvre retenu entame l'étude de l'A.P.S puis de l'A.P.D.

Si le maitre de l'ouvrage n'adopte pas la méthode par cout objectif provisoire, le calcul du cout objectif s'effectue le plus souvent sur les bases du programme et au plus tard sur la base de l'A.P. D (Tableau III. 2).

III.3.1.3 Estimation du cout de projet –Développement D'un model « cout – surface habitable »

À ce stade, les concepteurs utilisent plusieurs méthodes et techniques d'estimation des coûts grâce à leur expérience et aux données d'autres projets similaires. Ces méthodes peuvent être subjectives et leur application génère généralement des estimations grossières entachées d'erreurs. Pour ces raisons, un modèle empirique est développé dans cette étude pour estimer le coût des bâtiments à l'A.P.S. Ce modèle de coût est basé sur une étude numérique d'un ensemble de données provenant de projets de construction résidentielle réalisés dans le nord de l'Algérie.

A. Analyse et traitement des données collectées

La construction de bâtiments résidentiels en Algérie a connu un essor qualitatif ces dernières années, avec le lancement et la mise en œuvre de divers programmes de logement (MHUV, 2020). Ce secteur, très dynamique, est responsable de la réalisation d'un programme ambitieux, notamment dans le nord du pays, où se concentre la grande majorité de la population (AND, 2014). Les programmes de bâtiments d'habitation en Algérie sont principalement motivés par le besoin urgent de construire un maximum de logements dans un espace limité afin de répondre aux besoins croissants de la population.

Sur le plan structurel, les bâtiments résidentiels en Algérie (bâtiments étudiées) peuvent être classés comme suit :

Tableau III. 2. Formulation du critère économique à travers les différentes phases de conception

Niv. Conc	Phase d'étude	Description	Méthodes de calcul possible des couts		Observation
			Formulation	Conditions nécessaires	
1	Idée	L'idée de construire un projet, par exemple : N logements	$C = N_i \times Pu_i$	N_i : nombre de logements de type i Pu_i : prix unitaire d'un logement de type i	Données insuffisantes sur le prix unitaire (erreur importante)
2	Programme	On a défini le programme : <ul style="list-style-type: none"> - N_1 logts de type 1 - N_2 logts de type 2 - N_3 logts de type 3, etc. - B_1 bâtiment de type R+1 - B_2 bâtiment de type R+2 	$C = \sum_{i=1}^n N_i \times Pu_i$ Ou bien $C = \sum_{i=1}^m Net_i \times Pue_i$	N_i : nombres de logements de type i Pu_i : prix unitaire d'un logement de type i n : nombres de type de logements Net_i : nombres d'étage de bâtiment de type i Pu_i : prix unitaire d'étage de type i M, n : nombre de bâtiments	Données insuffisantes sur le prix unitaire (erreur importante) Les frais des modifications sont presque nuls
3	A.P.S	On dispose de : <ul style="list-style-type: none"> - Les vues en plans des étages - La description de (type) des logements - La surface habitable - Le système structural - Le pré dimensionnement des éléments. 	$C = Sh_i \times Pu_i$	Sh_i : la surface habitable totale du bâtiment i Pu_i : le prix du mètre carré habitable du bâtiment i	Frais de modification négligeables. (moment idéal des décisions). Donc ; il faut chercher des méthodes qui minimisent l'erreur.
4	APD et (Etude)	Etablissement des plans d'exécutions (dossier génie civil, des éléments secondaires, marcher)	$C = \sum_{i=1}^n C_i$ $C_{ij} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \times Pu_{ij}$	C_i : cout du poste de dépose i (exemple : cout des poteaux) Q_{ij} : quantité de sous poste de dépense j du poste de dépense i. Pu_{ij} : prix unitaire du poste de dépense i	Risque d'erreur minime dans l'estimation mais les frais de modification sont très importants
5	Réalisation	La réalisation du bâtiment sur le site choisi	$C = \sum_{i=1}^n C_{Si}$	C_{Si} : cout du situation i a facturé par l'entreprise (situation des travaux i)	Modification impossible (risque d'erreur nul)

- Bâtiments (rez-de-chaussée + 4 à 5 étages) contreventés par des portiques en béton (régulières et irrégulières) et un système mixte (voiles - portiques).
- Bâtiments de 5 à 7 étages avec double système de contreventement (voiles -portiques et contreventement par voile).
- Bâtiments de 6 à 11 étages avec double système de contreventement (voiles -portiques et contreventement par voile).

Dans cette étude économique, l'objectif est de développer un modèle permettant d'estimer le coût des bâtiments dès les premières phases de la conception. Les données nécessaires ont été collectées à partir de devis quantitatifs (métrés), de visites de chantiers et de spécifications techniques (nombre d'étages, surface habitable, etc.). Au total, 21 bâtiments du nord de l'Algérie ont été analysés. Les cas retenus pour l'étude permettent de prendre en compte les zones de sismicité. En effet, la sismicité de l'Algérie est fortement concentrée dans les régions du nord (Bezzeghoud, 2015). Pour le développement de la fonction économique, dix-sept projets ont été exploités, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau III.3. Les différents coûts de construction des bâtiments exploités sont présentés dans le Tableau III.4.

Tableau III.3. Caractéristiques architecturales des bâtiments étudiés

Nombre de bâtiments	Nombre d'étages	Nombres de logements/bâtiment					Surface habitable / logement A_l (m ²)				
		F2*	F3	F4	F5	F6	F2	F3	F4	F5	F6
2	R+7**	4	8	2	1	/	64.29	92.37	182.70	194.14	/
1	R+8	2	12	2	/	/	63.13	90.74	192.41	/	/
1	R+9	1	16	2	/	/	63.32	90.74	192.41	/	/
1	R+9	2	16	2	/	/	64.04	90.74	192.41	/	/
1	R+10	/	7	7	1	1	/	92.87	121.72	234.89	215.00
1	R+10	/	7	7	1	1	/	92.87	121.72	234.89	215.00
2	R+5	/	/	10	1	1	/	/	102.85	195.61	211.10
1	R+5	10	2	/	/	/	58.45	128.67	/	/	/
2	R+5	5	10	1	2	/	65.33	95.38	180.09	191.13	/
1	R+5	10	2	/	/	/	58.45	129.14	/	/	/
1	R+5	8	2	/	/	/	58.58	128.65			
1	R+5	/	/	10	1	1	/	/	102.85	195.61	211.10
2	R+5	5	10	1	2	/	65.33	95.38	180.09	195.68	/
1	R+5	4	8	2	1	/	65.68	95.62	183.89	186.91	/
1	R+5	10	2	/	/	/	58.45	129.14	/	/	/
1	R+5	5	10	1	2	/	65.33	95.38	182.60	192.00	/
1	R+5	/	10	/	1	1	/	88.46	/	177.80	191.10

F2*: type d'appartement ou 2 indique le nombre de pièces, séjour inclu

Exemple : F3 : 2 chambres + 1 séjour + 1 cuisine + 1 toilette + 1 SDB.

** R+7 : Rez-de-chaussée + 7 étages.

. Il est à noter que tous les étages sont destinés à l'habitation (rez-de-chaussée compris)

Tableau III.4. Coûts de construction des bâtiments étudiés

Bâtiments étudiés	Surface habitable/bâtiment A_l (m ²)	Coût infrastructure C_{inf} (MDZD*)	Coût superstructure C_{sup} (MDZD)	Coût total C_{tot} (MDZD)
2	3111.33	44.0	51.2	95.2
1	1599.97	22.6	26.3	48.9
1	1899.98	18.2	30.6	48.8
1	1964.79	18.8	31.6	50.4
1	1952.02	24.3	33.3	57.6
1	1952.02	24.3	33.3	57.6
2	2870.42	29.0	36.7	65.7
1	841.85	8.50	10.8	19.3
2	3685.60	37.2	47.1	84.3
1	725.95	8.12	10.4	18.5
1	842.79	9.43	12.0	21.4
1	1435.21	16.1	20.5	36.6
2	3703.82	41.4	52.9	94.3
1	1582.37	14.9	20.3	35.2
1	842.79	7.93	10.8	18.7
1	1847.05	17.4	23.7	41.1
1	1253.50	11.8	16.1	27.9

B. Modèle de régression pour l'estimation des coûts

LA Figure III.4, qui représente graphiquement le coût total des bâtiments en fonction de la surface habitable (Figure III.4), montre que ce coût ne suit pas une tendance régulière. Il est donc nécessaire de traiter les données plus en détail afin d'identifier ou les paramètres qui influence le coût total des bâtiments.

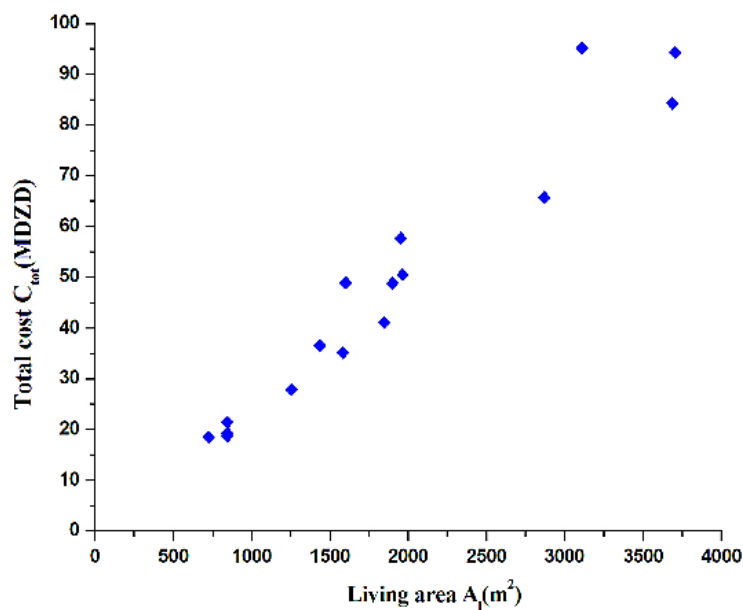


Figure III.4. Présentation graphique de la corrélation entre C_{tot} et A_l

Ce qui nous intéresse à travers cette analyse est de déduire un modèle mathématique de coût fiable du type (Eq.4) :

$$C_{tot} = f(A_l) \quad (\text{Eq.4})$$

La fonction de coût peut être exprimée par type ou nombre d'appartements, par nombre d'étages, etc. Cependant, en pratique, les bureaux d'études algériens expriment généralement le coût en fonction de la surface habitable. C'est pourquoi le modèle de coût est établi sur la base de ce paramètre.

Le modèle de régression obtenu (Eq.5) montre que les points suivent une tendance régulière ($R^2 = 0,93$). Ce modèle pourrait servir de référence aux concepteurs de projets de construction pour estimer le coût de construction dès la phase de conception initiale (préliminaire). Le modèle obtenu est également concordant avec des études similaires (Arafa & Alqedra, 2011).

$$C_{tot} = e^{(2 \times 10^{-5} \times A_l + 10,098)} \times A_l \quad (\text{Eq.5})$$

La comparaison graphique des valeurs du coût total et coût total ajustées montre que les différences sont très faibles (Figure III. 5).

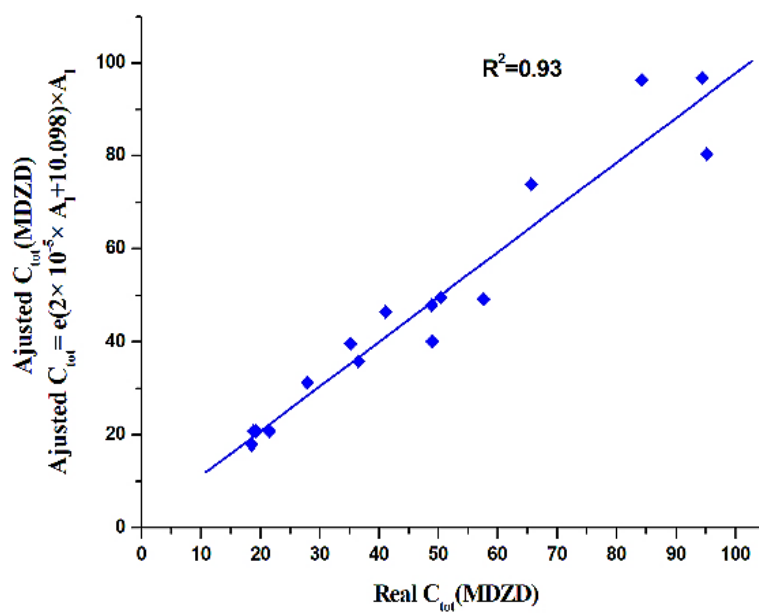


Figure III. 5. Comparaison entre le coût total réel et le coût total ajusté.

La formulation du critère coût de réalisation est regroupée dans le Tableau III. 5

Tableau III. 5. Description du critère coût de réalisation

Critère	Description du critère	Fonction d'évaluation
Coût de construction	Evaluation du coût de réalisation d'un bâtiment à la phase APS	$C_{tot} = e^{(2 \times 10^{-5} \times A_l + 10,098)} \times A_l$

III.3.2 Méthodologie d'évaluation du critère vulnérabilité sismique

Ce critère est utilisé pour évaluer la vulnérabilité structurelle d'un bâtiment. Il permet aux concepteurs, en phase de l'APS, de vérifier leurs choix architecturaux vis-à-vis de l'aspect sismique (Novelli et al., 2015). De nombreuses méthodes d'évaluation ont été développées : EMS-98, GNTD, HAZUS, VULNERALP, RISK-UE-2004, méthode FEMA, méthode japonaise (CETE, 2008).

Ces méthodes sont basées sur des approches statistiques et probabilistes reliant la typologie du bâtiment concerné et la nature des dommages observés sur ce type de construction au cours de l'évaluation post-sismique (Lazzali & Ait Meziane, 2014).

Il existe d'autres méthodes s'appuyant essentiellement sur une modélisation numérique (modélisation par éléments finis) de la structure, donc une connaissance précise du bâtiment (Caprili et al., 2012 ; Cattari et al., 2015). Le développement de ces méthodes est fortement lié à l'accroissement des puissances de calcul, et aux moyens de modélisation et données disponibles.

Dans cette étude, l'indice de vulnérabilité (the vulnerability index) (VIM) développé dans le cadre du programme européen Risk-UE est utilisé. Cette méthode présente des avantages par rapport à d'autres méthodes statistiques similaires (CETE, 2008 ; Cherif et al., 2017). Elle fournit un système de classification typologique permettant de regrouper les structures ayant une classe de performance sismique similaire (VI*) (Boutaraa et al., 2018 ; Cherif et al., 2017) puis ajouter des facteurs de modification du comportement (hauteur, irrégularités de formes, position par rapport aux autres bâtiments, type de fondation etc...), pour évaluer un indice de vulnérabilité final pour chaque bâtiment (VI) exprimé dans l'équation 6 (Milutinovic & Trendafiloski, 2003).

$$V_l = V_l^* + \sum_{j=1}^n Vm_j + \Delta V_R \quad (\text{Eq.6})$$

Où : V_l^* est l'indice de vulnérabilité correspondant à la classe du bâtiment. Vm_j sont des modificateurs de comportement qui incluent d'autres aspects affectant la

performance sismique du bâtiment, et enfin, ΔV_R est un facteur qui permet de prendre en compte les propriétés typologiques spécifiques à un niveau régional ou de la période de construction. Dans notre cas, $\Delta V_R = 0$, en raison du manque d'informations et de données de vulnérabilité existantes (retour d'expérience poste sismique).

Le Tableau III.6 présente cinq niveaux, allant de 0 (vulnérabilité très faible) à 1 (vulnérabilité très forte), proposés par la méthode d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments (Milutinovic & Trendafiloski, 2003) (Tableau III.6). Chaque valeur de V_i indique le degré de dommages que le bâtiment pourrait subir en cas de futur séisme.

Tableau III.6. Niveaux de vulnérabilité sismique

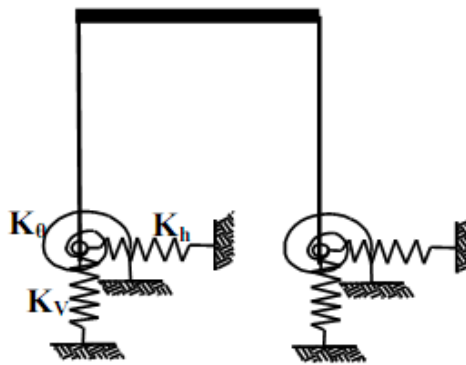
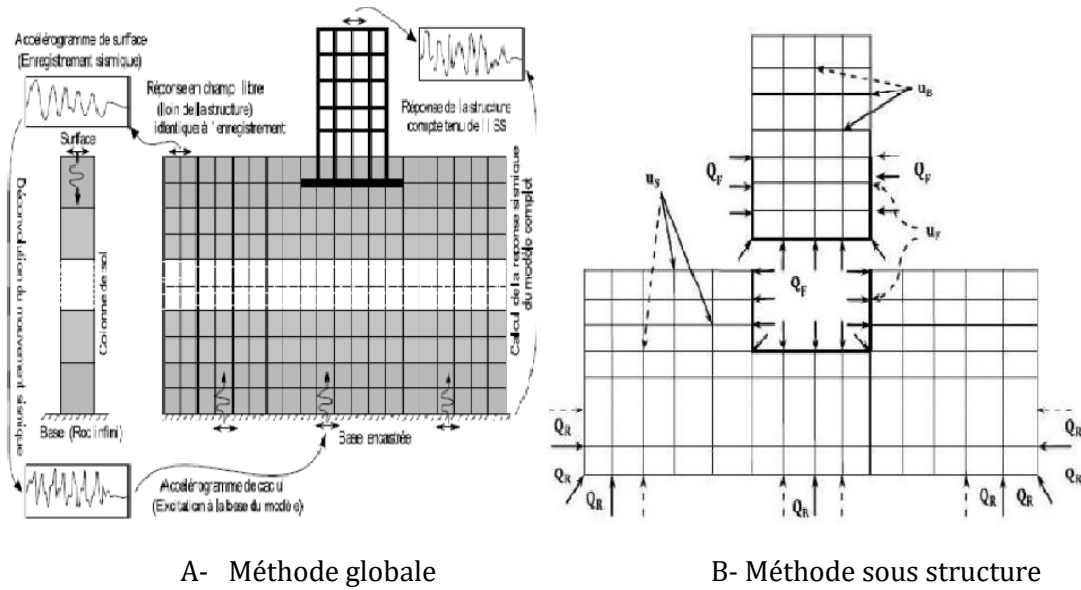
Niveaux	1	2	3	4	5
V_i	[0 - 0.20[	[0.20 - 0.40[	[0.40 - 0.60[	[0.60 - 0.80[	[0.80 - 1[
Degré de vulnérabilité	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort

III.3.3 Critère « état prévisible de l'interaction sol-structure »

Dans le but d'optimiser le dimensionnement des bâtiments ou de prédire, de façon plus réaliste, leurs comportements sismiques, les codes de constructions internationaux ont commencé à introduire depuis les années 2000, des clauses permettant de tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS) dans la phase de conception détaillé (Awchat et al., 2022 ; Bapir et al., 2023).

Plusieurs études ont abordé l'interaction sol-structure dans la littérature, en mettant en évidence les méthodes les plus utilisées, à savoir : la méthode globale, la méthode des sous-structures et la méthode des impédances (Figure III. 6).

Des simulations numériques effectuées par (KHALIL, 2009 ; SEGHIR, 2010) ont montré que l'interaction sol-structure peut avoir des effets avantageux ou nuisibles sur le comportement de la structure, en fonction des caractéristiques du sol et de celles du chargement sismique. Voici un modèle qui utilise l'interaction sol-structure (ISS) pour représenter le comportement des structures pendant un séisme.



C- Méthode des impédances

Figure III. 6. Principes des schémas adoptés pour modéliser l'ISS

III.3.3.1 Méthode des impédances

La manière la plus simple de prendre en compte le sol dans les modèles de calcul des structures est de le représenter par des ressorts reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide à laquelle on impose le mouvement. Dans le cas d'un modèle plan par exemple et d'une fondation de surface, l'interaction avec une semelle isolée peut être représentée par deux ressorts agissant en translation et un ressort en rotation. Dans le cas d'une fondation rigide, si le mouvement est quelconque, la fondation peut être représentée par la relation entre le torseur des efforts appliqués (trois composantes de réaction et trois composantes de moments) et les composantes des déplacements de corps rigide de la fondation. Dans le cas d'un comportement du sol linéaire (élastique ou viscoélastique), cette relation est caractérisée par une matrice 6×6 dite "impédance de la fondation" (Ghahari et al., 2023 ; Guellil et al., 2017).

Sous une semelle filante ou un radier, il est également possible de modéliser le sol par une série de ressorts et d'amortisseurs horizontaux et verticaux placés en un ensemble de nœuds constituant les points de calcul ou de discrétisation.

- **Etude paramétrique**

Les coefficients de raideur sont calculés pour chaque direction sismique (horizontal, vertical et rotation). Ils sont représentés dans le Tableau III. 7 pour les fondations rectangulaires.

Tableau III. 7. Les coefficients de raideur

Mouvement	Constante de ressort
$k_v = \frac{G_s}{(1+\nu)} \beta_z \sqrt{A}$	Translation verticale
$k_h = 2(1+\nu) G_s \beta_x \sqrt{A}$	Translation horizontale
$k_\theta = \frac{1+\nu}{4} G_s \beta_x (a^2 + b^2) \sqrt{A}$	Rotation

- a et b : Dimensions parallèle et perpendiculaire à la direction du séisme.
- G : Module de cisaillement du sol.
- β_x et β_z : paramètres dépendant de la proportion des dimensions de la fondation (b/a).
- ν : Coefficient de poisson.
- A : Aire de la fondation

Des analyses effectuées pour différentes configurations de la structure en faisant varier les paramètres affectant la fréquence, ont permis de définir un paramètre adimensionnel appelé « *rigidité relative sol-structure k_{ss}* ».

Un abaque a été construit en utilisant ce paramètre, en incluant les paramètres N_b , N_o , N_e (nombre d'ouverture dans le sens horizontale et transversale et nombres d'étages respectivement) (Figure III.7).

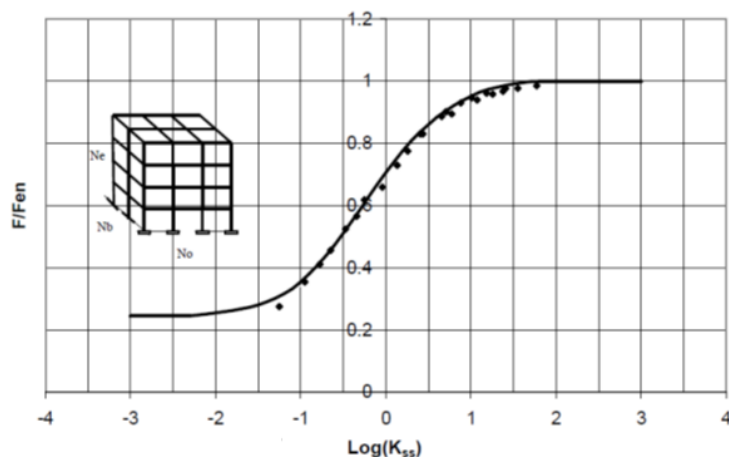


Figure III.7. Influence de K_{ss} sur la fréquence fondamentale de la structure

$$K_{ss} = \frac{N_b \times N_o \times \rho \times v_s^2 \times h^3 \sqrt{\frac{A}{A_0}}}{N_e \times E_p \times (I_p)^{3/4}} \quad (\text{Eq.7})$$

Avec :

- v_s : vitesse des ondes de cisaillement (m/sec) ;
- h : hauteur d'étage (m) ;
- A : Aire de la fondation (m²) ;
- A_0 : surface de référence égale à 1 m² ;
- E_p : Module de Young (MPa) ;
- I_p : moment d'inertie des poteaux (m⁴) ;
- N_e, N_o, N_b : Nombre d'étages, et ouvertures du bâtiment dans la direction longitudinale et transversale.

III.3.3.2 Echelle d'évaluation

D'après l'étude faite par (KHALIL, 2009) :

- $\frac{F}{F_{en}} \approx 1$: Pas d'influence de l'interaction sol-structure. (Donc l'hypothèse d'encastrement à la base peut être retenue)
- $\frac{F}{F_{en}} \ll 1$: il y a influence de l'interaction sol- structure sur le comportement sismique (Figure III.8).

L'influence de l'interaction sol-structure sur la 1^{ère} fréquence fondamentale du bâtiment est très importante conduisant à une réduction de l'ordre de 70% de la fréquence du bâtiment calculée en assumant un encastrement à la base.

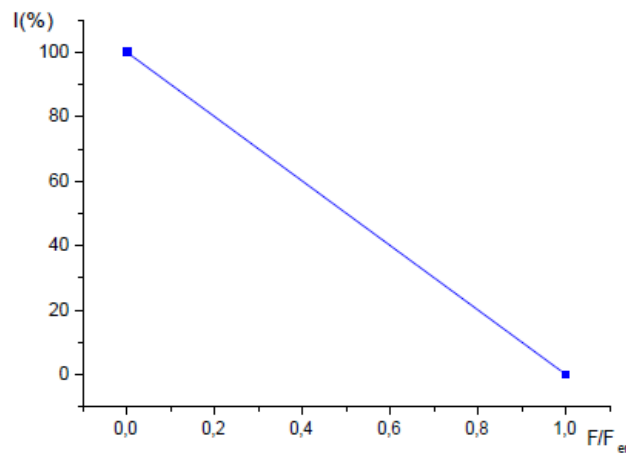


Figure III.8. Degré d'influence de l'interaction sol-structure sur la 1^{ère} fréquence fondamentale du bâtiment

III.3.4 Critère « degré prévisible de liquéfaction du sol »

La liquéfaction est un phénomène qui ne se produit que sous sollicitation sismique et concerne certaines formations géologiques : sables, limons ou sables vaseux, quelques fois des vases saturées d'eau et peu compactes. Plusieurs bâtiments ont été détruits à cause de ce phénomène, c'est le cas du séisme de BOUMERDES de Mai 2003.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le potentiel de liquéfaction d'un sol, notamment les essais in situ (comme le SPT et le CPT) ainsi que les essais en laboratoire, tels que l'essai triaxial cyclique.

Ce critère est utilisé pour évaluer la performance des solutions proposées. Son évaluation est basée sur le retour d'expérience dans le domaine. On propose ci-après une méthode simplifiée qui prend en compte la liquéfaction du sol.

III.3.4.1 L'approche par contraintes cycliques (méthode simplifier)

Cette méthode permet de définir le taux de contraintes cycliques moyen nécessaire pour avoir la liquéfaction (CRR), le taux de contraintes cycliques induit par un séisme (CSR) et le facteur d'échelle d'amplitude (MSF = 1 pour des séismes d'amplitude $M_w = 7,5$), pour arriver à un facteur de sécurité (FS) vis-à-vis de la liquéfaction (Eq.8) (Grasso et al., 2020 ; D'Apuzzo et al., 2020).

$$F_s = \frac{CRR_{7,5} \times MSF}{CSR} \quad (\text{Eq.8})$$

Une magnitude de 7,5 est souvent prise comme référence pour exprimer le CRR (qui devient $CRR_{7.5}$). Cette valeur correspond au CRR obtenu en laboratoire après 15 cycles de chargement uniforme.

L'évaluation du risque de liquéfaction dans le RPA 2024 comme dans l'Eurocode 8 (EC8 – EN 1998-5) repose en grande partie sur cette approche développée par [Seed & Idriss, 1971](#)), puis enrichie par d'autres chercheurs comme ([Youd et al., 2001](#)).

III.3.4.2 Échelle d'évaluation

Le RPA 2024 introduit un cadre quantitatif clair (PLI) pour estimer la sévérité de la liquéfaction, avec des mesures obligatoires selon les seuils atteints. L'EC8 adopte une approche plus flexible et empirique, centrée sur le facteur de sécurité FS et fondée sur les pratiques internationales (Tableau III.8). Les deux normes insistent sur l'importance d'intégrer l'étude de la liquéfaction dès les premières phases de conception géotechnique, en particulier pour les zones exposées.

Tableau III.8. Évaluation du risque de liquéfaction (RPA 2024 et EC8)

Critère	RPA 2024	Eurocode 8 (EC8) – EN 1998-5
Zone d'application	Zones sismiques II, III ou bâtiments de classe d'importance élevée (1A)	Zones à sismicité modérée/élevée avec sols saturés peu cohésifs
Méthodologie recommandée	Basée sur le calcul de l'indice PLI	Basée sur le calcul du facteur de sécurité (FS) à partir d'essais SPT ou CPT
Formule utilisée	$PLI = \int_0^{20m} (10 - 0.5z) \times F_L(z) dz$ avec : $F_L = 1 - FS \text{ si } FS < 1$	FS évalué selon des méthodes empiriques (ex. Seed & Idriss, Youd et al.,)
Seuils d'interprétation	$PLI = 0$, négligable $PLI \leq 5$, faible $5 < PLI \leq 15$, élevée $PLI > 15$, très élevée	$FS \geq 1$: pas de risque $FS < 1$: liquéfaction probable

III.3.5 Autres critères

Pour répondre au besoin urgent en termes de réalisation de logements en Algérie, les décisions de réalisation des projets d'habitat sont souvent basées sur un seul critère : l'urgence de construire le maximum de logements dans un espace restreint. Les critères liés au confort des espaces habitables (thermique, acoustique, éclairage des espaces, etc..) sont rarement utilisés pour évaluer la conception des bâtiments en BA en Algérie ([Gramez et al., 2021](#)). Ces critères appelés de « *seconde ordre* » sont regroupés dans le Tableau III.9.

Tableau III.9. Autres critères pouvant être utilisés dans l'analyse multicritère d'un bâtiment en BA (Benoudjafer et al., 2022 ; Hadji et al., 2024 ; Rais et al., 2021)

Critères	Description	Fonction d'évaluation	Variables de décision	Contraintes liées au projet
C ₁ : Critère thermique	Evaluation des déperditions thermiques par la transmission surfacique (W/C°)	Evaluation quantitative $C_1(a_i) = 1.2 \sum_{j=1}^4 (K_{ij} \times A_{ij})$	K_{ij} : Coefficient de transmission des parois (murs, planchers, ouvrants) A_{ij} : surface des parois	$C_1(a_i) \leq 1.05 \times D_{réf}$
Critère acoustique	C ₂ : l'isolation aux bruits aériens	Evaluation qualitative $C_2(a_i) = (W_m \times S_{mi} + W_f \times S_{fi}) / (S_{mi} + S_{fi})$	La qualité acoustique des murs enveloppe, des vitrages ainsi que leurs surfaces	/
	C ₃ : limitation de transmission de bruit d'impact	Evaluation qualitative $C_3(a_i) = \begin{cases} \text{très bon} \Rightarrow P_3 \\ \text{bon} \Rightarrow P_5 \\ \text{moyen} \Rightarrow P_2, P_4 \\ \text{mouvais} \Rightarrow P_1 \end{cases}$	La qualité acoustique des planchers	/
C ₄ : Critère de durabilité	Ce critère consiste à évaluer la durée de vie des solutions (a _i) en fonction de la qualité de béton utilisé	Evaluation qualitative $C_4(a_i) = \begin{cases} \text{moyen} \Rightarrow Q_1 \\ \text{bon} \Rightarrow Q_2 \\ \text{très bon} \Rightarrow Q_3 \end{cases}$	Qualité du béton	/
C ₅ : rentabilité des espaces à construire	Ce critère consiste à réduire les espaces occupés par les murs (m ²)	Evaluation quantitative $C_5(a_i) = \sum_{j=1}^3 (Epm_{ij} \times Lom_{ij})$	Épaisseur des murs (Epm _{ij}). (murs enveloppes, cloison de distribution et cloison de séparation)	/

Tableau III.9. Autres critères pouvant être utilisés dans l'analyse multicritère d'un bâtiment en BA (suite)

Critères	Description	Fonction d'évaluation	Variable de décision	Contraintes liées au projet
C ₆ : Critère d'occupation de sol	Optimiser l'utilisation de sol	Evaluation quantitative $C_6(a_i) = \sum_{j=1}^{nb} (S_{mi} \times N_j \times Nb_j)_i / S_{tp}$	S _{mi} : surface moyenne d'étage de bâtiment type j ; N _j : nombre d'étage de bâtiment type j ; Nb _j : nombre de bâtiment type j ; S _{tp} : surface de terrain affecté au projet.	$N_j \leq N_{max}$ N _{max} : le nombre maximal d'étage autorisé à construire
C ₇ : les performances visuelles	Optimiser l'utilisation de la lumière de jour.	Evaluation quantitative $C_7(a_i) = (S_{of} \times C_{tl})_i$	S _{of} : surface des ouvrants. C _{tl} : coefficient de transmission lumineuse	/
C ₈ : Fonctionnalité des espaces habitables	Maximiser le nombre de pièces	Evaluation qualitative $C_8(a_i) = \sum_{j=1}^4 (n_{ijl} \times w_j)$	n _{ijl} : le nombre de logement de type j. w _j : la note de logement type j.	/
C ₉ : nombre de logements à construire	Maximiser le nombre de logements à construire	Evaluation quantitative $C_9(a_i) = NL_i$	NL _i : nombre totale de logement	/

III.4 Les contraintes

Les contraintes du problème d'optimisation sont définies par l'ensemble des exigences réglementaires relatives au dimensionnement des structures en BA. Ainsi, pour qu'une solution de conception soit considérée comme admissible, elle doit satisfaire à l'ensemble des vérifications réglementaires exposées dans les paragraphes ci-dessous :

III.4.1 Les contraintes urbanistiques

Outre les exigences techniques de dimensionnement, les contraintes urbanistiques constituent un volet essentiel du problème d'optimisation. Ces contraintes sont imposées par les documents réglementaires d'urbanisme et concernent notamment la hauteur maximale des constructions, l'alignement par rapport aux voies publiques, les distances limites par rapport aux propriétés voisines, le coefficient d'occupation du sol (C.O.S), ainsi que le respect de l'emprise au sol (C.E.S). Toute solution de conception doit ainsi être conforme à ces prescriptions pour être considérée comme techniquement et administrativement recevable (Hamma & Petrişor, 2018 ; Messafri & Biara, 2024 ; Ben Guniche & Atheman, 2015).

- **Le coefficient d'occupation du sol (C.O.S) :** est une contrainte urbanistique réglementaire qui définit la densité maximale de construction autorisée sur un terrain donné. Le respect du C.O.S est fondamental dans toute démarche d'optimisation architecturale et structurelle, car il conditionne directement le volume constructible, l'organisation spatiale du projet et les choix techniques liés à la structure porteuse. Il s'exprime par l'équation suivante :

$$\frac{S.H.O.N}{ST} \leq C.O.S \quad (\text{Eq.9})$$

S.H.O.N : surface hors œuvre nette
ST : surface de terrain

Par exemple, un C.O.S de 0,5 signifie que la surface maximale de plancher autorisée ne peut excéder 50 % de la superficie du terrain

- **L'emprise au sol (EMP) :** désigne la surface occupée par la projection verticale de la construction sur le terrain, incluant tous les éléments bâtis en contact avec le sol tels que les murs porteurs, les balcons sur poteaux, et les annexes. L'emprise au sol est une contrainte urbanistique essentielle, car elle détermine la proportion du terrain qui peut être bâtie et impacte directement la conception architecturale, la répartition des volumes, et

l'implantation de la structure. Son respect est indispensable pour assurer la conformité du projet aux règles d'urbanisme locales. Il s'exprime par l'équation suivante :

$$S.H.O_{re} \leq S_{te} \times C_{em}$$

$S.H.O_{re}$: surface hors œuvre du rez-de-chaussée
 S_{te} : surface de terrain constructible
 C_{em} : coefficient de l'emprise de sol autorisé

(Eq.10)

- **L'alignement sur rue et gabarit** constitue une contrainte réglementaire définissant la position obligatoire d'une construction par rapport à la voie publique. Il peut être imposé en limite de propriété, en recul (alignement en retrait) ou dans l'alignement des constructions voisines. Le respect de cette règle garantit une cohérence urbaine en matière d'esthétique, de circulation et d'ensoleillement.

Le gabarit, quant à lui, correspond à l'enveloppe volumétrique maximale dans laquelle une construction doit s'inscrire. Il est généralement défini par des règles précisant la hauteur maximale, les retraits en fonction de la hauteur, les inclinaisons des toitures ou des façades (pentes réglementaires), et parfois même les proportions ou formes architecturales. Le gabarit assure le respect de l'harmonie urbaine et des servitudes de vues ou d'ensoleillement (Figure III.9).

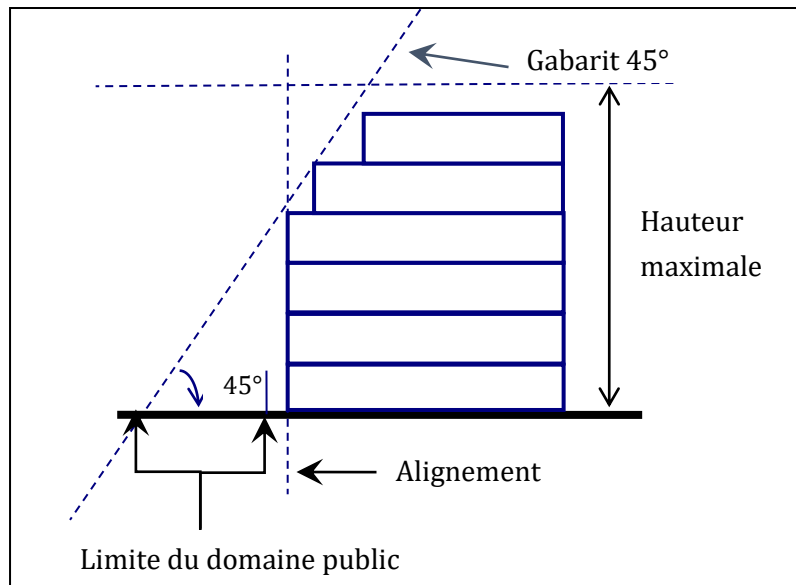


Figure III.9. Volume constructible limité par l'alignement, le gabarit, et la hauteur maximale

- **Prospecte par rapport à la limite mitoyenne :** définit la distance minimale que doit respecter une construction par rapport aux limites séparatives du terrain, notamment celles partagées avec les propriétés voisines. Cette règle vise à garantir des conditions satisfaisantes d'ensoleillement, de ventilation, d'intimité et de sécurité entre constructions voisines (Figure III.10).

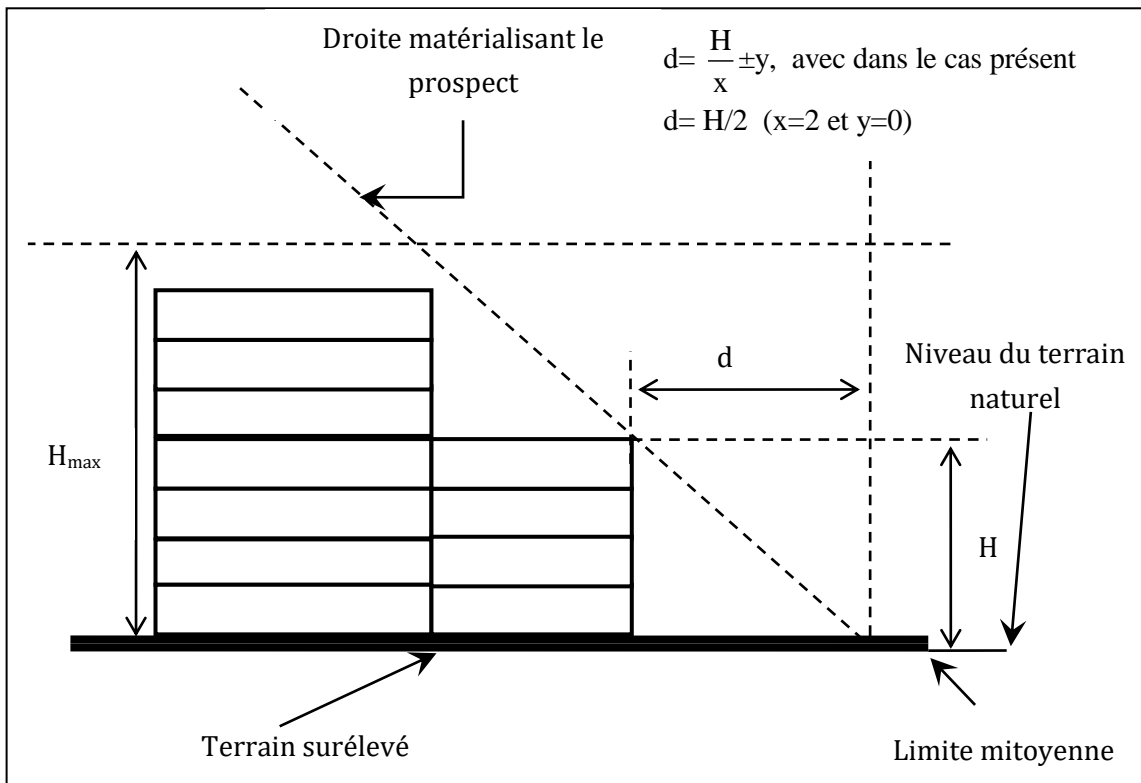


Figure III.10. Volume constructible limité par l'alignement, le gabarit, et la hauteur maximale

Le prospect est souvent exprimé sous forme d'une relation géométrique, par exemple sous la forme d'une pente réglementaire (ex. : "1,90 m de recul pour 1 m de hauteur de façade"), qui impose un retrait croissant avec la hauteur du bâtiment. Le non-respect de cette contrainte peut entraîner l'irrecevabilité d'un permis de construire.

- **Servitude de rue :** est une contrainte d'urbanisme qui impose une réserve d'espace le long des voies publiques en prévision d'élargissements futurs ou d'aménagements urbains (tels que trottoirs, voiries, réseaux divers). Elle interdit toute construction permanente dans cette zone réservée, même si elle se situe à l'intérieur des limites du terrain privé. Cette servitude peut affecter l'implantation du bâtiment, réduire l'emprise constructible et impacter le calcul du coefficient d'occupation du sol (C.O.S) ainsi que le gabarit autorisé. Elle doit impérativement être prise en compte

lors de la phase de préconception pour éviter toute non-conformité administrative.

Par exemple la distance minimale, permet d'éviter que les baies vitrées de bâtiment situés sur des parcelles adjacentes ne soient trop proche (Figure III.11).

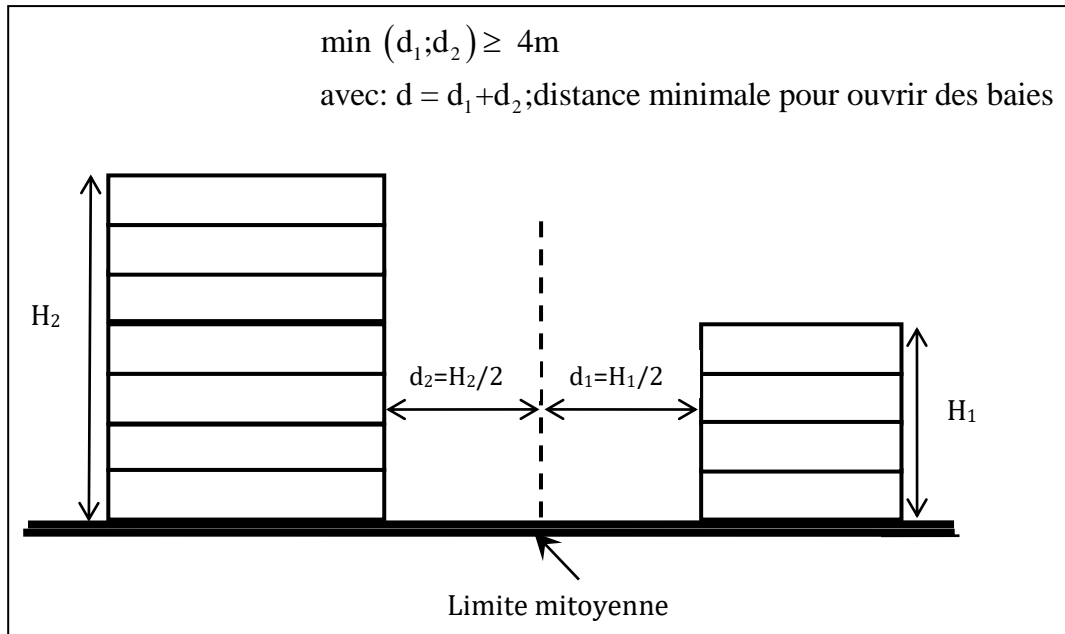


Figure III.11. Distance des baies vitrées a la limite mitoyenne

III.4.2 Les contraintes architecturales

Regroupent les règles, normes et choix de conception qui influencent directement la forme, l'organisation spatiale, l'esthétique et la fonctionnalité du bâtiment. Elles peuvent être issues de réglementations (urbanisme, accessibilité, sécurité incendie), du programme architectural, ou des préférences du maître d'ouvrage. Elles conditionnent la disposition des volumes, la hauteur des niveaux, la répartition des espaces, la qualité de l'éclairage naturel et la cohérence avec l'environnement bâti (Messafri & Biara, 2024).

Dans ce travail, on suppose que l'ensemble des contraintes architecturales et urbanistiques ont été intégrées et respectées dès la phase d'avant-projet sommaire (APS). Cela signifie que le projet respecte l'ensemble des prescriptions réglementaires en matière d'urbanisme (telles que le coefficient d'occupation du sol, l'emprise au sol, les prospects, le gabarit, les alignements, et les servitudes) ainsi que les exigences architecturales liées à l'organisation fonctionnelle, à l'esthétique du bâtiment, à l'orientation, à la hauteur des niveaux, à l'éclairage naturel et à la cohérence avec le contexte environnant. Ces contraintes sont considérées comme des paramètres fixes du problème, ce qui permet de concentrer l'analyse sur l'optimisation structurelle et économique du projet.

III.4.3 Contraintes techniques règlementaires

Dans le cadre de la conception et de l'optimisation des bâtiments en béton armé en Algérie, la prise en compte du Règlement Parasismique Algérien (MHUV, 2024) est une exigence incontournable. Ce règlement fixe les conditions techniques minimales que doivent respecter les structures pour garantir leur sécurité en cas de séisme, en fonction de la zone sismique, du type de sol, du nombre d'étages, et du système constructif adopté.

Dans cette étude, l'analyse se concentrera principalement sur les contraintes techniques liées au choix du système de contreventement et au type de fondation approprié pour chaque solution constructive envisagée, conformément aux exigences du Règlement Parasismique Algérien (MHUV, 2024).

Le choix de ces deux composantes structurelles est déterminant dans la performance sismique globale du bâtiment. Il conditionne à la fois la sécurité de l'ouvrage en cas de séisme et son coût de réalisation.

III.4.3.1 Contraintes sur le choix de type de contreventement

Le contreventement a pour rôle d'assurer la stabilité latérale de la structure en dissipant l'énergie sismique. Le RPA 2024 impose le recours à des systèmes adaptés à la zone sismique, à la hauteur du bâtiment et à son mode constructif. Les principaux types considérés sont regroupés dans le Tableau III.10 :

Tableau III.10. Le choix de type de contreventement en fonction de la zone sismique et le nombres de niveaux

Zone sismique	Nombre de niveaux	Hauteur H (m)	Choix du type de contreventement
I et II	$N \leq 5$	$H \leq 17$	Portique autostable (poteaux-poutres) sans remplissage en maçonnerie rigide (SC1)
	$N \leq 7$	$H \leq 23$	Système mixte voile -portiques (SC2)
	$N \leq 5$	$H \leq 17$	Système mixte équivalent à ossature, avec remplissage en maçonnerie rigide (SC3)
	$N \geq 8$	$H \leq 48$	Contreventement par voiles (SC4)
III	$N \leq 4$	$H \leq 14$	Portique autostable (poteaux-poutres) sans remplissage en maçonnerie rigide (SC1)
	$N \leq 6$	$H \leq 20$	Système mixte voile -portiques (SC2)
	$N \leq 4$	$H \leq 14$	Système mixte équivalent à ossature, avec remplissage en maçonnerie rigide (SC3)
	$N \geq 7$	$H \leq 48$	Contreventement par voiles (SC4)

Tableau III.11. Le choix de type de contreventement en fonction de la zone sismique et le nombres de niveaux (*Suite*)

Zone sismique	Nombre de niveaux	Hauteur H (m)	Choix du type de contreventement
IV	$N \leq 3$	$H \leq 11$	Portique autostable (poteaux-poutres) sans remplissage en maçonnerie rigide (SC1)
	$N \leq 5$	$H \leq 17$	Système mixte voile -portiques (SC2)
	$N \leq 3$	$H \leq 11$	Système mixte équivalent à ossature, avec remplissage en maçonnerie rigide (SC3)
	$N \geq 6$	$H \leq 48$	Contreventement par voiles (SC4)
V et VI	$N \leq 3$	$H \leq 11$	Portique autostable (poteaux-poutres) sans remplissage en maçonnerie rigide (SC1)
	$N \leq 5$	$H \leq 17$	Système mixte voile -portiques (SC2)
	$N \leq 2$	$H \leq 8$	Système mixte équivalent à ossature, avec remplissage en maçonnerie rigide (SC3)
	$N \geq 6$	$H \leq 48$	Contreventement par voiles (SC4)

III.4.3.2 Contrainte de choix du système de fondation

Le système de fondation est également un facteur critique, car il conditionne la transmission des efforts sismiques au sol. Le RPA 2024 établit des règles strictes en fonction de la nature du sol (classé S1 à S5), du type de bâtiment, et de la zone sismique. Chaque solution de conception envisagée dans l'étude sera donc associée au système de fondation le plus adéquat, en se basant sur une typologie de sol donnée et les prescriptions réglementaires en vigueur. Les principaux types fondations considérés sont regroupés dans le Tableau III.12.

Tableau III.12. Le choix de type de fondation

Profondeur du sol H(m)	Surface de fondation S (m ²)	Système de contreventement	Type de fondation
$H \leq 3$	$S \leq 0,6 \times S_{em}$	SC 1 OU SC 2	Semelles isolées
		SC 3	Semelles filantes
	$0,6 \times S_{em} < S \leq 0,8 \times S_{em}$	/	Semelles filantes
	$S > 0,8 S_{em}$	/	Radier générale
$3 < H \leq 6$	/	/	Radier général ou semelles sur puits
$H > 6$	/	/	Semelles ou radier sur pieux

III.5 Conclusion (synthèse sur l'analyse multicritères des bâtiments en BA)

Dans cette partie de notre travail, nous avons consacré une analyse approfondie à l'évaluation multicritère d'un bâtiment en béton armé. Cette approche vise à prendre en compte simultanément plusieurs critères de conception essentiels, afin de guider vers des choix structurels optimaux, à la fois conformes aux exigences réglementaires et cohérents des points de vue technique et économique. Parmi les critères étudiés, on peut citer : le coût de construction, la vulnérabilité sismique, l'état prévisible de l'ISS, le degré de la liquéfaction du sol, et autres critères thermique et acoustique (section III.3).

Il est important de souligner que l'analyse multicritère développée dans ce travail est réalisée dès la phase de l'avant-projet sommaire (APS) (section III.1). Cette étape préliminaire de la conception constitue un moment clé où les grandes lignes du projet sont définies, notamment en termes d'organisation spatiale, de volumétrie, de choix structurels et de faisabilité technique. En intégrant une évaluation multicritère à ce stade, il devient possible d'orienter les décisions vers des solutions optimisées, en tenant compte simultanément des contraintes sismiques, architecturales, urbanistiques, techniques et économiques (section III.4). Cela permet non seulement de vérifier la conformité du projet avec les exigences réglementaires (notamment celles du RPA 2024), mais également de poser les bases d'un dimensionnement rationnel, cohérent et durable, avant même d'engager des études détaillées.

Nous proposons de ramener l'étude multicritère initiale, fondée sur plusieurs critères à deux critères pertinents et représentatifs : le coût de construction et la vulnérabilité sismique. Ce choix repose sur le constat que ces deux critères concentrent, à eux seuls, l'essentiel des enjeux liés à la conception des bâtiments en zones sismiques. Ils intègrent un maximum d'informations sur chaque solution de conception en prenant en compte ses principales composantes, depuis l'esquisse architecturale jusqu'au dimensionnement structurel. D'une part, dans le coût de construction plusieurs paramètres (variables) de conception sont pris en compte tels que : la surface habitable, le nombre d'étages, le type de logement, le système structurel et le type de fondations. D'autre part, la vulnérabilité sismique permet d'évaluer la performance et la sécurité de la structure face aux sollicitations sismiques, en intégrant notamment le type de contreventement, la régularité architecturale, le nombre de niveaux. Ainsi, ces deux critères peuvent être considérés comme fournissant d'une première évaluation fiable d'un ensemble de solutions de conception (alternatives) en intégrant quasiment l'ensemble des informations disponibles à la phase de l'avant-projet sommaire (APS).

L'élimination du critère lié à l'état prévisible de l'interaction sol structure, et les critères thermique et acoustique (tableaux III.9) est due essentiellement à l'insuffisance des données et l'indisponibilité de modèles d'évaluation précis en phase d'APS, permettant de les évaluer et de déterminer leur influence sur le processus décisionnel. Par contre, l'élimination du critère lié à la liquéfaction du sol à l'APS est due à son non influence sur le processus décisionnel, du fait que l'ensemble des actions étudiées sont construites sur le même type du sol.

Au final, dans cette thèse nous allons retenir deux critères : "*cout de construction* " et "*vulnérabilité sismique*" que nous allons détailler puis évaluer. Ce choix est aussi conditionné par leur importance vis-à-vis des intérêts nationaux d'une part et par la disponibilité des données nécessaires d'autre part.

Nous allons définir notre problème d'optimisation multicritères des bâtiments en BA, aussi nous proposerons une méthode de résolution adaptée à notre cas d'étude. L'ensemble de cette démarche constituera l'objet du *chapitre IV* de ce manuscrit.

Chapitre **IV** Mise en œuvre de la méthodologie développée - Etude de cas -

À l'issue du travail mené jusqu'à maintenant, nous confrontons la méthode élaborée avec des cas d'études réels de bâtiments d'habitation. Nous avons choisi des bâtiments d'habitation par rapport à la disponibilité des données nécessaires pour évaluer les deux critères retenus dans le cadre de cette étude. Nous avons choisi une méthode bien adoptée à notre travail qu'est la méthode d'optimisation par colonie de fourmis (ACO). Dans le but de simplifier l'utilisation de la méthodologie pour l'étude des scénarios nécessaires, nous avons développé un programme informatique sur MATLAB. Le classement des solutions de Pareto optimales est effectué en utilisant la méthode du Processus Hiérarchique Analytique (AHP). Une étude comparative est également réalisée avec deux méthodes de classement bien établies, à savoir PROMETHEE et TOPSIS. Les résultats obtenus, analysés puis discutés dans ce chapitre, sont très intéressants et soulignent l'importance et l'intérêt d'une telle approche.

IV.1 Introduction

Afin de valider la pertinence de l'approche méthodologique proposée dans ce travail, une application pratique a été réalisée sur un cas réel de bâtiment en béton armé situé en zones sismiques modérée à forte, selon le zonage défini par le Règlement Parasismique Algérien 2024 (MHUV, 2024). Cette étude de cas a permis d'illustrer concrètement comment l'optimisation multicritère peut être utilisée dès les premières phases de conception pour guider les décisions d'ordres structurelles des concepteurs.

L'objectif principal de cette application est de comparer plusieurs variantes de conception structurelle en s'appuyant sur deux critères fondamentaux : le coût de construction et la vulnérabilité sismique. Ces deux critères ont été choisis pour leur complémentarité et leur importance stratégique, car ils traduisent à la fois la viabilité économique du projet et sa capacité à assurer la sécurité des occupants face au séisme.

La méthode d'optimisation multicritère utilisée dans cette étude a permis d'identifier les solutions offrant le meilleur compromis entre ces deux dimensions, en s'appuyant sur des données techniques fiables, des simulations numériques et une modélisation réaliste des charges et des comportements structuraux. Cette approche constitue ainsi un outil d'aide à la décision performant, particulièrement adapté aux enjeux de la conception parasismique dans le contexte algérien.

La détermination des solutions de conception optimales dans cette étude repose sur l'utilisation de l'optimisation par colonie de fourmis. Une fois les solutions de Pareto identifiées, leur classement est assuré par la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).

Afin de valider la robustesse de l'approche, une comparaison a été effectuée avec deux méthodes de classement reconnues : PROMETHEE et TOPSIS. L'ensemble de cette méthodologie a été appliqué à un cas réel de projet de bâtiment en Algérie (situé à Bejaia), ce qui a permis d'en démontrer la pertinence et de valider les résultats en les confrontant aux données réelles. Il s'agit ainsi de fournir au décideur (ingénieur et/ou maître d'ouvrage) des outils d'aide à la décision rationnels, comparables et adaptables, à même d'éclairer les choix de conception dès la phase de conception préliminaire.

IV.2 Critères de conception retenus

Une particularité de cette étude réside dans la rareté des données pratiques nécessaires à l'évaluation de la conception parasismique des bâtiments en BA. L'Algérie ne fait pas exception à cette problématique et se caractérise par un

déficit notable en matière de données relatives au développement de la conception parasismique. Même lorsque ces données existent, leur accès reste souvent difficile en raison de contraintes administratives, de problèmes de confidentialité, etc. (Benzerra et al., 2012 ; Cherrared et al., 2011 ; Moussaoui et al., 2017 ; Lanseur et al., 2020).

Dans la suite de notre étude, deux critères principaux ont été retenus pour évaluer la conception parasismique des bâtiments en béton armé en Algérie : le *coût de construction et la vulnérabilité sismique*.

IV.2.1 Pourquoi le coût de construction ?

Depuis les années 2000, l'Algérie a engagé une politique nationale ambitieuse visant le développement du secteur de l'habitat (Tableau IV.1). Cette stratégie repose sur une série de programmes gouvernementaux dont l'objectif principal est de garantir à la population un accès au logement, considéré comme une priorité absolue pour l'amélioration des conditions de vie des citoyens et, par extension, pour le renforcement de la stabilité sociale et du développement économique du pays.

Tableau IV.1. Nombre de logements construits en Algérie (2000–2024)

Période	Nombre de logements construits	Remarques principaux
2000-2019	Environ 3.8 millions	Les données spécifiques pour cette période selon le ministre de l'Habitat (CNESE,2024)
2020-2024	Environ 1,5 million	Toutes formules confondues, selon le ministre de l'Habitat (CNESE,2024 ; MHUV ,2020)

Au fil des années, la demande en logements n'a cessé de croître, portée par l'augmentation démographique, l'évolution des modes de vie et l'aspiration à un meilleur cadre de vie. Cette pression constante sur le marché de l'habitat oblige les pouvoirs publics à accélérer la cadence de réalisation de nouveaux projets résidentiels.

Cependant, face à l'urgence de cette demande, les décisions de lancement des projets de construction sont souvent prises sur la base de considérations techniques limitées, notamment en ce qui concerne la sécurité sismique. Le critère économique, pourtant essentiel, est généralement relégué au second plan, se traduisant uniquement par le respect d'un plafond budgétaire sans réelle analyse approfondie du coût de construction.

Ce manque d'évaluation détaillée du coût de construction est problématique, car il ne permet ni d'optimiser les ressources financières mobilisées par l'État, ni de garantir un équilibre durable entre qualité, sécurité et viabilité économique. En effet, dans un contexte où les contraintes budgétaires sont fortes et où la construction de logements à grande échelle représente une part importante des investissements publics, il devient impératif d'intégrer le coût de construction comme un critère central dans les processus de conception, d'évaluation et de prise de décision.

IV.2.1.1 Méthodes de calcul du critère « coût de construction »

Le coût de construction en Algérie constitue un facteur déterminant dans le processus de prise de décision. Les budgets alloués aux projets de logement sont généralement limités, ce qui oblige les décideurs à rechercher des compromis entre sécurité structurelle et viabilité économique.

Les méthodes de calcul développées ici sont basées sur un modèle mathématique comparé par rapport à des travaux de recherche ou développées à travers une réflexion adaptée à chaque situation (voir chapitre III, section III.2.1). Nous rappelons ci-dessous le modèle empirique de calcul établi :

$$C_{tot} = e^{(2 \times 10^{-5} \times A_l + 10,098)} \times A_l$$

- A_l : Surface habitable total m^2

IV.2.2 Pourquoi le critère vulnérabilité sismique ?

La sismicité en Algérie est un phénomène principalement concentré dans la région nord du pays. Cette zone fait partie de la ceinture périméditerranéenne, une région tectonique active marquée par la convergence des plaques lithosphériques africaine et eurasienne selon une direction nord-ouest/sud-est (NW-SE) (Nocquet & Calais, 2004 ; Ayadi & Bezzeghoud, 2015).

Au cours de son histoire, l'Algérie a connu plusieurs séismes de fortes magnitudes, ayant parfois entraîné des pertes humaines et matérielles considérables (Moussaoui & Cherrared, 2015). Le plus ancien séisme bien documenté remonte au 2 janvier 1365, avec le tremblement de terre d'Alger, rapporté par (Ambraseys & Vogt, 1988). Toutefois, des événements sismiques antérieurs ont été identifiés, notamment durant la période romaine, tels que les séismes survenus aux alentours de l'an 700 dans la région d'Aïn Témouchent et de l'an 800 dans celle de Timgad (Yelles-Chaouche et al., 2006). Néanmoins, ces séismes anciens demeurent peu documentés, en raison de l'absence de sources écrites ou d'archives fiables couvrant les époques médiévale et antique en Algérie.

Au cours des dernières décennies, le nord de l'Algérie a été frappé par deux séismes majeurs particulièrement destructeurs : celui d'El-Asnam en 1980, de magnitude $M = 7,3$, et celui de Zemmouri en 2003, de magnitude $M = 6,8$ (Bouhadad, 2014). L'historique de la sismicité en Algérie reste toutefois incomplet, marqué par une couverture irrégulière, notamment en ce qui concerne les séismes de faible à moyenne intensité. En raison de ces limitations, seuls les événements sismiques bien documentés, ayant fait l'objet de révisions et de confirmations par plusieurs études, ont été pris en compte dans cette analyse (voir Tableau IV.2).

Tableau IV.2. Historique des principaux séismes en Algérie (Yelles-Chaouche, 2003).

Date	Localité	Intensité	M	Victime
03/01/1365	Alger	X	-	Plusieurs
03/02/1716	Mitidja	X	-	20 000
09/10/1790	Oran	X	-	2 000
02/03/1825	Blida	X	-	7 000
22/08/1856	Djidjelli	X	-	-
02/01/1867	Mouzia	X-XI	-	100
16/11/1869	Aurès	IX	-	30
29/11/1887	Mascara	IX-X	-	80
15/01/1891	Gouraya	X	-	38
01/01/1901	Sidi-Aich	IX	-	-
16/09/1907	Constantine	VIII	-	-
24/06/1910	Sour El Ghozlane	X	-	81
12/02/1946	Bejaia	IX	-	264
09/09/1954	Orléans-Ville (Chlef)	X	6.7	1243
13/11/1957	Sétif	VIII	-	-
10/10/1980	El Asnam	X	7.3	2633
27/10/1985	Constantine	VIII	5.9	10
29/10/1989	Tipaza	VIII	6.0	22
18/08/1994	Mascara	VII	5.7	175
04/09/1994	Alger	VII	5.7	-
22/12/1999	Timouchent	VII	5.7	25
10/11/2000	Beni-Ourtilane	VII	5.4	04
21/05/2003	Boumerdès	X	6.8	2300
20/03/2006	Lâalam	VII	5.2	04
14/05/2010	Beni Ilmane	VII	5.2	04

Ces dernières années, les risques de catastrophe ont augmenté en raison de plusieurs facteurs : la densification urbaine, une gestion inefficace de l'aménagement du territoire, la construction d'infrastructures et de services inadaptés, ainsi qu'une dégradation progressive de l'environnement (Harbi et al., 2007 ; Moussaoui & Cherrared, 2015). Le parc immobilier ancien, qui représente une part importante du bâti en Algérie, constitue la catégorie la plus vulnérable face aux séismes, avec un risque élevé d'effondrement (Moussaoui & Cherrared, 2015). Par conséquent, évaluer la performance sismique des bâtiments, en intégrant explicitement le critère de vulnérabilité s'impose comme une priorité.

IV.2.2.1 Méthode de calcul de la « Vulnérabilité structurelle »

$$V_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m$$

- V_I^* : Valeur la plus probable de l'indice de vulnérabilité V_I (Tableau IV.3) ;
- ΔV_R : Facteur de vulnérabilité régional ; ce facteur permet de prendre en compte les propriétés de typologies spécifiques à un niveau régional. Son évaluation se fait sur la base d'un jugement d'expert ou sur l'interprétation de données de vulnérabilité existantes (retour post-sismique par exemple) ;
- ΔV_m : Modificateur de comportement ; Le facteur ΔV_m représente l'influence des paramètres autres que la typologie sur la réponse de la structure aux sollicitations sismiques. Le facteur ΔV_m est calculé comme la somme des facteurs de vulnérabilité V_m ($\Delta V_m = \sum V_m$), il correspond aux différents paramètres identifiés dans les Tableaux (Tableau IV.4 et Tableau IV.5).

Tableau IV.3. Indice V_I^* en fonction de la typologie du bâtiment (CETE, 2008)

Typologie	Description	V_I^*
M.1.1	Moellons	0.873
M.1.2	Pierres appareillées	0.74
M.1.3	Pierres de taille	0.616
M.2	Adobe	0.84
M.3.1	Planchers bois	0.74
M.3.2	Voûtes en maçonnerie	0.776
M.3.3	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0.704
M.3.4	Planchers en béton armé	0.616
M.4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0.451
M.5	Maçonnerie globalement renforcée	0.694
RC.1	Structure poteaux poutres en béton armé	0.042
RC.2	Murs porteurs en béton armé	0.386
RC.3.1	Murs de remplissage en maçonnerie, structure régulière	0.402
RC.3.2	Structures poteaux poutres irrégulières	0.522
RC.4	Structures mixtes en béton armé (portiques et murs)	0.386
RC.5	Murs préfabriqués en béton armé	0.384
RC.6	Structures préfabriquées en béton armé	0.544
S.1	Ossatures métalliques en portique	0.363
S.2	Ossatures métalliques avec triangulation	0.287
S.3	Portiques + remplissage en maçonnerie non armée	0.484
S.4	Portiques + murs en béton armé coulés en place	0.224
S.5	Structure mixte béton-acier	0.402
W	Structure en bois	0.447

Tableau IV.4. Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en béton armé (CETE, 2008)

Facteurs de vulnérabilité		Niveau de la réglementation		
		Pas de code ou niveau bas de protection	Niveau de protection moyen	Haut niveau de protection
Niveau du code		+0.1	0	-0.16
Mauvais entretien		+0.04	+0.02	0
Nombre d'étage	1 à 2	-0.04	-0.04	-0.04
	3, 4 ou 5	0	0	0
	6 et plus	+0.08	+0.06	+0.04
Irrégularité en plan	Forme	+0.04	+0.02	0
	Torsion	+0.02	+0.01	0
Irrégularité en élévation		+0.04	+0.02	0
Poteaux courts		+0.02	+0.01	0
Fenêtres arquées		+0.04	+0.02	0
Joint parasismique insuffisant		+0.04	0	0
Fondations	Semelles filantes	-0.04	0	0
	Semelles filantes avec longrines	0	0	0
	Semelles isolées	+0.04	0	0
Sol	Pente	+0.02	+0.02	+0.02
	Escarpeement	+0.04	+0.04	+0.04

Tableau IV.5. Valeurs des facteurs V_m pour les bâtiments en maçonnerie (CETE, 2008)

Facteurs de vulnérabilité	Paramètres	V_m
État d'entretien	Bon	-0.04
	Mauvais	+0.04
Nombre d'étage	Construction peu élevée (1 à 2 niveaux)	-0.02
	Construction moyennement élevée (3 à 5 niveaux)	+0.02
	Construction élevée (6 niveaux et plus)	+0.06
Système structural	Épaisseur des murs	-0.04 à +0.04
	Distance entre les murs	
	Connexion entre les murs	
	Connexion entre éléments horizontaux et verticaux (diaphragmes)	
Étage souple	Transparence, démolition	+0.04
Irrégularité en plan	Forme	+0.04
	Torsion d'ensemble	+0.02
Irrégularité en élévation		+0.02
Éléments résistants superposés		+0.04
Toiture	Poids de la toiture + poussée sur les murs	+0.04
	Connections de la toiture	
Interventions de confortement		-0.08 à +0.08
Éléments asismiques	Barbacanes, contreforts, arcs	Pas d'indication
Interaction entre bâtiments (position dans l'îlot)	Au centre	-0.04
	Au coin	+0.04
	Isolé	+0.02
	En tête d'îlot	+0.06
Interaction entre bâtiments (en élévation)	Planchers décalés	+0.02
	Bâtiments de hauteurs différentes	-0.04 à +0.04
Fondations	Fondations à des niveaux différents	+0.04
Morphologie du sol	Pente	+0.02
	Escarpeement	+0.04

IV.3 Conclusion partielle

Jusqu'à présent, notre approche s'est appuyée sur deux critères que nous avons jugés à la fois prioritaires et en adéquation avec notre domaine d'expertise, et sur lesquels s'est articulée la méthodologie proposée. Il s'agit, d'une part, de la vulnérabilité sismique des bâtiments, et d'autre part, du coût de construction.

Ces deux critères constituent ainsi le cœur de notre démarche d'évaluation et d'optimisation. Leur prise en compte conjointe permet de développer des solutions équilibrées, réalistes et adaptées aux spécificités du contexte algérien.

IV.4 Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème

Le choix de la méthode d'optimisation constitue une étape fondamentale dans tout processus de conception multicritère, en particulier lorsqu'il s'agit d'un domaine aussi complexe que celui de la conception parasismique des bâtiments en béton armé le moins couteux possible.

Dans le cadre de ce travail, le problème d'optimisation à traiter se distingue par plusieurs caractéristiques essentielles. Il implique la gestion simultanée de plusieurs objectifs, notamment *la minimisation du coût de construction et de la vulnérabilité sismique*, ce qui nécessite une approche d'optimisation multi-objectifs. De plus, le problème évolue dans un *espace de solutions vaste et complexe*, avec des *relations non linéaires entre les variables* de conception, rendant la recherche de solutions optimales plus difficile. Il doit également faire preuve de robustesse face à *l'incertitude et à la variabilité* des données d'entrée, telles que les *paramètres de l'algorithme utilisé* (taux de phéromone, nombres de fourmis, les valeurs du facteur heuristique, taux d'évaporation, nombres d'itération). Enfin, il doit être *souple à mettre en œuvre dès les phases de conception préliminaire*, où l'accès aux données précises est souvent limité, ce qui impose l'utilisation de modèles approximatifs ou adaptatifs (Figure IV.1).

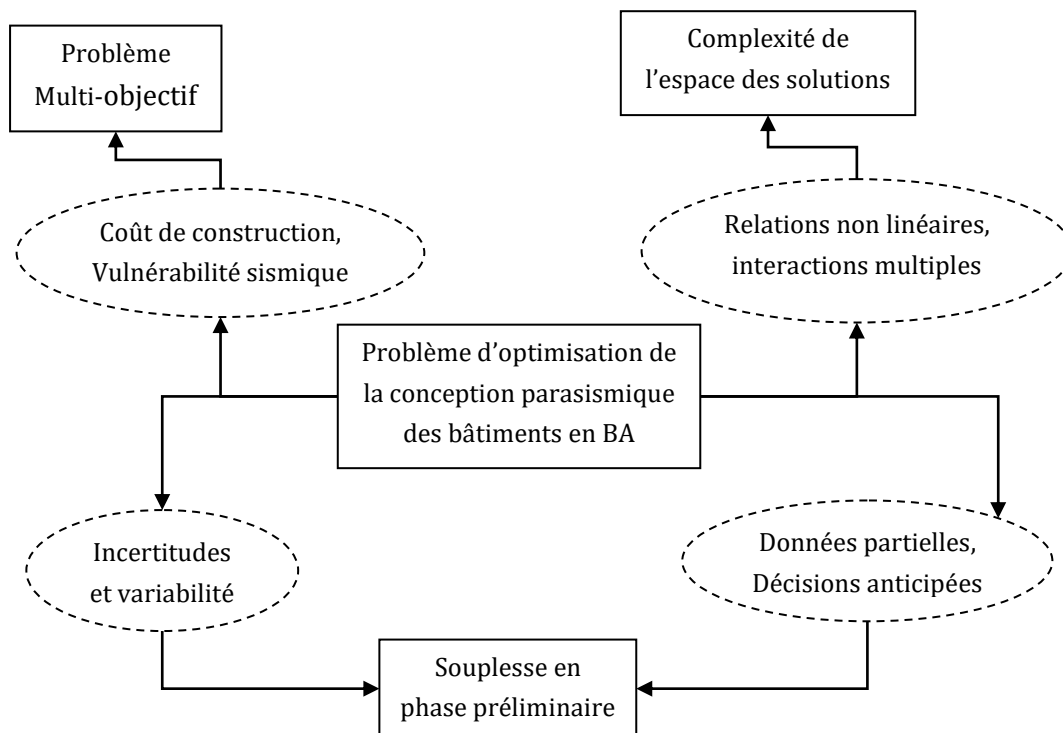


Figure IV.1. Problématique de l'optimisation, en conception parasismique

IV.4.1 Caractéristiques du problème d'optimisation à traiter

Divers types de variables significatives ont été identifiés, puis sélectionnés en fonction de leur impact potentiel. Les fonctions objectifs associées ont ensuite été modélisées de manière à refléter fidèlement les enjeux de la conception.

IV.4.1.1 Variables de décision

Dans le problème d'optimisation, les variables de décision représentent les paramètres de conception de la structure du bâtiment (par exemple : le nombre d'étages du bâtiment, le type de fondation, la morphologie du sol, etc.). Les variables d'optimisation ainsi que leurs valeurs possibles sont présentées dans le Tableau IV.6 .

Tableau IV.6. Description des variables de décision

Variable	Définition	Valeur de la variable	Valeur de la fonction (Cherif et al. 2017; Milutinovic and Trendafiloski 2003; Taibi et al. 2020)
x_{1i}	Nombre d'étages du bâtiment i	$x_{1i} \in \{1, 2, 3, \dots, 13\}$	$f_1(x_{1i}) = \begin{cases} -0.04 & \text{si } x_{1i} \in \{1, 2\} \\ 0 & \text{si } x_{1i} \in \{3, 4, 5\} \\ 0.06 & \text{si } x_{1i} \geq 6 \end{cases}$ $f_2(x_{1i}, x_{2i}) = \begin{cases} 0.442 & \text{si } x_{2i} = 0, x_{1i} \in \{1, 2, 3, 4\} \\ 0.522 & \text{si } x_{2i} = 1, x_{1i} \in \{1, 2, 3, 4\} \\ 0.386 & \text{si } x_{1i} \geq 5, x_{2i} \in \{0, 1\} \end{cases}$
x_{2i}	Forme du bâtiment i	$x_{2i} = \begin{cases} 1 & \text{si irrégulier} \\ 0 & \text{si régulier} \end{cases}$	$f_3(x_{2i}) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_{2i} = 0 \\ 0.02 & \text{si } x_{2i} = 1 \end{cases}$
x_{3i}	Forme verticale du bâtiment i	$x_{3i} = \begin{cases} 1 & \text{si irrégulier} \\ 0 & \text{si régulier} \end{cases}$	$f_4(x_{3i}) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_{2i} = 0 \\ 0.02 & \text{si } x_{2i} = 1 \end{cases}$
x_{4i}	Type de fondation du bâtiment i	$x_{4i} = \begin{cases} 1 & \text{si semelles isolées} \\ 2 & \text{si semelles filantes} \\ 3 & \text{si radier général} \end{cases}$	$f_5(x_{4i}) = \begin{cases} 0.04 & \text{si } x_{4i} = 1 \\ -0.04 & \text{si } x_{4i} = 2 \\ 0 & \text{si } x_{4i} = 3 \end{cases}$
x_{5i}	Morphologie de sol	$x_{5i} = \begin{cases} 1 & \text{si pente} \\ 0 & \text{si escarpement} \end{cases}$	$f_6(x_{5i}) = \begin{cases} 0.02 & \text{si } x_{5i} = 0 \\ 0.04 & \text{si } x_{5i} = 1 \end{cases}$
x_{6i}	Position du bâtiment i dans l'ilot	$x_{6i} = \begin{cases} 1 & \text{si Au centre} \\ 2 & \text{si En coin} \\ 3 & \text{si En tête de l'ilot} \end{cases}$	$f_7(x_{6i}) = \begin{cases} -0.04 & \text{si } x_{6i} = 1 \\ 0.04 & \text{si } x_{6i} = 2 \\ 0.06 & \text{si } x_{6i} = 3 \end{cases}$
y_i	Surface habitable d'un étage du bâtiment i	$y_i \in [y_i^{\min}, y_i^{\max}]$ (m ²)	$y_i \in [150, 580]$

IV.4.1.2 Contraintes d'optimisation

Les contraintes du problème d'optimisation sont dictées par les différentes exigences réglementaires des bâtiments en béton armé (RPA 2024). Comme mentionné précédemment, l'objectif de l'optimisation est de minimiser à la fois le coût du bâtiment et son indice de vulnérabilité. Pour ce faire, un taux de pénalité est utilisé pour prendre en compte les contraintes dans l'évaluation des performances de chaque solution de conception. L'ensemble détaillé de ces contraintes est présenté dans le Tableau IV. 7, qui précise les limites réglementaires à respecter pour que les solutions soient considérées comme admissible.

Tableau IV. 7. Formulation des contraintes d'optimisation

Critère	Contraintes	Variable définition/Observations
Type de fondation	$\begin{cases} \text{si } 1 \leq x_{1i} \leq 4 \Rightarrow x_{4i} = 1 \\ \text{si } 5 < x_{1i} \leq 9 \Rightarrow x_{4i} \in \{2,3\} \\ \text{si } x_{1i} \geq 10 \Rightarrow x_{4i} = 3 \end{cases}$	x_{1i} : Nombre d'étages du bâtiment i x_{4i} : Type de fondation du bâtiment i (RPA 2024)
Surface habitable	$\begin{cases} \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i \geq A_{10} \\ \sum_{i=1}^N y_{0i} \leq S_T \end{cases}$	N : Nombres de bâtiments y_i : surface habitable d'un étage dans le bâtiment i (m ²). A_{10} : la surface habitable totale minimale du projet (solution minimale) y_{0i} : surface habitable du rez-de-chaussée de chaque bâtiment (m ²) S_T : l'emprise au sol (m ²)

IV.4.1.3 Les fonctions objectif

La fonction objective exprime la performance de chaque solution de bâtiment Deux objectifs sont ainsi pris en compte dans cette étude : la minimisation du coût de construction et celle de la vulnérabilité sismique du bâtiment. Ces deux objectifs sont formulés comme indiqué dans l'Équation 11.

$$\begin{cases} F_1(x_{1i}, y_i) = e^{(2 \times 10^{-5} \sum_{i=1}^N (x_{1i} y_i + 10.098))} \times \sum_{i=1}^N (x_{1i} y_i) \\ F_2(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i}) = \frac{\sum_{i=1}^N F_{2i}(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i})}{N} \end{cases} \quad (\text{Eq.11})$$

Où :

F_1 : Fonction objectif « coût total de construction de chaque solution ».

F_2 : Fonction objectif « indice de vulnérabilité » (Équation 12).

$$F_2(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i}) = \underbrace{f_2(x_{1i})}_{V_i^*} + \underbrace{f_1(x_{1i}) + f_3(x_{2i}) + f_4(x_{3i}) + f_5(x_{4i}) + f_6(x_{5i}) + f_7(x_{6i})}_{\sum_{j=1}^n V_{m_j}}$$

(Eq. 12)

Où, pour le bâtiment i :

$f_1(x_{1i})$: vulnérabilité liée au nombre d'étages ;

$f_2(x_{1i}, x_{2i})$: vulnérabilité liée au système structurel ;

$f_3(x_{2i})$: vulnérabilité liée à la forme en plan ;

$f_4(x_{3i})$: vulnérabilité liée à la forme en élévation ;

$f_5(x_{4i})$: vulnérabilité liée au type de fondation ;

$f_6(x_{5i})$: vulnérabilité liée à la morphologie du sol ;

$f_7(x_{6i})$: vulnérabilité liée à la position du bâtiment dans l'îlot.

Enfin, le modèle mathématique de l'optimisation multicritère appliquée à la conception parasismique des bâtiments en béton armé (BA) peut être formulé comme suit (équation 13) :

$$\text{Minimiser } \begin{cases} F_1(x_{1i}, y_i) = e^{(2 \times 10^{-5} \sum_{i=1}^N (x_{1i} y_i + 10.098))} \times \sum_{i=1}^N (x_{1i} y_i) \\ F_2(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i}) = \frac{\sum_{i=1}^N F_{2i}(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, x_{6i})}{N} \end{cases}$$

$$\text{Sous contraintes : } \begin{cases} \text{si } 1 \leq x_{1i} \leq 4 \Rightarrow x_{4i} = 1 \\ \text{si } 5 < x_{1i} \leq 9 \Rightarrow x_{4i} \in \{2, 3\} \\ \text{si } x_{1i} \geq 10 \Rightarrow x_{4i} = 3 \\ \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i \geq A_{I0} \\ \sum_{i=1}^N y_{0i} \leq S_T \end{cases} \quad (\text{Eq. 13})$$

Où : $x_{1i} \geq 1$, $x_{2i}, x_{3i}, x_{5i} \in \{0, 1\}$ et $x_{4i}, x_{6i} \in \{1, 2, 3\}$

Nous avons modélisé le cas général comme un problème à deux critères sous contraintes : *minimiser le coût total de construction* des bâtiments, et *minimiser l'indice de vulnérabilité sismique* de chaque bâtiment, en prenant en compte plusieurs facteurs (le nombre d'étages du bâtiment, le système structural utilisé, etc.).

IV.4.2 Choix de la méthode d'optimisation

L'optimisation de la conception parasismique des bâtiments en BA fait intervenir des fonctions objectives généralement linéaires et continues. Les méthodes d'optimisation dites déterministes, qui reposent sur la différentiabilité ou la non-linéarité des fonctions objectif, ne sont pas adaptées dans ce contexte. De plus, les nombreuses contraintes réglementaires et les interactions entre critères de performance rendent le problème difficile à modéliser analytiquement. Il devient alors nécessaire de recourir à des méthodes d'optimisation dites "métaheuristiques", capables de traiter efficacement des espaces de recherche discrets, complexes et fortement contraints.

Deux types de métaheuristiques se distinguent : les méthodes de voisinage ou méthode à trajectoire et les méthodes distribuées ou méthodes à population.

Les méthodes à trajectoire, souvent assimilées à des méthodes de recherche locale, se caractérisent par leur capacité à explorer l'espace de solutions en suivant un chemin unique, généralement guidé par un critère d'optimalité. Bien qu'efficaces pour identifier un optimum local dans des problèmes monoobjectifs, ces approches présentent des limites importantes lorsqu'il s'agit de problèmes d'optimisation multiobjectif.

En effet, l'objectif de l'optimisation multicritère n'est pas de trouver une unique solution optimale, mais de déterminer un ensemble de solutions non dominées formant le front de Pareto. Ce front représente l'équilibre entre les différents objectifs, où l'amélioration d'un critère se fait généralement au détriment d'un autre. Les méthodes à trajectoire, de par leur nature séquentielle et ciblée, ne permettent pas de couvrir efficacement cette diversité de solutions, ce qui les rend inadaptes pour la recherche d'un tel front optimal.

Les méthodes à population reposent sur l'amélioration itérative d'un ensemble de solutions, appelées collectivement "population". Contrairement aux méthodes à trajectoire unique, ces approches permettent une exploration simultanée de plusieurs régions de l'espace de recherche, ce qui favorise une recherche globale et réduit le risque de convergence prématurée vers un optimum local.

L'efficacité de ces méthodes dépend en grande partie de leur mécanisme de sélection, de variation (comme la mutation ou le croisement) et de remplacement, ainsi que de la configuration fine de leurs paramètres (taille de la population, nombre d'itérations, taux de phéromone, etc.).

Ce type d'approche s'avère particulièrement adapté aux problèmes d'optimisation multiobjectif, dans lesquels il est essentiel de générer un ensemble de solutions non dominées constituant le front de Pareto. Grâce à leur capacité à maintenir une

diversité de solutions tout en améliorant progressivement la qualité des individus, les méthodes à population représentent un cadre puissant pour atteindre cet objectif.

On distingue principalement trois types d’algorithmes à population dans le domaine de l’optimisation :

- Les algorithmes génétiques (GA – *Genetic Algorithms*), inspirés des principes de la sélection naturelle et de l’évolution biologique,
- Les algorithmes d’optimisation par colonie de fourmis (ACO – *Ant Colony Optimization*), basés sur le comportement collectif des fourmis dans leur recherche de nourriture,
- Et d’autres variantes comme les algorithmes à essaim de particules (PSO – *Particle Swarm Optimization*), fondés sur la dynamique de groupe observée chez certains animaux (vol d’oiseaux).

Ces méthodes sont particulièrement efficaces dans les contextes complexes, notamment pour les problèmes multi-objectifs nécessitant la génération d’un front de Pareto représentatif.

La liste des paramètres de configuration de la version de base de chacun de ces algorithmes est présentée dans le Tableau IV.8 (Siarry, 2014). Ces paramètres incluent, entre autres, la taille de la population, les taux de croisement et de mutation pour les algorithmes génétiques, ou encore les coefficients de mise à jour des phéromones pour l’algorithme ACO.

Tableau IV.8. Paramètres de réglage des algorithmes d’optimisation à population

Algorithme génétique AG	Optimisation par colonie de fourmis ACO	Optimisation par essaim particulaire PSO
- Nombre d’individus - Nombre d’enfants - Type de population (vecteur ou binaire) - Méthode de croisement - Méthode de sélection - Probabilité de croisement - Probabilité de mutation - Nombre d’itération totale	- Influence phéromones - Influence visibilité - Evaporation - Valeur initiale des phéromones - Nombre de fourmis - Nombre d’itération totale	- Inertie (coefficient de confiance) - Coefficient de confiance cognitive. - Coefficient de confiance sociale. - Nombre de particules - Le type de voisinage Nombre d’itération totale

Dans le domaine du génie civil et de la construction, l’ACO a été utilisée par plusieurs auteurs. (Bamdad et al., 2018) ont utilisé l’ACO pour l’optimisation énergétique des bâtiments dans un contexte d’incertitude. (Seo et al., 2018) l’ont appliquée à la répartition sismique optimale des colonnes en béton armé dans un

bâtiment scolaire existant. (Zhao et al., 2019) ont eu recours à l'ACO pour contrôler et optimiser la qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments. (Abdallah et al., 2009) l'ont utilisée pour résoudre des problèmes de gestion de projet. (Shea et al., 2006) s'en sont servis pour l'optimisation multicritère de l'enveloppe de bâtiments à panneaux. Enfin, (Ng & Zhang, 2008) ont utilisé l'ACO pour optimiser les délais et les coûts de construction.

Dans le contexte de l'optimisation des bâtiments en béton armé (BA), les algorithmes ACO offrent une solution robuste pour la conception parasismique.

L'ACO, en tant qu'algorithme évolutionnaire, permet d'explorer efficacement l'ensemble des solutions possibles tout en tenant compte de ces divers objectifs. À travers l'utilisation de "fourmis" simulées, qui explorent l'espace de conception en fonction des règles définies par les critères de performance (coût, vulnérabilité sismique, etc.), l'algorithme permet de générer un front de Pareto représentant les meilleures solutions, où aucune amélioration d'un critère ne peut être obtenue sans détériorer un autre. Cela permet ainsi de proposer plusieurs solutions de conception pour les bâtiments en béton armé.

C'est pour ces raisons qu'une méthode à population, en l'occurrence l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO), a été retenue dans le cadre de cette étude.

IV.4.3 Présentation de l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO)

L'optimisation par colonies de fourmis (ACO) est une technique métaheuristique relativement récente, proposée pour la première fois au début des années 1990 par Marco Dorigo et Thomas Stützle pour résoudre le problème du voyageur de commerce (TSP). Compte tenu du succès de cet algorithme, son utilisation s'est rapidement étendue à de nombreux autres domaines (Wang et al., 2016).

IV.4.3.1 Adaptation de la super colonie de fourmis

Jusqu'à présent, l'optimisation par colonie de fourmis (ACO) désigne une métaheuristique inspirée du comportement des colonies de fourmis réelles lors de la recherche de nourriture (Talbi, 2009). Dans ce travail, nous nous inspirons du comportement d'un phénomène que nous appelons supercolonie de fourmis. Ce comportement est spécifique à l'espèce des fourmis argentines.

En effet, selon des travaux récents (Idres & Radjef, 2018 ; van Wilgenburg et al., 2010), des chercheurs en biologie ont observé que, contrairement à d'autres espèces, deux fourmis argentines issues de nids différents se reconnaissent comme étant de la même colonie lorsqu'elles se trouvent dans une même zone de

recherche. Ce comportement coopératif particulier améliore significativement les performances de l'optimiseur basé sur ACO.

Dans cette étude, un algorithme d'optimisation par super colonie de fourmis est utilisé. Le paragraphe suivant résume les principales étapes de l'algorithme employé.

IV.4.3.2 Structure de l'algorithme

A- Etape 01 : Construction du graphe du réseau

L'algorithme proposé n'utilise pas une seule colonie de fourmis, mais plusieurs colonies, une pour chacun des bâtiments (N bâtiments). Les fourmis issues des N colonies explorent simultanément l'espace de recherche à la recherche de solutions optimales. Elles construisent leurs solutions en se déplaçant sur un graphe (V, S) (Figure IV.2), où les sommets V représentent l'ensemble des variables de décision.

Les valeurs entières que peut prendre une variable correspondent à un bloc de sommets non connectés entre eux. Le bloc qui regroupe les sommets sources représente les N bâtiments, et chaque sommet d'un bloc est connecté à tous les sommets du bloc suivant. L'ensemble S désigne les arêtes utilisées pour relier ces sommets, permettant ainsi aux fourmis de parcourir le graphe et de générer des combinaisons possibles de décisions.

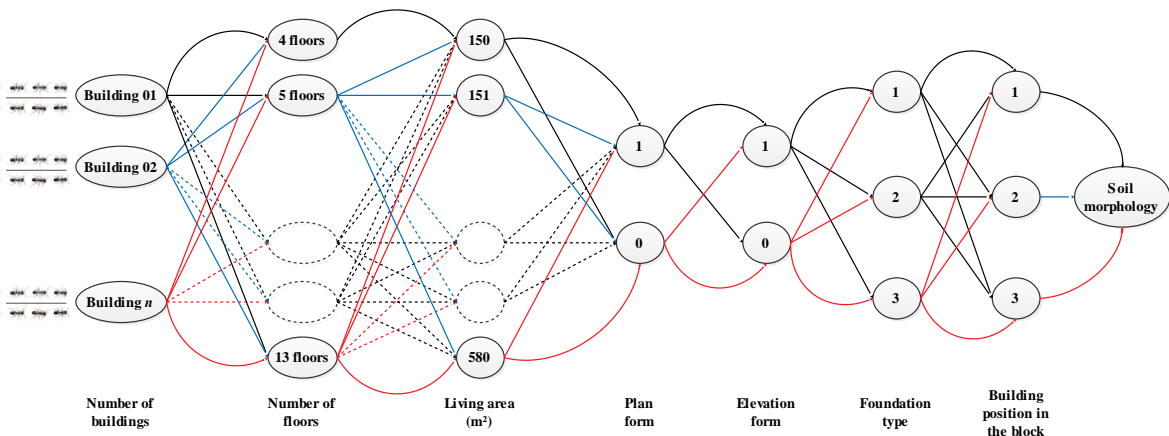


Figure IV.2. Chemins possibles empruntés par les fourmis pour la construction de solutions optimales

- **Parcours du graphe**

Tout d'abord, une colonie de fourmis est placée sur chaque sommet représentant un bâtiment. Les fourmis de chaque colonie se déplacent simultanément du sommet source jusqu'au dernier sommet (représentant

la morphologie du sol), selon un choix probabiliste. Une fois arrivées au dernier sommet, les fourmis combinent leurs solutions en s'appuyant sur leur mémoire : ainsi, la k^{ème} fourmi de chaque colonie combine sa solution avec celle de la k^{ème} fourmi des autres colonies.

Dans un second temps, après le calcul des fonctions objectifs, les fourmis reviennent progressivement sur le chemin qu'elles ont emprunté pour déposer des phéromones sur chaque sommet visité. À l'issue de cette phase, des fourmis élitistes interviennent. Leur rôle est de sélectionner les solutions non dominées et de les récompenser en déposant une quantité supplémentaire de phéromone sur les chemins qui donnent ces solutions.

- **Initialisation des paramètres**

Soit $\tau(i)$ la quantité de phéromone déposée sur chaque sommet lorsqu'une fourmi se déplace sur ces derniers pour construire la solution (le chemin) du sommet i au sommet j (d'un bloc à un autre).

Cette phase commence par l'initialisation des paramètres spécifiques à l'ACO, tels que le nombre de fourmis, le taux d'évaporation (ρ) et les paramètres de la règle de transition (α, β, η). Les traces de phéromones sont initialisées comme suit : $\tau(ij) = q$ où q est une petite constante positive, qui ne peut pas être égale à zéro, car elle constitue la base pour le calcul de la probabilité de transition lorsque $t=0$.

L'information heuristique η (visibilité) est ensuite initialisée pour chaque bloc de sommets, en fonction de l'effet de la valeur de chaque sommet sur le calcul des fonctions objectifs.

- **Choix de transition**

Une fourmi placée sur le sommet i à l'instant t choisit son sommet de destination j de destination en fonction de la visibilité η_{ij} de son successeur et de la quantité de phéromones $\tau(i)$ déposée sur ce dernier. Ce choix est effectué de manière aléatoire, selon une probabilité de transition définie par la formule suivante (Equation 14) :

$$P_{ij}(t) = \frac{\tau(i)^\alpha \times \eta(i)^\beta}{\sum_{j \in C} \tau(i)^\alpha \times \eta(i)^\beta} \quad (\text{Eq.14})$$

- C : ensemble des sommets représentant une même variable.

- Les paramètres α et β sont utilisés pour déterminer l'importance relative de l'intensité des traces de phéromone et de la visibilité (information heuristique) dans les choix de transition effectués par les fourmis.

B- Etape 02 : Mise à jour des phéromones

Après que toutes les fourmis ont terminé la construction de leurs solutions, les traces de phéromone sont révélées. Cette mise à jour s'effectue en deux étapes : Dans un premier temps, toutes les traces de phéromone sont réduites, afin de simuler l'évaporation, en multipliant chaque composante de phéromone par un facteur de persistance. Dans un second temps, les fourmis déposent une certaine quantité de phéromone à chaque nouvelle itération. La formule de mise à jour devient alors (Équation 15) :

$$\tau(t) = \tau(t-1) \times (1 - \rho) + \Delta(\tau_1(t) + \tau_2(t)) \quad (\text{Éq.15})$$

Avec :

- $\tau(t-1)$ Le taux de phéromone déposé à l'itération $(t-1)$;
- $\tau_1(t)$ Le taux de phéromone déposé par les fourmis sur les solutions réalisables ;
- $\tau_2(t)$ La quantité de phéromone déposée par les fourmis élitistes.

Notons que, dans notre algorithme, cette instruction est associée aux paires d'objectifs, ce qui nous a conduits à introduire trois manières de calcul de la quantité de phéromone à déposer, en lien avec les variables des deux fonctions objectives. La variable y_i n'intervient que dans la première fonction (le coût), la quantité de phéromone qui sera déposée sur le sommet représentant les surfaces y_i est donc calculée en fonction de F_2 (indice de vulnérabilité).

La variable x_{1i} intervient dans les deux fonctions objectives ; ainsi, le niveau de phéromone associé est déterminé à partir de la fonction (F_2) . Pour les autres sommets, le taux de phéromone à déposer sera également calculé en fonction de (F_2) , car ces sommets n'interviennent que dans la seconde fonction, liée à la vulnérabilité.

Si la solution construite par les fourmis n'est pas faisable, aucune phéromone n'est déposée sur le chemin emprunté $\tau_1(t) = 0$. En revanche, pour intensifier la recherche de solutions efficaces, une récompense est attribuée sous forme d'ajout de phéromone. Cette étape est réalisée par des fourmis élitistes, en nombre égal au nombre de solutions non dominées (Équation 16).

$$\tau_2(t) = \begin{cases} 1 & \text{si la solution est efficace} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (\text{Éq.16})$$

C- Étape 3 : Fin de l'algorithme

L'algorithme évolue jusqu'à atteindre un nombre maximal d'itérations. La Figure IV.3 illustre les différentes étapes de l'algorithme ACO proposé.

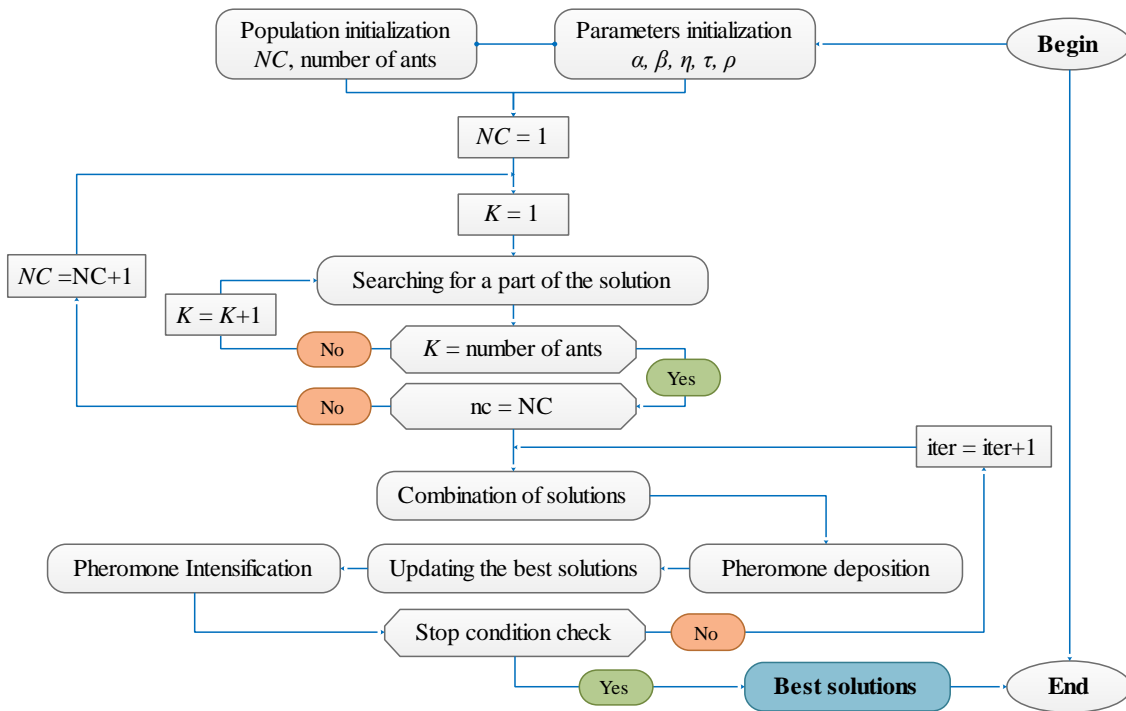


Figure IV.3. Algorithme d'optimisation du modèle ACO (Ant Colony Optimization) proposé

IV.5 Présentation du cas d'étude

La méthodologie proposée est appliquée à des cas réels de bâtiments résidentiels situés dans la ville de Bejaïa, au nord de l'Algérie. Les structures étudiées sont en béton armé et ont été conçues conformément au dernier code parasismique algérien. La Figure IV.4 illustre le plan de masse ainsi que les vues en plan et en élévation des bâtiments analysés. Les caractéristiques architecturales et financières de ces bâtiments sont résumées dans les Tableaux (Tableau IV.9 et Tableau IV.10).

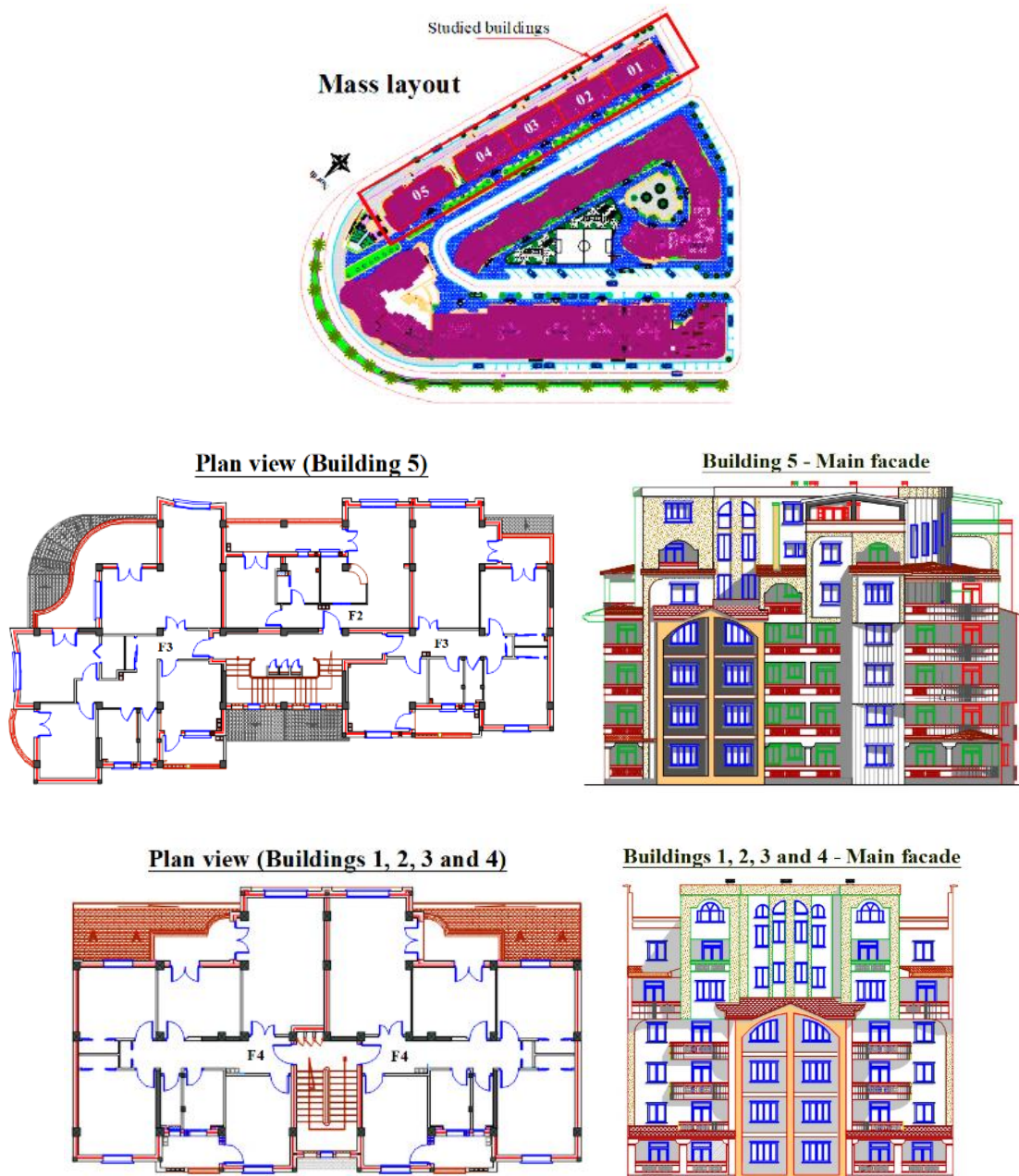


Figure IV.4. Vues en plan et en élévation des bâtiments étudiés

Tableau IV.9. Caractéristiques architecturales des bâtiments étudiés

Bâtiment	Nombres d'étages	Nombres de logements / bâtiment					Surface habitable par logement (m ²)				
		F2	F3	F4	F5	F6	F2	F3	F4	F5	F6
1	R+5	2	4	2	1	1	50.06	89.31	158.8	191.26	206.65
2	R+5	3	4	1	1	1	59.08	100.81	176.77	195.31	206.65
3	R+5	1	6	1	1	1	50.06	100.81	181.98	189.12	206.65
4	R+5	4	2	2	1	1	57.48	86.92	170.14	191.26	206.65
5	R+5	3	7	4	/	1	62.92	98.31	177.43	/	206.65

Tableau IV.10. Informations sur le coût et la vulnérabilité des bâtiments étudiés

Bâtiment	Surface habitable total A_i (m ²)	Coût Infrastructure C_{inf} (MDZD*)	Coût Superstructure C_{sup} (MDZD)	Coût Total C_{tot} (MDZD)	Indice Vulnerability
1	1172.87	9.80	21.7	31.5	0.506
2	1159.21	9.68	21.4	31.1	0.582
3	1232.67	10.3	22.8	33.1	0.526
4	1141.95	9.54	21.1	30.6	0.622
5	1793.30	15	33.1	48.1	0.642

IV.5.1 Étude statistique et condition d'arrêt

Dans cette section, une analyse statistique est réalisée afin d'évaluer la robustesse de l'approche proposée, avant d'engager le calcul final. Cette analyse vise principalement à déterminer les conditions optimales d'arrêt du processus d'optimisation par algorithme ACO (Ant Colony Optimization).

En effet, une question fondamentale dans tout problème d'optimisation, une fois le modèle formulé, concerne le moment et le critère d'arrêt de l'algorithme : doit-on interrompre le processus en fonction des attentes de l'utilisateur (valeur cible) ? Selon la valeur optimale affichée par l'algorithme (optimum global) ? Ou encore en fonction d'un compromis entre une solution optimale et une contrainte à ne pas dépasser, imposée par le cadre d'optimisation (voir Figure IV.5) ?

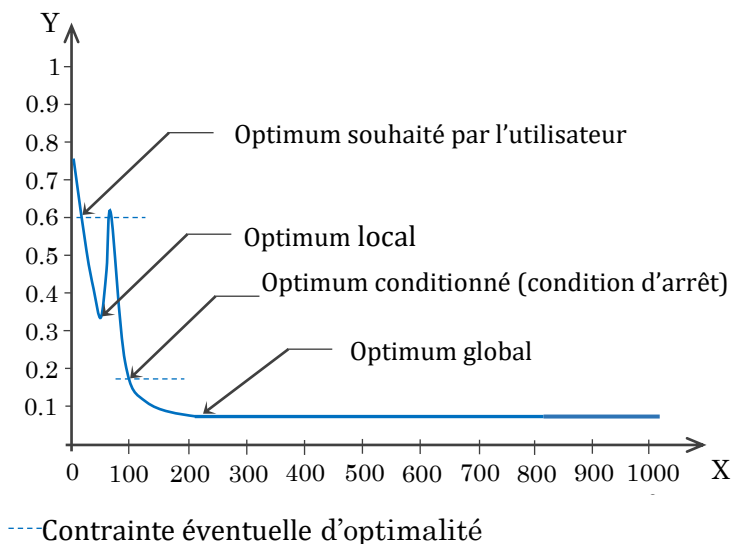


Figure IV.5. Optimums et conditions d'arrêts

La Figure IV.5 vient également justifier le choix de la méthode ACO (Ant Colony Optimization). Cette technique, issue des méthodes d'intelligence artificielle, se

distingue par sa robustesse et sa capacité à explorer efficacement l'ensemble de l'espace de recherche, réduisant ainsi le risque de convergence vers un optimum local. Contrairement aux approches d'optimisation classiques, qui reposent généralement sur la comparaison entre la valeur actuelle et la précédente, l'ACO adopte une stratégie de recherche globale. Ce caractère exploratoire lui permet d'éviter les pièges liés à des fonctions objectif présentant des irrégularités ou des pics locaux, comme illustré dans la Figure IV.5.

Le Tableau IV.11, Tableau IV.12, Tableau IV.13 présentent les paramètres spécifiques à l'algorithme ACO. Ces paramètres ont été déterminés à la suite d'une série de tests préliminaires réalisés sur les données du projet étudié.

Tableau IV.11. Les valeurs du facteur heuristique (η)

Blocs de sommets	Facteurs heuristiques (η)
Surface d'un étage (y_i)	$-1.5 \times 10^{-3} y_i + 1$
Nombres d'étages (4, 5, 6)	(0.47, 0.14, 0.89)
La forme en plan (0, 1)	(0.9, 0.1)
La forme en élévation (0, 1)	(0.9, 0.1)
Type de fondation (1, 2, 3)	(0.1, 0.9, 0.5)
Position du bâtiment dans l'ilot (1, 2, 3)	(0.9, 0.25, 0.1)

Tableau IV.12. Paramètres utilisés pour résoudre le problème

Number of colonies	5
Number of ants	500; 750; 1000
Maximum number of iterations	500; 750; 1000
Evaporation parameter (ρ)	0.8
Transition rule parameter (α, β)	1; 1.15

Tableau IV.13. Taux de phéromone déposée

$\Delta\tau_1$ Déposé sur les sommets (surface habitable)	$\Delta\tau_1 = -1.42 \times 10^9 \times F_1$
$\Delta\tau_1$ Déposé sur les sommets (nombres d'étages)	$\Delta\tau_1 = \frac{(-1.42 \times 10^9 \times F_1 + 1.54) + (-2.5 \times F_2(x) + 1.75)}{2}$
$\Delta\tau_1$ Déposé sur le reste des sommets	$\Delta\tau_1 = -2.5 \times F_2(x) + 1.75$

IV.5.2 Résultats et discussions

L'algorithme proposé nous a permis d'obtenir vingt-six solutions (Tableau IV.14, Tableau IV.15, et Tableau IV.16). Les valeurs des fonctions objectifs après 500, 750 et 1000 itérations sont présentées séparément dans ces trois tableaux.

Tableau IV.14. Les solutions (500 itérations)

Nombre de fourmis	Bâtiment	Nombre d'étage (x_{1i})	Surface d'étage (y_i) (m ²)	Forme en plan (x_{2i})	Forme en élévation (x_{3i})	Type de fondation (x_{4i})	Morphologie du sol (x_{5i})	Position du bâtiment dans l'ilot (x_{6i})	Valeur de la fonction objectif (F_j in DZD)	
500 fourmis	Solution 1	1	7	196	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168546340.90 \\ F_2 = 0.374 \end{cases}$
		2	6	194	0	0	3	1	1	
		3	5	183	0	0	2	1	1	
		4	8	194	0	0	3	1	1	
		5	7	214	0	0	3	1	1	
	Solution 2	1	6	182	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.386 \end{cases}$
		2	6	203	0	0	3	1	1	
		3	9	182	0	0	3	1	1	
		4	7	194	0	0	3	1	1	
		5	6	199	0	0	3	1	1	
	Solution 3	1	5	186	0	0	2	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168573952.90 \\ F_2 = 0.362 \end{cases}$
		2	8	189	0	0	3	1	1	
		3	6	180	0	0	3	1	1	
		4	11	185	0	0	3	1	1	
		5	5	189	0	0	2	1	1	
	Solution 4	1	11	182	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168601565.30 \\ F_2 = 0.350 \end{cases}$
		2	9	189	0	0	3	1	1	
		3	5	183	0	0	2	1	1	
		4	5	185	0	0	2	1	1	
		5	5	192	0	0	2	1	1	
Solution 5	1	5	215	0	0	2	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168712020.60 \\ F_2 = 0.338 \end{cases}$	
	2	5	203	0	0	2	1	1		
	3	5	180	0	0	2	1	1		
	4	13	194	0	0	3	1	1		
	5	5	199	0	0	2	1	1		
750 fourmis	Solution 1	1	5	185	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168629178.36 \\ F_2 = 0.378 \end{cases}$
		2	5	234	0	0	3	1	1	
		3	5	231	0	0	3	1	1	
		4	5	191	0	0	3	1	1	
		5	11	209	0	0	3	1	1	
	Solution 2	1	5	271	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 176687346.84 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$
		2	5	283	0	0	3	1	1	
		3	5	271	0	0	3	1	1	
		4	5	271	0	0	3	1	1	
		5	5	263	0	0	3	1	1	
	Solution 3	1	5	193	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168573952.86 \\ F_2 = 0.390 \end{cases}$
		2	5	192	0	0	3	1	1	
		3	11	189	0	0	3	1	1	
		4	5	194	0	0	3	1	1	
		5	8	191	0	0	3	1	1	
	Solution 4	1	7	202	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.414 \end{cases}$
		2	6	199	0	0	3	1	1	
		3	5	180	0	0	3	1	1	
		4	8	192	0	0	3	1	1	
		5	8	182	0	0	3	1	1	
1000 fourmis	Solution 1	1	4	195	0	0	2	1	3	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.374 \end{cases}$
		2	11	533	1	1	3	1	3	
		3	6	388	1	0	3	1	2	
		4	8	402	1	0	2	1	3	
		5	9	368	1	1	3	1	2	
	Solution 2	1	12	331	0	0	3	1	3	$\begin{cases} F_1 = 169485447.57 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$
		2	5	191	1	0	2	1	1	
		3	6	286	0	1	3	1	3	
		4	5	308	0	1	3	1	2	
		5	5	326	1	0	2	1	3	

Tableau IV.15. Les solutions (750 itérations)

Nombre de fourmis	Bâtiment	Nombre d'étage (x_{1i})	Surface d'étage (y_i) (m ²)	Forme en plan (x_{2i})	Forme en élévation (x_{3i})	Type de fondation (x_{4i})	Morphologie du sol (x_{5i})	Position du bâtiment dans l'ilot (x_{6i})	Valeur de la fonction objectif (F_i in DZD)	
500 fourmis	Solution 1	1	248	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 170038152.48 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$	
		2	283	0	0	3	1	1		
		3	257	0	0	3	1	1		
		4	268	0	0	3	1	1		
		5	255	0	0	3	1	1		
	Solution 2	1	183	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168601565.34 \\ F_2 = 0.378 \end{cases}$	
		2	183	0	0	3	1	1		
		3	12	243	0	0	3	1		1
		4	5	186	0	0	3	1		1
		5	5	187	0	0	3	1		1
	Solution 3	1	12	184	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.390 \end{cases}$
		2	5	200	0	0	2	1	1	
		3	7	191	0	0	3	1	1	
		4	5	194	0	0	3	1	1	
		5	5	197	0	0	2	1	1	
750 fourmis	Solution 1	1	180	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168546340.91 \\ F_2 = 0.402 \end{cases}$	
		2	8	182	0	0	3	1		1
		3	12	180	0	0	3	1		1
		4	6	180	0	0	3	1		1
		5	5	181	0	0	3	1		1
	Solution 2	1	7	184	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.430 \end{cases}$
		2	7	187	0	0	3	1	1	
		3	6	182	0	0	3	1	1	
		4	9	187	0	0	3	1	1	
		5	6	188	1	0	3	1	1	
1000 fourmis	Solution 1	1	261	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 170729335.02 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$	
		2	5	318	0	0	3	1		1
		3	5	207	0	0	3	1		1
		4	5	254	0	0	3	1		1
		5	5	276	0	0	3	1		1
	Solution 2	1	5	201	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168546340.91 \\ F_2 = 0.378 \end{cases}$
		2	13	192	0	0	3	1	1	
		3	5	200	0	0	3	1	1	
		4	5	199	0	0	3	1	1	
		5	5	201	0	0	3	1	1	
	Solution 3	1	12	201	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.390 \end{cases}$
		2	8	192	0	0	3	1	1	
		3	5	200	0	0	3	1	1	
		4	5	199	0	0	3	1	1	
		5	5	201	0	0	3	1	1	

Tableau IV.16. Les solutions (1000 itérations)

Nombre de fourmis	Bâtiment	Nombre d'étage (x_{1i})	Surface d'étage (y_i) (m ²)	Forme en plan (x_{2i})	Forme en élévation (x_{3i})	Type de fondation (x_{4i})	Morphologie du sol (x_{5i})	Position du bâtiment dans l'îlot (x_{6i})	Valeur de la fonction objectif (F_j in DZD)	
500 fourmis	Solution 1	1	5	202	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 170452821.18 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$
		2	5	261	0	0	3	1	1	
		3	5	271	0	0	3	1	1	
		4	5	278	0	0	3	1	1	
		5	5	302	0	0	3	1	1	
	Solution 2	1	5	217	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168656791.92 \\ F_2 = 0.378 \end{cases}$
		2	5	219	0	0	3	1	1	
		3	10	210	0	0	3	1	1	
		4	5	211	0	0	3	1	1	
		5	5	234	0	0	3	1	1	
	Solution 3	1	8	185	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.414 \end{cases}$
		2	6	184	0	0	3	1	1	
		3	10	186	0	0	3	1	1	
		4	5	188	0	0	3	1	1	
		5	6	186	0	0	3	1	1	
	Solution 4	1	5	193	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168573952.86 \\ F_2 = 0.390 \end{cases}$
		2	13	189	0	0	3	1	1	
		3	7	180	0	0	3	1	1	
		4	5	182	0	0	3	1	1	
		5	5	182	0	0	3	1	1	
750 fourmis	Solution 1	1	5	221	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168546340.91 \\ F_2 = 0.390 \end{cases}$
		2	6	202	0	0	3	1	1	
		3	5	190	0	0	3	1	1	
		4	5	220	0	0	3	1	1	
		5	11	194	0	0	3	1	1	
	Solution 2	1	6	197	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.426 \end{cases}$
		2	10	183	0	0	3	1	1	
		3	6	188	0	0	3	1	1	
		4	7	182	0	0	3	1	1	
		5	6	181	0	0	3	1	1	
1000 fourmis	Solution 1	1	5	252	0	0	3	1	1	$\begin{cases} F_1 = 168518729.50 \\ F_2 = 0.366 \end{cases}$
		2	5	277	0	0	3	1	1	
		3	5	263	0	0	3	1	1	
		4	5	206	0	0	3	1	1	
		5	5	302	0	0	3	1	1	

Lors des tests présentés dans les tableaux (Tableau IV.14, Tableau IV.15, et Tableau IV.16), les paramètres ρ , α et β ont été maintenus constants, avec les valeurs respectives de {0,8 ; 1 ; 1,15}. En revanche, le nombre d'itérations et le nombre de fourmis varient, passant de 500 à 750, puis à 1000. Le niveau initial de phéromones sur l'ensemble des chemins est déterminé selon les formules indiquées dans le Tableau IV.13.

Au cours de la phase d'initialisation, les fourmis se déplacent de manière aléatoire en fonction du niveau de phéromones. En parcourant l'espace de recherche, elles déposent leurs propres traces de phéromones, ce qui influence ensuite leur trajectoire. Par la suite, leurs déplacements sont guidés par les niveaux initiaux de phéromones et de visibilité.

L'augmentation du nombre d'itérations et de fourmis permet d'obtenir de meilleurs résultats, et l'ensemble des solutions générées s'avère supérieur à la conception de référence effectivement réalisée (Tableau IV.10). Le nombre d'itérations a été initialement fixé à 500, puis progressivement augmenté à 750 et 1000.

Concernant la variation du nombre de fourmis, on observe qu'avec 500 fourmis, cinq (5) solutions distinctes ont été obtenues. En augmentant ce nombre à 750, le nombre de solutions générées diminue à quatre (4), ce qui laisse penser que l'algorithme converge vers des solutions plus stables ou optimisées.

Nous avons également observé que l'algorithme commence à converger vers des solutions identiques, comme par exemple la solution 1 obtenue avec 750 fourmis et la solution 5 obtenue avec 500 fourmis. De plus, lorsque le nombre de fourmis atteint 1000, deux nouvelles solutions apparaissent dans les résultats.

En fixant le nombre d'itérations à 750 puis à 1000, et en faisant varier le nombre de fourmis (500, 750 et 1000), nous avons constaté que l'algorithme tend à converger, dans certains cas, vers les mêmes solutions. C'est le cas, par exemple, de la solution 1 obtenue avec 1000 itérations et 500 fourmis, qui correspond également à la solution 1 pour 750 itérations avec 500 et 1000 fourmis, ou encore de la solution 2 obtenue avec 500 itérations et 750 fourmis.

Ces observations nous ont conduits à fixer notre condition d'arrêt à 1000 itérations et 1000 fourmis, ce paramétrage offrant un bon compromis entre diversité des solutions et stabilité des résultats.

La convergence de l'algorithme vers les mêmes solutions s'explique par le fait que, dans leur recherche de la solution optimale, les fourmis ont tendance à emprunter les mêmes trajectoires déjà explorées. Par conséquent, augmenter le nombre d'itérations ou de fourmis ne fait qu'encombrer davantage les chemins existants, ce qui a pour effet d'augmenter le temps de convergence sans nécessairement améliorer la qualité des solutions obtenues.

On peut remarquer que certaines solutions obtenues sont dominées, c'est-à-dire non optimales au sens strict. Toutefois, elles ont été conservées dans l'ensemble des solutions car elles peuvent représenter des compromis intéressants en fonction des priorités ou des contraintes du décideur. L'algorithme ACO nous a permis d'identifier un ensemble de solutions pour le problème multi-objectifs défini dans l'équation 13.

Dans l'étape suivante, nous procéderons à un classement de ces solutions à l'aide de méthodes d'analyse multicritère, afin de faciliter la prise de décision.

IV.5.3 Classement des solutions obtenues à l'aide de la méthode AHP

Les solutions obtenues sont classées à l'aide de la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) proposée par (Saaty, 1990). Cette méthode permet de structurer un problème de décision sous forme hiérarchique, où l'objectif global occupe le niveau supérieur, les critères et sous-critères sont placés au niveau intermédiaire, et les alternatives (solutions) se trouvent au niveau inférieur (Selmi et al., 2016).

L'évaluation repose sur des matrices de comparaison contenant des éléments a_{ij} , représentant le degré de préférence d'un critère par rapport à un autre. Ces valeurs sont établies à l'aide de comparaisons par paires, selon une échelle d'importance relative allant de 1 à 9 (voir Tableau IV.17).

Tableau IV.17. La comparaison par paires pour les préférences dans la méthode AHP (Al-Harbi, 2001)

Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance	Un élément est un peu plus important que l'autre
5	Importance essentielle	Un élément est plus important que l'autre
7	Importance démontrée	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9	Importance absolue	Un élément est absolument plus important que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements adjacents quand un compromis est nécessaire	
Valeurs inverses	Utilisées pour montrer la dominance du second élément par rapport au premier	

IV.5.3.1 Comparaison des critères deux à deux

Par exemple, si le critère C_i est jugé fortement plus important que le critère C_j , alors le rapport w_i/w_j sera égal à 5. En procédant à la comparaison entre tous les critères, on obtient ainsi la matrice suivante (Équation 17).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1i} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ a_{j1} & \dots & a_{ij} & a_{jj} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{ni} & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Avec } a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad \text{et } a_{ii} = 1 \quad (\text{Eq.17})$$

Où : a_{ij} est l'intensité de l'importance de C_i sur C_j et w_i le coefficient de pondération associé à C_i .

IV.5.3.2 Détermination des poids associés à chaque critère

L'étape suivante consiste à déterminer le vecteur des coefficients de pondération $W = (w_1 \dots w_i \dots w_n)$. On considère ici I_d comme la matrice identité d'ordre n , où n représente le nombre d'alternatives prises en compte dans l'analyse (ou la dimension de la matrice de décision A). Une fois la matrice de comparaison remplie, celle-ci est normalisée colonne par colonne : cela consiste à sommer les valeurs de chaque colonne, puis à diviser chaque élément de la colonne par cette somme. Ensuite, pour chaque ligne (correspondant à un critère), on calcule la moyenne arithmétique des valeurs obtenues. Cette moyenne représente le poids relatif attribué à chaque critère (Équation 18).

La valeur globale du poids attribué à un critère situé à l'extrémité de l'arborescence est obtenue en multipliant l'ensemble des poids le reliant à la racine. Il est essentiel que la somme des poids des critères « fils » d'un même critère « parent » soit égale à 1. Cette méthode de calcul des poids est connue sous le nom de relation d'interdépendance.

À l'origine, Saaty a proposé une méthode fondée sur le calcul des valeurs propres λ de la matrice de jugements. Il a démontré que la valeur propre principale λ_{max} issue du problème caractéristique ($\det (A - \lambda I_d) = 0$) est réelle et toujours supérieure ou égale à la taille de la matrice. En résolvant ensuite le système linéaire $AV = \lambda_{max} I_d V$, où V est un vecteur propre de A , et en imposant la condition que la somme des composantes du vecteur des poids soit égale à 1, on obtient les mêmes poids que ceux déterminés par la méthode de normalisation par colonnes.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\frac{a_{11}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{1i}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\frac{a_{i1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ii}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\frac{a_{n1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ni}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^n \left[\frac{a_{1l}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[\frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[\frac{a_{nl}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.18})$$

En résumé, chaque poids w_i est calculé selon l'équation 19 suivante :

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \left[\frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \quad (\text{Eq.19})$$

IV.5.3.3 Vérification de la consistance des résultats

L'un des principaux atouts de cette méthode réside dans le calcul d'un indice appelé « *ratio de cohérence* » (ou *ratio de consistance*), qui permet de valider la fiabilité des jugements émis. Autrement dit, cet indice sert à vérifier si les valeurs attribuées par le décideur sur l'échelle de 1 à 9 sont logiquement cohérentes entre elles.

Pour une matrice donnée, on considère sa valeur propre maximale notée λ_{max} , comme indiqué dans la Equation 20. Cette valeur est essentielle pour évaluer la cohérence des jugements dans la méthode AHP.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (\text{Eq. 20})$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i} \quad (\text{Eq. 21})$$

Et :

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \dots \\ \lambda'_i \\ \dots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n w_k \times \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{nk} \end{bmatrix} = w_1 \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{1i} \\ \dots \\ a_{1n} \end{bmatrix} + \dots + w_i \times \begin{bmatrix} a_{1i} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{ni} \end{bmatrix} + \dots + w_n \times \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \dots \\ a_{in} \\ \dots \\ a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 22})$$

L'indice de consistance CI d'une matrice carrée de taille $(n \times n)$ est calculée à l'aide de l'équation 23 suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 23})$$

Le ratio de consistance (CR) est ensuite calculé en utilisant l'équation 24, où RI est un indice de consistance obtenu par un grand nombre de simulations (Tableau IV.18).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Eq. 24})$$

Tableau IV.18. Valeurs de l'indice aléatoire RI

Taille de la matrice (n)	1&2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

Le ratio de cohérence (CR) représente la probabilité que la matrice de comparaison ait été remplie de manière aléatoire. Il permet ainsi d'évaluer la cohérence globale des jugements émis. Selon Saaty, ce ratio doit idéalement être inférieur ou égal à 10 %. Si le CR dépasse ce seuil, cela indique une incohérence significative dans les jugements, et il devient alors nécessaire de revoir certaines appréciations pour améliorer la fiabilité de l'analyse.

Finalement, la méthode AHP nous semble bien adaptée à notre problématique. Toutefois, malgré sa large utilisation, la littérature met en évidence certaines limites de cette méthode (Al-Harbi, 2001). Parmi les principales critiques figurent la nécessité d'une cohérence rigoureuse dans la matrice de comparaison, ainsi que la subjectivité liée à l'attribution des poids de pondération aux critères.

Dans cette étude, une pondération plus élevée est attribuée au critère sismique, en raison du fait que l'Algérie est située dans une zone à forte sismicité (Bezzeghoud et Buforn, 1999 ; RPA, 2024). Toutefois, le critère économique ne doit pas être entièrement écarté, d'autant plus que le pays traverse une période de crise économique, notamment due à la baisse des prix des hydrocarbures (DGPP, 2019 ; World Bank, 2017). Ainsi, en tenant compte à la fois du contexte sismique et économique de l'Algérie, et en nous appuyant sur l'échelle présentée dans le Tableau IV.17, nous établissons la matrice de décision (MD) suivante (Équation 25).

$$MD = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow MD = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 25})$$

Ensuite, le poids de chaque critère est calculé en utilisant l'équation 26 :

$$\begin{cases} w_i = \left(\sum_{l=1}^n \left(a_{il} / \sum_{k=1}^n a_{kl} \right) \right) / n \\ w_1 = 0.33, w_2 = 0.67 \end{cases} \quad (\text{Eq. 26})$$

Pour vérifier le degré de cohérence entre les préférences, nous déterminons le Ratio de Cohérence CR en utilisant l'équation 24.

Or, dans notre cas, le nombre de critères étant égal à deux (2), la valeur de RI est nulle. Par conséquent, la valeur de CR est également nulle, ce qui signifie que la comparaison effectuée entre les deux critères est acceptée.

Avant de procéder au classement des solutions, la première étape consiste à normaliser les valeurs de coût dans l'intervalle $[0,1]$, de manière à les mettre sur la même échelle que le critère de vulnérabilité. Cette normalisation est effectuée à l'aide de l'équation 27, où : $F_1^{Nor_1}(x)$ représente le coût standardisé. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau IV.19 . Il convient de souligner que ce classement dépend directement des coefficients de pondération attribués à chaque critère. Ainsi, une modification de ces coefficients pourrait entraîner un changement dans l'ordre de classement des solutions.

$$F_1^{Nor_1}(x) = \frac{\left[F_1(x) - \underset{s \in \{s_1, s_2, \dots, s_{26}\}}{\text{Min}} F_1(x) \right]}{\left[\underset{s \in \{s_1, s_2, \dots, s_{26}\}}{\text{Max}} F_1(x) - \underset{s \in \{s_1, s_2, \dots, s_{26}\}}{\text{Min}} F_1(x) \right]} \quad (\text{Eq. 27})$$

Tableau IV.19. Classement des solutions

Solutions (S_i)		Coût (F_1) (MDZD)	$F_1^{Nor_1}(x)$	Vulnérabilité (F_2)	$0.33 \times F_1^{Nor_1}(x) + 0.67 \times F_2(x)$	Classement	
500 iterations	500 frms	S_1	168.546	0,00338	0.374	0,25169	6 ^{ème}
		S_2	168.518	0	0.386	0,25862	10 ^{ème}
		S_3	168.573	0,00676	0.362	0,24477	3 ^{ème}
		S_4	168.601	0,01014	0.350	0,23784	2 ^{ème}
		S_5	168.712	0,02366	0.338	0,23426	1 ^{er}
	750 frms	S_6	168.629	0,01352	0.378	0,25772	9 ^{ème}
		S_7	176.687	0,99999	0.366	0,57521	26 ^{ème}
		S_8	168.573	0,00676	0.390	0,26353	15 ^{ème}
		S_9	168.518	0	0.414	0,27738	18 ^{ème}
	1000 frms	S_{10}	168.518	0	0.374	0,25058	5 ^{ème}
		S_{11}	169.485	0,11834	0.366	0,28427	20 ^{ème}
750 iterations	500 frms	S_{12}	170.038	0,18612	0.366	0,30664	23 ^{ème}
		S_{13}	168.601	0,01014	0.378	0,25660	8 ^{ème}
		S_{14}	168.518	0	0.390	0,26130	12 ^{ème}
	750 frms	S_{15}	168.546	0,00338	0.402	0,27045	17 ^{ème}
		S_{16}	168.518	0	0.430	0,28810	22 ^{ème}
	1000 frms	S_{17}	170.729	0,27062	0.366	0,33452	25 ^{ème}
		S_{18}	168.546	0,00338	0.378	0,25437	7 ^{ème}
		S_{19}	168.518	0	0.390	0,26130	12 ^{ème}
	1000 iterations	500 frms	S_{20}	170.452	0,23677	0.366	0,32335	24^{ème}
S_{21}			168.656	0,01690	0.378	0,25883	11 ^{ème}
S_{22}			168.518	0	0.414	0,27738	18 ^{ème}
S_{23}			168.573	0,00676	0.390	0,26353	15 ^{ème}
750 frms		S_{24}	168.546	0,00338	0.390	0,26241	14 ^{ème}
		S_{25}	168.518	0	0.426	0,28542	21 ^{ème}
1000 frms		S_{26}	168.518	0	0.366	0,24522	4 ^{ème}

En termes de coût, l'ensemble des solutions proposées par l'algorithme (issues du processus d'optimisation) s'avèrent globalement plus avantageuses que la

solution effectivement réalisée, à l'exception de la 26^{ème} solution (voir Tableau IV.19). Par exemple, le coût de la 25^{ème} solution, évalué à $F_1 = 170,729$ MDZD, est inférieur à celui du cas réel ($F_1 = 174$ MDZD), soit un gain minimal d'environ 1,88 %.

Par ailleurs, concernant la vulnérabilité sismique, la valeur maximale obtenue parmi les solutions générées est $F_2 = 0,430$, ce qui représente une réduction de 21,2 % par rapport à la vulnérabilité initiale estimée à $F_2 = 0,642$.

Après le classement des solutions obtenues (Tableau IV.19), la solution optimale identifiée est la solution 5 (500 itérations, 500 fourmis). En adoptant cette solution, les cinq bâtiments seraient implantés au centre de l'îlot ($x_{6i} = 1$), avec une forme régulière en plan et en élévation ($x_{2i} = 0$ et $x_{3i} = 0$). Les fondations choisies seraient des semelles filantes pour les bâtiments 1, 2, 3 et 5 ($x_{4i} = 2$) et un radier général pour le bâtiment 4 ($x_{4i} = 3$). Le nombre d'étages (x_{1i}) ainsi que les surfaces habitables (y_i) des cinq bâtiments sont détaillés dans le Tableau IV.14.

Cette configuration permettrait au décideur de réduire le coût de construction de 3,03 % par rapport au projet initial, tout en abaissant le niveau de vulnérabilité sismique de la classe 3 (vulnérabilité moyenne à élevée, $F_2 = 0,58$ à $0,642$) à la classe 2 (faible vulnérabilité, $F_2 = 0,338$).

IV.5.4 Comparaison du classement obtenu avec les méthodes PROMETHEE et TOPSIS

Afin de renforcer la crédibilité des solutions obtenues par la méthode AHP, une étude comparative a été menée en recourant à d'autres méthodes de classement multicritères, notamment PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) et TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).

Ces deux méthodes ont été choisies en raison de leur large utilisation dans les processus de prise de décision multicritères et de leur capacité à fournir une évaluation complémentaire ou alternative à celle de l'AHP.

IV.5.4.1 Présentation de la méthode PROMETHEE

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), a été proposée en 1982 par Jean-Pierre Brans ([Selmi et al., 2016](#) ; [Wu et al., 2017](#)). Elle repose sur un processus de comparaison croisée entre toutes les alternatives (ou actions) considérées. Pour chaque alternative, un indice de préférence global est calculé afin de déterminer ses performances relatives. Cet indice permet ensuite de déterminer les flux de préférence pour chaque alternative, qui servent à établir un *classement partiel* (méthode

PROMETHEE I), ou un *classement complet* (méthode PROMETHEE II) (Brans et al., 1986). Cette méthode peut être résumée en plusieurs étapes clés :

A- Étape 1 : Choix des critères généralisés

Chaque critère C_j est associé à un critère généralisé, sélectionné à l'aide d'une fonction de préférence adaptée. Afin de simplifier le travail du décideur, six types de fonctions de préférence ont été développés par Brans et Mareschal (Figure IV.6)(Brans et Mareschal, 2002).

Ces fonctions permettent de quantifier le niveau de préférence entre deux alternatives en fonction de l'écart de performance observé sur un critère donné. Le choix de la fonction la plus appropriée dépend de la nature du critère et de la sensibilité du décideur aux différences de performance entre les alternatives (Selmi et al., 2016).

B- Étape 2 : Calcul de l'indice de préférence multicritère

Pour déterminer la relation de surclassement, un indice de préférence multicritère est calculé $\pi(a_i, a_k)$ (Equation 28). Cet indice permet de mesurer le niveau de préférence de l'alternative a_i sur l'alternative a_k en tenant compte de l'ensemble des critères.

$$\pi(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^N p_j(a_i, a_k) w_j \quad (\text{Eq. 28})$$

C- Étape 3 : Évaluation des préférences (calcul des flux)

L'évaluation des préférences est réalisée en tenant compte des trois types de flux suivants : Le flux entrant $\phi^-(a)$, Le flux sortant $\phi^+(a)$, et Le flux net $\phi(a)$. Ces flux sont calculés à l'aide des équations (29), (30) et (31) respectivement.

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a_k) \quad (\text{Eq. 29})$$

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(a_i, x) \quad (\text{Eq. 30})$$

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (\text{Eq. 31})$$

La meilleure solution est celle qui présente la plus grande valeur de flux net.

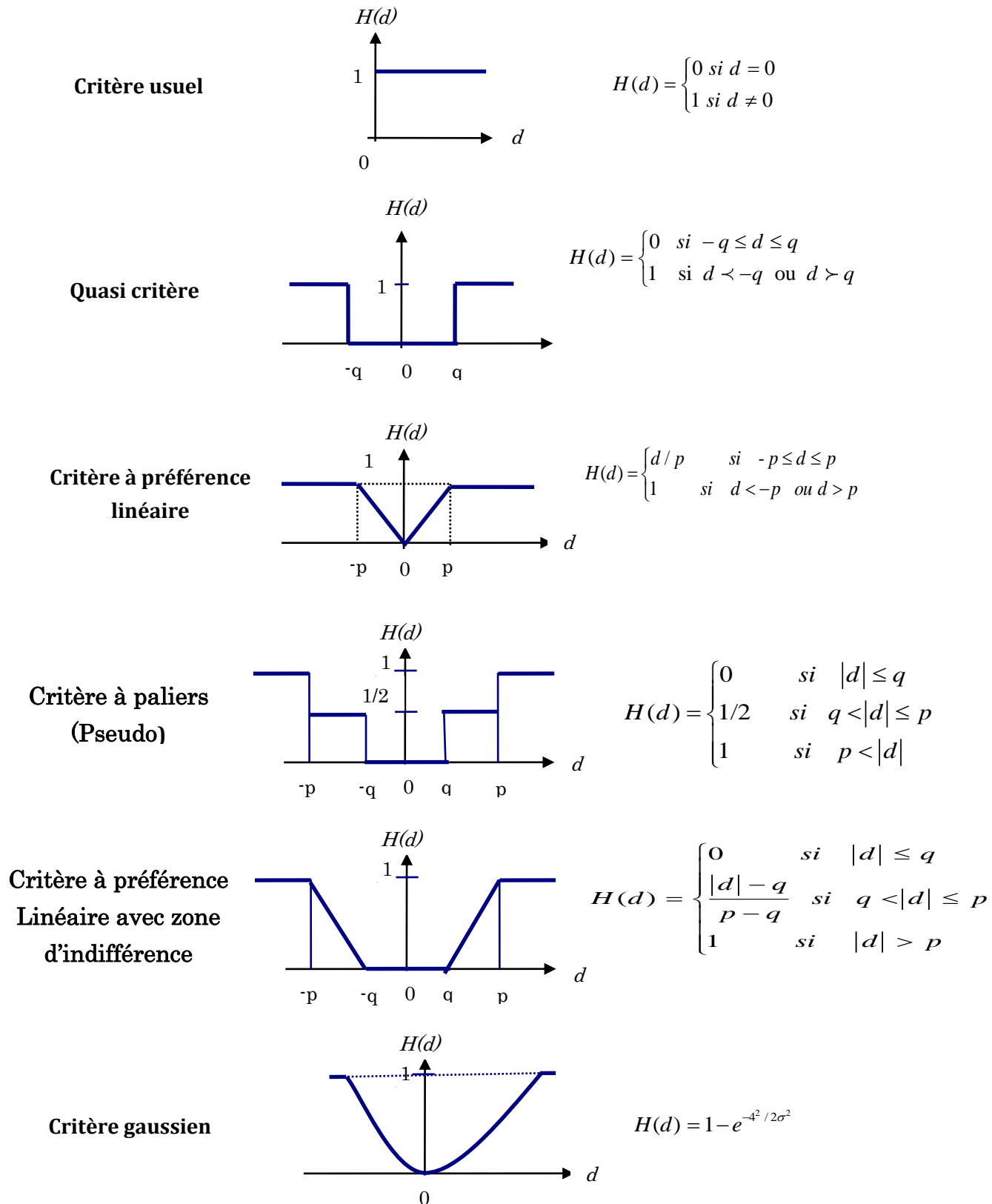


Figure IV.6. Types de fonctions de préférence.

IV.5.4.2 Présentation de la méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode d'aide à la décision multicritère, initialement développée par Hwang et Yoon en 1981, puis enrichie par Yoon en 1987, et par Hwang, Lai et Liu en 1993 (Opricovic & Tzeng, 2004 ; Venkatesh et al., 2015). Elle repose sur le concept suivant : La solution retenue doit être la plus proche possible de la solution idéale positive (c'est-à-dire la solution la meilleure sur tous les critères) et la plus éloignée possible de la solution idéale négative (celle qui dégrade tous les critères). Le classement des solutions par TOPSIS prend donc simultanément en compte les distances géométriques à ces deux solutions idéales. Un ordre de préférence est ensuite établi à partir de leur proximité relative à ces deux références, en combinant ces mesures d'éloignement (Dedania et al., 2015 ; Erdoğan et al., 2016). La méthodologie TOPSIS peut être résumée en plusieurs étapes (Selmi et al., 2016) :

A- Étape 1 : Calcul de la matrice de décision normalisée

La première étape consiste à normaliser la matrice de décision afin de rendre comparables les différentes valeurs des critères, qui peuvent avoir des unités ou des échelles différentes. Cette normalisation est réalisée en divisant chaque valeur par la racine carrée de la somme des carrés des valeurs correspondantes pour chaque critère, selon l'équation suivante :

$$r_{ij} = \frac{C_j(a_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m C_j(a_i)^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{Eq. 32})$$

B- Étape 2 : Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée

Après avoir normalisé les valeurs des critères, la deuxième étape consiste à pondérer ces valeurs en fonction de l'importance relative de chaque critère. Pour cela, chaque valeur normalisée est multipliée par le poids associé au critère correspondant, selon l'équation suivante :

$$V = (v_{ij})_{m \times N}, V_{ij} = w_j \times r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{Eq. 33})$$

w_j : représente le poids attribué au critère j . et $\sum w_j = 1$.

C- Étape 3 : Détermination de la solution idéale positive et de la solution idéale négative

Dans cette étape, deux solutions de référence sont identifiées : La solution idéale positive (V^+) représente la meilleure performance possible pour chaque critère, c'est-à-dire les valeurs maximales pour les critères à maximiser (bénéfices) et les valeurs minimales pour les critères à minimiser (coûts). La solution idéale négative (V^-) représente au contraire la pire performance pour chaque critère, soit les valeurs minimales pour les critères à maximiser et les valeurs maximales pour les critères à minimiser (Equation 34, 35).

$$V^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_N^+) \quad (\text{Eq. 34})$$

$$V^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_N^-) \quad (\text{Eq. 35})$$

Avec : $v_{i1}^+ = \max_{0 \leq i \leq m} (v_{ij})$, $v_{i1}^- = \min_{0 \leq i \leq m} (v_{ij})$, $j = 1, 2, \dots, N$

D- Étape 4 : Calcul des distances euclidiennes de chaque alternative par rapport à la solution idéale positive et à la solution idéale négative

Dans cette étape, on mesure à quelle distance (D^+ , D^-) se trouve chaque alternative (ou solution) des deux solutions de référence définies à l'étape précédente. Ces distances se calculent à l'aide des équations suivantes :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{Eq. 36})$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{Eq. 37})$$

E- Étape 5 : Calcul de la proximité relative de chaque solution par rapport à la solution idéale

À cette étape, on détermine à quel point chaque alternative (ou solution) est proche de la solution idéale positive et éloignée de la solution idéale négative. Cela se fait à travers le coefficient de proximité relative (R_i), défini par l'équation suivante :

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}, \text{ avec } i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{Eq. 38})$$

La meilleure solution est celle ayant la plus grande proximité relative (R_i).

IV.5.5 Résultats des méthodes PROMETHEE et TOPSIS

Dans un premier temps, la méthode PROMETHEE est appliquée pour classer les solutions obtenues à partir de l'optimisation. Il s'agit d'associer à chacun des deux critères considérés (le coût de réalisation et la vulnérabilité sismique) une fonction de préférence parmi les six types définis par (Brans & Mareschal, 2002). Pour le critère de coût de réalisation, une fonction de préférence linéaire est retenue. En effet, ce type de critère suppose qu'il existe un seuil d'indifférence $q=0.20$ MDZD, en dessous duquel deux alternatives (solutions) sont considérées comme équivalentes. Au-delà de ce seuil, la préférence croît de manière linéaire jusqu'à un seuil de préférence stricte fixé à $p=1.00$ MDZD. Cela signifie qu'une différence de coût supérieure à 1 MDZD entraîne une préférence nette pour l'alternative la moins coûteuse. En ce qui concerne le critère de vulnérabilité sismique, une fonction de préférence usuelle est adoptée. Ce choix se justifie par le fait que toute différence, même minime, entre les évaluations de deux actions sur ce critère conduit immédiatement à une préférence stricte pour l'action ayant la vulnérabilité la plus faible. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV.20

Dans un second temps, la méthode TOPSIS a été appliquée. Les distances euclidiennes (D^+ , D^-) ont été calculées pour les 26 solutions obtenues (présentées dans le Tableau IV.14, Tableau IV.15 , et Tableau IV.16) en utilisant respectivement les équations (36) et (37). Ensuite, la proximité relative (R_i) de chaque solution à la solution idéale, a été déterminée. Le classement final des solutions est présenté dans le Tableau IV.20.

Tableau IV.20. Classement des solutions obtenues selon les méthodes PROMETHEE et TOPSIS

Solutions (S_i)		PROMETHEE				TOPSIS					
		ϕ^+	ϕ^-	ϕ	Classement	D^+	D^-	R_i	Classement		
500 iterations	500 frms	S_1	0.4670	0.2680	0.1990	6 ^{ème}	0.0123	0.0194	0.61177	11 ^{ème}	
		S_2	0.3335	0.4020	-0.0685	16 ^{ème}	0.0164	0.0154	0.48349	16 ^{ème}	
		S_3	0.6809	0.0536	0.6273	3 ^{ème}	0.0082	0.0235	0.74081	3 ^{ème}	
		S_4	0.7073	0.0268	0.6805	2 ^{ème}	0.0041	0.0276	0.87027	2 ^{ème}	
		S_5	0.7323	0.000	0.7323	1 ^{er}	7.4×10^{-05}	0.0317	0.99768	1 ^{er}	
	750 frms	S_6	0.3584	0.2948	0.0636	13 ^{ème}	0.0137	0.0181	0.56882	14 ^{ème}	
		S_7	0.4556	0.4104	0.0452	15 ^{ème}	0.0101	0.0219	0.68492	9 ^{ème}	
		S_8	0.1985	0.4288	-0.2303	20 ^{ème}	0.0178	0.0140	0.44091	20 ^{ème}	
		S_9	0.1191	0.5896	-0.4705	23 ^{ème}	0.0261	0.0063	0.19496	23 ^{ème}	
		1000 frms	S_{10}	0.4943	0.2412	0.2531	5 ^{ème}	0.0123	0.0194	0.61179	10 ^{ème}
			S_{11}	0.5005	0.3315	0.1690	7 ^{ème}	0.0096	0.0221	0.69714	5 ^{ème}
750 iterations	500 frms	S_{12}	0.4804	0.3634	0.1170	8 ^{ème}	0.0096	0.0221	0.69667	6 ^{ème}	
		S_{13}	0.3589	0.2948	0.0641	12 ^{ème}	0.0137	0.0181	0.56884	13 ^{ème}	
		S_{14}	0.1995	0.4288	-0.2293	17 ^{ème}	0.0178	0.0140	0.44099	17 ^{ème}	
	750 frms	S_{15}	0.1722	0.5628	-0.3906	22 ^{ème}	0.0219	0.0101	0.31501	22 ^{ème}	
		S_{16}	0.0655	0.6700	-0.6045	26 ^{ème}	0.0316	0.0031	0.08999	26 ^{ème}	
	1000 frms	S_{17}	0.4688	0.3802	0.0886	10 ^{ème}	0.0096	0.0221	0.69597	8 ^{ème}	
		S_{18}	0.3598	0.2948	0.0650	11 ^{ème}	0.0137	0.0181	0.56889	12 ^{ème}	
		1000 frms	S_{19}	0.1995	0.4288	-0.2293	17 ^{ème}	0.0178	0.0140	0.44099	17 ^{ème}
			S_{20}	0.4701	0.3738	0.0963	9 ^{ème}	0.0096	0.0221	0.69627	7 ^{ème}
1000 iterations	500 frms	S_{21}	0.3580	0.2948	0.0632	14 ^{ème}	0.0137	0.0181	0.56879	15 ^{ème}	
		S_{22}	0.1191	0.5896	-0.4705	23 ^{ème}	0.0261	0.0063	0.19496	23 ^{ème}	
		S_{23}	0.1985	0.4288	-0.2303	20 ^{ème}	0.0178	0.0140	0.44091	20 ^{ème}	
		S_{24}	0.1990	0.4288	-0.2298	19 ^{ème}	0.0178	0.0140	0.44095	19 ^{ème}	
	750 frms	S_{25}	0.0923	0.6432	-0.5509	25 ^{ème}	0.0302	0.0034	0.10148	25 ^{ème}	
		1000 frms	S_{26}	0.5211	0.0804	0.4407	4 ^{ème}	0.0096	0.0222	0.69777	4 ^{ème}

À partir des résultats présentés dans le Tableau IV.20, on constate que la meilleure solution identifiée par les deux méthodes, PROMETHEE et TOPSIS, est la solution n°5 (500 itérations, 500 fourmis). Ce résultat valide le classement précédemment établi dans le Tableau IV.19. En termes de convergence, cela signifie un bon équilibre entre coût et vulnérabilité sismique, et une domination claire par rapport aux autres solutions. De telles convergences sont un signal fort pour le décideur.

IV.5.6 Comparaison des solutions obtenues par l'ACO à l'aide des méthodes AHP, PROMETHEE et TOPSIS

L'objectif principal de cette comparaison est de vérifier la cohérence des classements établis par ces méthodes et de renforcer la crédibilité des solutions proposées par l'ACO. Malgré les différences dans les approches méthodologiques, les trois méthodes ont permis d'identifier la même solution optimale, à savoir la solution n°5 (500 itérations, 500 fourmis) (Figure IV.7).

En effet, à partir du Tableau IV.19, et le Tableau IV.20 ainsi que de la Figure IV.7, il apparaît clairement que le classement des solutions (S_3 , S_4 et S_5) ainsi que celui de la solution S_{26} sont identiques pour l'ensemble des méthodes. Une légère

différence est observée concernant le classement de la cinquième meilleure solution entre les trois méthodes. En effet, les méthodes AHP et PROMETHEE désignent la solution S10, tandis que la méthode TOPSIS positionne juste après la solution S11. Ces résultats confirment l'efficacité du modèle de classement proposé dans le Tableau IV.19.

Il existe certaines disparités dans le classement des alternatives par les trois méthodes. Cela est principalement dû à la fonction de normalisation utilisée. En effet, la normalisation proposée est définie par l'équation présentée dans le Tableau IV.19 . Cependant, la méthode PROMETHEE repose sur le concept de fonction de préférence et de flux de surclassement, tandis que la méthode TOPSIS se base sur la notion de distance par rapport aux solutions idéales positive et négative.

Ce consensus entre les méthodes confirme la robustesse et la fiabilité de cette solution, aussi bien du point de vue du coût de réalisation que de la vulnérabilité sismique. Ainsi, l'utilisation combinée d'ACO avec des méthodes d'aide à la décision multicritère permet non seulement de générer un ensemble de solutions efficaces, mais aussi de garantir une sélection objective et cohérente de la meilleure alternative.

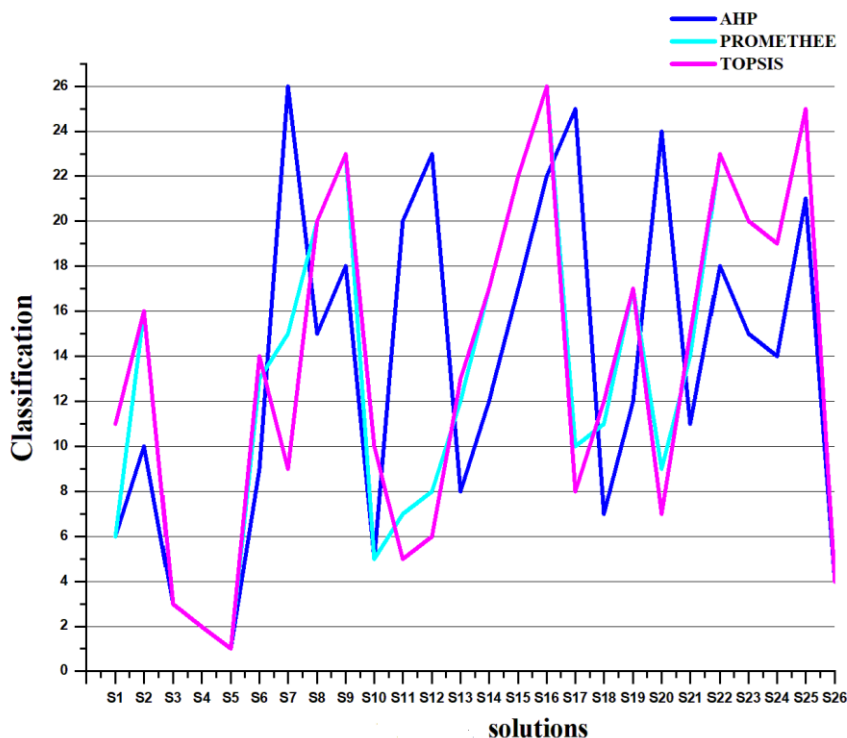


Figure IV.7. Comparaison des solutions obtenues avec les méthodes AHP, PROMETHEE et TOPSIS.

IV.5.7 Analyse de sensibilité sur les poids des critères

L'analyse de sensibilité consiste à évaluer l'impact des variations des poids attribués aux critères sur le classement final des solutions. Cette étape est cruciale pour tester la robustesse du modèle de décision adopté (AHP, PROMETHEE, TOPSIS) face à d'éventuels changements dans les préférences du décideur.

Dans notre étude, les critères pris en compte sont le coût de réalisation et la vulnérabilité sismique. Étant donné que ces critères peuvent avoir des importances relatives différentes selon le contexte (économique ou sécuritaire), nous avons procédé à une variation progressive des poids attribués à chacun, tout en conservant la somme des poids égale à 1.

Les résultats du classement pour différentes combinaisons de poids des critères sont présentés dans les figures (Figure IV.8, Figure IV.9, et Figure IV.10). Ces figures mettent en évidence les éventuels changements dans l'ordre des solutions optimales selon l'importance relative accordée au coût de réalisation et à la vulnérabilité sismique.

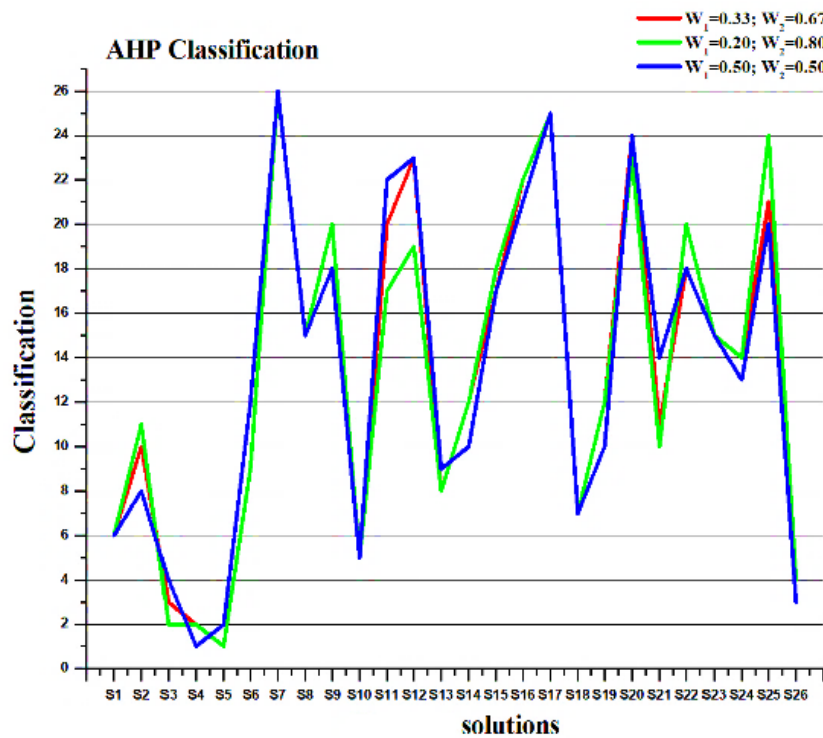


Figure IV.8. Sensibilité aux poids des critères (AHP)

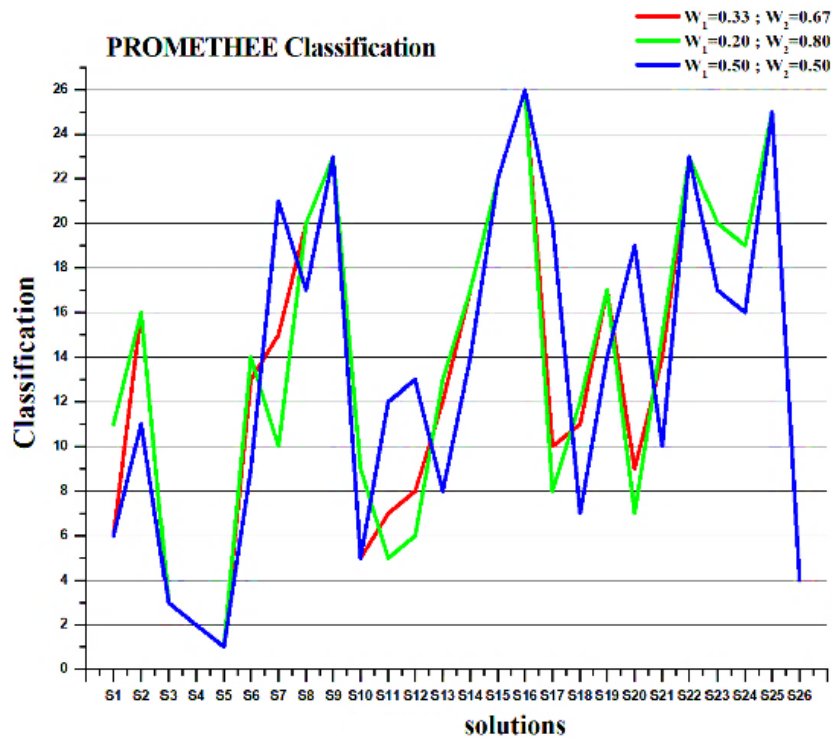


Figure IV.9. Sensibilité aux poids des critères (PROMETHEE)

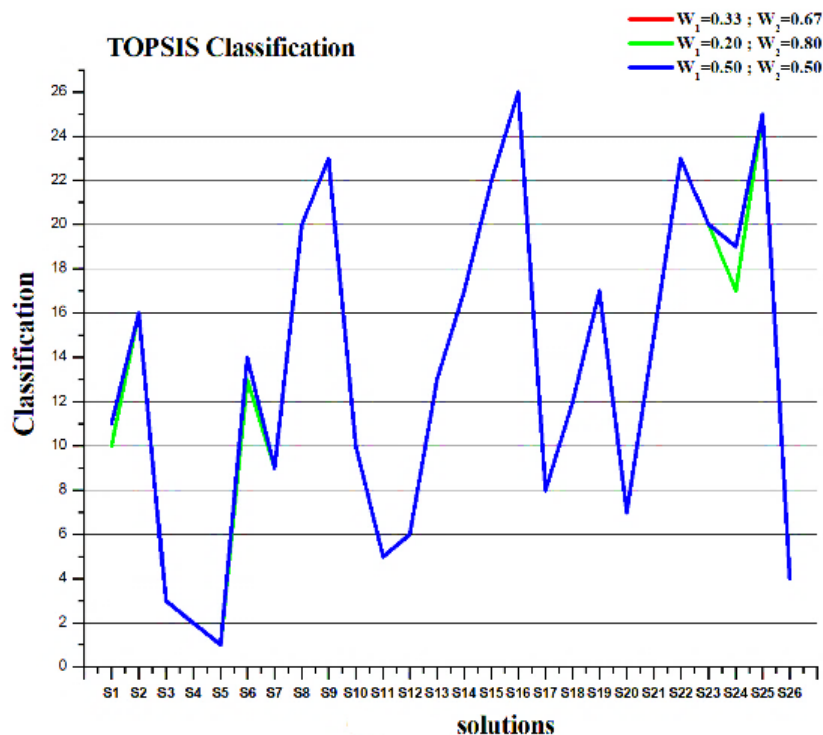


Figure IV.10. Sensibilité aux poids des critères (TOPSIS)

On observe que la tendance générale du classement reste stable malgré la variation des poids des critères. Cela s'explique principalement par le fait que les

deux critères pris en compte ne sont pas en conflit, puisqu'ils sont tous deux à minimiser (coût de réalisation et vulnérabilité sismique).

Ainsi, la variation des poids attribués n'a pas un impact significatif sur le classement final des solutions. En effet, certaines solutions conservent le même rang, tandis que d'autres subissent des modifications mineures

Ces résultats démontrent que, dans le cadre de l'étude présentée, l'attribution des coefficients de pondération n'influence pas fortement le classement final, ce qui confère une robustesse supplémentaire à l'analyse multicritère effectuée.

IV.6 Conclusion

L'approche proposée dans cette étude repose sur l'utilisation de l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) pour la résolution d'un problème d'optimisation de la conception sismique des bâtiments résidentiels en béton armé. L'algorithme a permis de générer un ensemble de solutions efficaces en tenant compte simultanément de deux critères principaux : le coût de réalisation et la vulnérabilité sismique, en un temps très court (*dans notre cas, la solution optimale a été obtenue après 500 itérations avec 500 fourmis*). L'algorithme peut être facilement transposé à des processus plus complexes ou à d'autres pays, en ajustant simplement les paramètres d'entrée en fonction des réglementations locales en vigueur.

Afin de classer ces solutions, trois méthodes d'analyse multicritère ont été appliquées : AHP, PROMETHEE et TOPSIS. Les résultats ont montré une forte concordance entre les classements fournis par ces différentes méthodes, validant ainsi la cohérence et l'efficacité du modèle de classement proposé.

Par ailleurs, une analyse de sensibilité a été effectuée sur les poids attribués aux critères. Cette analyse a révélé que la stabilité du classement est globalement préservée, en raison de la non-confluctualité des objectifs (minimisation dans les deux cas). Cela renforce la robustesse du processus de décision et confirme que les résultats ne dépendent pas excessivement des préférences subjectives du décideur.

La solution optimale obtenue satisfait à la fois les critères sismiques et économiques, contrairement à la solution de référence (cas d'étude) qui repose uniquement sur le critère sismique (solution déterministe imposée par les réglementations parasismiques algériennes). L'approche proposée permet de choisir entre plusieurs alternatives tout en optimisant le coût, offrant ainsi un outil d'aide à la décision pertinent pour les concepteurs, et décideurs confrontés à des enjeux complexes de planification.

La spécificité de cette étude réside dans le fait que les normes algériennes imposent des constructions sismiques très coûteuses fondées exclusivement sur le critère sismique. L'approche développée a permis de réaliser des gains financiers non négligeables (jusqu'à 3,15 %). Ce gain, bien qu'il puisse paraître modeste à l'échelle d'un projet unique, devient extrêmement significatif lorsqu'on le projette sur l'ensemble des projets similaires à venir dans le pays. Compte tenu de l'ampleur des programmes de logement et d'infrastructures en Algérie, cette réduction des coûts pourrait représenter des économies cumulées de plusieurs dizaines de millions de dinars algériens (MDZD), voire plus à l'échelle nationale. Cette démarche ouvre ainsi la voie à une planification plus rationnelle et économiquement soutenable des projets de construction, sans compromettre la sécurité des bâtiments.

Nous revenons plus précisément sur toutes ces conclusions ainsi que sur l'ensemble des axes de recherches futures découlant de cette thèse dans la partie « conclusion générale en perspectives ».

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

L'optimisation des bâtiments en béton armé constitue aujourd'hui un enjeu crucial dans le domaine du génie civil, en particulier dans les régions exposées aux risques sismiques. Dans un contexte de contraintes économiques croissantes et de normes de sécurité de plus en plus rigoureuses, il devient indispensable d'adopter des approches intégrées permettant de concilier performance structurelle et rentabilité financière. Cette étude s'inscrit pleinement dans cette dynamique en proposant une méthode d'optimisation multicritère, appliquée à la conception parasismique des bâtiments résidentiels en béton armé.

Ce travail entre dans le cadre d'une contribution à la mise en place d'une méthodologie globale basée sur l'analyse multicritère et des méthodes multicritères de décision et est destiné à évaluer la conception parasismique des bâtiments en béton armé en Algérie. Il est important que la méthode soit adaptée aux spécifications nationales pour convaincre les décideurs de sa mise en œuvre.

Au début de notre recherche, nous avons posé une problématique clé caractérisant le travail à mener. Afin de répondre à cette problématique, nous avons commencé, dans le chapitre I, par définir et introduire les différentes notions liées au bâtiment en béton armé et au sujet traité. Puis, nous avons constaté la nécessité d'introduire l'aide à la décision multicritère dans la conception de bâtiment, après nous avons listé les différentes méthodes et outils d'optimisation multicritères utilisés dans la conception du bâtiment et en particulier les bâtiments en béton armé. Différentes approches ont été expliquées dans le chapitre II.

Dans l'autre partie de la thèse nous avons effectué une analyse multicritère du bâtiment, où plusieurs critères ont été développés et formulés sur la base de retour d'expérience dans le domaine en fonction des modalités d'optimisation prévues dans la suite de l'étude. Il a été constaté la nécessité d'effectuer l'optimisation à l'état de l'avant-projet sommaire (APS). Une étape décisive où les choix initiaux peuvent avoir un impact majeur sur la faisabilité, le coût global et la réalisation du projet.

Afin de choisir les critères de conception dans le processus d'optimisation des bâtiments en béton armé en Algérie. Nous avons constaté que la conception des bâtiments en béton armé en particulier le résidentiel se base sur un seul critère l'urgence de construire le maximum de logement à un temps restreint. Il temps que les

décideurs doivent changer de politique et s'orienter vers une politique basée sur la conception multicritère des bâtiments d'habitation, ou plusieurs critères du jugement doit être prise en considérations. Nous avons, cependant, été confronté à la réalité tant redoutée : le manque de données mesurables et fiables nécessaires à ce processus d'évaluation. Néanmoins, nous avons pu retenir deux critères pertinents, que nous avons jugé prioritaires : "cout du construction " et "vulnérabilité sismique ".

À l'issue des trois premiers chapitres, nous avons constaté que la méthodologie proposée doit s'adapter à des applications extra-universitaires, d'où la nécessité de simplifier son utilisation. Pour cela, nous avons proposé dans le chapitre IV, un outil numérique que nous avons développé sur MATLAB pour faciliter la manipulation et l'application de la méthodologie définie.

Nous avons constaté, après l'application de la méthodologie définie et de la base de données collectée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans le chapitre IV, que Le recours à des méthodes d'optimisation multicritère a permis de dégager plusieurs solutions de conception. En effet, avec cette première tentative d'évaluation de la conception parasismique des bâtiments étudiés vis-à-vis les critères sélectionnés nous avons tiré des conclusions très intéressantes.

Pour une meilleure compréhension des conclusions et des observations tirées à travers cette étude, nous les avons répertoriés sous forme de conclusions d'ordre générales et spécifiques, que nous présentons ci-dessous

Conclusions d'ordre générales

- A. L'analyse multicritère montre la difficulté de la prise en compte de plusieurs critères de conception en phase de APS, pour manque des modèles bien définis pour certains critères.
- B. Complexité des critères : Les projets de construction doivent répondre à plusieurs exigences parfois contradictoires : sécurité structurelle, coût, durabilité, performance énergétique, confort, etc.
- C. Grande dimension du problème : Un bâtiment implique un très grand nombre de paramètres variables : géométrie, systèmes constructifs, type de fondation, nombre d'étages, etc.

- D. Adaptabilité aux contraintes locales : ils peuvent être personnalisés en fonction des normes locales (sismiques, technique réglementaire, environnementales), des prix du marché ou des besoins des usagers.
- E. Résultats performants et rapides : Les algorithmes d'optimisation par population, et plus largement les algorithmes évolutionnaires, occupent une place de plus en plus importante dans le domaine de l'optimisation des bâtiments, notamment en génie civil et en ingénierie de la construction. Leur succès repose sur leur capacité à résoudre des problèmes complexes, non linéaires, multi-objectifs et comportant de nombreuses variables de décision, souvent impossibles à traiter par des méthodes analytiques classiques.

Conclusions spécifiques

- i. Une démarche plus équilibrée vise à minimiser la vulnérabilité structurelle tout en réduisant les coûts de construction. Cette stratégie intègre plusieurs variables telles que le nombre d'étages, l'irrégularité en plan et en élévation, le choix du système porteur, le type de fondations, ainsi que la surface habitable. Ces paramètres influencent à la fois le comportement dynamique de la structure et son coût global. Des contraintes multiples (techniques, réglementaires) ont été prises en compte. Ainsi, une démarche d'optimisation efficace s'appuie sur une évaluation multicritère, capable de traiter l'ensemble des données disponibles dès les premières étapes de la conception.
- ii. Les critères pris en compte dans l'étude de cas permettent de prendre en compte la description des bâtiments d'une manière efficace : le critère coût de construction permet d'évaluer le budget total nécessaire, tout en tenant compte de paramètres réels et modifiables du bâtiment. Il donne une image précise de l'impact économique des différentes configurations, le critère vulnérabilité sismique assure la sécurité structurelle et l'adéquation aux normes parasismiques algériennes (RPA), tout en restant couplé à la réalité constructive du projet.
- iii. Par ailleurs, l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACO), couplé aux méthodes MCDM, a permis d'explorer un large espace de solutions de manière rapide et efficace. Les résultats obtenus sont probants : la solution optimale identifiée permet non seulement de satisfaire les exigences sismiques, mais aussi de réduire les coûts de construction par rapport à la solution de référence basée exclusivement sur la sécurité structurelle. Ce gain devient particulièrement significatif

lorsqu'il est extrapolé à l'ensemble des projets similaires en Algérie, pouvant représenter des économies cumulées de plusieurs dizaines de millions de dinars.

- iv. L'utilisation des méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM), telles que l'AHP, PROMETHEE et TOPSIS, a permis d'évaluer et de classer efficacement les différentes solutions constructives. Ces méthodes se sont révélées particulièrement pertinentes.
- v. Le poids attribué à chaque critère (le coût ou la vulnérabilité sismique) dans le cas étudié joue un rôle fondamental. Ces poids traduisent l'importance relative que le décideur (architecte, ingénieur, maître d'ouvrage). C'est pourquoi une étude de sensibilité sur les poids des critères a été faite pour : Vérifier la robustesse du classement obtenu, Comprendre l'impact d'un changement d'orientation stratégique (par exemple : privilégier davantage la vulnérabilité que le coût, ou inverse).
- vi. L'intérêt de cette étude ne se limite pas au seul contexte algérien. La méthodologie proposée, flexible et adaptable, peut être transposée à d'autres pays confrontés à des enjeux similaires, notamment ceux situés en zones sismiques et en développement. Elle offre ainsi un outil d'aide à la décision robuste pour les maîtres d'ouvrage et les autorités publiques, permettant une meilleure gestion des ressources tout en assurant la sécurité des populations.
- vii. En conclusion, ce projet de recherche démontre que l'intégration de l'analyse multicritère et des méthodes d'optimisation intelligentes à la phase de conception des bâtiments constitue une voie prometteuse pour répondre aux défis contemporains de l'ingénierie structurelle, en particulier dans les contextes où les exigences de sécurité doivent cohabiter avec des contraintes économiques réelles.

Perspectives – Recherches futures

Ce projet de recherche a permis, de dégager plusieurs des perspectives que nous avons exploitées dans des recherches futures, nous citons :

- i. L'état de l'art sur l'optimisation des bâtiments a permis de dégager une multitude d'axes de recherche. En effet, d'autres critères d'optimisation pourraient être repris et étudiés (Efficacité énergétique (critère thermique), critère environnementale (traitement des déchets), etc.

- ii. Effectuer l'optimisation au stade plus avancé (étude détaillée), vers une modélisation enrichie pour dégager d'autre variable afin de décrire d'autre critères (par exemple état prévisible de l'interaction sol structure).
- iii. Il serait particulièrement pertinent, dans une perspective de continuité et d'approfondissement des travaux, d'explorer l'utilisation d'autres méthodes d'optimisation issues du domaine de l'intelligence artificielle, telles que les algorithmes génétiques (AG) et les algorithmes par essais particuliers (PSO – Particle Swarm Optimization). Ces méthodes, qui font partie de la famille des algorithmes évolutionnaires et populationnels, présentent des caractéristiques différentes de l'algorithme ACO (Ant Colony Optimization) utilisé dans l'étude présente, notamment en termes de mécanismes de recherche, de convergence et d'exploration/exploitation de l'espace des solutions. L'intégration de ces approches alternatives permettrait d'effectuer une étude comparative approfondie, visant à évaluer l'impact de plusieurs paramètres clés. Une telle étude offrirait plusieurs avantages. D'une part, elle permettrait d'identifier la méthode d'optimisation la plus adaptée selon les objectifs du projet (minimisation du coût, réduction de la vulnérabilité sismique, compromis optimal). D'autre part, elle fournirait aux décideurs et concepteurs des éléments d'aide à la décision plus solides, fondés sur une évaluation multicritère des performances des différentes approches d'optimisation.

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine du bâtiment n'est plus simplement une option innovante, mais tend à devenir une nécessité, voire une obligation, face aux défis croissants liés à la complexité des projets, aux exigences réglementaires strictes, à la pression économique et aux impératifs de durabilité. A cet effet les pouvoirs publics algériens, les maitres d'œuvre, les entreprises, devront travailler main dans la main pour parvenir à des constructions durables en Algérie.



BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

Cette thèse renvoie à 216 références listées ci-dessous :

A

Al-Hajjar J (1989). C.A.O. et evaluation multicritere : elements pour l'aide a la conception des fondations de batiment. PhD. thesis, Universite Des Sciences Et Techniques De Lille, France.

Ampanavos, S., Nourbakhsh, M., & Cheng, C. Y. (2021). Structural design recommendations in the early design phase using machine learning. In *International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures* (pp. 190-202). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1280-1_12.

Antunes, R., & Gonzalez, V. (2015). A production model for construction : A theoretical framework. *Buildings*, 5(1), 209-228. <https://doi.org/10.3390/buildings5010209>.

Alaloul, W. S., Liew, M. S., & Zawawi, N. A. B. (2016). A framework for coordination process into construction projects. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 66, p. 00079). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166600079>.

Arroyo, O., Barros, J., & Ramos, L. (2018). Comparison of the reinforced-concrete seismic provisions of the design codes of the United States, Colombia, and Ecuador for low-rise frames. *Earthquake Spectra*, 34(2), 441-458. <https://doi.org/10.1193/102116EQS178EP>.

Abate, M., Evangelista, A. C. J., & Tam, V. W. (2024). A Comparison Analysis of Buildings as per Norwegian and Ethiopia ES-EN1998-1 Seismic Code. *Buildings*, 14(6), 1841. <https://doi.org/10.3390/buildings14061841>.

Abderrachid, B., Larbi, B., & Salah, B. M. (2021). The Review of Algerian Building Seismic Code (RPA) in Seven Points Compared to American and European Codes. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 13, 45-50. <https://doi.org/10.55549/epstem.1038424>.

Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM) : Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in engineering*, 11(3), 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).

Alsofiani, M. A. (2024). Digitalization in infrastructure construction projects : A prisma-based review of benefits and obstacles. *arXiv preprint arXiv :2405.16875*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.16875>.

Alsanabani, N. M., Al-Gahtani, K. S., Bin Mahmoud, A. A., & Aljadhari, S. I. (2023). Integrated methods for selecting construction foundation type based on using a value engineering principle. *Sustainability*, 15(11), 8547. <https://doi.org/10.3390/su15118547>.

Arafa, M., & Alqedra, M. (2011). Early stage cost estimation of buildings construction projects using artificial neural networks. *Journal of Artificial Intelligence*, 4(1), 63-75. <https://doi.org/10.3923/jai.2011.63.75>.

Akintoye, A. (2000). Analysis of factors influencing project cost estimating practice. *Construction Management & Economics*, 18(1), 77-89. <https://doi.org/10.1080/014461900370979>.

Alshibani, A., Zayed, T., & Ahmed, M. (2025). A Regression-Based Model for Parametric Cost Estimation of Industrial Steel Structures. *Journal of Construction Engineering and Management (ASCE)*. <https://doi.org/10.3846/jcem.2024.22472>.

AlTalhoni, S., Liu, J., & Abudayyeh, O. (2024). Forecasting Construction Cost Indices Using Time Series Models : An Evaluation Study. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2023-1061>.

Ali, N. B. H., Sellami, M., Cutting-Decelle, A. F., & Mangin, J. C. (2009). Multi-stage production cost optimization of semi-rigid steel frames using genetic algorithms. *Engineering Structures*, 31(11), 2766-2778. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.004>.

Aparicio Ruiz P, Guadix Martín J, Salmerón Lissén JM, Sánchez de la Flor FJ (2014) An integrated optimisation method for residential building design : A case study in Spain. *Energy Build* 80 :158– 168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.020>.

Awchat, G., Monde, A., Sirsikar, R., Dhanjode, G., & Tayade, S. (2022). Soil-Structure Interaction : Comparative Review of International Codes and Other Literature with Indian Seismic Code. *Civil And Environmental Engineering*, 18(1), 87-95. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0009>.

Abdelli, A (2007). Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive. PhD. thesis, The National Polytechnical Institute of Toulouse, France.

AND, A. N. des déchets. (2014). Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie. www.and.dz

Ambraseys, N. N., & Vogt, J. (1988). Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers. *European Earthquake Engineering*, (3), 16–29.

Abdallah, H., Emara, H. M., Dorrah, H. T., & Bahgat, A. (2009). Using Ant Colony Optimization algorithm for solving project management problems. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 10004–10015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.064>.

Al-Harbi, K. M. a S. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19(1), 19–27. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1).

B

Bouteche, B., & Bougdah, H. (2023). Sustainable cities and precarious housing : the case of Algeria. *Management of Sustainable Development*, 15(2), 28-35. <http://dx.doi.org/10.54989/msd-2023-0014>.

Benrachi, B., & Lezzar, S. (2014). The impact of building modifications on Algerian social collective housing. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 6(1), 123-132. <https://doi.org/10.1080/19463138.2013.780176>.

Bounoua, L., Bachir, N., Souidi, H., Bahi, H., Lagmiri, S., Khebiza, M. Y., ... & Thome, K. (2023). Sustainable development in Algeria's urban areas : population growth and land consumption. *Urban Science*, 7(1), 29. <https://doi.org/10.3390/urbansci7010029>.

Bourahla, N., Larfi, S., Souaci, K., Bourahla, Y., & Taфраout, S. (2023). Intelligent automation and optimization of reinforced concrete dual systems for earthquake resisting buildings in a BIM environment. *Journal of Building Engineering*, 76, 107111. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107111>.

Balali, V., Zahraie, B., & Roozbahani, A. (2014). Integration of ELECTRE III and PROMETHEE II decision-making methods with an interval approach : Application in selection of appropriate structural systems. *Journal of computing in civil engineering*, 28(2), 297-314. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000254](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000254).

Başarı, E., Eski, Ö., Turan, M. E., & Araz, Ö. U. (2020). Selection of Pile Foundation Systems : An Integrated Multi-Criteria Decision Making. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(1), 133-145. <https://doi.org/10.24012/dumf.740120>.

Bayram, S., & Al-Jibouri, S. (2016). A Comparison of Neural Network and Regression Analysis for Preliminary Cost Estimation of Building Projects. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 21(2), 160-178. <https://doi.org/10.1108/JFMPC-06-2015-0023>.

Belton, V., & Stewart, T. (2012). *Multiple criteria decision analysis : an integrated approach*. Springer Science & Business Media.

Baidar, K., Sagitov, A., Babayev, Z., Ospanova, A., & Ospanov, T. (2021). An exhaustive search energy optimization method for residential building envelope in different climatic zones of Kazakhstan. *Buildings*, 11(12), 633. <https://doi.org/10.3390/buildings11120633>.

Bel Hadj Ali, N (2003). Etude de la conception globale des structures en Construction Métallique optimisation par les Algorithmes Génétiques. PhD. thesis, Université de Savoie, France.

Bayram, S., & Al-Jibouri, S. (2016). Efficacy of estimation methods in forecasting building projects' costs. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(11), 04016057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001183).

Brans J., Bertrand M (2003) PROMETHEE-GAIA : une méthodologie d'aide à la décision en présence de critère multiples., *1er Editions de l'université de Bruxelles. Belgique*.

- Bezzeghoud, M., & M Ayadi, A. (2015). Seismicity of Algeria from 1365 to 2013 : Maximum observed intensity map (MOI2014). *Seismological Research Letters*, 86(1), 236-244. <https://doi.org/10.1785/0220140075>.
- Boutaraa, Z., Negulescu, C., Arab, A., & Sedan, O. (2018). Buildings Vulnerability Assessment and Damage Seismic Scenarios at Urban Scale: Application to Chlef City (Algeria). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), 3948–3960. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0961-2>.
- Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction : A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>.
- Benoudjafer, I., & Zemouri, N. (2022). Vers une amélioration de la performance énergétique des habitations : cas de la ville de Bechar. *Revue d'Architecture*, 2(1), 1-16. <https://doi.org/10.XXXXX/revarc.2022.01>.
- Ben Guniche & Atheman. (2015). Notions et pratique de l'urbanisme en Algérie. 180-167 , (2)3, القانون العقاري والبيئة. <https://asjp.cerist.dz/en/article/85488> .
- Bouhadad, Y. (2014). Occurrence and impact of characteristic earthquakes in northern Algeria. *Natural Hazards*, 72(3), 1329–1339. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0704-0>.
- Bamdad, K., Cholette, M. E., Guan, L., & Bell, J. (2018). Building energy optimisation under uncertainty using ACOMV algorithm. *Energy and Buildings*, 167, 322–333. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.053> .
- Benzerra, A., Cherrared, M., Chocat, B., Cherqui, F., & Zekiouk, T. (2012). Decision support for sustainable urban drainage system management : A case study of Jijel, Algeria. *Journal of Environmental Management*, 101, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.027>.
- Bezzeghoud, M., & Buforn, E. (1999). Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, MW = 4.8), 1994 Alhoceima (Morocco, MW = 5.8), and 1994 Mascara (Algeria, MW = 5.7) earthquakes and seismotectonic implications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 359–372.

Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects : The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5).

Brans, J. P., & Mareschal, B. (2002). PROMETHEE : Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples. Collection "Statistique et Mathématiques Appliquées". Editions de l'Université de Bruxelles, Paris.

C

Calixte, X., Cuffi, K., & Leclercq, P. (2022). Mise en place d'un outil pédagogique de documentation du processus de conception architecturale. *SHS Web of Conferences*, 147. <https://doi.org/10.1051/shs conf/202214703002>.

Chang, R., Zhang, N., & Gu, Q. (2023). A review on mechanical and structural performances of precast concrete buildings. *Buildings*, 13(7), 1575. <https://doi.org/10.3390/buildings13071575>

Cheng, M. Y., Tsai, H. C., & Sudjono, E. (2010). Conceptual cost estimates using evolutionary fuzzy hybrid neural network for projects in construction industry. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4224-4231. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.080>.

Collette, Y., & Siarry, P. (2011). *Optimisation multiobjectif : Algorithmes*. Editions Eyrolles.

Chantrelle, F. P., Lahmidi, H., Keilholz, W., El Mankibi, M., & Michel, P. (2011). Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, 88(4), 1386-1394. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.002>.

Caprili, S., Nardini, L., & Salvatore, W. (2012). Evaluation of seismic vulnerability of a complex RC existing building by linear and nonlinear modeling approaches. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 913-954. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9329-4>.

Cattari, S., Lagomarsino, S., Karatzetzou, A., & Pitilakis, D. (2015). Vulnerability assessment of Hassan Bey's mansion in Rhodes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 347-368. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9613-1>.

Cherif, S. eddine, Chourak, M., Abed, M., & Pujades, L. (2017). Seismic risk in the city of Al Hoceima (north of Morocco) using the vulnerability index method, applied in Risk-UE project. *Natural Hazards*, 85(1), 329–347. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2566-8>.

CETE Méditerranée (DREC/SVGC-SIG). (2008). *Comparaison de méthodes qualitatives d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes. Plan séisme - action 2.4.7. Guide des méthodes de diagnostics de la résistance des bâtiments aux séismes*. Convention MEDD/CETE n°CV05000107 : Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM. (France).

Cherrared, M., Zekiouk, T., & Chocat, B. (2011). Application de la méthode AHP pour l'évaluation de la performance des systèmes d'assainissement urbains. *Journal of Decision Systems*, 20(1), 103–127. <https://doi.org/10.3166/jds.20.103-127>.

Conseil national économique, social et environnemental [CNESE]. (2024). *Rapport national sur le développement social et humain en Algérie 2019-2023*. CNESE.

Chen, G., Zheng, S., He, X., Liang, X., & Liao, X. (2025). Machine Learning-Based Cost Estimation Models for Office Buildings. *Buildings*, 15(11), 1802. <https://doi.org/10.3390/buildings15111802>.

D

Dos Santos, Y. R. P., da Silva, D. W., & da Silva, J. D. (2025). Soil-structure interaction influence on the design of spread footing foundations in a reinforced concrete building. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00251-7>.

Dallaa, D., & Belhaoues, S. (2024). The Economic and Social Approach of Government subsidy Policy in Algeria. *مجلة المنهل الاقتصادي*, 7(2), 1169-1186. <https://asjp.cerist.dz/en/article/257631>.

Datta, S. D., Tayeh, B. A., Hakeem, I. Y., & Abu Aisheh, Y. I. (2023). Benefits and barriers of implementing building information modeling techniques for sustainable practices in the construction industry—A comprehensive review. *Sustainability*, 15(16), 12466. <https://doi.org/10.3390/su151612466>.

Derriche, Z., Kacemi, M., & Seddiki, M. (2025). Multi-criteria evaluation applied to a pilot sustainable neighbourhood project in Algeria : The El Ryad neighbourhood concerning sustainability indicators. *Architecture papers of the Faculty of architecture and design STU (ALFA)*, 30(1). <https://doi.org/10.2478/alfa-2025-0002>.

Dris, H., & Benyahia, A. (2024). Sustainable Development in Algeria : Prospects and Challenges. *أبحاث ودراسات*, 16(5), 298-313. <https://asjp.cerist.dz/en/article/254400>.

D'Cruz, N. A., & Radford, A. D. (1987). A multicriteria model for building performance and design. *Building and Environment*, 22(3), 167-179. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(87\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(87)90005-9).

Dehchar, C., Boudjellal, K., & Bouabaz, M. (2023). Improvement of Productivity in Buildings Construction. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 18(1), 20230005. <https://doi.org/10.2478/sspjce-2023-0005>.

Dachowski, R., & Gałek, K. (2020). Selection of the best method for underpinning foundations using the PROMETHEE II method. *Sustainability*, 12(13), 5373. <https://doi.org/10.3390/su12135373>.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2020). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 24(3), 558–577. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2895916>.

Decker, S. A. (2015). *Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage*. PhD. Thesis, université de Bordeaux, France.

De la Fuente, A., & Fernández-Ordóñez, D. (2018). A multi-criteria decision-making based approach to assess the sustainability of concrete structures. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* (Vol. 442, No. 1, p. 012008). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012008>.

Dobrucali, E., & Demir, I. H. (2021). A simple formulation for early-stage cost estimation of building construction projects. *Grđevinar*, 73(08.), 819-832. <https://doi.org/10.14256/JCE.3013.2020>.

D'Apuzzo, M., Evangelisti, A., Modoni, G., Spacagna, R. L., Paolella, L., Santilli, D., & Nicolosi, V. (2020). Simplified approach for liquefaction risk assessment of transportation systems : Preliminary outcomes. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2020 : 20th International Conference, Cagliari, Italy, July 1–4, 2020, Proceedings, Part VII 20* (pp. 130-145). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58820-5_10.

DGPP, D. G. de la P. et des P. (2019). Tableau de Bord - Principaux indicateurs de l'économie. <http://www.dgpp-mf.gov.dz>. Accessed 21 April 2019.

Dedania, H. V., Shah, V. R., & C. Sanghvi, R. (2015). Portfolio Management : Stock Ranking by Multiple Attribute Decision Making Methods. *Technology and Investment*, 6(4), 141. <https://doi.org/10.4236/ti.2015.64016>.

E

Eleftheriadis, S., Mumovic, D., & Greening, P. (2017). Life cycle energy efficiency in building structures : A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 811–825. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.028>.

Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and sustainable energy reviews*, 22, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.

Emmerich, M. T., & Deutz, A. H. (2018). A tutorial on multiobjective optimization : fundamentals and evolutionary methods. *Natural computing*, 17, 585-609. <https://doi.org/10.1007/s11047-018-9685-y>.

Entani, T. (2016). Bottom Up Review of Criteria in Hierarchically Structured Decision Problem. In V.-N. Huynh, M. Inuiguchi, B. Lê, B. Lê, & T. Dencœux (Eds.), *Integrated Uncertainty in Knowledge Modelling and Decision Making* (pp. 99–109). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49046-5_9.

Erdoğan, N. K., Altınırmak, S., & Karamaşa, Ç. (2016). Comparison of multi criteria decision making (MCDM) methods with respect to performance of food firms listed in BIST. *Copernican Journal of Finance & Accounting*, 5(1), 67–90. <https://doi.org/10.12775/cjfa.2016.004>.

F

Feige, A., Wallbaum, H., & Krank, S. (2011). Harnessing stakeholder motivation: towards a Swiss sustainable building sector. *Building Research & Information*, 39(5), 504–517. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.589788> .

Finnveden, G., & Moberg, A. (2005). Environmental systems analysis tools - An overview. *Journal of Cleaner Production*, 13(12), 1165–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.004> .

Fang, L., Wang, X., Fang, C., Li, J., & Wang, S. J. (2025). Advanced Technologies in Creative Architectural Design: A Systematic Review. *Advanced Intelligent Discovery*, 1(1), 2400035. <https://doi.org/10.1002/aidi.202400035>.

Fazil, A. M., Oyedele, L., & Bilal, M. (2020). A Systematic Review of Intelligent Cost Estimation Models in Construction. *Journal of Building Engineering*, 32, 101779. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101779>.

Flager, F., & Haymaker, J. (2007, June). A comparison of multidisciplinary design, analysis and optimization processes in the building construction and aerospace industries. In *24th international conference on information technology in construction* (pp. 625-630). Maribor, Slovenia.

G

GOBIN, C. (2003). *Analyse fonctionnelle et construction*. Techniques de l'ingénieur. Construction, (C3052), C3052-1.

Gkimprixis, A., Tubaldi, E., & Douglas, J. (2020). Evaluating alternative approaches for the seismic design of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(9), 4331-4361. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00858-4> .

Giri, P., Bhatt, A. D., Gautam, D., & Chaulagain, H. (2019). Comparison between the seismic codes of Nepal, India, Japan, and EU. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20, 301-312. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0102-8>.

Gero, J. S., D'Cruz, N., & Radford, A. D. (1983). Energy in context : A multicriteria model for building design. *Building and Environment*, 18(3), 99-107. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(83\)90001](https://doi.org/10.1016/0360-1323(83)90001) .

Günaydın, H. M., & Doğan, S. Z. (2004). A neural network approach for early cost estimation of structural systems of buildings. *International journal of project management*, 22(7), 595-602. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.04.002> .

Geoffrion, A. M., Dyer, J. S., & Feinberg, A. (1972). An interactive approach to multi-criteria optimization with multiple decision makers. *Management Science*, 19(4), 357–368. <https://doi.org/10.1287/mnsc.19.4.357>.

Gan, W., & Guo, B. (2019). *Energy-Saving Design of Building Envelope Based on Multiparameter Optimization. Mathematical Problems in Engineering*, 2019, Article 5261869. <https://doi.org/10.1155/2019/5261869>.

Glover F (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput Oper Res* 13 :533–549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1). Available online 16 May 2003.

Ghahari, S. F., Ghofrani, A., Zhang, J., & Taciroglu, E. (2023). Nonlinear Time-History Analysis of Soil-Structure Systems Incorporating Frequency-Dependent Impedance Functions. *arXiv preprint arXiv :2312.06060*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.06060>.

Guellil, M. E., Harichane, Z., Berkane, H. D., & Sadouk, A. (2017). Soil and structure uncertainty effects on the soil foundation structure dynamic response. *Earthquakes and Structures*, 12(2), 153-163. <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.2.153>.

Grasso, S., Massimino, M. R., & Sammito, M. S. V. (2020). New stress reduction factor for evaluating soil liquefaction in the coastal area of Catania (Italy). *Geosciences*, 11(1), 12. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010012>.

Gramez, A., Ouis, D., & Belhamel, F. (2021). In-situ investigation of the acoustical performance in collective social dwellings. *Applied Acoustics*, 180, 108124. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108124>.

H

Hyari, K., Al-Shaikhli, S., & Alnuaimi, A. (2015). A Conceptual Cost Estimation Model for Engineering Services at Early Project Stages. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 13(3), 419–439. <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2014-0012>.

Hussein, L., Kilic, H. S., & Ozorhon, B. (2018). *Applications of fuzzy MCDM methods in civil engineering : A state-of-the-art survey. Journal of Civil Engineering and Management*, 24(2), 81–101. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.5941>.

Hashemi, A., Zolfani, S. H., & Zavadskas, E. K. (2021). *A hybrid fuzzy MCDM framework for sustainable contractor selection in highway projects. Sustainability*, 13(6), 3223. <https://doi.org/10.3390/su13063223>.

Hadji, I., Mazouz, S., Mokhtari, A. M., Benzaama, M. H., & El Mendili, Y. (2024). Multi-Zone Energy Performance Assessment of Algerian Social Housing Using a Parametric Approach. *Buildings*, 14(6), 1587. <https://doi.org/10.3390/buildings14061587>.

Hamma, W., & Petrișor, A. I. (2018). Urbanization and risks : case of Bejaia city in Algeria. *Human Geographies : Journal of Studies & Research in Human Geography*, 12(1). <https://doi.org/10.5719/hgeo.2018.121.6>.

Harbi, A., Maouche, S., Vaccari, F., Aoudia, A., Oussadou, F., Panza, G. F., & Benouar, D. (2007). Seismicity, seismic input and site effects in the Sahel-Algiers region (North Algeria). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(5), 427–447. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.10.002>.

I

Idres, L., & Radjef, M. S. (2018). Adaptation of ant supercolony behavior to solve route assignment problem in integers. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 11(3), 423–442. <https://doi.org/10.1108/IJICC-08-2017-0095>.

Izadi, A., Sanaieian, H., Farazjou, F., & Minoee Sabery, S. (2023). A systematic review of multi-objective optimization methods of building energy performance. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, 33(3). <https://doi.org/10.22068/ijaup.802>.

J

Jin, S., & Tu, H. (2024). Current status and research progress in architectural programming : a comparative analysis between China and other

countries. *Frontiers of Architectural Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.07.010>.

Jin, F., Hu, B., Zhou, J., Gao, B., & Zhang, Q. (2025). Research on Quasi-Elastic-Plastic Optimization of Reinforced Concrete Frame-Shear Wall Structures. *Buildings*, 15(6), 982. <https://doi.org/10.3390/buildings15060982>.

Jassim, H. S. H., Hasan, M. F., Altaee, M. J., & Gamil, Y. (2025). A model for preliminary cost estimation in buildings construction projects. *Frontiers in Built Environment*, 11, article 1359777. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1359777>.

K

Kolltveit, B. J., & Grønhaug, K. (2004). The importance of the early phase : the case of construction and building projects. *International Journal of Project Management*, 22(7), 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.03.002>.

Kafkas, U. (2023). The effect of foundation type selection on approximate cost of reinforced concrete buildings : the role of soil classes and number of floors. *Journal of Scientific Reports-A*, (057), 81-96. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1456823>.

Kashani, A. R., Gandomi, A. H., Azizi, K., & Camp, C. V. (2022). Multi-objective optimization of reinforced concrete cantilever retaining wall: a comparative study. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(9), 262. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03318-6>.

Keivanian, F., Chiong, R., Kashani, A. R., & Gandomi, A. H. (2023). A Fuzzy Adaptive Metaheuristic Algorithm for Identifying Sustainable, Economical, Lightweight, and Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.00198>.

Kassapoglou, C., Kravanja, Z., Šilih, S., & Farkas, M. (2021). Mass, Direct Cost and Energy Life-Cycle Cost Optimization of Steel-Concrete Composite Floor Structures. *Applied Sciences*, 11(21), 10316. <https://doi.org/10.3390/app112110316>.

Kou, L., Louei, A., & Zhu, L. (2021). An integrated AHP-weighted sum approach for optimizing sustainable building design alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126612>.

Kaya, N. (2024). Multi-criteria decision-making methods (mcdm) : à bibliometric analysis (1974-2024). *Journal of Business Economics and Finance*, 13(2), 55-67. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2024.1940>.

Köksalan, M., & Karasakal, E. (2006). An interactive approach for multiobjective decision making. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5), 532-540. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602019>.

Kvasov, D. E., & Sergeyev, Y. D. (2015). Deterministic approaches for solving practical black-box global optimization problems. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.05010>.

Khalil, L. (2009). *Influence de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des bâtiments : analyse dans les domaines linéaire et non linéaire*. PhD. thesis, Université Lile 1, France.

L

Lowe, C., & Ponce, A. (2009). *UNEP-FI / SBCI'S FINANCIAL & SUSTAINABILITY METRICS REPORT. An international review of sustainable building performance indicators & benchmarks*. United Nations Environment Programme (UNEP)-Sustainable Buildings & Construction Initiative (SBCI) and United Nations Environment Programme (UNEP)-Finance Initiative (FI).

Lu, K., Deng, X., Jiang, X., Cheng, B., & Tam, V. W. (2023). A review on life cycle cost analysis of buildings based on building information modeling. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(3), 268-288. <https://doi.org/10.3846/jcem.2023.18473>.

Lu, X., Zhang, C., Liao, W., Lin, Y., Lin, X., & Xue, H. (2021). Comparison of seismic performance between typical structural steel buildings designed following the Chinese and United States codes. *Advances in Structural Engineering*, 24(9), 1828-1846. <https://doi.org/10.1177/1369433220986633>.

Lotfi, M., Gerami, M., & Karakouzian, M. (2024). Sustainable Structural System Selection Using Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision Model Based on Seismic Performance. *Buildings* (2075-5309), 14(7). <https://doi.org/10.3390/buildings14072107>.

Loron, A. S., & Loron, M. S. (2015). An integrated fuzzy analytic hierarchy process-fuzzy data envelopment analysis (fahp-fdea) method for intelligent building assessment. *Technical Gazette/Tehnički Vjesnik*, 22(2). <https://doi.org/10.17559/TV-20140428223907>.

Lin, Y.-H., Chen, Y.-P., Yang, M.-D., & Su, T.-C. (2016). Multiobjective optimal design of sewerage rehabilitation by using the nondominated sorting genetic algorithm-II. *Water Resources Management*, 30(2), 487–503. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1173-x>.

Li, H., Zhang, Q., & Gen, M. (2021). An evolutionary many-objective optimization algorithm based on indicator-based selection. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(3), 1515–1527. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2903874>.

Larson, J., Menickelly, M., & Wild, S. M. (2019). Derivative-free optimization methods. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.11585>.

Lazzali F, Ait Meziane Y (2014) Vulnerability and Damage Assessment of Current Buildings in Bab El Oued District in Algiers. *Sci. Coop. Int. Workshop Eng. Branches Koc Univ. Istanbul. Turkey*.

Lanseur, H., Cherrared, M., Yousfi-Halimi, N., Moussaoui, F., & Bel Hadj Ali, N. (2021). Multi-criteria analysis and ant colony optimization for seismic design of concrete residential buildings at the early stage phase : Algerian case study. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22, 505-527. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00329-w>.

M

Messabhia, Ali . (1989). Aide à la définition de la technologie et à la modélisation des ouvrages de structure dans un système de CAO bâtiment. Thèse de doctorat; Université de Savoie: Chambéry, France.

Madi, R., Bordjiba, A., & Guenfoud, M. (2019). Compliance with RPA of an Old Building. In *International Symposium on Materials and Sustainable Development* (pp. 152-162). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43211-9_14.

MHUV, Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme et de la ville. (2024). Document Technique Réglementaire D.T.R. - B.C. 2.48. Règles Parasismiques Algériennes RPA 2024. Retrieved from <https://www.tarekdata.com/FR/documents/normes/RPA-2024>.

MHUV, Ministère de l'Habitat de l'Urbanisme et de la Ville. (2020). *Politique gouvernementale dans le domaine de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville*. Retrieved from <http://www.premier-ministre.gov.dz/fr>.

Merzouk, M., Zhao, J., & Xu, Z. (2025). Sustainable Building Project Management in Algeria: Challenges, Strategies, and Future Directions for Environmentally Friendly Construction. *Buildings*, 15(6), 883. <https://doi.org/10.3390/buildings15060883>.

Moussaoui, F., Cherrared, M., Kacimi, M.-A., & Belarbi, R. (2017). A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings — Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study. *Sustainable Cities and Society*, Article in press. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.008>.

Marks, W. (1997). Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Building and environment*, 32(4), 331-339. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00065-0).

Marcher, C., Giusti, A., & Matt, D. T. (2020). *Decision support in building construction : A systematic review of methods and application areas*. *Buildings*, 10(10), 170. <https://doi.org/10.3390/buildings10100170>.

Merabet, G. H., Essaaidi, M., Ben-Haddou, M., Qolomany, B., Qadir, J., Anan, M., Al-Fuqaha, A., Abid, M. R., & Benhaddou, D. (2020). *Artificial Intelligence-Assisted Energy and Thermal Comfort Control for Sustainable Buildings: An Extended Representation of the Systematic Review*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2006.12559>.

Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). *A novel multi-criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects*. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>.

Mousseau, V., Figueira, J., & Dias, L. C. (2015). *ELECTRE methods*. In *Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 133–162). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5

Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014. *Expert systems with Applications*, 42(8), 4126-4148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003>.

Makowski, M., & Wątróbski, J. (2024). PyMCMA : autonomous generation of uniformly distributed Pareto-front representations using reference point techniques. *SoftwareX*, 27, 101801. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101801>.

McDermott, J. (2019). *When and Why Metaheuristics Researchers Can Ignore “No Free Lunch” Theorems*. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.03280>.

Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). WP4: Vulnerability of Current Buildings. *RISK-UE Project Handbook*, 111.

Messafri, N., & Biara, R. W. (2024). The frameworks governing subdivisions in Algeria. *Revue d'Architecture*, 3(1), 71-87. <https://asjp.cerist.dz/en/article/260975>.

Moussaoui, F., & Cherrared, M. (2015). Contribution to assessment of the seismic performance of residential buildings in the Algerian context. In *SSCS'2015, RILEM International Conference Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures*. Rio de Janeiro, Brazil.

Moustapha, M., Galimshina, A., Habert, G., & Sudret, B. (2022). *Multi-objective robust optimization using adaptive surrogate models for problems with mixed continuous–categorical parameters*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2203.01996>.

N

Najar, I. A., Ahmadi, R., Amuda, A. G., Mourad, R., Bendary, N. E., Ismail, I., ... & Tang, S. (2025). Advancing soil-structure interaction (SSI): a comprehensive review of current practices, challenges, and future directions. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s43065-025-00118-2>.

Negrin, I. A., Roose, D., Chagoyen, E. L., & Lombaert, G. (2021). Biogeography-Based Optimization of RC structures including static soil-structure interaction. *arXiv preprint arXiv:2103.05129*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.05129>.

Nguyen, Q. B., Nguyen, D. H., Vo, T. P., & Nguyen, V. T. (2020). Multi-objective optimization of reinforced concrete buildings considering energy performance and cost. *Journal of Building Engineering*, 31, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101370>.

Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied energy*, 113, 1043-1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.

Novelli, V. I., D'Ayala, D., Makhloufi, N., Benouar, D., & Zekagh, A. (2015). A procedure for the identification of the seismic vulnerability at territorial scale. Application to the Casbah of Algiers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 177-202. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9666-1>.

Nocquet, J.-M., & Calais, E. (2004). Geodetic Measurements of Crustal Deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 661-681. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2468-z>.

Ng, S. T., & Zhang, Y. (2008). Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(9), 721-728. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2008\)134:9\(721\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2008)134:9(721)).

O

ONS, Office Nationale des Statistiques. (2024). *Enquete sur dépenses de consommation et le niveau de vie des ménages 2024 - Dépenses de consommation des ménages algériens en 2024*. Collections Statistiques N° 183, série S : Statistiques Sociales. Retrieved from <http://www.ons.dz>.

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods : A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).

P

Pavel, F. (2023). Seismic Design Codes—Key Elements for Seismic Risk Perception and Reduction in Europe. *Buildings*, 13(1), 158. <https://doi.org/10.3390/buildings13010158>.

Pujadas-Gispert, E., Vogtländer, J. G., & Moonen, S. P. G. (2021). Environmental and economic optimization of a conventional concrete building foundation : Selecting the best of 28 alternatives by applying the pareto front. *Sustainability*, 13(3), 1496. <https://doi.org/10.3390/su13031496>.

Pettang, C., Mbumbia, L., & Foudjet, A. (1997). Estimating building materials cost in urban housing construction projects, based on matrix calculation: The case of Cameroon. *Construction and building materials*, 11(1), 47-55. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(96\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00030-X).

Piegay, N (2015). Optimisation multi-objectif et aide à la décision pour la conception robuste : Application à une structure industrielle sur fondations superficielles. PhD. Thesis, université de Bordeaux, France.

Pelissari, R., Oliveira, M. C., Abackerli, A. J., Ben-Amor, S., & Assumpção, M. R. P. (2021). Techniques to model uncertain input data of multi-criteria decision-making problems : à literature review. *International Transactions in Operational Research*, 28(2), 523-559. <https://doi.org/10.1111/itor.12598>.

Pierott, R., Hammad, A. W., Haddad, A. N., & Falcón, G. (2021). A mathematical optimisation model for the design and detailing of reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 245, 112861. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112861>.

Pajasmaa, J., Miettinen, K., & Silvennoinen, J. (2025). *Group Decision Making in Multiobjective Optimization : A Systematic Literature Review*. *Group Decision and Negotiation*, 34, 329–371. <https://doi.org/10.1007/s10726-024-09915-8>.

Papadopoulos, I., & Miettinen, K. (2022). Scalarization techniques for multiobjective optimization : A systematic literature review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, 18. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03224-x>.

Q

Quaglia, C. P., Yu, N., Thrall, A. P., & Paolucci, S. (2014). Balancing energy efficiency and structural performance through multi-objective shape optimization: Case study of a rapidly deployable origami-inspired shelter. *Energy and Buildings*, 82, 733-745. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.063>.

R

Riadh, D., & Osman, M. M. (2021). Housing crisis in Algeria : challenges and perspectives. *Planning Malaysia*, 19. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i19.1073>.

Radford, A. D., & Gero, J. S. (1980). On optimization in computer aided architectural design. *Building and Environment*, 15(2), 73-80. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(80\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(80)90011-6).

Roy, R., Hinduja, S., & Teti, R. (2008). Recent advances in engineering design optimisation : Challenges and futures trends. *CIRP annals*, 57(2), 697-715. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007>.

Reis, J. M. L., de Brito, J., & Bragança, L. (2020). Review of multi-criteria decision-making methods applied to building refurbishment. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(6), 507-523. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.13553>.

Roy, B., & Vanderpooten, D. (2020). Difficultés fondamentales en prise de décision multicritère : compromis, choix subjectifs et contexte. *European Journal of Operational Research*, 284(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.056>.

Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica. Paris.

Izadikhah, M., & Alikhani, R. (2018). An improvement on STEM method in multi-criteria analysis. *Applied Soft Computing*, 67, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.042>.

Rais, M., Boumerzoug, A., & Baranyai, B. (2021). Energy performance diagnosis for the residential building façade in Algeria. *Pollack Periodica*, 16(2), 136-142. <https://doi.org/10.1556/606.2020.00204>.

S

Santos, Y. R. P. D., Bello, M. I. M. D. C. V., Gusmão, A. D., & Patricio, J. D. (2021). Soil-structure interaction analysis in reinforced concrete structures on footing foundation. *Soils and Rocks*, 44(2), e2021058020. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.058020>.

Saura-Gómez, P., Rizo-Maestre, C., & Echarri-Iribarren, V. (2022). The useful life of Reinforced concrete structures with reinforcement corrosion due to Carbonation in non-aggressive and normal exposures in the Spanish Mediterranean. *Materials*, 15(3), 745. <https://doi.org/10.3390/ma15030745>.

Safaa Eldin, A. M., Abdelalim, A., & Tantawy, M. (2024). Enhancing Cost Management in Construction : The Role of 5D Building Information Modeling (BIM). *Engineering Research Journal*, 183(3), 226-251. <https://doi.org/10.21608/erj.2024.377303>.

Suwandi, S., Hardjomuljadi, S., & Sulistio, H. (2024). The Role of the Owner's Accompanying Consultant in the Planning and Design Stage of Government Building Construction. *IJEED (International Journal of Entrepreneurship and Business Development)*, 7(2), 353-370. <https://doi.org/10.29138/ijeed.v7i2.2685>.

Salimian, S., Mousavi, S. M., Tupenaite, L., & Antucheviciene, J. (2023). An integrated multi-criteria decision model to select sustainable construction projects under intuitionistic fuzzy conditions. *Buildings*, 13(4), 848. <https://doi.org/10.3390/buildings13040848>.

Sánchez-Garrido, A. J., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2021). Neutrosophic multi-criteria evaluation of sustainable alternatives for the structure of single-family homes. *Environmental Impact Assessment Review*, 89, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106572>.

Sonmez, R. (2008). Parametric range estimating of building costs using regression models and bootstrap. *Journal of construction Engineering and Management*, 134(12), 1011-1016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:12\(1011\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:12(1011)).

Stevanović, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177-196. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028>.

Sizirici, B., Fseha, Y., Cho, C.-S., Yildiz, I., & Byon, Y.-J. (2021). *A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry, from Design to Operation*. *Materials*, 14(20), 6094. <https://doi.org/10.3390/ma14206094>.

Sana Ben Hamida (2014) Chapitre 11 - Extensions des algorithmes évolutionnaires à l'optimisation sous contraintes. In : Eyrolles (ed) Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation.

Sharifi, M. R., Akbarifard, S., Qaderi, K., & Madadi, M. R. (2021). A new optimization algorithm to solve multi-objective problems. *Scientific Reports*, 11(1), 20326. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99617-x>.

Shea, K., Sedgwick, A., & Antonunnto, G. (2006). Multicriteria optimization of paneled building envelopes using ant colony optimization. In *Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering* (pp. 627-636). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11888598_56.

Seghir, A. (2010). *Contribution à la modélisation numérique de la réponse sismique des ouvrages avec interaction sol-structure et interaction fluide-structure : application à l'étude des barrages poids en béton*. PhD. Thesis. Université Paris-Est ; Université Abderrahmane Mira-Bejaïa. Bejaïa. Algérie.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>.

Siarry, P ; (2014) Introduction. In : Eyrolles (ed) Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation. P 534.

Seo, H., Kim, J., & Kwon, M. (2018). Optimal seismic retrofitted RC column distribution for an existing school building. *Engineering Structures*, 168(September 2017), 399-404. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.098>.

Selmi, M., Kormi, T., & Bel Hadj Ali, N. (2016). Comparison of multi-criteria decision methods through a ranking stability index. *International Journal of Operational Research*, 27(1-2), 165-183. <https://doi.org/10.1504/ijor.2016.10000064>.

Saaty, T. L. (1990). *Multicriteria Decision Making Series - The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Ressource Allocation*. 0070543712. <http://amazon.com>.

T

Technology and Sustainability, 8(2), 26-37. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20453>.

Tripathi, M. P. K., & Yusuf, M. A. V. (2021). A Review on Analysis of Foundation & its Super Structure under the SBC Condition of Soil. *International Journal of Current Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.11.6.2>.

Tebbouche, H., Bouchair, A., & Grimes, S. (2017). Towards an environmental approach for the sustainability of buildings in Algeria. *Energy Procedia*, 119, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.053>.

Tafraout, S., Bourahla, N., Bourahla, Y., & Mebarki, A. (2019). Automatic structural design of RC wall-slab buildings using a genetic algorithm with application in BIM environment. *Automation in construction*, 106, 102901. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102901>.

Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M., & Kabli, M. R. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. *Applied soft computing*, 17, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.003>.

Taibi, H., Ait Youcef, M., & Khellafi, M. (2020). Seismic vulnerability assessment using the macroseismic method proposed in the framework of Risk-UE project based on the recommendations of the Algerian seismic code RPA99/Version 2003. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 59-66. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00190-6>.

Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Vol. 74. John Wiley & Sons, United States of America.

V

Valentini, V., Mirarchi, C., & Pavan, A. (2017). Comparison between traditional and digital preliminary cost-estimating approaches. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0066-7>.

Van wilgenburg, E., Torres, C. W., & Tsutsui, N. D. (2010). The global expansion of a single ant supercolony. *Evolutionary Applications*, 3(2), 136–143. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2009.00114.x>.

Venkatesh, V. G., Dubey, R., Joy, P., Thomas, M., Vijeesh, V., & Moosa, A. (2015). Supplier selection in blood bags manufacturing industry using TOPSIS model. *International Journal of Operational Research*, 24(4), 461–488. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2015.072725>.

W

Wagiri, F., Shih, S. G., Harsono, K., Cheng, T. W., & Lu, M. K. (2023). Exploration of Building Information Modeling and Integrated Project Cloud Service in early architectural design stages. *VITRUVIO-International Journal of Architectural*.

Wen, Z., Liao, H., Zavadskas, E. K., & Antuchevičienė, J. (2021). Applications of fuzzy multiple criteria decision making methods in civil engineering : A state-of-the-art survey. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 358-371. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15252>.

Wilmot, C. G., & Mei, B. (2005). Neural network modeling of highway construction costs. *Journal of construction engineering and management*, 131(7), 765-771. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:7\(765\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:7(765)).

Wang, Y., Jiang, Z., Li, L., Qi, Y., Sun, J., & Jiang, Z. (2023). A Bibliometric and Content Review of Carbon Emission Analysis for Building Construction. *Buildings*, 13(1), 205. <https://doi.org/10.3390/buildings13010205>.

Wright, J. A., Loosemore, H. A., & Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and buildings*, 34(9), 959-972. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00071-3).

Wetter M, Wright J (2004) A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. *Build Environ* 39 :989–999. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.022>.

Wang, C., Abdul-Rahman, H., & Ch'ng, W. S. (2016). Ant Colony Optimization (Aco) in Scheduling Overlapping Architectural Design Activities. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(6), 780–791. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.914100>.

World Bank. (2017). Algérie : rapport de suivi de la situation économique (avril 2017). Avril. <http://www.banquemondiale.org/fr/country/algeria>. Accessed 22 November 2017.

Wu, Y., Wang, Y., Chen, K., Xu, C., & Li, L. (2017). Social sustainability assessment of small hydropower with hesitant PROMETHEE method. *Sustainable Cities and Society*, 35, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.034>.

Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 363-378. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.07.001>.

Y

Yavan, F., Maalek, R., & Toğan, V. (2024). Structural Optimization of Trusses in Building Information Modeling (BIM) Projects Using Visual Programming, Evolutionary Algorithms, and Life Cycle Assessment (LCA) Tools. *Buildings*, 14(6), 1532. <https://doi.org/10.3390/buildings14061532>.

Yang, D., Di Stefano, D., Turrin, M., Sariyildiz, S., & Sun, Y. (2020). *Dynamic and interactive re-formulation of multi-objective optimization problems for conceptual architectural design exploration*. *Automation in Construction*, 118, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103251>.

Yang, R., & Wang, L. (2012). Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. *Sustainable Cities and Society*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.09.001>.

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils : summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4), 297-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297)).

Yelles-Chaouche, A. K., Boudiaf, A., Djellit, H., & Bracene, R. (2006). La tectonique active de la région nord-algérienne. *Comptes Rendus - Geoscience*, 338(1-2), 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.002>.

Yelles-Chaouche, A. K., (2003). Recent Seismic Activity in Northern ALGERIA. In *Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology 12-14 May 2003*. Tehran, Islamic Republic of Iran Recent.

Z

Zakian, P., & Kaveh, A. (2024). Multi-objective seismic design optimization of structures : à review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(2), 579-594. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09992-z>.

Zumrut, I. B., Baran, H. B., & Ozbalta, T. G. (2022). Multi-criteria decision-making approach for selecting a structural system of an industrial facility. *Organization, Technology & Management in Construction*, 14(1), 2656-2665. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2022-0010>.

Zhang, Y. F., & Fuh, J. Y. H. (1998). A neural network approach for early cost estimation of packaging products. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 433-450. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00141-1](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00141-1).

Zima, K. (2015). The case-based reasoning model of cost estimation at the preliminary stage of a construction project. *Procedia Engineering*, 122, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.007>.

Zhang, M., Yang, Y., & Zhou, Y. (2021). *Uniformity criterion for designs with both qualitative and quantitative factors*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2101.02416>.

Zaki, S., & Zaied, A. E.-N. H. (2019). *Meta-heuristics algorithms : A survey*. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 67(5), 67-74. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V67I5P210>.

Zhao, A., Zhou, M., Yu, J., Zhang, J., & Yang, X. (2019). Control and Optimization of Indoor Environmental Quality Based on Model Prediction in Building. In *International Conference on Smart City and Intelligent Building ICSCIB 2018: Advancements in Smart City and Intelligent Building* (pp. 45-57). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6733-5>.

RÉSUMÉ

La conception d'une structure parasismique optimale est un problème complexe puisqu'elle doit tenir compte à la fois des exigences de sécurité, prescrites par les règlements, et du souci d'économie, pour satisfaire les contraintes budgétaires. L'objectif de cette étude de doctorat consiste à mettre au point une méthodologie permettant d'aider à définir un bâtiment parasismique optimal à l'étape d'avant-projet. Pour ce faire, une analyse multicritère du problème a été faite. Cette analyse a permis d'identifier différents critères de conception, définis et formulés. Ensuite, nous avons effectué une optimisation du problème en considérant deux critères pertinents : coût de réalisation et vulnérabilité sismique. Le problème est traité à l'étape de l'avant-projet sommaire (APS) en utilisant la méthode d'optimisation par colonie de fourmis (ACO). Le classement des solutions optimales est effectué en utilisant la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP). Une étude comparative est menée avec deux méthodes de classement bien connues : PROMETHEE et TOPSIS. La méthodologie proposée et la base de données collectées ont été appliquées sur des cas réels de bâtiments d'habitation algériens en considérant les aspects économique et sismique. Les résultats obtenus, basés sur des mesures locales, sont très intéressants et soulignent l'intérêt d'une telle approche. L'optimisation proposée à travers l'algorithmes colonie de fourmis a abouti à des résultats très satisfaisants et a conduit à des meilleures solutions en terme du coût de réalisation tout en respectant les exigences de sécurité parasismique. La méthodologie proposée peut être utilisée comme outil approprié pour la prise de décision dans les processus de conception des projets.

Mots-clés

Avant-projet sommaire, analyse multicritère, coût de construction, vulnérabilité sismique, colonie de fourmis (ACO), méthodes (AHP, PROMETHEE, TOPSIS), bâtiments résidentiels en BA.

ABSTRACT

Designing an optimal earthquake-resistant structure is a complex challenge, as it must simultaneously meet safety requirements imposed by regulations and address economic constraints. The objective of this doctoral research is to develop a methodology to assist designers in defining an optimal earthquake-resistant building at the preliminary design stage. To this end, a multi-criteria analysis of the problem was conducted to identify and define the various design criteria, based on field experience and tailored to the optimization framework adopted in this study. Optimization was carried out considering two key criteria : construction cost and seismic vulnerability. The problem was addressed at the conceptual design stage using the Ant Colony Optimization (ACO) method. The ranking of the optimal solutions was then performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. A comparative study was also conducted using two well-known ranking methods : PROMETHEE and TOPSIS. The proposed methodology and the compiled database were applied to real-world cases of concrete residential buildings in Algeria, taking into account both economic and seismic aspects. The results obtained, based on local data, demonstrate the relevance and effectiveness of this approach. The optimization via the ant colony algorithm yielded highly satisfactory solutions, leading to reduced construction costs while ensuring compliance with earthquake safety requirements. Therefore, the developed methodology proves to be a valuable decision-making tool for designers during the preliminary design phase of earthquake-resistant building projects.

Keywords

Preliminary design, multi-criteria analysis, construction cost, seismic vulnerability, Ant Colony Optimization (ACO), methods (AHP, PROMETHEE, TOPSIS), reinforced concrete residential buildings.

الملخص

تصميم هيكل مقاوم للزلازل بشكل أمثل يُعدّ مشكلة معقدة؛ إذ يتعيّن عليه تلبية متطلبات السلامة التي تفرضها القوانين، مع الأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والقيود الميزانية. يهدف هذا البحث لنيل شهادة الدكتوراه إلى تطوير منهجية تساعد المصممين في تحديد المبنى المقاوم للزلازل الأمثل خلال مرحلة ما قبل المشروع. ولهذا الغرض، تم إجراء تحليل متعدد المعايير، أتاح تحديد وصياغة معايير التصميم المختلفة، وذلك استناداً إلى الخبرات الميدانية، مع مراعاة أساليب التحسين المعتمدة في هذا البحث. بعد ذلك، تم تنفيذ عملية التحسين مع التركيز على معيارين أساسيين: تكلفة الإنجاز وقابلية المبنى للتأثر بالزلازل. تمت معالجة المشكلة في مرحلة الدراسات الأولية للمشروع (APS) باستخدام خوارزمية تحسين مستوحاة من خوارزميات مستعمرة النمل (ACO). كما تم ترتيب الحلول المثلى باستخدام طريقة Analytic Hierarchy Process (AHP) كذلك أُجريت دراسة مقارنة باستخدام طريقتين معروفتين لتصنيف الحلول: PROMETHEE و TOPSIS. تم تطبيق المنهجية المقترحة وقاعدة البيانات التي جُمعت على حالات حقيقية لمبانٍ سكنية خرسانية في الجزائر، مع الأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والزلزالية. أظهرت النتائج المستخلصة من البيانات المحلية فاعلية وجدوى هذه المقاربة. وقد أفضى التحسين باستخدام خوارزمية مستعمرة النمل إلى نتائج مُرضية للغاية، وأدى إلى حلول أفضل من حيث تكلفة الإنجاز مع المحافظة على متطلبات السلامة الزلزالية. بالتالي، تُعدّ المنهجية المقترحة أداة فعالة ومناسبة لدعم اتخاذ القرار في عمليات التصميم الأولية لمشاريع المباني المقاومة للزلازل.

الكلمات المفتاحية

مرحلة الدراسات الأولية، التحليل متعدد المعايير، تكلفة البناء، القابلية الزلزالية، خوارزمية مستعمرة النمل (ACO)، الطرق (AHP، PROMETHEE، TOPSIS)، المباني السكنية الخرسانية المسلحة.