



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures

Thèse
de Doctorat en Science
Génie Civil

Intitulée
Intégration de la conception structurale parasismique
intelligente dans la plateforme BIM

Présentée par :
TAFRAOUT Salim

Présentée et soutenue publiquement le 12/07/2021 devant le jury composé de :

Président :	Mr BALI Abderrahim	Professeur ENP Alger
Directeurs de thèse :	Mr BOURAHLA Nouredine	Professeur ENP Alger
	Mr MEBARKI Ahmed	Professeur Université Gustave Eiffel, (UPEM), France
Examineurs :	Mr BERMAD Abdemalek	Professeur ENP Alger
	Mr BOUHICHA Mohamed	Professeur Université de Laghouat
	Mr HAMIZI Mohand	Professeur Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures

Thèse
de Doctorat en Science
Génie Civil

Intitulée
Intégration de la conception structurale parasismique intelligente
dans la plateforme BIM

Présentée par :
TAFRAOUT Salim

Présentée et soutenue publiquement le 12/07/2021 devant le jury composé de :

Président :	Mr BALI Abderrahim	Professeur ENP Alger
Directeurs de thèse :	Mr BOURAHLA Nouredine	Professeur ENP Alger
	Mr MEBARKI Ahmed	Professeur Université Gustave Eiffel, (UPEM), France
Examineurs :	Mr BERMAD Abdemalek	Professeur ENP Alger
	Mr BOUHICHA Mohamed	Professeur Université de Laghouat
	Mr HAMIZI Mohand	Professeur Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

دمج التصميم الإنشائي الذكي المقاوم للزلازل في منصة نمذجة معلومات البناء BIM

ملخص

في السنوات الأخيرة، اتخذ دمج تقنية BIM وكذلك أدوات الذكاء الاصطناعي في جميع تخصصات صناعة البناء خطوة كبيرة إلى الأمام من خلال تطوير منصات رقمية بارامترية تجمع جميع البيانات المادية والوظيفية للمشروع بطريقة ذكية ومنظمة. يشارك أصحاب المصلحة في شركة الإلكترونيات المتقدمة هذه المعلومات ويستفيدون منها بطريقة موثوقة وفعالة من خلال العمل على نموذج رقمي واحد ثلاثي الأبعاد على مدار عمر المشروع. بهدف زيادة تسهيل الواجهات الضرورية بين مختلف الجهات الفاعلة في المشروع (الهندسة المعمارية والهندسة المدنية والبناء AEC) باستخدام نماذج BIM، يركز الكثير من العمل البحثي حالياً على تطوير تقنيات لتحسين قابلية التشغيل البيئي للبيانات بين البرامج المختلفة بالإضافة إلى التحسين الهيكلي عن طريق التصميم التوليدي الذي يظل معتمداً على خبرة المهندس والحسابات الهيكلية. في هذا السياق، يعنى هذا المشروع البحثي بتطوير تقنية جديدة للمساعدة في التصميم الإنشائي والتي تسمح بإنشاء تصميمات هيكلية بطريقة ذكية وتلقائية تماماً تتوافق مع التكوينات المعمارية في BIM-3D. يعتمد الإجراء على خوارزميات وراثية ذات وظيفة متعددة الأهداف، حيث ان تعريف قيودها وأهدافها أخذ بعين الاعتبار كل من قواعد وتوصيات التصميم المقاوم للزلازل. بعد ذلك تم تنفيذ عدد من التطبيقات على نظامين مختلفين من المنشآت البنائية، حيث ان الأول يتعلق بالبنائيات من نوع جدران - أرضيات خرسانية مسلحة، اما النوع الثاني فيتعلق بالبنائيات من الألواح المعدنية الخفيفة، أين أكدت النتائج الأداء الجيد والمتانة للخوارزمية. تتمثل ميزة هذه التقنية في قدرتها على تحسين الهيكل وإعطاء المزيد من المرونة لأولئك المشاركين في عملية تصميم الهياكل وخاصة الواجهة مع الجزء المعماري من المشروع.

الكلمات المفتاحية: نمذجة معلومات البناء، التصميم الإنشائي الأوتوماتيكي، التحسين الهيكلي، هندسة الزلازل، الخوارزميات الجينية ذات وظيفة متعددة الأهداف.

Integration of intelligent earthquake-resistant structural design into the BIM platform

Summarize

In recent years, integration of the BIM technology as well as the artificial intelligence tools in all disciplines of the construction industry have taken a considerable step forward through the development of parametric digital platforms bringing together all the physical and functional data of the project in an intelligent and structured way. AEC partners can share and operate the data and the information in a reliable and efficient manner by working on a single 3D digital model over the life of the project. To facilitate further the interfaces between the different actors of the AEC using BIM frameworks, extensive research work is currently focusing on the development of techniques for improving the interoperability of data between different software programs in addition to the structural optimization by generative design which remains dependent on the expertise of the engineer and structural calculations. In this context, this research project develops a new technique to generate in a completely automatic and intelligent way optimized structural designs which comply with architecture BIM-3D models. The approach is based on an optimization process using a genetic algorithm having a multi-objective function, constraints and targets derived from the rules and criteria of earthquake-resistant design. Applications are then carried out on two common construction types: Reinforced concrete wall – slab system and buildings made of cold formed steel panels. The results have confirmed the good performance and robustness of the algorithm. The advantage of this technique is that it optimizes the structure and offers more flexibility in the process of the design in particular at the interface between the architecture and the structural design of the project.

Keywords: Building information modelling BIM, Automatic structural design, structural optimization, earthquake engineering, genetic algorithms, multi-objective function.

Intégration de la conception structurale parasismique intelligente dans la plateforme BIM

Résumé

Au cours des dernières années, l'intégration de la technologie BIM ainsi que les outils de l'intelligence artificielle dans l'ensemble des disciplines de l'industrie du bâtiment ont pris un essor considérable à travers le développement des plateformes numériques paramétriques regroupant l'ensemble des données physiques et fonctionnelles du projet d'une manière intelligente et structurée. Les intervenants en AEC partagent et exploitent ces informations d'une manière fiable et efficace en travaillant sur un seul modèle numérique 3D durant toute la durée de vie du projet. Dans le but de faciliter davantage les interfaces nécessaires entre les différents acteurs de l'AEC en utilisant les modèles BIM, beaucoup de travaux de recherches focalisent actuellement sur le développement des techniques d'amélioration de l'interopérabilité des données entre les différents logiciels ainsi que l'optimisation structurale par la conception générative qui restent dépendants de l'expertise de l'ingénieur et les calculs de structures. Dans ce contexte, ce projet de recherche consiste à développer une nouvelle technique d'aide à la conception structurale qui permet de générer d'une manière totalement intelligente et automatique des conceptions structurales conformes à des configurations d'architecture en BIM-3D. La procédure est basée sur des algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs, dont les contraintes et les cibles sont tirées des règles et recommandations de conceptions parasismiques. Des applications sont alors effectuées sur deux systèmes constructifs de type voiles – dalles en béton armé, et de type panneaux métalliques légers, dont les résultats ont confirmé la bonne performance et la robustesse de l'algorithme. L'intérêt de cette technique est de pouvoir optimiser la structure et de donner plus de flexibilité aux intervenants dans le processus de la conception des ouvrages et notamment l'interface avec la partie architecturale du projet.

Mots clé : Building information modeling BIM, Conception structurale automatique, optimisation structurale, génie parasismique, algorithmes génétiques, fonction multi-objectifs.

Remerciements

Louange à Allah le Tout Puissant qui m'a guidé, orienté et aidé durant mon parcours afin d'accomplir et parachever ce travail.

Je voudrais exprimer ma sincère gratitude à mes directeurs de thèse, le professeur BOURAHLA Nouredine et le professeur MEBARKI Ahmed, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant de diriger ce travail de recherche. Je les remercie aussi pour leur disponibilité, patience, soutien et conseils avisés et précieux durant toutes ces années. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance pour leur critique constructive d'une rigueur absolue.

Je tiens à remercier vivement le Président du jury ainsi que l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer et examiner ma thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Mr BOURAHLA Yasser qui m'a accordé son temps, son expérience ainsi que son aide précieuse pour la réalisation du programme d'analyse.

Je remercie aussi l'ensemble de mes collègues de travail au bureau SCTE pour leurs encouragements et en particulier Mr BENREDOUANE Mustapha et Mr OUAZIT Nouredine pour leur aide précieuse et leurs conseils et orientations avisés.

Je remercie le laboratoire LGSDS de m'avoir accueilli, à l'actif duquel est inscrit ce travail de recherche.

Enfin, mes chaleureux remerciements s'adressent à toute ma famille, en particulier mes parents, ma femme et mes filles, mon frère et mes sœurs, pour leur soutien inestimable ainsi que leur patience infinie durant toutes ces années de travail.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....	15
Problématique.....	15
Contexte de la thèse & objectifs.....	16
Plan de travail.....	16
Chapitre 1 : Concept du BIM : évolution, recherches et perspectives	
1.1 Introduction.....	19
1.2 Définitions et procédure d’usage du BIM (Maquette numérique).....	19
1.2.1 Définition du BIM.....	19
1.2.2 Historique du développement du BIM.....	20
1.2.3 Procédure d’usage du BIM.....	22
1.2.4 Niveaux d’information N-D et niveaux de développement ou de détails.....	24
1.2.5 Les outils du BIM.....	26
1.3 La norme « IFC ».....	27
1.3.1 Composition d’un fichier IFC.....	28
1.4 Le BIM dans l’industrie du bâtiment.....	31
1.4.1 Phase d’ingénierie.....	33
1.4.2 Phase de construction :.....	34
1.4.3 Phase post-construction (Exploitation & Opération) :.....	35
1.5 Evolution et perspectives du BIM.....	37
1.6 Conclusion.....	38
Chapitre 2 : Conception générative, Optimisation et Automatisation de la conception structurale	
2.1 Introduction.....	41
2.2 Principe de la conception structurale générative.....	41
2.3 Optimisation des structures.....	46
2.4 Intégration de l’IA dans l’industrie AEC.....	48
2.5 Automatisation de la conception structurale.....	52
2.6 Conclusion.....	60
Chapitre 3 : Développement d’un AG pour la génération des structures optimisées	
3.1 Introduction.....	63
3.2 Les algorithmes génétiques.....	63
3.2.1 Le processus génétique.....	64
3.2.2 Le fonctionnement d’un algorithme génétique.....	64

3.3	L'optimisation multi-objectifs des AG	69
3.3.1	Le problème d'optimisation :	70
3.3.2	La satisfiabilité :	71
3.3.3	La domination et l'optimalité :	71
3.3.4	Entre recherche & prise de décision :	71
3.4	Elaboration d'un AG pour la génération des structures optimisées.....	72
3.4.1	Le principe	72
3.4.2	Extraction des données géométriques « Inputs » du bâtiment.....	74
3.4.3	Les contraintes	75
3.4.4	La fonction multi-objectifs	77
3.4.5	Génération aléatoire des solutions	77
3.4.6	Fonction de croisement « Crossover »	78
3.4.7	Fonction de mutation	79
3.4.8	La sélection.....	79
3.4.9	Finalisation et convergence	80
3.5	Code de l'algorithme génétique.....	80
3.6	Conclusion	80

Chapitre 4 : Application de l'AG pour la conception des structures Dalles - Voiles en BA

4.1.	Introduction.....	82
4.2.	Présentation du système structural « dalle – voile » en BA	82
4.2.1.	Le concept.....	82
4.2.2.	Comportement structural des voiles	84
4.2.3.	Comportement structural des dalles	92
4.3.	Définitions des contraintes de l'algorithme génétique	94
4.3.1.	La longueur minimale d'un voile individuel :	94
4.3.2.	La quantité de voiles (longueur totale des voiles) dans chaque direction :	94
4.3.3.	Répartition des voiles en plan.....	94
4.3.4.	Distance limite entre les voiles :	94
4.4.	La fonction multi-objectifs	95
4.5.	Critère d'arrêt de déroulement de l'AG.....	96
4.6.	Performances de l'AG-MO à l'optimisation de la conception structurale	97
4.6.1.	Présentations des modèles architecturaux analysés.....	97
4.6.2.	Evaluation des conceptions structurales générées et optimisées par l'AG-MO98	
4.6.3.	Etude de sensibilité des poids (coefficients de pondération) des paramètres de la fonction objectif	106
4.6.4.	Robustesse et stabilité de l'AG.....	113
4.7.	Conclusion	115

Chapitre 5 : Application de l'AG pour la conception des structures en profilés laminés à froid

5.1. Introduction.....	117
5.2. Présentation du système structural « en profilé laminé à froid ».....	117
5.2.1. Le concept.....	118
5.2.2. Caractéristiques structurales des panneaux avec plaque métallique.....	123
5.2.3. Caractéristiques structurales des panneaux avec éléments individuels	125
5.2.4. Caractéristiques structurales des planchers métalliques.....	127
5.3. Définitions des contraintes	129
5.3.1. Sens de portée des planchers :	129
5.3.2. Longueur minimale entre les montants des panneaux muraux :	130
5.3.3. Longueur totale des panneaux muraux :	130
5.3.4. Excentricité de torsion et disposition des panneaux muraux :	131
5.4. La fonction multi-objectifs	131
5.5. Performances de l'AG-MO à l'optimisation de la conception structurale	132
5.5.1. Présentations des modèles architecturaux analysés.....	132
5.5.2. Evaluation des conceptions structurales générées par l'AG-MO.....	133
5.5.3. Effet du changement des poids de la fonction objectif.....	137
5.6. Conclusion	140

Chapitre 6 : Conclusions et Recommandations

Conclusion.....	142
Recommandations	143

Références Bibliographiques 145

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Aperçu historique sur l'évolution du développement des logiciels ayant permis la création de la technologie BIM.	21
Tableau 1.2 : liste des cas d'utilisation des modèles BIM typiques	23
Tableau 1.3 : Historique de développement des versions IFC	28
Tableau 2.1 : Influence des intérêts de recherche sur l'intégration de l'IA dans AECL.	51
Tableau 4.1 : Variation de la longueur des voiles par rapport à la hauteur des bâtiments	89
Tableau 4.2 : Configuration architecturale des cas étudiés	97
Tableau 4.3 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG	99
Tableau 4.4 : Disposition des voiles selon la génération de l'AG-MO	99
Tableau 4.5 : Résultats sur les longueurs des voiles de contreventement	102
Tableau 4.6 : Résultats de la stabilité dynamique globale	102
Tableau 4.7 : Valeurs des rapports du rayon de torsion ainsi que de l'excentricité	103
Tableau 4.8 : Rapport de superposition des surfaces	104
Tableau 4.9 : Résultats du critère de résistance des voiles	104
Tableau 4.10 : Distribution des efforts dans les voiles et les dalles	105
Tableau 4.11 : Résultats des critères de résistance et déformation des dalles	106
Tableau 4.12 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG	107
Tableau 4.13 : Effet de la variation du poids de l'excentricité sur la symétrie du bâtiment	107
Tableau 4.14 : Effet de la variation du paramètre de la longueur des voiles	109
Tableau 4.15 : Effet de la variation de la longueur totale	109
Tableau 4.16 : Effet de la variation du poids de la longueur des voiles selon les zones sismiques	110
Tableau 4.17 : Résultats des rapports des surfaces suivant la variation du poids de la portée	111
Tableau 4.18 : Variation des paramètres et poids de la fonction MO	112
Tableau 4.19 : Effet de la variation du paramètre de distance et poids de la surface couverte	113
Tableau 4.20 : Comparaison des caractéristiques de dispositions optimisées pour plusieurs solutions.	114
Tableau 4.21 : Différentes disposition des voiles d'une configuration optimisée sur un même bâtiment.	114
Tableau 5.1 : Configuration architecturale des cas étudiés	133
Tableau 5.2 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG	137
Tableau 5.3 : Effet du changement du poids de l'excentricité dans la fonction multi-objectifs de l'AG	138
Tableau 5.4 : Effet du changement du poids du rayon torsionnelle	138

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Vue d'un modèle BIM 3D, avec les informations sémantiques	20
Figure 1.2 : Concept du processus BIM fait par Borrmann	22
Figure 1.3 : Evolution des modèles dimensionnels	24
Figure 1.4 : Niveaux de développement selon le « BIM Forum Specifications »	25
Figure 1.5 : Entête du fichier IFC – Header	30
Figure 1.6 : Partie de données du fichier IFC – DATA	30
Figure 1.7 : Perte des données lors des échanges du flux d'informations	31
Figure 1.8 : Collaboration des différents intervenants avec la plateforme BIM	32
Figure 1.9 : Courbe MacLeamy - Avantages d'utilisation du BIM à travers les différentes phases du projet	34
Figure 2.1 : Décomposition et Extraction d'une conception structurale selon StAr	43
Figure 2.2 : Processus d'identification d'une conception structurale selon StAr	43
Figure 2.3 : Processus d'identification d'une conception structurale selon M-RAM	44
Figure 2.4 : Vue sur l'interface du programme ISDS	45
Figure 2.5 : les types d'optimisation structurale : a) dimensionnelle, b) forme, c) topologique	47
Figure 2.6 : Evolution des publications sur l'implication de l'IA dans l'AEC	48
Figure 2.7 : Intérêt principal des recherches sur l'implication de la IA dans l'AECI, (Réseau cooccurrence des mots clés)	49
Figure 2.8 : Evolution des publications de recherches sur l'utilisation des différentes méthodes de l'IA dans l'ingénierie structurale	50
Figure 2.9 : Evolution des publications de recherches sur l'utilisation de ML dans les différents aspects de l'ingénierie structurale	51
Figure 2.10 : Processus de l'approche SDO	57
Figure 2.11 : Prototype d'un processus de conception générative dans un BIM	59
Figure 2.12 : Architecture du prototype G-BIM	60
Figure 3.1 : Niveaux d'organisation d'un AG	65
Figure 3.2 : différents types de croisement (crossover)	66
Figure 3.3 : opérateur de mutation	67
Figure 3.4 : Processus général de fonctionnement d'un AG évolutif	69
Figure 3.5 : Processus de l'algorithme génétique	73
Figure 3.6 : Vues en 3D du modèle d'architecture BIM	74
Figure 3.7 : Données géométriques à extraire du modèle BIM-3D	75
Figure 3.8 : Représentation des murs par de vecteurs bidirectionnels	75
Figure 3.9 : Classifications des critères géométriques et structuraux	76

Figure 3.10 : Croisement entre deux solutions	78
Figure 3.11 : Application de la mutation sur les murs	79
Figure 4.1 : Vue en 3D-BIM d'une structure en voile - dalle	83
Figure 4.2 : Un voile supporte des charges dans son plan ; une dalle qui supporte des charges orthogonales à son plan.	83
Figure 4.3 : Lignes isostatiques	85
Figure 4.4 : Modes de ruine dans un voile sous chargement latéral : (a) Rupture des aciers tendus ; (b) Rupture du béton comprimé -fendage- ; (c) Rupture au centre du voile par traction et/ou compression des bielles inclinées à 45°.	85
Figure 4.5 : Modes de ruine sur un essai réel	86
Figure 4.6 : effet de la longueur des voiles sur la génération des efforts	86
Figure 4.7 : Variation des prototypes analysés en fonction de leurs (hauteurs / surfaces)	87
Figure 4.8 : Modèle prototype d'une structure en Voile / dalle	88
Figure 4.9 : Variation des déplacements par rapport à la hauteur	88
Figure 4.10 : Longueur totale des voiles fonction de la hauteur et la surface	89
Figure 4.11 : répartition des forces sur les voiles	91
Figure 4.12 : discontinuité verticale des voiles non autorisée	92
Figure 4.13 : Dégression des longueurs des voiles au fur et à mesure de la hauteur	92
Figure 4.14 : Diagramme de flexion et torsion sur une surface de plaque déformée.	93
Figure 4.15 : Effet du diaphragme dans les dalles	93
Figure 4.16 : Disposition des voiles pour la structure prototype	93
Figure 4.17 : Limites des portées entre les voiles	95
Figure 4.18 : Dimensions limites de la surface du plancher dont le voile doit supporter	96
Figure 4.19 : Critère de validation des surfaces suivant la disposition des voiles	96
Figure 4.20 : Répartition des voiles et des surfaces de couvertures correspondantes	108
Figure 4.21 : Dégression des sections d'armatures nécessaires dans les voiles en fonction du poids et de l'intensité sismique	110
Figure 4.22 : Variation de la zone couverte selon les facteurs de poids de la portée : a) 0.75, b) 1.25 et c) 1.50.	111
Figure 5.1 : différentes formes des profilés en PAF	117
Figure 5.2 : Structures avec des éléments en type PAF	118
Figure 5.3 : Assemblage des panneaux en PAF	119
Figure 5.4 : Courbe Contrainte – Déformation des deux types d'aciers	120
Figure 5.5 : Ossature avec des panneaux en acier léger	123
Figure 5.6 : Panneau avec feuille et profilés métalliques légers	123
Figure 5.7 : Ossature typique avec panneaux en éléments individuels et stabilités	126

Figure 5.8 : Ossature typique d'un panneau en éléments individuels	126
Figure 5.9 : Composition d'un plancher collaborant métallique	128
Figure 5.10 : Comportement mécanique d'un plancher collaborant métallique	128
Figure 5.11 : disposition des pannes / solives	128
Figure 5.12 : Processus d'identification du sens de portée dans l'AG	129
Figure 5.13 : Exemple sur le choix du sens de portée selon le cas	129
Figure 5.14 : Distance minimale entre deux montants	130
Figure 5.15 : Génération de l'AG du sens de portée et direction des solives	134
Figure 5.16 : Disposition de la conception conventionnelle des solives	134
Figure 5.17 : Comparaison entre les deux modèles	136
Figure 5.18 : Répartition des PAF sans tenir compte du rapport Rayon / Dim. dans les modèles générés par l'AG	139
Figure 5.19 : Répartition des PAF sans tenir compte du minimum requis par l'AG	139

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CES : Corps d'état secondaire

CFS : Cold Formed Steel profils

FE : Finit Element

IA : Intelligence Artificielle

IAI : International Alliance for Interopérabilité

IFC : Industry Foundation Classes

ISDS : Integrative Structural Design System

IT : Technologie informatique

LOD : Level of development

LOI : Level of information

ML : Machine Learning

NBIMI : The National Building Information Modeling Initiative

N-D : Niveau d'information

NIBS : National institute of building sciences

PAF : Profilés laminés à froid

StAr : Structure / Architecture

Introduction Générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, l'industrie du bâtiment a connu un essor remarquable à travers l'utilisation des nouvelles technologies relatives à la numérisation des informations, où la productivité, la qualité ainsi que le coût relatif à la réalisation des projets ont été considérablement améliorés.

D'une manière générale, la construction d'un bâtiment est le résultat d'une collaboration étroite entre les intervenants des différentes disciplines « AEC » (architecture, engineering et construction), où d'importants flux d'informations circulent continuellement entre ces acteurs, et ce le long du cycle de vie du projet. C'est dans ce contexte que la technologie du BIM a vu le jour, à travers la création des plateformes numériques capables de stocker d'une manière fiable et structurée toutes ces données (Hugo, 2016). Ces maquettes intègrent dans un modèle 3D, l'ensemble des caractéristiques géométriques, physiques, et fonctionnelles nécessaires du projet, permettant tant aux professionnels de la construction qu'aux clients d'en tirer le meilleur profit. Ce processus de recueillement des données, est connu par l'émergence du « Smart Building – Bâtiment Intelligent » (Pinot, 2019).

D'autre part, un autre apport a considérablement marqué ce développement. Il s'agit des divers outils de l'intelligence artificielle « IA », qui présentent un enjeu très important dans cette industrie AEC également (Cherkaoui et al., 2019).

A travers ces technologies, de nombreux travaux de recherches ont été alors élaborés dans le but de développer davantage de nouvelles techniques qui aident à améliorer plusieurs aspects de cette industrie, tels que l'interopérabilité entre les différents intervenants AEC, les conceptions génératives, l'optimisation sous ses différentes formes, les performances énergétiques et d'autres. Pour cela, certains outils de l'intelligence artificielle « IA » ont été utilisés tels que les réseaux neurones, l'apprentissage de machines, les différents types d'algorithmes, etc.

Toutefois, malgré cette évolution, certains domaines n'ont pas connu beaucoup d'intérêt et restent à l'état actuel faiblement investis, et parmi ces sujets nous citons l'aspect de conception structurale générative des bâtiments qui se ferait de manière automatique.

Problématique

Lors d'un projet de construction d'un bâtiment, l'élaboration d'une conception structurale joue un rôle crucial dans l'industrie AEC car c'est durant cette phase que d'importantes décisions sont prises par les ingénieurs, tels que le type de construction, le système structural, les caractéristiques des matériaux, la disposition ainsi que les dimensions des éléments, etc... où un choix judicieux de ces paramètres impacte directement la constructibilité, le coût et les performances générales du bâtiment.

Dans un processus classique de conception, les ingénieurs s'appuient généralement sur leurs propres expériences afin d'établir une proposition conceptuelle, tout en essayant par la suite d'améliorer et d'optimiser manuellement leurs solutions en utilisant des modèles de calcul et de vérification de la structure.

Ce processus itératif est généralement très long, et peut impacter le temps pour proposer d'autres solutions alternatives possibles, et donc l'aspect d'optimisation n'est pas proprement garanti. Cependant, avoir une conception fiable dès la première phase du projet, nécessite des concepteurs capables de comparer et d'évaluer le comportement structural de différentes solutions d'une manière rapide et efficace, afin d'augmenter le potentiel de réussite globale du projet ; malheureusement ces conditions ne sont pas toujours réunies.

C'est pour cette raison que l'idée nous est venue de proposer cette approche numérique qui utilise à la fois des modèles d'architecture en BIM-3D, ainsi que les algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs, permettant la génération d'une manière automatique et intelligente de plusieurs solutions alternatives de conception structurale qui satisfasse à la fois l'architecture du projet ainsi que les critères de conception du génie parasismique.

Contexte de la thèse & objectifs

Le présent projet de recherche a pour objectif de développer pour les architectes et les ingénieurs, une technique d'aide capable de générer des conceptions structurales compatibles à la fois avec l'architecture du projet, et avec les règles de calcul parasismiques en vigueur et cela d'une manière automatique et intelligente. Cette technique peut être utilisée dès le premier stade du projet, à savoir la phase d'avant-projet (APD). Pour ce faire, des applications ont été alors développées en utilisant des algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs, ainsi que des configurations architecturales en modèles BIM-3D, dont l'interopérabilité est assurée par le biais des formats IFC.

Le principe de fonctionnement de cette approche consiste à définir, en premier lieu, les critères essentiels et nécessaires dans une conception structurale pour qu'ils soient intégrés par la suite dans le processus de l'algorithme soit comme des contraintes, soit comme étant des cibles dans la fonction multi-objectifs. Ces critères sont généralement catégorisés en deux types : i) ceux d'ordre architecturale et géométrique ; ainsi que ii) ceux relatifs aux codes et normes de calcul structural. Ces derniers dépendent principalement du système constructif utilisé. Dans notre projet de recherche, nous avons utilisé deux systèmes, à savoir : les constructions en types voiles et dalles en béton armé, ainsi que ceux en types panneaux métalliques laminés à froid.

Enfin, dans le but d'évaluer les performances ainsi que l'efficacité de l'algorithme génétique à fonction multi-objectifs « AG-MO », des applications sont alors effectuées sur plusieurs modèles d'architecture distincts, en termes de formes géométriques, de dimensions (hauteur, longueur, largeur), ainsi que des configurations architecturales en termes de répartition des murs de cloisons et de disposition d'ouvertures. La sensibilité et la robustesse de l'algorithme ont été également vérifiées en faisant varier les poids de la fonction multi-objectifs.

Plan de travail

Cette thèse est composée des chapitres suivants :

➤ *Chapitre 1 : Concept du BIM : évolution, recherches et perspectives*

Ce chapitre donne un aperçu général de cette nouvelle technologie, comprenant les diverses définitions concernant le processus BIM, les outils d'interopérabilité, son évolution à travers le temps et en particulier son intégration dans l'industrie AEC.

➤ *Chapitre 2 : Conception générative, optimisation et automatisation de la conception structurale*

Dans ce chapitre, nous exposons une synthèse bibliographique sur les différents aspects relatifs à la conception générative et l'optimisation des conceptions structurales en utilisant les techniques basées sur l'intelligence artificielle.

➤ *Chapitre 3 : Développement d'un algorithme génétique pour la génération des structures optimisées*

Ce chapitre est dédié à l'élaboration d'un algorithme génétique pour la génération automatique d'une conception structurale optimisée à partir d'un modèle architectural en BIM-3D. Le protocole de définition et d'intégration des contraintes structurales et la fonction multi-objectifs à partir des règles générales de conception et des critères de résistance et de stabilité a été établi pour être appliqué à un système structural quelconque.

➤ *Chapitre 4 : Application de l'algorithme génétique pour la conception des structures dalle-voile en béton armé*

Dans ce chapitre, il a été procédé à l'application de l'algorithme génétique, que nous avons élaboré, au système voiles-dalles en béton armé. Pour ce faire, les contraintes et la fonction multi-objectifs propres au système sont définies et intégrées dans l'algorithme. Plusieurs configurations architecturales ont été utilisées pour la mise en œuvre de l'algorithme et l'évaluation de sa performance sur la base des résultats obtenus.

➤ *Chapitre 5 : Application de l'algorithme génétique pour la conception intelligente des structures en profilés laminés à froid*

Afin de confirmer le caractère général de l'algorithme génétique, une deuxième application aux structures à base de charpente en acier laminé à froid a été élaborée dans ce chapitre. Les critères de résistance et de stabilité ont été intégrés sous forme de contraintes et de fonction multi-objectifs pour être appliqués à plusieurs configurations architecturales. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité et la robustesse de cet algorithme.

➤ *Chapitre 6 : Conclusions générales & recommandations*

Enfin, notre travail de recherches s'achève avec ce dernier chapitre qui résume les conclusions essentielles déduites de cette expérience typique, ainsi que les recommandations que nous jugeons utiles pour qu'elles soient prises en compte lors des futurs travaux.

Chapitre 1

Concept du BIM

Evolution, recherches et perspectives

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, l'utilisation de la technologie de numérisation dans le secteur industriel du bâtiment a connu un essor considérable, associé à une amélioration importante de la productivité et de la qualité ainsi qu'une variété des produits. Les outils numériques se sont de plus en plus améliorés afin d'être mieux adaptés pour satisfaire les besoins de la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments et des infrastructures.

Cependant, l'utilisation continue des données numériques tout au long de la chaîne du processus, dans le cas du génie civil, a démarré en retard par rapport à d'autres secteurs industriels. De ce fait, des informations précieuses sont généralement perdues ou non synchronisées lors des échanges entre les acteurs AEC (Architecture, Engineering and Construction), lesquelles informations sont principalement transmises sous forme de dessins, de tracés physiques imprimés sur papier, ou sous un format numérique mais limité en exploitation. Ces perturbations dans le flux d'informations se produisent tout au long du cycle de vie d'un projet de bâtiment, durant ses phases de conception, de construction et d'exploitation. Ainsi, la planification et la réalisation des projets de construction sont donc devenues des missions complexes, nécessitant une large contribution des différents acteurs AEC à travers un rapprochement continu et un échange intense d'informations, afin de pouvoir réussir le projet (Borrmann et al., 2018).

Ce chapitre présente, d'une manière générale, les différents aspects qui caractérisent l'utilisation du BIM dans l'industrie du bâtiment AEC, en exposant dans un premier temps les définitions essentielles de cette nouvelle technologie, suivies par leur évolution à travers le temps en matière de recherches et développement d'outils et de procédures de travail. Nous présentons également les bénéfices de l'intégration de cette nouvelle technologie dans les différentes phases d'un projet du bâtiment, ainsi que l'ampleur de son utilisation à l'échelle mondiale.

1.2 Définitions et procédure d'usage du BIM (Maquette numérique)

1.2.1 Définition du BIM

Le terme « BIM : Building Information Model » ou « Maquette Numérique » est une représentation numérique qui comprend généralement la géométrie tridimensionnelle des composants du bâtiment à un niveau de détail bien défini. Elle comprend également des objets non physiques, tels que les espaces et les zones du bâtiment, la structure hiérarchique du projet ainsi que les plannings. Les objets sont généralement associés à un ensemble bien défini d'informations sémantiques, telles que le type de composant, les matériaux, les propriétés techniques ou les coûts, ainsi que les relations entre les composants et d'autres entités physiques ou logiques, voir figure 1.1.



Figure 1.1 : Vue d'un modèle BIM 3D, avec les informations sémantiques

Le « National Building Information Modelling Standard » des États-Unis définit le BIM comme suit :

Le « BIM » est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. C'est une source de connaissances partageable pour information sur un projet formant une base fiable pour les décisions au cours de son cycle de vie, depuis la conception jusqu'à la démolition. Une prémisses de base du BIM est la collaboration entre les intervenants du projet à différentes phases du cycle de vie du projet afin d'insérer, extraire, mettre à jour ou modifier les informations dans le modèle, pour soutenir et refléter les rôles de ces intervenants » (NIBS ver.3, 2015)

1.2.2 Historique du développement du BIM

Jusqu'à ces dernières années, et dans une large mesure, le processus de collaboration, de communication ainsi que l'échange d'informations ont été faits d'une manière linéaire entre les différents acteurs intervenant dans le processus de la construction d'un projet. Chaque acteur génère et ajoute des informations afin de remplir ses propres obligations. Cela signifie qu'avant une idée atteint la construction, elle est générée plusieurs fois par plusieurs intervenants, où cette multi-régénération des données peut engendrer certains conflits et problèmes de synchronisation des informations entre les acteurs AEC, ce qui peut nuire à l'avancement du projet (Tjell, 2010).

Depuis plus de quatre décennies, le professeur Chuck Eastman a introduit un nouveau concept de régénération des modèles à l'industrie du bâtiment, dans lequel il a décrit un système où « *Tout changement ne devrait être effectué qu'une seule fois pour tous les futurs dessins à actualiser (NIBS ver.3, 2015). Donc tous les plans dérivés de ce même plan de base seraient automatiquement cohérents* ».

A cette époque, il appelait ce concept par « Design Description System », qui est la base de ce qu'on appelle aujourd'hui le BIM. Ce principe a fait l'objet d'un grand investissement par les développeurs de logiciels, afin d'expliquer comment le concept basé sur l'aspect « d'information intégrée » des objets, peut réduire la perte de temps en termes de mises à jour automatiques.

Le tableau suivant présente à titre indicatif un aperçu sur l'historique du développement des logiciels de dessin avec l'importante contribution de Chuck Eastman dans ce domaine, ce qui le place dans une perspective plus large. Un logiciel était déjà en 1973 capable de concevoir des objets en 3D, que Eastman a alors mis en évidence en 1975 et a prédit comment cette nouvelle technologie pourra rendre l'industrie de la construction beaucoup plus efficace.

Tableau 1.1 : Aperçu historique sur l'évolution du développement des logiciels ayant permis la création de la technologie BIM. (Bozdoc, 2003)

Avant 1970	<p>Le Dr Patrick J. Hanratty, connu comme "le père du CADD / CAM" pour ses contributions pionnières dans le domaine de la conception et de la fabrication assistées par ordinateur, a développé en 1957 PRONTO, le premier système commercial de programmation à commande numérique.</p> <p>En 1960, Ivan Sutherland a utilisé l'ordinateur TX-2 produit au laboratoire Lincoln du MIT pour mettre en œuvre un projet appelé SKETCHPAD, qui est considéré comme la première étape de l'industrie de la CAO.</p> <p>Les premiers programmes de conception assistée par ordinateur utilisaient des algorithmes simples pour afficher des motifs de lignes d'abord en deux dimensions, puis en 3D. Les premiers travaux dans ce sens avaient été produits par le professeur Charles Eastman de l'Université Carnegie-Mellon.</p> <p>En 1968, Donald Welbourn (Directeur de la coopération industrielle à l'Université de Cambridge), a eu la précoce vision de prévoir la possibilité d'utiliser des ordinateurs pour aider les modélisateurs à résoudre les problèmes de modélisation de formes 3D difficiles.</p> <p>Le Dr Hanratty a fondé en 1969 the United Computing. La même année, la société MAGI est fondée et lance Syntha Vision considérée par beaucoup comme le premier programme commercial de modélisateur solide.</p> <p>En 1969, les sociétés Computervision et Applicon ont été fondées pour produire des systèmes de dessin de production en système CAO.</p>
1973	La création et l'édition de formes solides 3D arbitraires et leurs développements
1979	Mike et T. Lazear développent le premier software PC CAD, où le système CAO, était un miniordinateur typique de 16 bits avec une mémoire maximale de 512 Ko et un stockage de disque de 20 à 300 Mo à un prix de 125 000 USD.
1982	Autodesk a été fondée en Californie. L'objectif était de créer un programme de CAO pour PC pour moins de 1000 \$ USD
1984	En utilisant le langage (Pascal), G. Bajor a travaillé avec T. Hajas pour écrire le programme de CAO 3D pour le MAC qui était le début de la société GraphSoft.
1985	Keith Bentley fonde Bentley systems, Inc. MicroStation qui fournit une conception assistée par ordinateur avancée pour les PC. Initialement nommé PseudoStation, le logiciel développé par Bentley Systems permettait aux utilisateurs de visualiser les dessins et les fichiers IGDS sans avoir besoin du logiciel d'Intergraph.
1986	La première utilisation documentée du concept Building Information Modeling
Depuis 1990 à ce jour	Développement avancé des versions graphiques des logiciels de dessins 2D / 3D, ainsi que les logiciels orientés BIM.

Lorsque le concept BIM a été lancé, des prédictions ont été faites sur la façon dont cette nouvelle approche changerait le processus dans l'industrie du bâtiment, mais l'ampleur du changement n'était pas et ne pouvait pas être prédite à l'époque de Eastman en 1975. Avec le temps, il s'est avéré que les changements provoqués par le BIM dans l'industrie du bâtiment ont été beaucoup plus prometteurs et étendus, et cela à travers le changement fondamental de la perception concernant la façon de concevoir et construire les bâtiments, en impliquant plus les personnes dans l'industrie du bâtiment, car l'outil seul ne peut réaliser de telles tâches. En outre, l'efficacité des résultats « Output » dépend principalement des données d'entrées « Input », ainsi que des moyens utilisés. Donc, le grand défi de la mise en œuvre du BIM consiste à changer la philosophie et la perception qui animent l'industrie du bâtiment, car le problème est que le BIM n'est pas logique, même si la technologie semble l'être.

La réussite de cette nouvelle révolution technologique doit s'appuyer sur la confiance, la collaboration et la transparence entre les deux aspects (Machine / Homme) qui modifient l'approche conventionnelle.

1.2.3 Procédure d'usage du BIM

Le BIM décrit à la fois le processus de création de tels modèles de construction numériques ainsi que le processus de maintenance, d'utilisation et d'échange tout au long de la durée de vie de l'installation construite, dans un esprit de travail collaboratif interne à une entreprise ou interprofessionnel.

La figure 1.2, résume le processus de l'élaboration du modèle BIM imaginé par Borrmann (Borrmann et al., 2018), ainsi que les flux d'informations entre les différents intervenants.

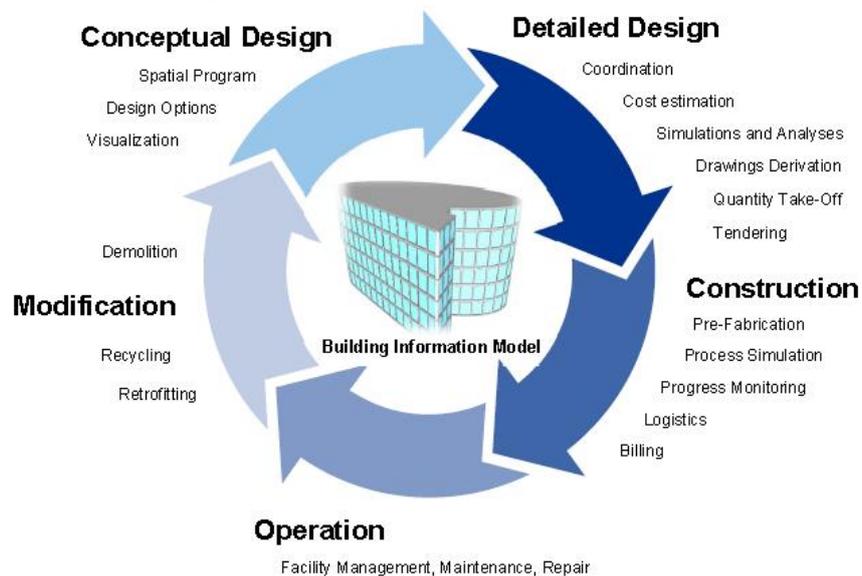


Figure 1.2 : Concept du processus BIM fait par Borrmann (Borrmann et al., 2018)

Il est à noter que l'idée du concept BIM n'est pas nouvelle, car les premiers articles de recherche sur la création et l'utilisation de modèles virtuels des bâtiments ont été publiés dans les années 1970 par Eastman et son équipe (Eastman et al., 1974). Par contre le terme « Building Information Modeling – BIM » n'a été utilisé pour la première fois qu'en 1992 par les chercheurs Van Nederveen et Tolman (Nederveen et al., 1992). Cependant, la diffusion

généralisée de ce terme a été initiée par la société des logiciels Autodesk qui l'a utilisé pour la première fois dans un livre blanc (Autodesk, 2003). Ces dernières années, de nombreux logiciels ont été élaborés, dotés de puissantes fonctionnalités BIM, dont le concept issu de la recherche est désormais devenu une pratique industrielle établie.

Sur le plan pratique il n'y a pas de définition universelle sur les données que doit contenir ou fournir un modèle BIM. Le contenu des informations dépend principalement de l'objectif du modèle, suivant les cas d'utilisation pour lesquels il est créé. Les cas d'utilisation du modèle BIM constituent donc un point de départ très important pour l'exécution du projet.

A titre d'exemple, « PennState college of engineering » a développé une approche globale d'utilisation, de construction et d'exploitation des modèles BIM (PennState, 2019). Généralement, pour les projets BIM types, plusieurs modèles sont utilisés au travers des différentes phases du projet, où chacun des modèles est adapté à une phase spécifique et aux cas d'utilisation envisagés. *Tableau 1.2* répertorie, à titre d'information, certains des cas d'utilisation les plus courants, la liste n'étant, en aucun cas, exhaustive.

Tableau 1.2 : Liste des cas d'utilisation des modèles BIM typiques (Borrmann et al., 2018)

Cas d'utilisation	Description
Visualisation technique	Visualisation du modèle 3D comme base de travail lors des réunions de projet et relations publiques
Coordination entre les différentes disciplines	Fusion des modèles des différentes disciplines en un modèle global de coordination à des intervalles réguliers, afin de détecter les chevauchements et résoudre les conflits sémantiques
Elaboration des plans techniques	Elaboration de la majorité des plans détails pour la conception et la construction
Modèles d'analyse et de calcul basés sur le BIM	Utilisation des modèles BIM comme input dans les modèles de calcul et d'analyse structurale, énergétique, performance, lumière, fluides, etc...
Estimation du coût	Basé sur les modèles BIM, le coût détaillé du projet peut être facilement obtenu
Quantitatifs	Basé sur les modèles BIM, les devis quantitatifs peuvent être préparés systématiquement pour la construction
Planning de la construction Modèle 4 D	Liaison entre les missions et actions individuelles du modèle BIM avec les processus correspondant du planning de la construction
Simulation sur l'évolution du coût – Modèle 5 D	Liaison entre le modèle 4D et les coûts de fabrication et / ou d'achat des matériaux de bâtiment
Suivi de l'avancement du projet	Création et actualisation du modèle 4D – planning- pour refléter et suivre l'avancement de la construction à l'état réel du projet

Facturation et contrôle du coût	Facturation et contrôle en se basant sur le modèle BIM de suivi de d'avancement des travaux
Gestion des défaut, erreurs, etc...	Utilisation du modèle BIM afin de répertorier les défauts de construction et établir leurs corrections
Exploitation du bâtiment et maintenance	Remise du modèle final BIM au client, pour qu'il soit utilisé ultérieurement dans les systèmes de gestion des installations pour l'exploitation et la gestion

1.2.4 Niveaux d'information N-D et niveaux de développement ou de détails

Le BIM permet l'élaboration des modèles à plusieurs niveaux d'informations, à savoir : des modèles 3D, 4D, 5D et 6D, où le modèle 3D représente la géométrie du bâtiment avec des objets paramétriques, le modèle 4D intègre les séquences et la planification des matériaux, des personnes, de l'espace, du temps, etc., le modèle 5D inclut les listes des fournitures et les coûts du projet, et le modèle 6D prend en compte la gestion des installations, le coût lors de l'exploitation ainsi que les impacts environnementaux. Ces concepts dépendent principalement sur le génie logiciel pour être implémentés. *Figure 1.3* illustre une présentation sur les liaisons entre les différents niveaux du modèles BIM.

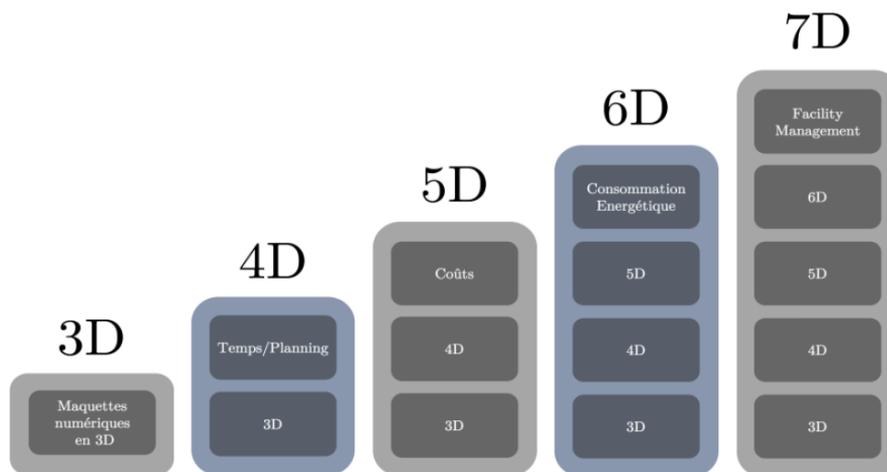


Figure 1.3 : Evolution des modèles dimensionnels

La spécification du niveau de développement LOD (Level of development) est une référence qui permet aux praticiens de l'industrie du bâtiment AEC de spécifier et d'articuler avec un haut niveau de clarté le contenu et la fiabilité de leurs modèles BIM à différentes étapes du processus de conception et de construction.

La spécification du LOD utilise les définitions de base développées par l'AIA (American Institute of Architects) pour le formulaire « AIA G202-2013 Building Information Modeling Protocol », et elle est organisée par la norme de classification des spécifications de construction, d'estimation des coûts et d'analyse des coûts aux États-Unis et au Canada « CSI Uniformat » (CSI UniFormat, 2021). Le LOD définit et illustre les caractéristiques des éléments du modèle de différents systèmes de construction à différents niveaux de développement. Ceci permet aux différents intervenants de bien définir sur quoi leurs modèles peuvent être établis et aux utilisateurs en aval de comprendre clairement l'utilité et les limites des modèles qu'ils reçoivent.

Le but de cette spécification est d'aider à expliquer le cadre LOD et à normaliser son utilisation afin qu'il devienne plus utile comme outil de communication. Le choix adéquat du niveau du LOD à adopter pour un projet donné est laissé à l'appréciation de l'utilisateur selon la spécificité du projet (Bedrick et al., 2019).

Les principaux objectifs de ces spécifications sont les suivants :

- Aider les intervenants AEC, y compris les propriétaires, à spécifier les livrables BIM et à obtenir une image claire de ce qui sera inclus dans un modèle BIM ;
- Aider les responsables de la conception à expliquer à leurs équipes les informations et les détails qui doivent être fournis à différentes étapes du processus de la conception ;
- Fournir une norme qui puisse être référencée par des contrats et des plans d'exécution BIM.

Les spécifications LOD sont donc utilisées comme étant des moyens pour définir les modèles BIM afin d'avoir des échanges d'informations spécifiques, des jalons dans un plan de travail de conception et des livrables pour des fonctions spécifiques.

Il est à noter que le terme « LOD » signifiant le niveau de développement – Level of development – d'un modèle numérique a été largement utilisé et a remplacé le terme niveau de détail, jugé trompeur, car il met trop l'accent sur l'aspect géométrique, alors que le premier définit à la fois le détail géométrique requis (connu sous le nom : niveau de géométrie - LOG) ainsi que les informations alphanumériques requises (également désignées comme niveau d'information - LOI). Un « LOD » définit l'étendue des informations fournies mais donne également une indication sur leur maturité et leur fiabilité. Dans la plupart des cas, un LOD peut être associé à une phase de conception spécifique.

Le BIM Forum américain définit six niveaux de développement normalisés, à savoir LOD100, LOD200, LOD300, LOD350, LOD400 et LOD500, tel qu'ils sont présentés sur la figure 1.4, où ces niveaux sont publiés dans le catalogue « LOD-Spec. » décrivant le niveau de développement pour les constructions ainsi que les composants typiques de construction (Bedrick et al., 2019).

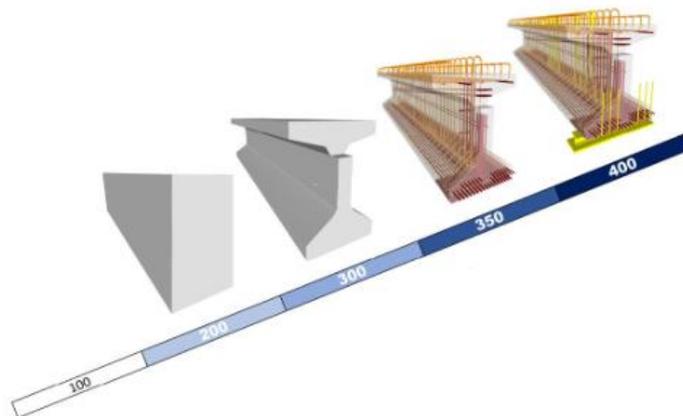


Figure 1.4 : Niveaux de développement selon le « BIM Forum Specifications »

Cependant, ce document ne fournit que des spécifications minimales concernant le niveau d'information « LOI », car les informations alphanumériques requises dépendent fortement du type de projet de construction et des cas d'utilisation BIM respectifs. Les exigences LOD font généralement partie des exigences d'informations de l'employeur définies par le client au début du projet.

1.2.5 Les outils du BIM

Le développement de la technologie BIM a été axé en premier lieu sur l'outil. Par contre, sa gestion n'a été prise en compte que durant les dernières années, ce qui n'est pas un hasard car si l'accent était mis au début sur le logiciel, principalement, qui dans une certaine mesure l'est encore aujourd'hui, de fait sans le logiciel, le BIM n'existerait pas.

L'évolution des capacités des outils BIM a été largement ressentie au cours des dix dernières années, et le processus de développement de logiciels se poursuivra aux fins d'amélioration en vitesse et efficacité d'accès aux informations des maquettes BIM.

Parmi les aspects les plus investis par les chercheurs et les producteurs des logiciels du BIM à l'heure actuelle, on cite les deux domaines suivants :

✓ Interface conviviale des logiciels.

Le fonctionnement d'un logiciel ou d'un programme doit être intuitif, car l'utilisation de nombreux logiciels reste encore très lourde, même pour les personnes qui ont une certaine expérience dans l'utilisation des programmes. Ceci reste un aspect relativement complexe à définir car les objectifs diffèrent selon les intervenants AEC du bâtiment, ce qui mène les usagers à trouver des programmes plus conviviaux à gérer (Hu et al., 2016).

✓ L'interopérabilité.

En dehors des trois grands producteurs de logiciels à savoir « AutoDesk, Graphisoft et Bentley », on trouve des centaines voire des milliers – d'autres programmes sur le marché du BIM, car il existe plusieurs fournisseurs de logiciels qui ont investi divers créneaux dans l'industrie du bâtiment.

Le problème majeur avec l'ensemble de ces fournisseurs, réside dans la plateforme de travail utilisée par leurs programmes qui n'est pas unifiée, faisant que la plupart des logiciels ne sont pas en mesure d'interagir entre eux parfaitement, ce qui engendre une perte de certaines données lors de l'exportation et l'importation lors des échanges d'informations.

Actuellement, ce problème reste posé pour beaucoup de logiciels, car il n'est pas encore universellement possible de transférer un objet contenant des informations d'un programme à un autre sans subir de perte, d'où le travail fastidieux de plusieurs chercheurs afin de créer d'autres applications ou logiciels capables de détecter les parties d'informations incorporées dans les objets qui n'ont pas été transférées (BuildingSmart report, 2020).

Afin de remédier à ce problème, de nombreuses tentatives ont été effectuées par certaines institutions et développeurs de logiciels telles que BuildingSmart et Solibri (2020), pour créer des formats de fichier compatibles et interopérables avec la majorité des logiciels. Le format de

fichier IFC (Industry Foundation Classes) qui peut contenir des objets et leurs attributs (informations) a été alors développé. Il a gagné en popularité internationale actuellement (Bollinger, 2006). Ce format représente un grand pas en avant dans la tentative de résolution du problème d'interopérabilité. Le travail présenté dans cette thèse utilisera ce format pour l'exploitation d'une configuration architecturale en format IFC en vue d'une optimisation structurale. Une description détaillée de ce protocole en sera donnée ci-après.

Dans un domaine contigu, plusieurs programmes et logiciel ont été aussi développés pour la lecture, la visualisation et la vérification des modèles BIM, tels que les programmes Solibri, Tekla BIMsight, Navisworks d'Autodesk et Benthly (2020).

1.3 La norme « IFC »

L'acronyme IFC, en anglais « Industry Foundation Classes », correspond à un format de fichier texte utilisé pour interchanger les données type XML, éditable avec un éditeur de texte tel que le « bloc note » (BS France, Mediaconstruct, 2020). Ce format de fichier a été créé afin d'améliorer l'interopérabilité des informations entre les différents logiciels utilisés dans l'industrie du bâtiment.

Les IFC ont été développés et spécifiés initialement par l'alliance internationale de l'interopérabilité l'IAI (International Alliance for Interoperability) qui a été créée en 1996, devenue par la suite « BSI » Building Smart international à partir de 2008. BSI continue jusqu'à ce jour de maintenir, enrichir et aussi à certifier les logiciels sur l'IFC. Actuellement les IFC sont normalisés en format de fichier standardisé en norme ISO16739.

L'IFC est donc un fichier de données conçu comme étant un modèle conceptuel de données orienté objet, comprenant la description des objets constituant un bâtiment tels que (murs, fenêtres, espaces, poteaux...) ainsi que leurs attributs et les relations entre eux telle l'implantation d'une fenêtre dans un mur, par exemple. Chaque objet comporte un certain nombre d'informations normalisées afin qu'elles soient exploitées de manière uniforme par l'ensemble des logiciels du domaine. Les classes d'objets d'un IFC traitent à la fois :

- La forme de ces objets ainsi que de leurs caractéristiques ;
- La gestion du bâtiment le long de son cycle de vie à travers les phases de (conception, construction, gestion) et suivant les différentes disciplines (architecture, structure, thermique, estimatif...).

Les objets sont classés dans des catégories nommées « IFCType », où l'usage de l'anglais permet de reconnaître les éléments comme « IfcSlab » pour les planchers, « IfcBeam » pour les poutres, etc. La version IFC4 compte environ 776 classes d'objets, ce qui permet une grande précision dans la qualification de la donnée.

En 1995, la société américaine Autodesk, a eu l'initiative de proposer une alliance entre 11 autres entreprises, travaillant toutes dans l'industrie du bâtiment à travers les différents secteurs tels que l'ingénierie, la construction ou encore le développement de logiciels (Archibus, AT&T, Carrier Corporation, HOK Architects, Honeywell, Jaros Baum & Bolles, Lawrence Berkeley Laboratory, Primavera Software, Softdesk Software, Timberline Software, Tishman

Construction), afin d'avoir une norme ouverte, internationale et libre d'accès. Un an après, en 1996, l'alliance internationale de l'interopérabilité l'IAI a été créée et la première version IFC 1.0 a vu le jour en 1997 (N-BIM, 2007).

Par la suite plusieurs versions ont été développées, *Tableau 1.3*.

Tableau 1.3 : Historique de développement des versions IFC (Van Berlo, 2020)

Version	Date de publication
IFC5	(En développement)
IFC4-Add2	Juillet 2016
IFC4-Add1	Juillet 2015
IFC4 (anciennement 2x4)	Mars 2013
IFC2x3-TC1	Juillet 2007
IFC2x3	Février 2006
IFC2x2-Add1	Juillet 2004
IFC2x2	Mai 2003
IFC2x-Add1	Octobre 2001
IFC2x	Octobre 2000
IFC2.0	1999
IFC1.5	1998
IFC1.0	1997

Actuellement, la version référence est l'IFC 4.0 qui a été normée en 2013 en format ISO16739. L'IFC 5.0 est en développement pour traiter les infrastructures telles que le SIG.

1.3.1 Composition d'un fichier IFC

La structure du format IFC repose sur trois grands piliers :

- ✓ La sémantique ;
- ✓ Les relations (entre les objets tels que installations, espaces, zones, aménagements, éléments structurels) ;
- ✓ Les propriétés de chaque objet (forme, coût, position, performance énergétique, connexion avec les autres objets, propriétés physiques et mécaniques, etc.) ;

Où les propriétés d'un objet peuvent se présenter de 3 manières :

- Des attributs généraux normalisés : Nom, Description, GUID ;

- Des jeux de propriétés (“Property Sets”) également normalisés par l’IFC, spécifiques aux types d’objets ;
- Des jeux de propriétés personnalisés par l’utilisateur, pour couvrir des besoins d’échanges non prévus par la norme.

A titre d’exemple, pour un mur il convient de citer :

IfcWallStandardCase

Attributes (attributs généraux normalisés)

- > *GlobalId*
- > *Name*
- > *Description*
- > *ObjectType*

Pset_WallCommon (propriétés normalisés)

- > *AcousticRating*
- > *Combustible*
- > *Compartmentation*
- > *ExtendToStructure*
- > *FireRating*
- > *IsExternal*
- > *LoadBearing*
- > *Reference*
- > *SurfaceSpreadOfFlame*
- > *ThermalTransmittance*

F6_Pset_Economiste (propriétés personnalisées)

- > *CodeCctp*
- > *Nomenclature*

Cependant, le fichier IFC est composé de 2 éléments :

- 1- Un entête – HEADER – qui reprend les informations générales sur le fichier et le programme ayant servi à sa génération, commençant par « Header » et qui se termine par « Endsec », tel que présenté par *Figure 1.6*.

```

ISO-10303-21;
HEADER;

/*****
* STEP Physical File produced by: The EXPRESS Data Manager Version 5.02.0100.07 : 28 Aug 2013
* Module: EDMstepFileFactory/EDMstandAlone
* Creation date: Thu Apr 05 09:33:31 2018
* Host: T-Salim
* Database: C:\Users\LENOVO\AppData\Local\Temp\{9A306D77-0024-4E35-A7AB-2D1035C95576}\ifc
5507
* Database version:
* Database creation date: Thu Apr 05 09:33:29 2018
* Schema: IFC2X3
* Model: DataRepository.ifc
* Model creation date: Thu Apr 05 09:33:29 2018
* Header model: DataRepository.ifc_HeaderModel
* Header model creation date: Thu Apr 05 09:33:29 2018
* EDMuser: sdai-user
* EDMgroup: sdai-group
* License ID and type: 5605 : Permanent license. Expiry date:
* EDMstepFileFactory options: 020000
*****/
FILE_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView_V2.0]','2;1');
FILE_NAME('0001','2018-04-05T09:33:31','(',')','The EXPRESS Data Manager Version 5.02.0100.07 : 28 Aug 2013','20170927_1515(x64) -
Exporter 18.3.1.0 - Interface alternative d'export 18.3.1.0',$);
FILE_SCHEMA('IFC2X3');
ENDSEC;

```

Figure 1.5 : Entête du fichier IFC – Header

- 2- Un bloc de données – DATA – qui reprend les caractéristiques du bâtiment (Eléments qui le composent, leurs formes, leurs caractéristiques techniques, leurs positions au sein de la structure, etc.), commençant par « DATA » et qui se termine par « Endsec » ;

```

DATA;
#1= IFCORGANIZATION('$','Autodesk Revit 2018 (FRA)',,$,$);
#5= IFCAPPLICATION(#1,'2018','Autodesk Revit 2018 (FRA)','Revit');
#6= IFCARTESIANPOINT((0.,0.,0.));
#9= IFCARTESIANPOINT((0.,0.));
#11= IFCDIRECTION((1.,0.,0.));
#13= IFCDIRECTION((-1.,0.,0.));
#15= IFCDIRECTION((0.,1.,0.));
#17= IFCDIRECTION((0.,-1.,0.));
#19= IFCDIRECTION((0.,0.,1.));
#21= IFCDIRECTION((0.,0.,-1.));
#23= IFCDIRECTION((1.,0.));
#25= IFCDIRECTION((-1.,0.));
#27= IFCDIRECTION((0.,1.));
#29= IFCDIRECTION((0.,-1.));
#31= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#6,$,$);

#183408= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('A-GLAZ-____-OTLN',$, (#122103,#122288,#122288));
#183410= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('A-ROOF-____-OTLN',$, (#144302,#144361),$);
#183412= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('A-WALL-____-OTLN',$, (#122021,#122048,#122048));
#183414= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('I-FURN-____-OTLN',$, (#3897,#3912,#6332,#6332));
#183416= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('I-WALL-____-OTLN',$, (#130889,#130900,#130900));
#183418= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('M-EQPM-____-OTLN',$, (#43044,#43054),$);
#183420= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('P-SANR-FIXT-OTLN',$, (#56166,#56176,#57016));
#183422= IFCPRESENTATIONLAYERASSIGNMENT('S-BEAM-____-OTLN',$, (#122392,#122410,#122410));
ENDSEC;

END-ISO-10303-21;

```

Figure 1.6 : Partie de données du fichier IFC – DATA

Chaque ligne commence par un numéro sous la forme « #xxxxx », qui représente l'identifiant unique de l'objet concerné, afin de permettre la recherche de l'élément dans la maquette, ainsi que de créer des « renvois » vers d'autres objets, ces renvois permettent aussi entre autres de lier les objets entre eux.

1.4 Le BIM dans l'industrie du bâtiment

Actuellement, les échanges d'informations - tels que les dessins techniques - se font généralement d'une manière graphique sous forme de plans (vues en plans, coupes horizontales et verticales, des vues en détails, etc...). Le logiciel utilisé pour créer ces dessins limite la façon et la manière séculaire de travailler à l'aide des plans. Cependant, ces dessins avec des traits ne peuvent pas être entièrement exploitables par l'ensemble des outils numériques. Baser le flux d'informations uniquement sur des dessins ne permet donc pas d'exploiter le grand potentiel des technologies de l'information afin de soutenir la gestion de projet et l'exploitation du bâtiment. Un problème clé qui s'impose est que la cohérence des divers dessins techniques ne peut être vérifiée que manuellement, ce qui peut être une source d'erreurs potentiellement massive, en particulier si l'on tient compte du fait que les dessins sont généralement créés par des experts de différentes disciplines de conception et de plusieurs sociétés. De plus, les modifications lors de la conception sont particulièrement difficiles (si elles ne sont pas suivies et relayées en continu à tous les plans associés), où des incohérences peuvent facilement survenir et restent souvent non découvertes jusqu'à leurs découvertes lors de la construction, entraînant alors des coûts supplémentaires importants au projet.

Dans la pratique, ces modifications sont généralement marquées par des nuages de révision sur les plans, ce qui peut être difficile à détecter et ambigu après un certain temps, vu l'ampleur des informations et leurs enregistrement limitées sur les plans, ce qui présente également un inconvénient important lors de leurs exploitation car elles ne peuvent pas être directement utilisées par les applications en aval pour tout type d'analyse, de calcul et de simulation, mais doivent être saisies à nouveau manuellement, ce qui nécessite à nouveau des travaux supplémentaires inutiles et donc constitue une autre source d'erreurs. À chacun de ces points d'échange d'informations, les données qui étaient auparavant disponibles sous forme numérique sont perdues et doivent être laborieusement recréées.

Figure 1.7 - imaginée par Eastman- illustre la perte des données lors des échanges d'informations à travers la méthode conventionnelle (Eastman et al., 2011).

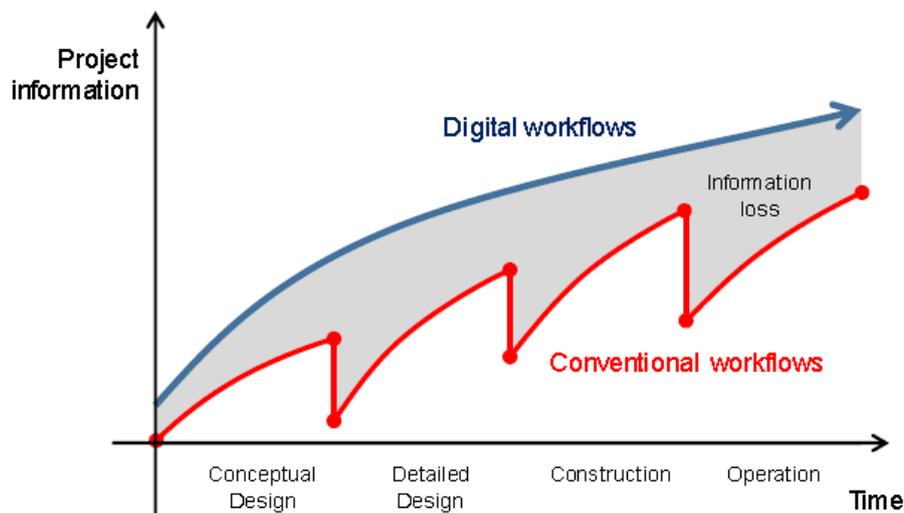


Figure 1.7 : Perte des données lors des échanges du flux d'informations

A partir de là, la modélisation des informations du bâtiment « BIM – Building Information Modeling » est rentrée en jeu, par le biais d'une utilisation beaucoup plus profonde de la technologie informatique « IT » dans la conception, l'ingénierie, la construction et l'exploitation de ce qui est déjà construit et réalisé. Au contraire de la méthode conventionnelle classique, le BIM stocke, conserve et échange les informations à l'aide de représentations numériques tridimensionnelles « 3D » complètes. Cette approche permet l'amélioration considérable de la coordination des activités lors de la conception, l'intégration des simulations, la configuration et le contrôle du processus de construction ainsi que la remise des informations du bâtiment à l'opérateur, tout en réduisant l'intervention de saisie manuelle des données sur un projet à son minimum nécessaire, ce qui évite les travaux laborieux ainsi que les erreurs, et induit de par cette amélioration l'augmentation de la productivité et de la qualité des projets de construction.

L'industrie du bâtiment est caractérisée par la complexité des interchanges des données, par les différents intervenants « AEC », qui ne vont pas être contrôlés par une seule entité, mais seront plutôt dispersés sur un certain nombre d'entreprises, y compris les bureaux d'architecture, d'ingénierie et entreprises de construction, pour une durée déterminée du projet. Par conséquent, il y a un nombre important d'interfaces dans le réseau, et donc le flux d'informations doit être supervisé et contrôlé par une instance centrale ; il incombe donc d'avoir une plateforme BIM pour l'ensemble des AEC.

Cette plateforme ou maquette numérique BIM est une représentation virtuelle d'un projet de bâtiment constituée d'un ensemble d'objets (structuraux, architecturaux, mécaniques... etc.), où chaque objet possède ces propres attributs et paramètres. Cette maquette est élaborée à travers un processus bien défini, afin qu'elle soit une plateforme centrale de partage et d'échange de données et d'informations entre les différents intervenant AEC du projet, (Hugo, 2016).

Le principal avantage de cette maquette est donc la maîtrise quasi-permanente et la gestion en continu du projet, depuis sa phase de conception jusqu'à sa phase d'exploitation, assurant entre les deux une continuelle coordination entre les différents corps de métier AEC ainsi que le client. La figure 1.8 présente le schéma fonctionnel de ce processus (Valente, 2015).



Figure 1.8 : Collaboration des différents intervenants avec la plateforme BIM (Valente, 2015)

Dès lors, on peut distinguer clairement les principales phases du processus BIM, à savoir :

- Phase d'ingénierie ;
- Phase de construction ;
- Phase d'exploitation

1.4.1 Phase d'ingénierie

Contrairement aux méthodes conventionnelles par le processus 2D, le BIM offre un grand nombre d'avantages dans la phase de conception préliminaire et d'ingénierie. Le plus important d'entre eux est le travail avec des modèles numériques 3D plus réalistes, et dont les détails techniques peuvent être dérivés directement du modèle, et sont donc automatiquement cohérents entre eux. Un autre avantage important est la détection des conflits entre les différents modèles partiels, ce qui permet, en amont à un stade précoce, d'identifier et de résoudre les conflits entre les disciplines de conception. Le modèle 3D-BIM facilite également l'intégration des calculs ainsi que les simulations d'une manière systématique, car les informations géométriques du bâtiment avec les paramètres des matériaux peuvent être directement extraites du modèle.

Un large éventail de simulations, y compris l'analyse structurale, la simulation des performances des bâtiments, la simulation d'évacuation des eaux, etc..., sont accessibles et utilisables dans le processus de conception. Enfin, les données du modèle peuvent être utilisées pour faire les bilans quantitatifs et estimatifs du projet, et donc servir comme base d'estimations de coûts fiables et améliorant la précision du processus d'appel d'offres.

D'un point de vue de planification des phases, l'application du BIM entraîne le déplacement de l'effort de conception vers les phases préliminaires tel qu'il est illustré sur le graphe de MacLeamy (CURT 2004 ; Eastman et al., 2011) sur la Figure 1.9. Dans un processus conventionnel, l'effort principal de conception et d'ingénierie ne se produit que dans les phases de conception détaillées ultérieures, et parfois même lors la phase de construction. Cela engendre, par conséquent, des possibilités de modifications de conception plus limitées et également plus coûteuses à mettre en œuvre car leurs évaluations ne se produisent qu'à un stade relativement tardif par rapport au processus global. En revanche, dans le processus basé sur le BIM, la majeure partie de l'effort de planification peut se faire dès les premières phases de conception en créant des modèles numériques complets de construction. Cela permet d'évaluer l'impact des modifications et décisions au stade de conception de manière plus globale, et permet l'identification ainsi que la solution des conflits potentiels dès le début du projet, ce qui diminue considérablement l'effort requis lors des phases ultérieures et améliore la qualité globale de la conception.

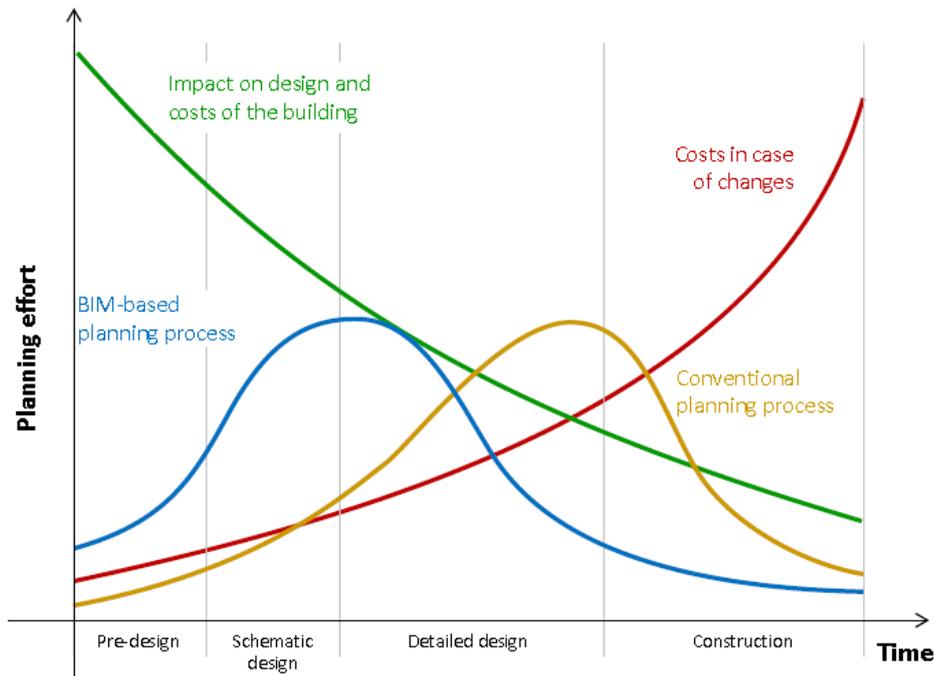


Figure 1.9 : Courbe MacLeamy - Avantages d'utilisation du BIM à travers les différentes phases du projet

1.4.2 Phase de construction :

De même que l'engineering, l'application du BIM dans la phase d'exécution et de construction offre d'importants avantages, à savoir :

- Utilisation du modèle BIM comme base de travail facilitant considérablement le façonnage et la fabrication des éléments surtout avec l'utilisation des machines équipées par des logiciels BIM ;
- Réaction et intervention rapide lors des modifications dans l'engineering, où les changements seront actualisés automatiquement sur l'ensemble des documents utilisés comme supports de base dans la construction ;
- Détection des erreurs ainsi que les omissions de la conception avant la phase de construction ;
- Synchronisation du planning en temps réel entre la construction et l'ingénierie du projet avec la prise en charge de toutes les modifications qui peuvent surgir lors de cette phase. En utilisant un modèle BIM-4D, qui associe les différents composants du bâtiment aux délais de construction prévus, la séquence de construction peut être validée, les collisions spatiales peuvent être détectées et la logistique du site peut être organisée.
- Synchronisation des approvisionnements entre l'ingénierie et la construction, où un modèle BIM-5D intègre en outre des informations sur les coûts il peut être utilisé afin de simuler l'évolution des coûts à travers le temps de réalisation du projet. Enfin, la facturation des travaux de construction, ainsi que la gestion des problèmes peuvent également être prises en charge à l'aide des méthodes BIM.

1.4.3 Phase post-construction (Exploitation & Opération) :

Un modèle BIM, bien établi avec une bonne organisation des informations lors de la conception y compris toutes les informations pertinentes de la phase de construction, permet au propriétaire d'utiliser cette base de données ultérieurement lors de l'exploitation du projet. Si le propriétaire reçoit des informations numériques de grande valeur au lieu de simples dessins, il aura la possibilité de les introduire directement dans ses installations ou ses systèmes de gestion des actifs. Cela signifie que les informations relatives à la taille des pièces, la climatisation, l'électricité et les télécommunications sont directement accessibles et n'ont pas besoin d'être saisies manuellement. Pour le fonctionnement d'un bâtiment, les informations sur les appareils installés, y compris les cycles de maintenance et les conditions de garantie, sont particulièrement précieuses.

Un autre aspect très important est l'actualisation en continu du modèle BIM du bâtiment en parallèle de tous les changements effectués lors des installations réelles in-situ. Lorsque des rénovations ou des modifications importantes sont nécessaires ultérieurement, le modèle numérique BIM du bâtiment fournit une excellente base pour les vérifications nécessaires de la conception.

Lorsqu'une installation atteint la fin de son cycle de vie et devrait être démolie ou remplacée, le modèle numérique BIM fournit des informations détaillées sur les matériaux utilisés, afin de planifier leur recyclage ou leur élimination respectueux de l'environnement.

Toutefois, malgré l'importance enregistrée à travers l'intégration de cette nouvelle technologie dans l'industrie AEC, l'adoption du BIM à l'échelle mondiale reste très variable d'un pays à l'autre où certains l'utilise très sommairement tel que la modélisation 3D seulement, alors que d'autres pays, par le biais de leurs gouvernements, ont exigé son intégration dans le marché du bâtiment et ce depuis le début des années 2000, tels les cas des États-Unis (2003), de Singapour (2004), de la Finlande (2007), du Royaume-Uni (2011), suivis par beaucoup d'autres pays sur l'ensemble des continents.

Les États-Unis sont considérés comme étant le pays pionnier de cette technologie, où plusieurs institutions du secteur étatique et privé se sont intéressées à cette technologie tels que la « General Service Administration » depuis 2003 (GSA, 2020) et le « US Army Corps of Engineers » qui a publié en 2012 une feuille de route BIM complète et elle a fourni des modèles pour les outils de création BIM ainsi que les exigences contractuelles (CAD-BIM Technology center, 2012). La norme nationale BIM Américaine, quant à elle, a été publiée en 2012 par l'Institut national des sciences du bâtiment NIBS, qui regroupe un ensemble de normes relatives aux échanges de données IFC et COBie, les spécifications BIMforum LOD, les normes CAO américaines, et les cas d'utilisation PennState BIM. La dernière version a été actualisée en 2015 (NIBS, 2015).

La Grande Bretagne a lancé en 2011 une stratégie qui consiste à fixer comme objectif de mettre la technologie BIM comme priorité afin d'acquérir un avantage concurrentiel sur le marché international. En 2014, une bibliothèque nationale BIM qui fournit les objets BIM des différents fabricants avec des ensembles de propriétés prédéfinis a été établie (NBS, 2020).

La France pour sa part a initié, en 2014, un plan de transition numérique du patrimoine, où un guide BIM répondant aux besoins des maîtres d'ouvrage a été publié en 2016. Au cours de la même année, le chapitre français de BSI appelé « MediaConstruct », ainsi que plusieurs guides décrivant les processus BIM, les cas d'utilisation BIM et le contenu BIM, ont été publiés (PTNB, 2016). D'autres pays européens ont également lancé des initiatives pour mettre en œuvre le BIM dans le secteur public de la construction, tels que la Suède en 2014 (BIM Alliance Sweden, 2017), la Norvège en 2013 (Staatsbyg, 2020) et les Pays-Bas en 2013 (Rgd, 2020). Il y a lieu de citer aussi l'Allemagne où le ministère des Transports a publié une feuille de route BIM en 2015 définissant l'utilisation obligatoire des méthodes BIM pour tous les projets d'infrastructures fédéraux à partir de 2020 (BMVI, 2015). Une importante initiative qui concerne l'établissement d'un réseau européen commun afin d'aligner l'utilisation du BIM dans l'industrie AEC a été élaborée. Parmi les résultats de cette initiative, on peut citer la publication du « BIM Handbook for Owners » ainsi que le « Manuel pour l'introduction du BIM par le secteur public européen » (EU-BIM, 2017).

En Asie, parmi les pays les plus avancés dans l'intégration du BIM dans leurs sociétés, on peut citer la Chine qui a fait ses premières directives et normes BIM en 2001. Depuis plusieurs travaux de recherches se sont développés, ayant abouti entre autres à la publication du « Outline of Development of Construction Industry Informatization (2016-2020) » (Liu et al., 2017).

En Australie, le premier rapport « The National Building Information Modeling Initiative - NBIMI » a été publié en 2012 (NBIMI, 2012), suivi par l'intégration du BIM dans le secteur des infrastructures à la fin de l'année 2015 (ICT report, 2016). Parallèlement, plusieurs normes et standards concernant l'utilisation du BIM ont été publiés par « The Austrian Standards » (BIM ASI, 2015).

Concernant les pays arabes du Moyen Orient, bien que l'implantation du chapitre BuildingSmart a été installé pour la première fois aux Emirats Arabes Unis UAE en 2009 (BS-ME, 2011), l'utilisation du BIM est restée très sommaire jusqu'à l'année 2014 où la municipalité l'a mandaté pour les grandes tours (Tareq, 2019), où ce retard a été principalement causé par l'inexistence de normes ainsi que les coûts de mise en œuvre de ce processus dans les projets (Mehran, 2016). D'autres pays ont essayé d'intégrer cette technologie dans leurs industries du bâtiment tels que le Qatar et l'Arabie Saoudite, mais l'UAE reste toujours le leader dans ce domaine (Gerges et al., 2017 ; Smart Market, 2017).

Le même constat est enregistré pour les pays Africains où l'intégration du BIM reste actuellement très sommaire avec un niveau de maturité faible à moyen. Cependant, avec l'expansion économique ainsi que l'important investissement des grandes compagnies étrangères ces dernières années, les gouvernements de plusieurs pays se sont alors investis pour adopter cette technologie dans leurs sociétés (Saka et al., 2019), tels que le Nigéria (Ogwueleka et al., 2017) et l'Afrique du Sud (Harris, 2019).

Enfin, en Algérie l'adoption du BIM dans l'industrie de la construction a commencé ces dernières années à prendre place dans plusieurs institutions, bureaux d'études et entreprises malgré les majeurs défis qui s'imposent, tels que le manque de normes, de protocole, d'accord contractuel et d'une vision claire du gouvernement et des professionnels de la construction vers

la mise en œuvre du BIM, ainsi que le manque de demande des clients. Cela n'a pas empêché d'utiliser cette technologie même si c'est à un niveau de maturité faible à moyen (Bouguerra et al., 2020).

1.5 Evolution et perspectives du BIM

L'intégration du BIM dans l'industrie du bâtiment lors des quatre dernières décennies a montré un impact significatif sur l'ensemble de l'industrie (AEC). Contrairement au processus conventionnel, et selon une analyse élaborée par l'institution McGraw-Hill Construction en 2014, les entreprises ayant adopté ce processus ont enregistré un retour d'investissement « ROI »¹ très remarquable atteignant les 97% pour les pays tels que le Japon, l'Allemagne et la France, 85% pour le Canada avec le Brésil, et 74% pour les USA. Parmi les bénéfices enregistrés lors de l'utilisation du BIM, il convient de 41% de réduction des erreurs et omissions, 35% d'augmentation de collaboration entre les AEC et client, 32% d'amélioration dans l'organisation du projet, 31% de réduction sur les travaux refaits, 23% de réduction des coûts de la construction, et près de 20% de gain sur le planning global du projet (McGraw-Hill, 2014).

Parallèlement à l'ampleur enregistrée sur l'intégration du BIM qui ne cesse d'augmenter, les exigences sur son utilisation n'ont pas cessé de croître aussi, surtout du fait de l'obligation par les gouvernements de plusieurs pays d'adopter ce nouveau processus dans leurs industries du bâtiment, au moins avec le niveau 2. De ce fait, plusieurs travaux de recherches ont été lancés par plusieurs institutions et laboratoires afin de perfectionner ce processus pour qu'il réponde aux besoins du marché de cette industrie à l'état actuel, d'améliorer davantage les outils d'interfaces, et de développer ainsi d'autres outils et technologies BIM pour l'avenir dans les secteurs du bâtiment et des infrastructures (Azhar, 2011).

Selon une analyse établie par « The Autodesk University » (Allen, 2017), les nouvelles tendances du BIM sont très prometteuses, de nombreux travaux étant axés ces dernières années sur l'adoption et l'intégration de l'intelligence artificielle « IA » sur plusieurs volets du BIM d'une manière générale, et particulièrement dans le processus de conception et de construction, par le biais des :

- ✓ Adoption de l'automatisation de conception architecturale / structurale paramétrique telle que l'approche de conception générative ;
- ✓ Adoption des programmes algorithmiques dans la conception ;
- ✓ Vérification et évaluation automatiques des modèles numériques par ordinateurs en fonction de contraintes prédéfinies ;
- ✓ Amélioration de l'interopérabilité entre les acteurs AEC permettant d'éviter les pertes de données ;
- ✓ Utilisation des méthodes d'apprentissage automatique afin de faciliter les processus de prise de décision ;
- ✓ Utilisation des constructions robotisées.

¹ Return on the Investment

D'après le directeur de la Digital Delivery de la société Bryden Wood² M. Phil Langley, le BIM est plutôt bien plus puissant qu'un simple outil de documentation « *Le BIM est une technologie qui aide les utilisateurs à collecter, rassembler et organiser toutes sortes d'informations, y compris la structure du bâtiment (et ses performances). Cela peut également inclure la manière dont les actifs construits peuvent être réellement expérimentés et utilisés par les personnes. Les modèles doivent eux-mêmes devenir des sources de données qui peuvent être superposées et ajoutées au fil du temps pour capturer de nombreux aspects différents du cycle de vie et doivent être considérés comme des référentiels de données pouvant être utilisés pour alimenter des techniques de conception numérique plus avancées et sophistiquées* » (Hicham, 2018). Le même constat a été affirmé par Mme. Sasha Crotty qui est Senior Product Manager chez Autodesk Revit Platform & Services, qui a fait écho dans un point de vue similaire « *Il y a tellement de connaissances qui sont piégées à l'intérieur de projets antérieurs sur des serveurs du monde entier qui n'attendent que d'être réutilisées. La question est vraiment la suivante : l'automatisation peut-elle contribuer à rendre les architectes plus efficaces afin qu'ils puissent apporter davantage de leurs compétences et connaissances de base en conception pour améliorer l'environnement bâti ?* » (Hicham, 2018).

Sur cet aspect et durant ces dernières années, Autodesk a investi le potentiel d'intégration de la conception automatisée dans ses programmes avec le développement du projet « Dreamcatcher » considéré comme étant la future génération du CAD, permettant aux concepteurs l'établissement de conception générative automatisée en considérant leurs objectifs recherchés ainsi que leurs contraintes. Ce système peut générer plusieurs variantes de conception architecturale qui répondent aux objectifs spécifiés. Il permet aussi aux concepteurs d'explorer les avantages et les inconvénients des différentes approches alternatives, et choisir par la suite la conception la plus adéquate (Kazi, 2017). Actuellement, Autodesk a intégré un nouveau module de la conception générative pour les acteurs architectes et les ingénieurs dans la nouvelle version du Revit 2021 (Smith et al., 2020).

1.6 Conclusion

Le BIM est une technologie de modélisation des informations du bâtiment qui aide à la gestion des données, le long du cycle de vie du projet. Ces modèles comprennent à la fois la géométrie 3D des éléments ainsi qu'un ensemble complet d'informations sémantiques, à savoir leurs fonctions, les caractéristiques des matériaux ainsi que les relations entre les objets. Un modèle BIM peut fournir une représentation numérique de très haut niveau du bâtiment réel, où le contenu d'un modèle dépend principalement du cas de son utilisation ainsi que de la phase du projet dans laquelle il sera appliqué. Ces modèles permettent à la fois la visualisation, la coordination de la conception, la génération de dessins, le bilan des quantités, le suivi des progrès du projet ainsi que la gestion des diverses installations.

L'utilisation du BIM a montré des avantages très significatifs par rapport aux processus conventionnels, tels que la réduction des erreurs dans la conception des bâtiments avec une meilleure transparence du processus de construction, ce qui contribue à réduire les risques en ce qui concerne le dépassement en matière de temps et de budget d'un projet. Outre la

² <http://www.brydenwood.co.uk>

modélisation en 3D des bâtiments et la gestion pluridisciplinaire AEC des projets, le volet d'inter-échange des données a été le plus investi, afin d'assurer une interopérabilité efficace et normalisée entre les différents systèmes BIM.

Actuellement, avec l'avancée considérable de la technologie d'informatique « IT » et particulièrement l'IA, le BIM apparait comme étant l'environnement idéal pour l'automatisation intelligente des interfaces interdisciplinaires du domaine de l'industrie du bâtiment. A cet égard, plusieurs institutions se sont investies dans cet otique, qu'elles soient du secteur public ou privés, notamment les chercheurs de plusieurs universités à travers le monde.

Chapitre 2

**Conception générative,
Optimisation et Automatisation de
la conception structurale**

2.1 Introduction

L'élaboration d'une conception structurale d'un bâtiment joue un rôle majeur dans le processus de construction avec les différents intervenants AEC, car d'importantes décisions sont prises par les ingénieurs concepteurs dans cette étape, notamment la typologie de la structure, l'ossature et le système structural, les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux, la disposition ainsi que les dimensions des éléments structuraux, etc... où un choix judicieux et adéquat de ces paramètres impacte directement la constructibilité, le coût et les performances générales du bâtiment.

D'une manière générale, le processus de conception structurale passe par plusieurs étapes, à savoir : i) l'exploitation des données input du projet, ii) la modélisation et le calcul, iii) l'évaluation de la structure en matière de résistance et stabilité, et enfin iv) l'optimisation de la conception afin de minimiser son coût (Johnson et al., 2009). Cependant, garantir un tel résultat suggérerait que les concepteurs soient en mesure d'analyser, de comparer et d'évaluer le comportement de plusieurs variantes de conceptions rapidement et efficacement au cours des premières étapes, afin d'augmenter le potentiel de réussite globale du projet, alors que dans un système classique les ingénieurs s'appuient généralement sur leurs propres connaissances et expériences pour concevoir les structures, en essayant par la suite d'optimiser manuellement leurs concepts à travers un processus itératif et long, réduisant ainsi le temps pour envisager d'autres alternatives possibles (Hamidavi et al., 2018).

Ce constat a été clairement illustré sur le graphe de McLeamy (CURT, 2004) qui a démontré que le déplacement de l'effort des concepteurs vers les phases préliminaires peut améliorer favorablement ce processus en termes de rentabilité et de capacité fondamentale à changer la conception et augmenter ainsi le potentiel de réussite globale du projet.

Par conséquent et dans le cadre de notre présent travail de recherche qui concerne l'intégration des techniques de l'intelligence artificielle « IA » dans une conception structurale toute en utilisant des outils BIM et d'une manière automatisée, le présent chapitre expose les travaux de recherche déjà réalisés dans ce domaine et développe les différents aspects de ce processus.

2.2 Principe de la conception structurale générative

D'une manière générale, la conception structurale d'un bâtiment est principalement basée sur un processus itératif composé de trois étapes successives d'ajustement et de raffinement, dont la première concerne la conception préliminaire de la structure alors que les deux autres sont relatives aux calculs préliminaires et détaillés des éléments structuraux. La première étape représente la phase la plus importante du processus car c'est à ce niveau que les caractéristiques les plus essentielles du bâtiment sont définies et que d'importantes décisions concernant l'architecture du bâtiment sont prises, telles la configuration interne des espaces par rapport au positionnement des éléments structuraux, ce qui donne forme à l'ossature du bâtiment. Par conséquent, il est primordial de tenir compte des critères de conception structurale ainsi que des contraintes et exigences de l'architecture avec ceux des CES dans cette première phase.

Durant ces dernières années, certains travaux de recherches ont été développés afin de proposer des concepts représentatifs de conceptions génératives capables d'intégrer l'aspect structural dans ce processus, mais la plupart de ces modèles ont été orientés plutôt vers l'aspect architectural et géométrique globale du bâtiment, et ils ne considèrent pas le côté purement structural qui assure la stabilité et la résistance du bâtiment vis-à-vis des diverses sollicitations.

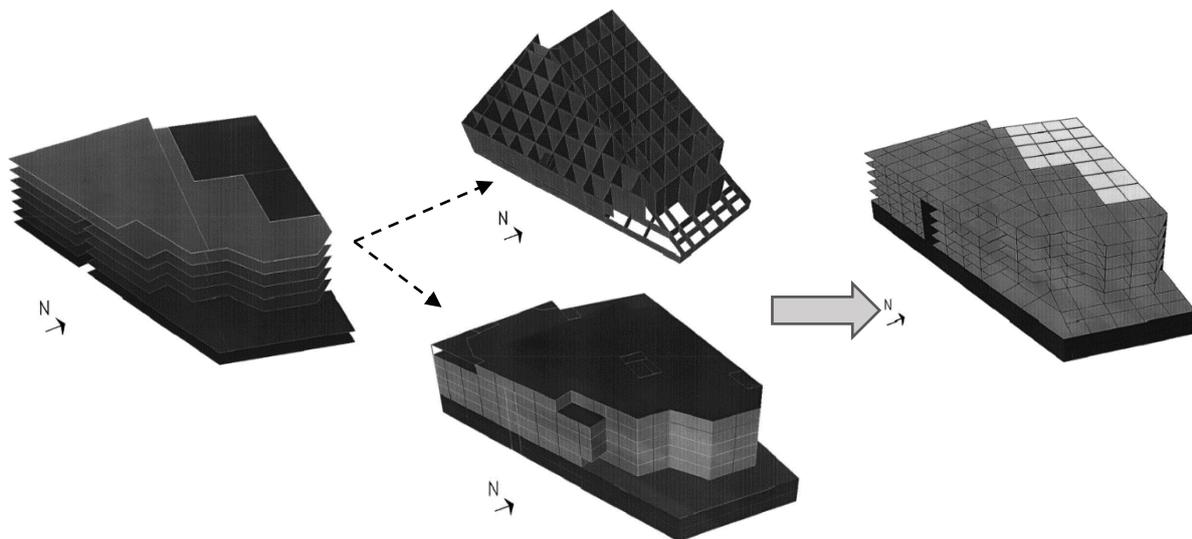
Il est à noter que le principe d'une bonne conception structurale d'un bâtiment doit satisfaire les trois exigences suivantes : i) intégrer les configurations des différents intervenants impliqués dans le processus de cette conception ; ii) permettre le raffinement et/ou l'évolution des conceptions ; et iii) favoriser l'exploration de diverses solutions alternatives afin de permettre les itérations ainsi que les changements futurs. Ces modèles varient en termes de portée et fonction selon l'objectif recherché du concept.

La portée détermine si le modèle est sémantiquement explicite (c.à.d. s'il incorpore de manière exhaustive les conceptions structurales qui sont pertinentes) et plus pratique qu'une représentation syntaxique (qui définit de manière générique la structure de données ainsi que les règles d'organisation de l'information), ou vice versa. Pour cela, de nombreuses approches ont été développées par plusieurs chercheurs, où pour le cas d'une représentation sémantique la plupart modélise les éléments structuraux tout en considérant certaines entités architecturales strictement nécessaires telles que les planchers et les murs, et dont peu de modèles fournissent des descriptions détaillées sur la conception structurale ainsi que sa relation avec l'aspect architectural du bâtiment. Par contre, pour le cas de la représentation syntaxique générique, l'aspect de l'information spatiale dans la conception structurale est plutôt bien considéré (Rivards et al., 2000).

La plupart des travaux dans ce domaine a été élaborée en utilisant, comme support de base, les programmes informatiques et/ou parfois même les logiciels de calcul et de dessin de structure. Les plus distingués d'entre eux sont ceux qui impliquent, dans le processus de génération de conceptions, l'intégration de l'aspect structurale dans la phase préliminaire de l'étude et qui utilisent les diverses techniques de l'intelligence artificielle tels que les algorithmes génétiques, l'utilisation des plateformes centralisés, etc.

Après analyse, nous avons constaté trois approches typiquement différentes, chacune développant une technique bien particulière.

La première approche est celle de Mora (Mora et al., 2006), connue sous le nom de « StAr – Structure / Architecture », qui consiste à établir une décomposition descendante du système structural global du bâtiment en plusieurs sous-volumes structuraux indépendants par niveau. Ils sont supposés se comporter comme des ensembles structuraux. Par la suite, ces sous-volumes sont à leur tour subdivisés en des entités plus petites dans le même niveau afin de permettre la définition des exigences structuraux selon le fonctionnement architectural, voir figure 2.1.



a) Modèle d'architecture

b) décomposition

c) modèle structure

Figure 2.1 : Décomposition et extraction d'une conception structurale selon StAr

La réflexion de cette approche est principalement basée sur la combinaison des concepts des deux domaines architectural et structural dans un seul modèle géométrique capable de schématiser les informations spatiales, le raisonnement du concept en matière de géométrie et de topologie seulement étant synthétisé en Figure 2.2 :

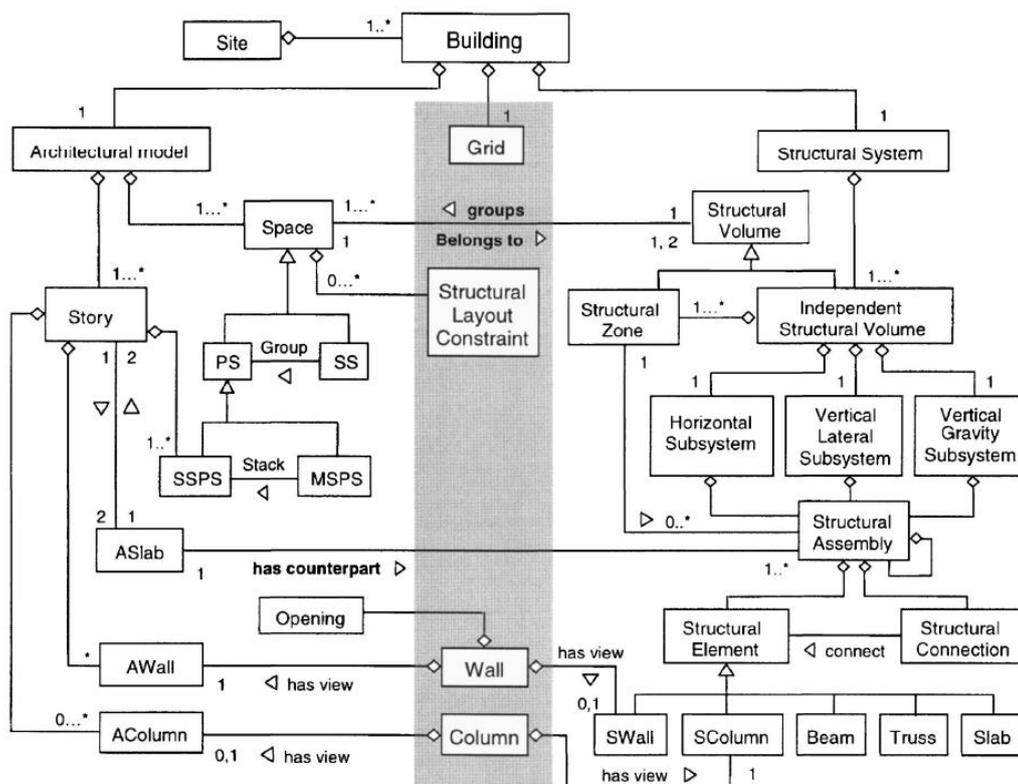


Figure 2.2 : Processus d'identification d'une conception structurale selon StAr

Cependant, l'aspect du comportement structural, du calcul et du dimensionnement des éléments structuraux selon les codes et la réglementation en vigueur n'est pas intégré dans cette approche.

La deuxième approche est celle proposée par (Soibelman et al., 2000) qui consiste à produire un programme informatique qui vise à aider les ingénieurs dans leurs conception structurale lors de la phase préliminaire d'un bâtiment - en particulier les immeubles de grande hauteur - tout en se basant principalement sur le retour d'expérience des conceptions antérieures, afin de permettre la génération et l'adaptation de plusieurs variantes de conception structurale, et cela à travers le développement d'un prototype à raisonnement multiple nommé « M-RAM - Multi-Reasoning Model ». Le programme développé est caractérisé par sa capacité de classer les solutions structurales proposées d'une manière très organisée et fiable selon l'aspect géométrique du bâtiment (voir figure 2.3), ce qui permet l'amélioration des connaissances des concepteurs ainsi que leur créativité dans l'établissement du choix des conceptions pour les ouvrages similaires.

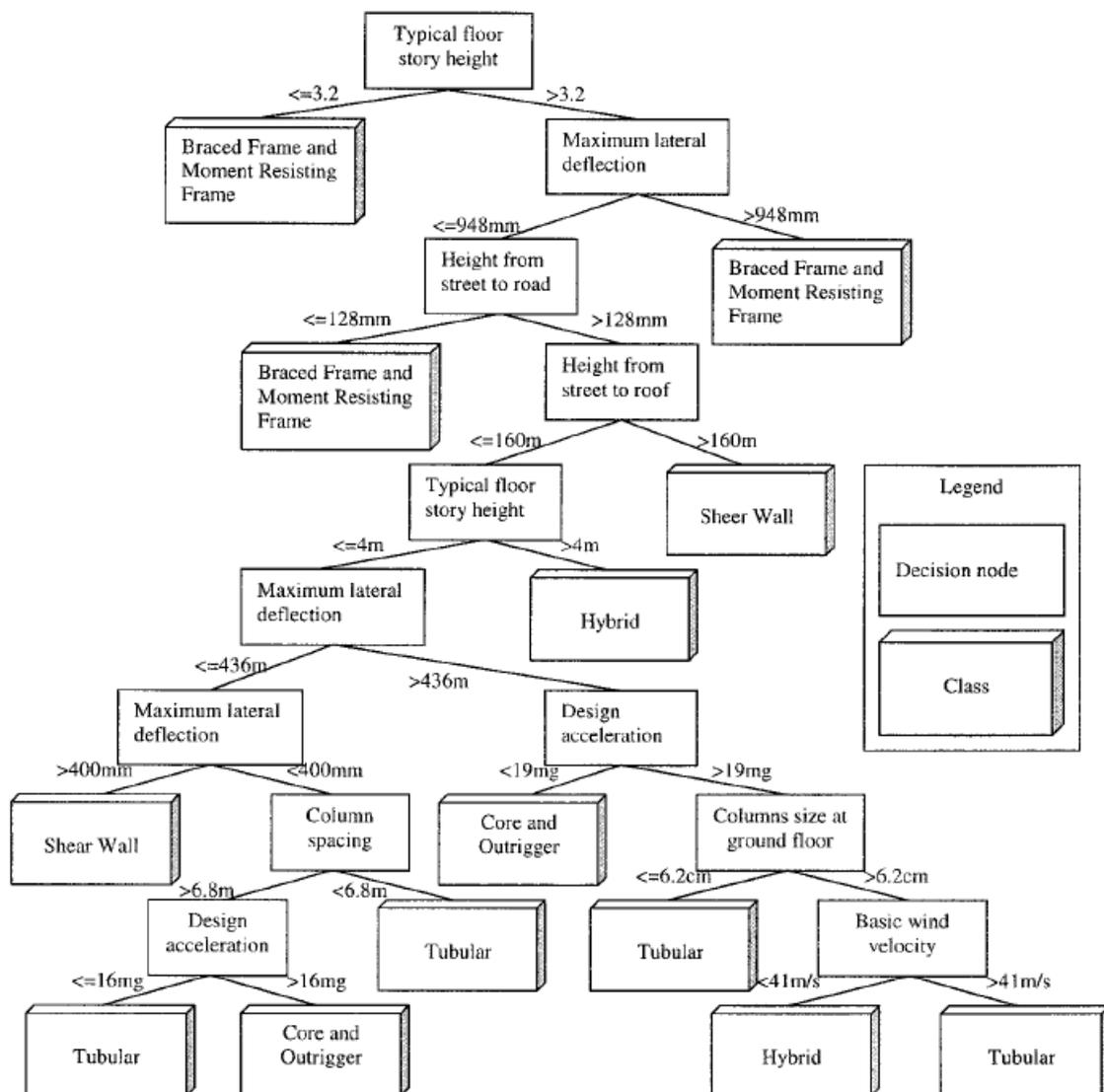


Figure 2.3 : Processus d'identification d'une conception structurale selon M-RAM

L'efficacité et la fiabilité de ce prototype ont été confirmées à travers le développement d'un algorithme génétique AG, et l'inter-échange entre les différents intervenants du processus a été assuré par l'utilisation de l'internet comme support de base de communication dans ce mécanisme. Néanmoins, cette approche ne considère pas l'aspect du comportement structural ou les exigences règlementaires dans la phase de conception.

La troisième approche typique est celle de (Gerold et al., 2012) proposant un projet basé sur l'utilisation du système conception structurale intégrative « ISDS - Integrative Structural Design System » et permettant l'analyse et la synchronisation de différentes solutions alternatives de conception structurale générées d'un ouvrage donné dès la première phase, afin d'investir leurs limites en matière de performance, de résistance, de ductilité et de sécurité, ainsi que l'interactions entre ces paramètres. Cette technique fournie donc aux architectes et aux ingénieurs un environnement leur permettant de considérer l'impact potentiel de l'ensemble des décisions prises dès le début du projet, où les actions importantes et exigeantes telles que par exemple l'analyse de la résistance et les limites de déformations des éléments structuraux sont considérées dans la première phase. Pour cela, un processus a été proposé et développé par l'utilisation de plusieurs logiciels d'architecture, de conception et d'analyse structurale afin d'élaborer des modèles d'une manière relativement simple et rapide, pour avoir une visualisation plus efficace avec une interprétation intuitive des résultats (voir figure 2.4).

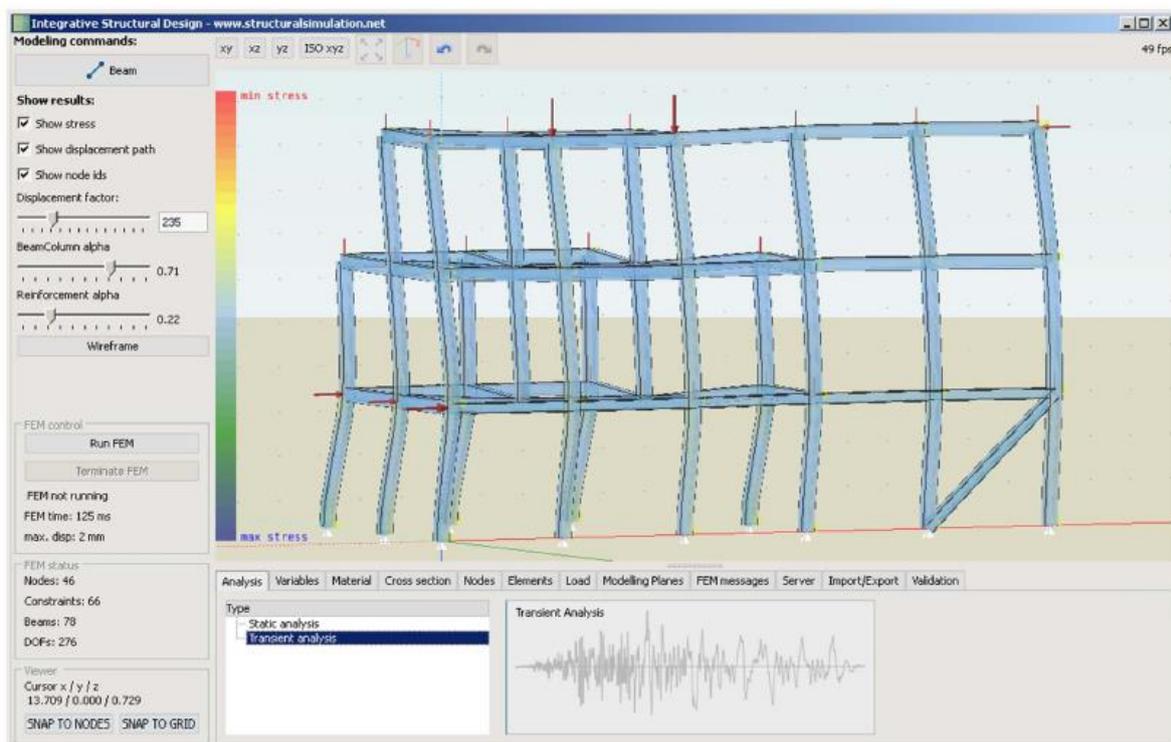


Figure 2.4 : Vue sur l'interface du programme ISDS

Cependant, cette approche nécessite plusieurs intervenants ayant au préalable un minimum d'expérience et de connaissances et elle suggère des modélisations ainsi que des calculs.

Ce qu'on peut conclure de ces travaux est que, malgré le remarquable intérêt apporté par certains chercheurs sur la conception structurale générative dans la phase préliminaire du projet, l'accent est davantage orienté vers l'aspect géométrique et topologique que vers l'aspect dimensionnel, comportemental et réglementaire des structures. En effet, sur l'ensemble des techniques développées, les solutions proposées n'abordent pas directement ce volet. En outre, la validation de ce processus est tributaire d'un travail complémentaire que l'ingénieur de structure doit faire à travers l'établissement des modèles de calcul afin d'analyser et confirmer les alternatives de conceptions les plus adéquates à son projet.

L'intégration de la conception structurale au stade préliminaire d'un projet en considérant l'aspect purement structural dans cette étape reste à l'heure actuelle toujours originale, notamment quand il s'agit de considérer à la fois les paramètres liés à la géométrie et la topologie du bâtiment ainsi que les critères fondamentaux utilisés lors d'une conception structurale, laquelle conception se base principalement sur les règles de conception et calcul des structures, ainsi que sur les règles et exigences des conceptions parasismiques, et ce sans établissement de modélisation et de calcul.

2.3 Optimisation des structures

Un autre aspect très important qui est toujours en pleine effervescence ces dernières années, concerne l'optimisation structurale, du fait du développement remarquable de la technologie informatique « IT » à travers les outils de calcul numérique, de modélisation, des algorithmes, etc... qui sont de plus en plus performants et rapides. Cette optimisation peut intervenir principalement sur deux aspects : l'émergence d'une nouvelle conception, à travers la modification de la topologie, et l'amélioration de l'existant, en modifiant les paramètres de conception suivant l'objectif et les limites recherchés (Sid, 2006).

Généralement, l'optimisation structurale peut être répartie en 3 catégories :

- 1- *L'optimisation dimensionnelle* : qui consiste à avoir comme variables de conception les dimensions transversales des éléments structuraux (section des éléments barres, épaisseurs des éléments plans tels que les membranes et les plaques, etc...) ;
- 2- *L'optimisation de forme* : qui consiste à contrôler la géométrie d'une structure à une topologie fixe, où les paramètres variables de conception sont principalement les limites de la structure suivant sa forme telles que les coordonnées des points ;
- 3- *L'optimisation topologique* : c'est une méthode qui permet de trouver la répartition optimale de la matière dans un volume donné soumis à des contraintes. Elle se distingue de l'optimisation de forme qui ne fait varier que la frontière de la structure qu'il faut avoir dessinée au départ. En d'autres termes, ce type d'optimisation intervient à la fois sur la géométrie et la topologie de la structure, ce qui permet de déterminer d'une certaine manière la forme ainsi que les dimensions transversales optimales d'une ossature structurale. Cela revêt un grand intérêt car cela permet d'avoir plus de variantes de conception à travers la flexibilité qu'on peut avoir avec une topologie variable, et avec un gain significatif en matière de performance.

La figure 2.5 présente les trois types d'optimisation structurale selon Bendsoe (Bendsoe et al., 2003) :

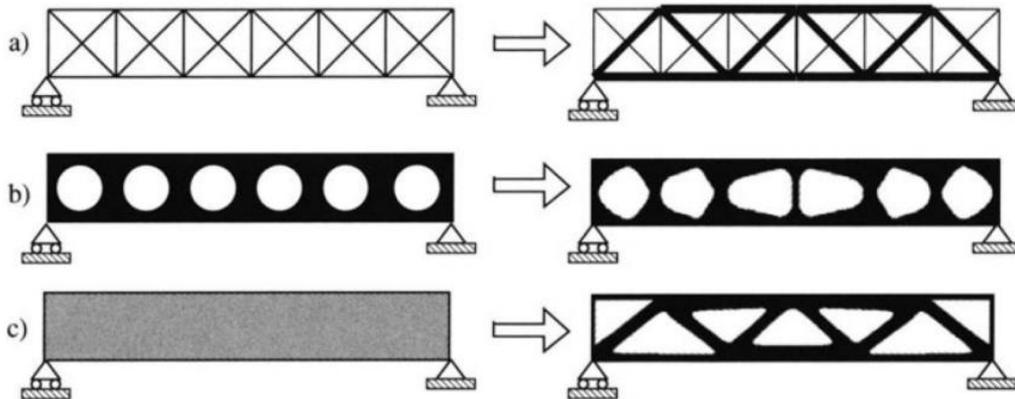


Figure 2.5 : les types d'optimisation structurale : a) dimensionnelle, b) forme, c) topologique

L'optimisation topologique structurale peut être obtenue en utilisant généralement deux approches (Souquet et al., 2004), à savoir :

- Approche classique déterministe : Parmi les méthodes les plus populaires connues dans cette approche, il y a lieu de citer les algorithmes basiques qui font partie du type simplex, caractérisés par leurs limites aux traitements des fonctions objectifs différentiables ;
- Approche stochastique : Les méthodes les plus connues sont les algorithmes évolutionnaires qui simulent un processus d'évolution naturelle, inspirés par des concepts issus de la théorie d'évolution de Darwin. Ces algorithmes ont des techniques d'optimisation itératives en utilisant un processus aléatoire, où ils font évoluer un ensemble de solutions à un problème donné à travers l'utilisation d'une fonction objectif afin de mesurer ses valeurs dans l'optique de trouver les meilleurs résultats. Pour cela trois types d'algorithmes ont été alors distingués, à savoir : la programmation évolutionniste selon Fogel, les Stratégies d'évolution selon Rechenberg, ainsi que les Algorithmes Génétiques selon Holland.

Les premiers projets d'optimisation topologique par algorithme génétique ont été élaborés au début des années 90, où la plupart des travaux concernent l'optimisation des éléments structuraux : Sandergen en 1990, Jensen en 1992 pour l'optimisation d'une section d'une poutre, Chapman en 1994 pour l'optimisation d'une console (Sid, 2006), à titre d'exemple.

Depuis, plusieurs techniques se sont développées, où l'aspect d'extraction d'un nouveau concept structural en utilisant les algorithmes génétiques a été investi, en particulier pour les structures à fermes en treillis, du fait de la nature discrète de ces problèmes. L'un des projets les plus récents est celui de (Jootoo et al., 2018) proposant une nouvelle méthode de génération de ce type de structures en utilisant une combinaison d'optimisation de la topologie avec un nouvel algorithme d'extraction, où les fermes sont extraites des topologies par l'analyse morphologique et les techniques d'intelligence artificielle.

Les résultats trouvés ont montré que l'algorithme de génération des fermes proposé a développé des ossatures structurales comparables à celles générées par l'optimisation métaheuristique, tout en satisfaisant les hypothèses utilisées lors de la conception structurale préliminaire (Jootoo et al., 2018).

2.4 Intégration de l'IA dans l'industrie AEC

Une analyse scientométrique très pertinente a été publiée récemment par A. Darko sur l'un des journaux les plus spécialisés en la matière - Automation in Construction - en 2020 concernant l'intégration de l'IA dans l'industrie AEC (Darko et al., 2020). La recherche a été faite d'une manière systématique et qualitative sur un ensemble de 41 827 articles enregistrés et extraits de la bibliothèque Scopus – connue par son large éventail de publications scientifiques - par rapport à d'autres bases de données. Afin de bien cibler son analyse, l'auteur et son équipe ont prédéfini, en premier lieu, une gamme de mots clés relatifs à l'industrie de l'AEC tels que « industrie de la construction, génie civil, génie des structures, génie architectural, etc... » ainsi que les différentes approches liées à l'IA tels que « Intelligence artificielle, Apprentissage de machine, Systèmes experts, Algorithmes génétiques, Réseaux neurones, Robotique, etc... ».

Cette étude a montré l'évolution qu'a connue la recherche sur l'implication de l'IA dans l'industrie du bâtiment à travers les différents secteurs AEC depuis l'apparition des premières publications dans les années 70 à ce jour, où une forte croissance de l'intégration de l'IA a été observée depuis les premières années du 21ème siècle.

Figure 2.6 illustre l'évolution du nombre de publications sur l'implication de l'IA dans l'AECI, depuis les années 70 jusqu'à l'année 2019.

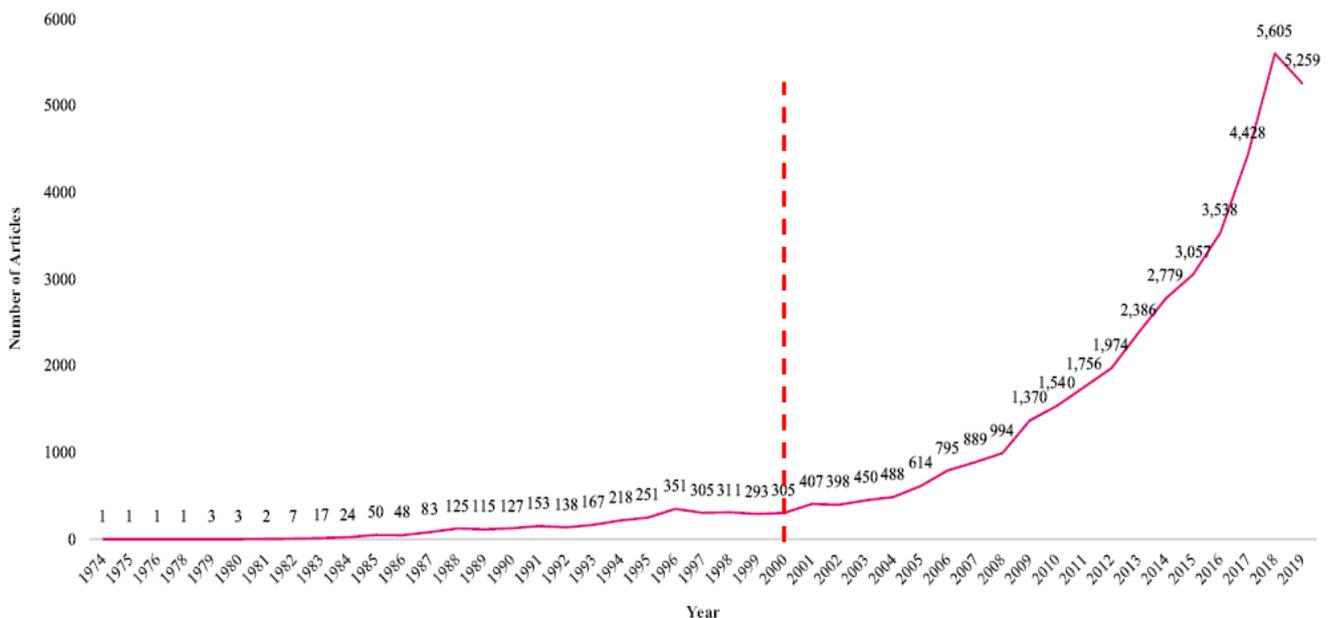


Figure 2.6 : Evolution des publications sur l'implication de l'IA dans l'AEC (Darko et al., 2020)

L'analyse a montré que les sujets de recherche, ayant connu une attention particulière, « Top Themes » dans l'industrie AEC, sont ceux relatifs à l'utilisation de l'IA à travers l'application

de plusieurs techniques dont l'optimisation, les algorithmes génétiques (AG), les réseaux neuronaux (NN), l'apprentissage automatique (ML), les méthodes de logique floue (F. Logic ; F. Sets), entre autres. Le même constat a été enregistré par les travaux de A.K.Skula et al. dans une analyse bibliométrique, sur l'utilisation de l'IA dans l'engineering sur les trente dernières années, publiée en 2018 (Shukla et al., 2019), et par ceux de R. Jin et al. publiés dans une analyse sur l'évolution de la recherche académique dans le secteur de l'ingénierie, de la construction et du management (Jin et al., 2019). Cela s'explique par l'intérêt et l'objectif principal de l'implication de l'IA dans l'AECI, qui est l'optimisation des processus, des activités, des décisions ainsi que des problèmes de cette industrie.

La figure 2.7 présente l'intérêt des recherches effectuées lors des quatre dernières décennies sur l'implication de l'IA dans l'industrie des AEC.

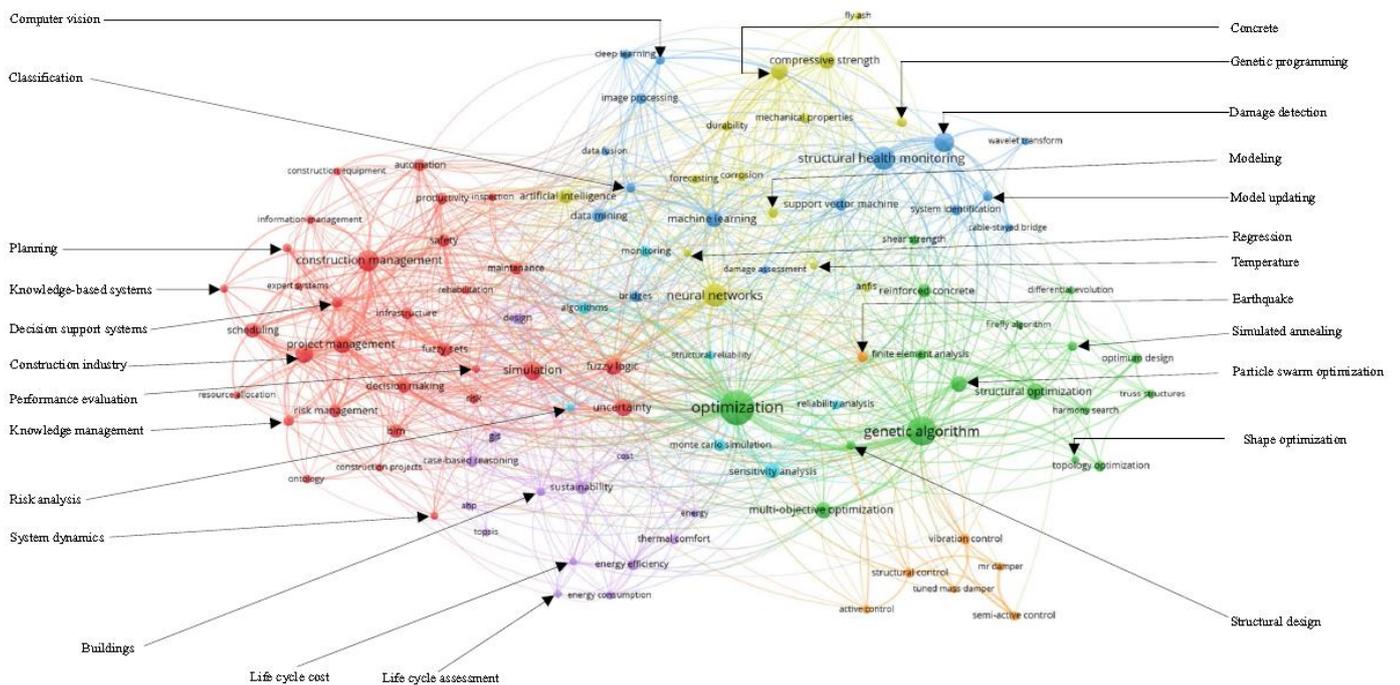


Figure 2.7 : Intérêt principal des recherches sur l'implication de la IA dans l'AECI, (Réseau cooccurrence des mots clés) (Darko et al., 2020)

Les résultats de ces analyses ont montré une importante et forte liaison entre les AG ainsi que la technologie d'optimisation dans les différents champs de recherche actuels de l'industrie AEC, où l'optimisation des plannings lors de la construction ainsi que le management a connu une grande part d'investigation tout en utilisant des fonctions d'optimisation multi-objectifs (El-Abbasy et al., 2016 & 2017 ; Kim et al., 2016 ; Lee et al., 2019). Il a été aussi constaté qu'en plus de l'optimisation, d'autres thèmes ont été largement abordés tels que les simulations, les incertitudes, le management, les ponts, etc, tout en utilisant d'autres techniques tels que les réseaux de neurones (NN), ou les méthodes Fuzzy (FL, FS) (Darko et al., 2020).

Il convient de citer également une autre technologie considérée comme étant un sous-domaine de l'IA. Il s'agit de l'apprentissage automatique (ML) dont la portée et le potentiel sont beaucoup plus généraux que les autres méthodes d'IA. Le ML représente la capacité des ordinateurs à apprendre sans être explicitement programmés, où les modèles peuvent être

prédictifs ou descriptifs pour obtenir des connaissances à partir des données. Cette technologie est utilisée dans de diverses disciplines tels que l'informatique, le contrôle des calculs complexes, les probabilités et statistiques, ainsi que d'autres domaines. De son côté, l'industrie AEC a connu un intérêt majeur lors des dernières décennies à travers l'implication des méthodes de ML dans les différents aspects de l'ingénierie structurale tels que les études, la conception, ainsi que le développement d'algorithmes capables d'établir un apprentissage à partir des données elles-mêmes et faire par la suite des prédictions en utilisant ces données. La figure 2.8 présente l'évolution du nombre d'articles de recherches publiés sur l'utilisation des différentes méthodes de l'IA dans l'ingénierie structurale entre la période de 2009 et 2017 (Salehi et al., 2018).

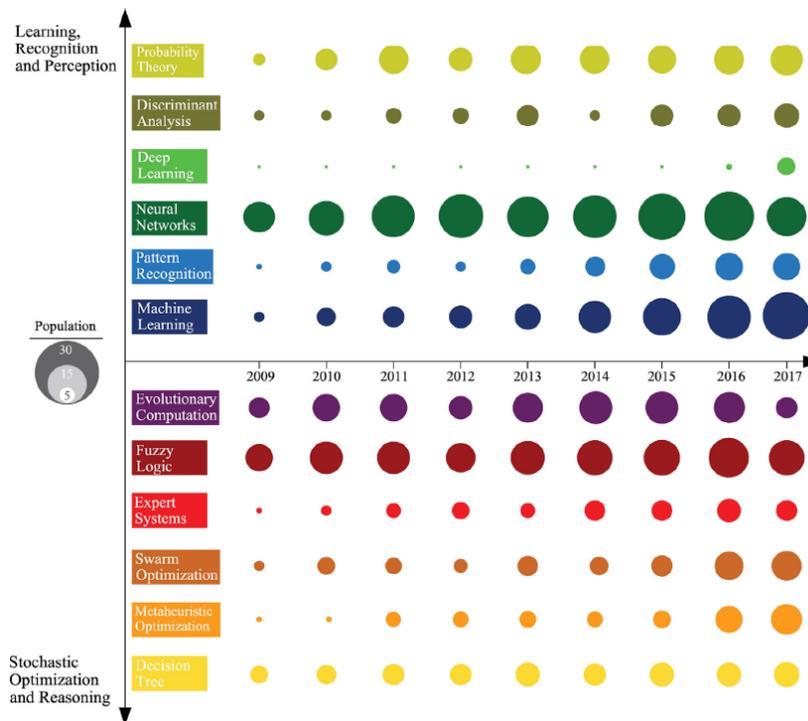


Figure 2.8 : Evolution des publications de recherches sur l'utilisation des différentes méthodes de l'IA dans l'ingénierie structurale (Salehi et al., 2018)

Figure 2.8 montre que l'utilisation du ML dans l'ingénierie structurale a connu une progression significative ces dernières années par rapport à d'autres méthodes et technologies. Cela est dû à sa grande capacité d'établir des relations entre les données input et output qui sont généralement non linéaires et trop complexes pour qu'elles puissent être formulées mathématiquement.

Par ailleurs, les premières utilisations des techniques ML ont été élaborées dans le développement des outils de management pour la sécurité structurale ainsi que l'acquisition des informations pour les calculs des éléments métalliques (Stone et al., 1989 ; Arciszewski et al., 1987). Par la suite, cette technologie a été généralisée sur plusieurs domaines tels que : le contrôle et le suivi de la sécurité des structures, l'identification des dommages, l'optimisation, l'évaluation de la performance, l'efficacité structurale, ainsi que l'identification de paramètres structuraux. Figure 2.9 présente le nombre d'articles de recherche publiés lors de la dernière

décennie en utilisant les techniques ML dans les différents aspects de l'ingénierie structurale (Salehi et al., 2018).

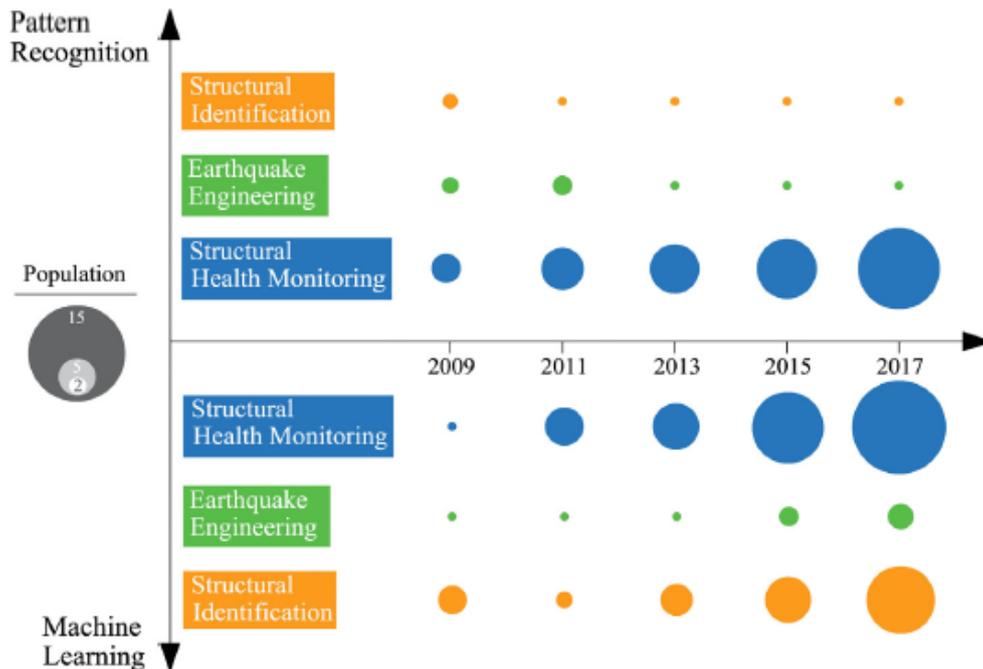


Figure 2.9 : Evolution des publications de recherches sur l'utilisation de ML dans les différents aspects de l'ingénierie structurale (Salehi et al., 2018)

L'analyse scientométrique a montré aussi que d'autres méthodes et techniques de l'IA restent toujours à investir davantage, tels que par exemple le contrôle semi-actif et actif, l'optimisation de forme des structures en treillis, l'optimisation de topologie, l'analyse du cycle de vie, le confort thermique, les énergies ainsi que l'optimisation des conceptions, où ces techniques ont des valeurs du degré de centralité bien inférieures par rapport à d'autres recherches du premier rang tel qu'il est présenté dans le tableau 2.1. Cela explique que les intérêts de ces recherches ne sont pas encore bien intégrés dans le corps de base de la recherche sur l'IA dans l'industrie AEC (Darko et al., 2020).

Tableau 2.1 : Influence des intérêts de recherche sur l'intégration de l'IA dans AECl.

Relative influence of existing research interests on AI-in-the-AECI.			
Research areas	Degree centrality	Betweenness centrality	Relative influence
Optimization	89	440.41	1
Genetic algorithm	80	338.68	2
Neural networks	72	196.63	3
Simulation	65	141.53	4
Uncertainty	64	157.29	5
Construction management ^a	58	100.56	6
Fuzzy logic	54	119.16	7
Fuzzy sets	54	100.66	8
Machine learning	53	112.53	9
Artificial intelligence	51	80.59	10

Bridges	49	95.56	12
Decision making	47	41.75	13
Particle swarm optimization	45	91.05	14
Sensitivity analysis	45	90.76	15
Algorithms	45	57.61	16
Design	45	53.35	17
Maintenance	44	39.65	18
Multi-objective optimization	43	83.97	19
Structural health monitoring	43	61.19	20
...			
Research areas	Degree centrality	Betweenness centrality	Relative influence
Data fusion	23	8.45	70
Resource allocation	23	6.21	71
Structural design	22	23.86	72
Durability	22	11.83	73
TOPSIS	22	10.78	74
Knowledge management	22	9.30	75
Model updating	22	8.38	76
Computer vision	22	7.66	77
Structural reliability	22	7.62	78
Shear strength	21	9.28	79

A partir du *Tableau 2.1*, il est clair que parmi les volets n'ayant pas reçu leurs bonnes parts d'investigation et dont leurs recherches restent toujours très faibles et limitées, l'on peut citer le sujet de l'intégration des méthodes de l'IA tels que le (BIM, GA, etc.) dans la conception structurale – beaucoup plus quand il s'agit d'une conception structurale parasismique – (Gerold et al., 2012 ; Yazdani et al., 2017), où un tel investissement permet d'optimiser et améliorer les coûts, la productivité, la sécurité, la gestion des risques et la durabilité dans l'industrie AEC.

2.5 Automatisation de la conception structurale

Tel qu'il a été déjà exposé précédemment, le développement d'une bonne conception structurale d'un bâtiment représente un grand défi dans un projet de construction. En effet, au cours des premières phases, d'importantes décisions sont prises, notamment sur le type de structure, le choix des caractéristiques des matériaux, la disposition des éléments ainsi que leurs dimensions. Les erreurs de conception et de calcul, à ce stade, peuvent être fatales et deviennent de plus en plus difficiles et plus coûteuses à corriger au fur et à mesure de l'avancement du projet, ce qui peut entraîner des catastrophes techniques, financières et architecturales (Fenves et al., 2000). Cela suggère, donc que les ingénieurs devraient être en mesure d'analyser, de comparer et d'évaluer le comportement structural de plusieurs conceptions préliminaires possibles rapidement et efficacement pendant les premières étapes d'un projet, où le potentiel global de réussite du projet est accru.

D'une manière générale, lors d'une étude de conception structurale, les ingénieurs s'appuient principalement sur leurs propres connaissances et expériences pour produire des solutions conceptuelles adéquates et optimisées, et cela à travers un processus manuel, itératif et long,

lequel processus réduit le temps pour envisager d'autres alternatives possibles (Mora et al., 2006).

L'intégration de IA dans le processus de conception structurale s'avère être une approche très efficace par rapport aux techniques de modélisation classiques et traditionnelles, car elle fait référence à la technologie d'informatique qui développe des machines et des logiciels dotés d'une intelligence automatisée semblable à celle de l'homme (Anup T., 2018). L'IA offre des avantages précieux aux concepteurs afin de faire face aux problèmes associés aux incertitudes. En outre, elle constitue une aide efficace pour résoudre des problèmes plus complexes où les solutions basées sur les techniques de l'IA représentent de bonnes alternatives afin de déterminer les paramètres de conception les plus essentiels. En plus, elle offre la possibilité d'accélérer le processus de prise de décision, de réduire le taux d'erreur et d'augmenter ainsi l'efficacité des calculs (Singh, 2018).

Parmi les techniques de l'IA qui ont marqué leurs puissances dans le domaine de la recherche, il convient de citer les algorithmes génétiques (AG), l'apprentissage automatique (ML), la reconnaissance de formes (PR) et l'apprentissage en profondeur (DL). Elles s'imposent comme une nouvelle classe de méthodes intelligentes à utiliser dans l'ingénierie structurale, différentes techniques présentant divers avantages dans divers domaines du génie civil, tels que les études d'optimisation (optimisation du poids total des structures métalliques, utilisation du béton et composite qui peut être obtenue à l'aide de la programmation génétique) ainsi que les études d'IA hybride dans les domaines du génie des structures, la gestion des constructions, l'hydrologie, l'hydraulique, la géotechnique, le génie environnemental, les transports, et enfin les matériaux de construction.

Avec les progrès rapides et croissants de l'intégration de l'IA dans l'ingénierie conceptuelle des constructions, certains chercheurs ont centré leurs travaux ces dernières années sur le développement de nouvelles approches qui concernent la conception structurale, comprenant une multitude de technologies et de méthodes liées à l'IA. En effet, la conception est un processus itératif très complexe et les simulations ainsi que les analyses de modélisation physique et mathématique sont intensives en termes de calcul. L'analyse d'ingénierie structurale joue donc un rôle important dans ce processus, vu que ces résultats sont souvent utilisés comme paramètres d'optimisation de base pour améliorer le candidat de conception en cours de validation et d'analyse.

Vu l'intérêt de notre travail de recherche qui se focalise sur l'utilisation des méthodes d'IA dans la génération de conceptions structurales d'une manière automatisée dès le premier stade du projet, et qui répond à la fois aux critères architecturaux et réglementaires de construction, une analyse bibliographique sur les travaux déjà faits, sur ce sujet en particulier, a été élaborée afin de bien éclairer notre vision et notre objectif et apporter ainsi une valeur ajoutée et innovante dans ce domaine de recherche. Les résultats de recherche ont confirmé le constat de Darko (Darko et al., 2020) qui a relevé le nombre limité des travaux consacrés à cet aspect, notamment quand il s'agit d'une conception parasismique. En effet, la plupart des travaux existants se sont concentrée sur la génération de conceptions en se basant seulement sur l'aspect géométrique, ou sur l'optimisation de conceptions déjà prédéfinie en utilisant les méthodes classiques de calcul.

Cependant et afin de bien illustrer ce constat, nous exposons ci-après les travaux de recherches les plus récents dans cet aspect.

Travaux de « Renev et al. » : Ils ont développé une ancienne méthode connue sous le nom de TRIZ (theory of inventive problem solving) afin d'augmenter le degré d'implication de l'automatisation ainsi que des logiciels dans le choix conceptuel lors de la conception structurale des bâtiments. L'auteur a effectué, en premier lieu, une recherche qualitative sur les données des différentes théories proposées dans la littérature dans ce domaine en analysant les avantages et les inconvénients de chaque théorie. La méthode TRIZ qu'a choisie le chercheur a été créée et développée à l'époque de l'ancienne URSS par l'ingénieur russe « Genrikh Saulovich Altshuller » et son équipe entre les années 1946 et 1985 (Renev et al., 2018).

La revue de la littérature sur l'utilisation de cette méthode dans l'industrie du bâtiment a montré que plusieurs chercheurs ont tenté d'utiliser les outils TRIZ afin de trouver des solutions uniques pour résoudre des problèmes complexes spécifiques dans plusieurs domaines tels que le développement de techniques et technologies de construction, la conception de nouvelles structures, la gestion de la construction des projets ainsi que l'évaluation des projets. Cependant, les résultats ont montré que la réussite de l'application de cette méthode ne peut être possible sans adaptation et créativité, ce qui a permis de conclure que l'utilisation de TRIZ est encore très limitée dans la construction. En effet, cette théorie est classique a été créée pour résoudre les problèmes techniques courants et, par conséquent, ne fournit pas d'outils spécifiques pour des secteurs particuliers (Renev et al., 2016).

C'est à partir de ces résultats que Renev a proposé une nouvelle approche pour l'automatisation de la conception au stade de la phase préliminaire des projets de construction. Il se base sur l'intégration d'un certain nombre d'outils TRIZ tels que l'analyse des contradictions, l'analyse des fonctions et le découpage dans un logiciel BIM et en utilisant des outils de programmation (des algorithmes) graphique open source.

L'approche est fondée sur trois principes, à savoir :

1. Optimisation de la forme, en se basant sur les connaissances et l'expérience du concepteur, et en utilisant des supports de programmation informatique tel que les scripts de programmation graphique de dynamo. Dans cette phase, le concepteur n'est pas censé utiliser des techniques pour la résolution de problèmes. Il doit plutôt rechercher des solutions optimales et significatives pour le processus de conception. A titre d'exemple, il s'agit de chercher la forme optimale d'une structure en changeant les paramètres initiaux tels que (les dimensions, la hauteur, le nombre d'étages, etc.) au lieu de faire une conception entièrement nouvelle avec de nouveaux paramètres. Une fois que le programme est élaboré, le concepteur peut facilement modifier ses paramètres initiaux afin d'obtenir la structure souhaitée.
2. Une fois que la forme de la structure est arrêtée, le concepteur passe à la phase 2 qui consiste à analyser les contradictions techniques. C'est dans cette étape que l'auteur propose l'utilisation de l'approche inventive TRIZ. Par exemple, pour les structures portantes horizontales, l'une des contradictions assez courantes est celle du rapport (résistance par rapport au poids des éléments), où comme solution inventive l'utilisation

des matériaux composites semble la plus adéquate par rapport aux matériaux uniformes. Cependant, c'est à l'ingénieur que revient la décision d'accepter ou de refuser les principes inventifs suggérés afin d'améliorer la conception.

3. La dernière étape de l'approche est celle de « l'analyse fonctionnelle » d'un modèle BIM, où le logiciel est censé être capable d'auto-analyser le modèle et de suggérer des solutions afin d'améliorer le système. Pour cela, l'auteur et son équipe suggèrent d'utiliser la modélisation fonctionnelle TRIZ avec certains paramètres, ainsi qu'un programme graphique spécial tel qu'un script avec l'aide de Dynamo. Ce dernier détecte automatiquement les éléments et les place dans une matrice d'interaction qui aide à définir si ces éléments interagissent entre eux ou non et montre toutes les interactions possibles. Ce logiciel permet de réaliser un flux de travail plus complet et plus pratique car toutes les étapes sont effectuées dans l'environnement BIM. Une telle analyse lors de la conception permet aux ingénieurs d'analyser automatiquement le modèle BIM et d'obtenir facilement une conception tout en évitant les processus complexes d'optimisation de la topologie et d'analyse structurelle qui sont des problèmes pour une conception plus détaillée.

Toutes les étapes ci-dessus peuvent être répétées autant de fois qu'il est requis par le concepteur. Elles peuvent également être exécutées dans n'importe quelle séquence, bien qu'il soit recommandé par l'auteur d'appliquer la logique décrite dans son travail. Parmi les points essentiels résultant de son travail, il s'agit d'investir davantage l'utilisation de l'aspect de programmation graphique dans la conception automatisée (Reney et al., 2018).

Travaux de « Hamidavi et al. » : l'objet de ce travail est de mettre en évidence une approche de conception structurale efficace dès la première phase de l'étude afin d'aider les ingénieurs à identifier les problèmes conceptuels dans leur processus itératif de conception, ce qui peut réduire considérablement leurs efforts ainsi que leurs temps. Le principe proposé est de développer un processus semi-automatisé capable d'élaborer plusieurs alternatives de conception structurale à travers plusieurs étapes d'optimisation « SDO – Structural Design Optimisation », dans un environnement BIM. L'idée de ce travail de recherche fait partie d'un projet étendu dont l'objectif est de développer un flux de travail du BIM génératif « G-BIM », permettant aux ingénieurs concepteurs de générer automatiquement plusieurs alternatives de conceptions et cela dès le stade préliminaire, tout en considérant à la fois l'aspect architectural et le calcul structural. C'est dans ce contexte que l'auteur a poursuivi le flux de travail G-BIM afin de proposer un cadre d'optimisation de conception structurale (Hamidavi et al., 2019).

L'approche de ce travail de recherche a été développée principalement en deux phases, dont la première consiste à établir la partie technique du processus SDO. Cette dernière a été faite en suivant quatre étapes, à savoir :

1. Collecte et organisation des données : afin de recueillir et classifier l'ensemble des informations et données essentielles relatives à la conception et l'analyse structurale. Cette étape est aussi basée sur 5 démarches, à savoir :
 - a) Codage régulier des données utilisées avant le début du processus de conception afin d'identifier par exemple le type de matériau ou d'élément adéquat à utiliser. Ce scénario permet aux ingénieurs de bénéficier de leurs expériences professionnelles afin de réduire

- le temps du processus de modélisation. Un autre codage peut être aussi généré, qui consiste à identifier le type d'analyse souhaité tels que (déplacement, contraintes, déformation, etc...) ;
- b) Extraction des données en utilisant un modèle architectural où sur la base de ces données, les processus de conception structurale, d'analyse et d'optimisation seront lancés d'une manière automatique ;
 - c) Génération d'une conception initiale de la structure en fonction des contraintes structurales et de codes spécifiques ;
 - d) Analyse initiale de la conception, en respectant les codes et les contraintes spécifiques à la construction, afin de garantir la stabilité de la structure d'un point de vue structural et économique.
 - e) Optimisation de la conception en utilisant la méthode automatique SDO.
2. Optimisation de la conception structurale « SDO » : élaborée en utilisant un algorithme génétique AG semi-automatisé, et en se basant sur deux principaux facteurs, à savoir : i) les contraintes de conception et de fabrication qui peuvent garantir la sécurité de l'ouvrage, et ii) la minimisation de la fonction du coût qui peut garantir le facteur d'économie. Cela fournit une boucle automatique pour la conception structurale, l'analyse et l'optimisation. La compréhension des principaux paramètres liés à la structure tels que le matériau, les charges, la géométrie, la topologie, le procédé de fabrication, le coût, etc..., qui jouent un rôle très important dans ce processus d'optimisation.
 3. Evaluation du processus : une fois que les conceptions structurales sont optimisées, elles sont envoyées aux ingénieurs pour une dernière évaluation d'un point de vue technique et économique. Ce processus itératif permet aux ingénieurs de réduire leurs efforts et leurs temps dans la conception, l'analyse et l'optimisation.
 4. Intégration et modifications dans un environnement BIM : Après évaluation structurale finale, le modèle choisi est envoyé pour une modification ultérieure dans le BIM.

Dans la deuxième phase, l'auteur a élaboré un sondage auprès des ingénieurs de structure et experts du BIM sur un ensemble d'institutions universitaires et industrielles, à travers l'envoi d'un questionnaire en ligne à l'aide de Google Forms pour exposer sa technique. Au total, ce questionnaire a été envoyé à 300 personnes dont 104 ont répondu. Les résultats obtenus ont été très concluants : 70% des personnes interrogées étaient favorables à cette approche d'optimisation automatisée de la conception et de l'analyse structurales dans le BIM, en utilisant l'intelligence artificielle « IA » tels les algorithmes génétiques « GA » (Hamidavi et al., 2019).

L'ensemble des étapes du processus de l'approche proposée par l'auteur sont résumées dans la figure 2.10.

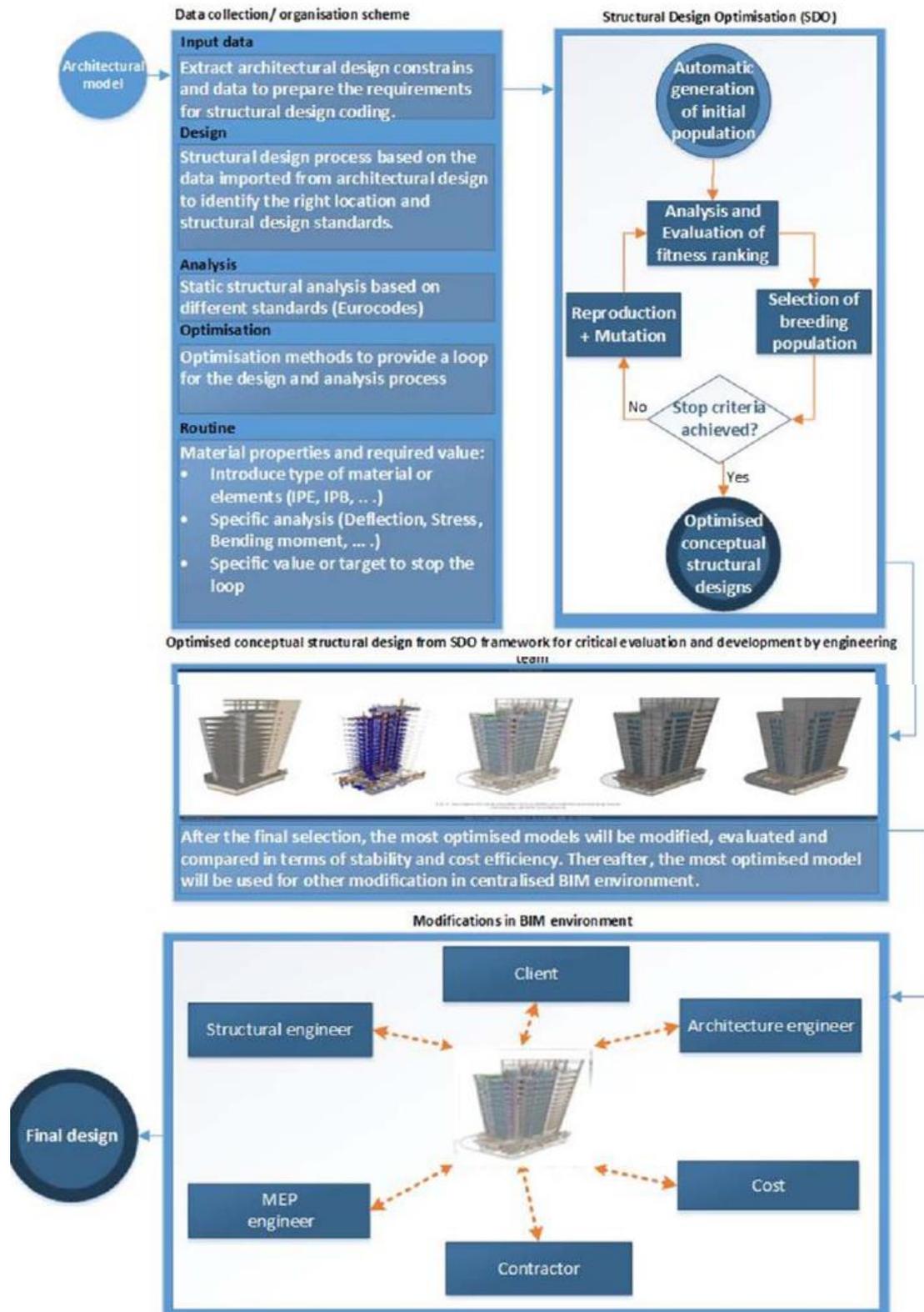


Figure 2.10 : Processus de l'approche SDO

Cependant, sur le plan pratique, ce projet de recherche nécessite d'être concrétisé par l'établissement d'exemples d'études, afin d'apprécier réellement son efficacité.

Travaux de « Abrishami et al. » : L'approche consiste à améliorer le processus de conception structurale d'une manière automatisée à travers l'intégration d'algorithmes de conception générative dans des plates-formes BIM, et ce, au stade préliminaire du projet afin de permettre aux concepteurs de générer plusieurs alternatives de conception en faisant varier les paramètres prédéfinis en fonction des contraintes de conception et des exigences demandées. Les alternatives générées pourraient être modifiées et améliorées par la suite en changeant les caractéristiques paramétriques BIM nécessaires (Abrishami et al., 2015).

L'approche adopte principalement les mêmes bases que celles utilisées dans un processus de conception conventionnelle, avec de minimales modifications dans le processus de conception commun, et en exploitant le potentiel d'un environnement de conception BIM intégré avec de nouvelles méthodes de conception par des programmes informatiques afin de maximiser leurs opportunités, telle l'adoption d'algorithmes génétiques pour générer plusieurs alternatives de conception (Abrishami et al., 2013).

Le travail proposé par l'auteur présente un ensemble précieux de rubriques qui peuvent aider à améliorer le processus de conception préliminaire, à savoir :

- ✓ Création de modèles avec des liens pertinents vers l'ensemble des informations et détails, nécessaires pour le processus de développement ;
- ✓ Création d'un processus génératif capable de contrôler la variabilité des résultats de conception et de générer des conceptions avec le niveau de complexité requis ;
- ✓ Créer un environnement collaboratif innovant permettant aux concepteurs de communiquer de manière efficace à travers les phases de conception ;
- ✓ Création d'un environnement de conception informatique prenant en charge les esquisses (soit en numérisant des esquisses faites manuellement, soit en s'appuyant sur la technologie de la tablette) dans un environnement 2D et 3D ;
- ✓ Permettre aux concepteurs d'éditer, d'enregistrer et d'améliorer les croquis et les conceptions dans un environnement commun où tous les concepteurs peuvent contribuer au processus de conception ;
- ✓ Permettre aux concepteurs de prendre leurs croquis (2D et / ou 3D) aux niveaux suivants afin de concrétiser leurs réflexions et de les guider progressivement vers les phases finales.

Ce prototype est principalement développé à l'aide d'un langage de programmation intégré à Autodesk-Revit, où cette approche permettra au processus génératif d'utiliser directement les fonctions de modélisation de Revit, qui peuvent être également utilisées pour la visualisation de la conception de la structure. La figure 2.11 présente le prototype proposé par l'auteur décrivant les rubriques et les démarches qui prennent en charge le processus de conception génératif dans un environnement BIM.

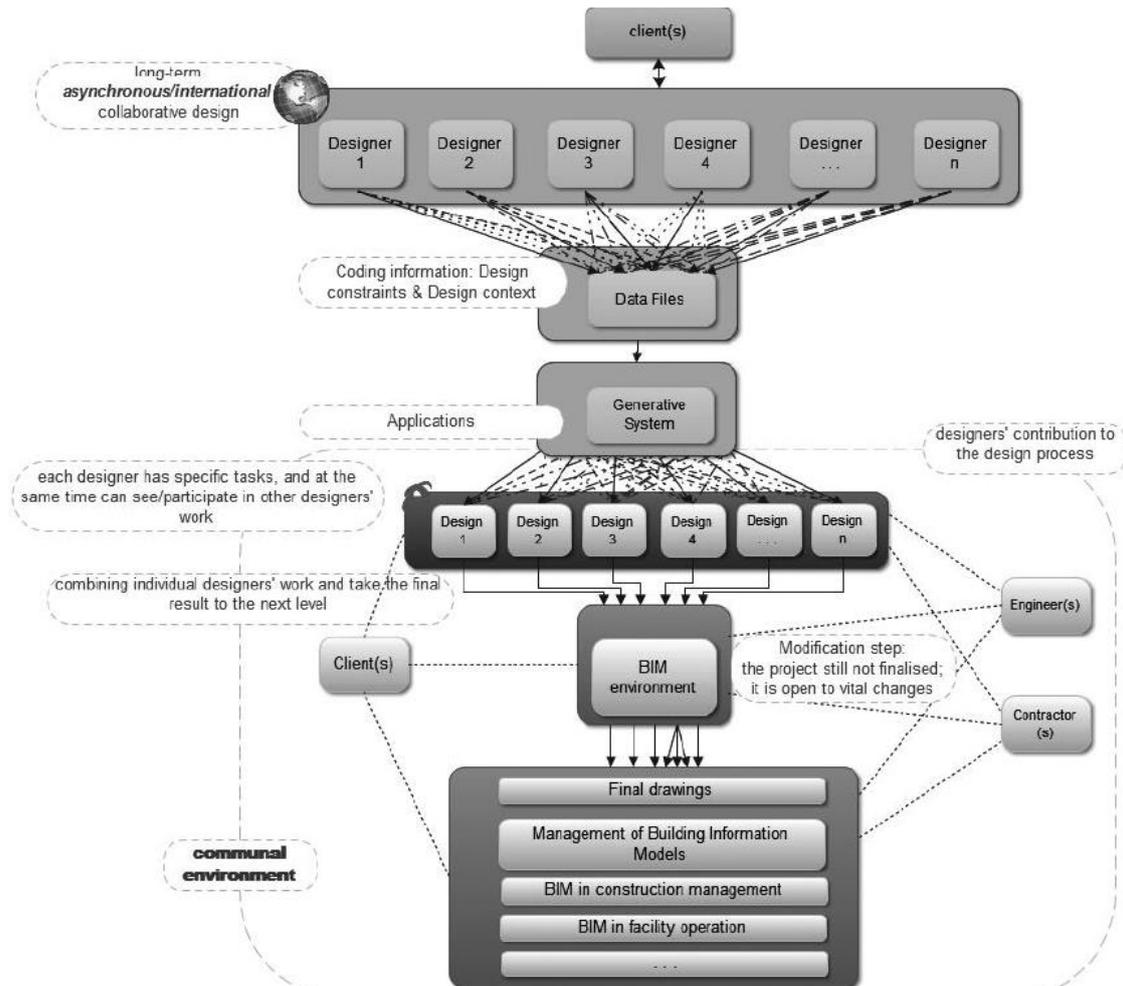


Figure 2.11 : Prototype d'un processus de conception générative dans un BIM

Le prototype G-BIM proposé permet l'adoption et l'intégration d'une conception évolutive, où les utilisateurs ne sont pas censés être des experts en programmation ni des experts en algorithmes génétiques, car les systèmes évolutifs existants sont généralement testés sur la base de bibliothèques de code source ou de boîtes à outils de programmation, et leurs outils sont rarement utilisés en tant que systèmes menés par menus prêts à l'emploi. A cet effet, l'approche proposée utilise un concept similaire aux outils actuels tel que « Grasshopper » qui est un éditeur d'algorithmes graphiques. Elle propose également un cadre qui exploite et combine les nouveaux concepts dans un environnement BIM, où en utilisant ce prototype G-BIM, les routines sont codées et développées pendant la phase préliminaire de conception qui forme le génotype pour l'étape de génération, suivi par la définition des représentations.

Les fichiers de données préciseront les contraintes de conception et leurs contextes (tels que les limites du site, les dimensions et distances minimales, le nombre d'étages et d'espaces, etc.). Par la suite, les outils BIM sont alors utilisés pour la représentation et le perfectionnement, où les résultats des conceptions générées par le prototype seront traduits en format IFC pour qu'ils soient exploités par un grand nombre de logiciels BIM (Abrishami et al., 2014).

La figure 2.12, présente l'architecture du prototype « G-BIM », composée de trois phases principales, à savoir : i) le codage ; ii) la génération ; et iii) la modification.

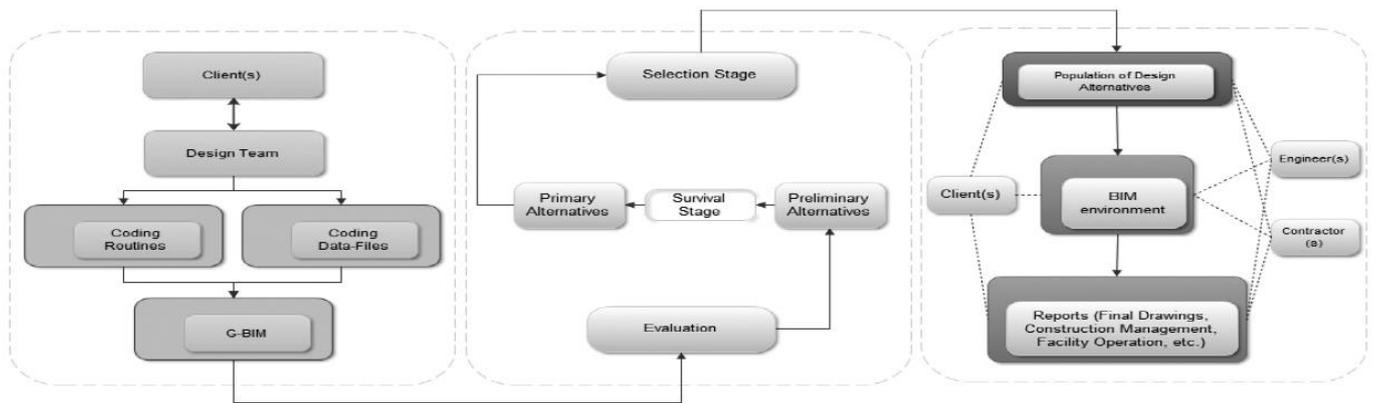


Figure 2.12 : Architecture du prototype G-BIM (Abrishami et al., 2014)

Ce qui est à retenir, de ce projet de recherche, est que l'auteur avec son équipe ont réussi à développer une approche capable d'analyser et d'optimiser des solutions de conception à un stade préliminaire avec l'élaboration d'un prototype BIM génératif, permettant la génération et l'exploration de solutions de conception, à travers l'intégration des programmes informatiques dans un environnement BIM. Cependant, l'auteur recommande de perfectionner davantage le processus proposé, afin de développer et valider ce cadre de recherche.

Sur l'ensemble des travaux publiés par l'auteur, aucun exemple pratique n'a été présenté en utilisant ce processus.

2.6 Conclusion

L'examen et l'analyse de la littérature pertinente sur l'intégration de l'IA d'une manière générale dans l'industrie AEC ont montré que cette technologie a été développée de manière significative sur plusieurs domaines lors de ces dernières années. Cependant et comme dans tout travail, il existe encore un nombre considérable de tendances émergentes dans l'évolution des méthodes et des techniques de l'IA. La prise de décision assistée par ordinateur – ou en d'autres termes l'automatisation – dans la conception fait partie de ces volets qui nécessitent plus d'intérêt et d'investigation par les chercheurs, et ce au travers de l'intégration des diverses techniques de l'IA telles la conception générative, la résolution créative de problèmes dans la conception technique, l'innovation automatisée des technologies de la construction, la prise de décision assistée par ordinateur dans la construction, ainsi que d'autres, tout cela dans un environnement – ou sur une plateforme – BIM.

De nos jours, les développeurs se concentrent également sur l'augmentation du niveau d'automatisation par le biais de la création croissante de fonctions automatisées dans les nouvelles versions des logiciels modernes. Cependant, l'accent est principalement orienté vers la phase de la conception détaillée plutôt que la phase préliminaire, où le logiciel n'est qu'un outil dans la mise en œuvre des décisions déjà prises par un concepteur expérimenté ou à travers plusieurs simulations et modélisations numériques. Donc, l'intégration de l'automatisation dans la phase de conception préliminaire (phase d'avant-projet) reste encore à un niveau assez faible.

Bien que cette phase de la conception soit fondamentale, le niveau de son efficacité assistée par ordinateur devrait augmenter. Malheureusement, les techniques déjà développées ne

prennent pas en compte certains critères très importants telles, par exemple, la proposition d'une conception efficace en matière du choix du système constructif, l'implantation des éléments structuraux ainsi que leurs dimensions, tout en respectant à la fois des règles techniques de conception – en particulier ceux du génie parasismique – ainsi que la répartition des espaces de l'aménagement architectural, où ce résultat ne peut avoir lieu actuellement que dans la phase dédiée à l'étude détaillée du projet.

L'intégration de la conception automatisée au niveau de la phase préliminaire de la conception permet donc aux concepteurs d'identifier les zones les plus adéquates et efficaces d'un point de vue stabilité globale et résistance afin d'implanter des éléments structuraux et éliminer celles où ces éléments sont les moins efficaces, et ce le plus tôt possible. Cela permet aussi d'obtenir une panoplie de solutions plus progressives et optimisées et d'économiser les ressources aux étapes ultérieures du cycle de vie du projet.

Sur la base de ces conclusions, une réflexion pour la création d'une nouvelle approche pour la conception conceptuelle automatisée des structures de bâtiments a été envisagée dans ce travail de recherche, afin d'investir et expertiser davantage ce volet et voir ses bénéfices.

Chapitre 3

Développement d'un algorithme génétique pour la génération de structures optimisées

3.1 Introduction

Ces dernières années, l'intégration de l'intelligence artificielle « IA » dans l'industrie AEC a connu un grand essor au travers du développement de plusieurs outils et applications numériques. Entre autres, on peut citer les algorithmes génétiques « AG » qui sont particulièrement utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation en ingénierie.

Basés sur les approches stochastiques, ces algorithmes sont généralement caractérisés par leurs puissances dans la résolution des problèmes les plus complexes comparés aux autres algorithmes classiques déterministes. Leur efficacité peut être jugée au travers du nombre considérable et évolutif de recherches effectuées ces dernières décennies.

Dans le cadre de notre travail de recherche, ce chapitre présente en premier lieu un aperçu global sur les algorithmes génétiques et leurs principes de fonctionnement. Par la suite, nous présentons la structure ainsi que les démarches essentielles considérées lors du développement d'un algorithme génétique d'optimisations multi-objectifs basé uniquement sur des critères et règles de conception en vue de générer des solutions structurales optimisées pour divers systèmes constructifs à partir de configurations architecturales, sans faire appel aux calculs de structure.

3.2 Les algorithmes génétiques

Inspiré de la théorie d'évolution Darwinienne des populations biologiques, Holland en (1975) a posé les fondements des algorithmes génétiques « AG » en passant du paradigme d'évolution naturelle à l'évolution artificielle. Ces algorithmes sont basés sur le mécanisme de sélection, croisement et mutation naturelle et génétique qui combine la stratégie de « survie des plus forts » avec un échange d'information aléatoire et structuré en même temps, où pour un problème donné un ensemble de solutions possibles est alors créé aléatoirement (Cormier, 2008).

D'une manière générale, le principe de fonctionnement de ces algorithmes est similaire à celui de l'évolution naturelle où les caractéristiques (ou les variables à déterminer) sont utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d'autres pour former des chromosomes qui par la suite deviendront des individus. Chaque solution est associée à un individu, où ce dernier est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure solution au problème, qui est elle-même encore inconnue. De même que les systèmes biologiques soumis à des contraintes, les meilleurs individus d'une population (solutions possibles) sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de transmettre une partie de leur héritage génétique à la prochaine génération. La nouvelle population (génération) est donc créée en combinant les gènes des deux parents, où certains individus de cette génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs parents, et donc une meilleure solution au problème. La nouvelle génération est alors soumise aux mêmes critères de sélection et génère, par la suite, ses propres rejets.

Ce processus est répété à travers plusieurs itérations jusqu'à ce que l'ensemble des individus possède le même héritage génétique. Les membres de cette dernière génération seront très

différents de leurs ancêtres, mais posséderont une information génétique correspondant à la meilleure solution (Cormier, 2008).

3.2.1 Le processus génétique

Un algorithme génétique cherche généralement les extremums d'une fonction définie sur un espace de données. A cet effet, cinq éléments sont nécessaires :

- ✓ Codage des éléments : Cette étape consiste à associer à chacun des points de l'espace d'état une structure de données, où la qualité de ce dernier conditionne la réussite et l'efficacité de l'algorithme génétique.
- ✓ Génération de la population initiale : Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix d'une population initiale est très important car il peut rendre la convergence vers l'optimum global plus rapide.
- ✓ Une fonction à optimiser : Celle-ci retourne une valeur appelée fonction de fitness ou d'évaluation de l'individu.
- ✓ Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer davantage l'espace d'état, tels que le croisement qui consiste à recomposer les gènes d'individus existant dans la population, ainsi que l'opérateur de mutation qui a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
- ✓ Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

3.2.2 Le fonctionnement d'un algorithme génétique

L'utilisation des AG permet la création d'un certain nombre de solutions d'une manière totalement aléatoire, et ce à travers plusieurs opérations d'analyse et de traitement. Une fois les solutions obtenues, elles seront soumises à un procédé d'évaluation selon leurs pertinences pour qu'elles soient conservées. Seules les solutions les plus optimales survivent. L'évolution de la population est générée successivement en croisant les meilleures solutions entre elles et en les faisant muter, puis en relançant ce procédé à plusieurs itérations afin d'essayer de tendre vers la solution la plus optimale.

Les mécanismes d'évolution et de sélection sont indépendants du problème à résoudre ; cependant seules trois fonctions changent :

- ❖ La fonction qui s'occupe de représenter le problème en codant chaque information caractérisant une solution possible selon un codage bien particulier. Chaque information représente alors un gène et toutes les valeurs que peut prendre cette caractéristique représentent les allèles possibles pour ce gène, tous ces gènes étant mesurés pour obtenir un chromosome qui représente une solution dans son intégralité.
- ❖ La fonction inverse qui à partir d'un chromosome permet d'obtenir une solution par décodage du génome.

- ❖ La fonction qui évalue l'adaptation d'une solution à un problème, i.e. sa pertinence.

D'une manière générale, le fonctionnement d'un algorithme génétique est basé sur les principales tâches suivantes :

Codage :

Avant d'expliquer le processus du codage, il faut comprendre en premier lieu la structure des niveaux d'organisation d'un algorithme génétique. Cette structure est définie comme suit :

- Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène où toutes les valeurs qu'il peut prendre représentent les allèles³ de ce dernier. IL s'agit donc de trouver une manière de coder chaque allèle différemment et de façon unique.

Un chromosome est une suite de gènes et chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes ; une population est un ensemble d'individus. La figure 3.1 résume les niveaux d'organisation d'un AG (Cormier, 2008).

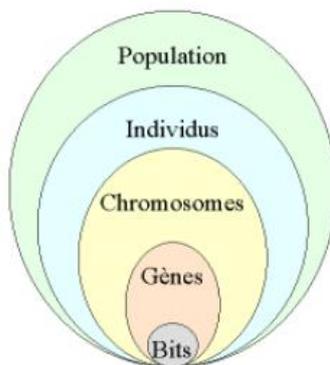


Figure 3.1 : Niveaux d'organisation d'un AG

La procédure normale pour coder un algorithme génétique est de coder chaque paramètre comme une séquence de bits. Ces séquences sont ensuite tronquées l'une après l'autre pour former une grande séquence qui est le chromosome, qui représente le vecteur des paramètres. Chaque séquence du vecteur total représente un gène et la valeur de chaque gène est un allèle.

En d'autres termes, cet opérateur consiste à initier, pour chaque paramètre ou variable qui contribuera dans la solution, sa structure de données ainsi que son ordre dans la structure.

Opérateurs génétiques :

La définition des opérations génétiques peut être présentée comme suit :

- ✓ **Evaluation** : Connue aussi sous le nom de « *Fitness Function* », cette fonction consiste à établir une évaluation qualitative des paramètres ou variables à utiliser. Le résultat de cette évaluation « *The score* » permet, par la suite, la sélection des meilleurs individus.

³ Un allèle est une version variable d'un même gène

- ✓ **Sélection** : c'est un processus où les individus sont copiés selon la valeur de leurs fonctions objectifs « f », qui peut être décrite comme étant une mesure de profit d'utilité ou de qualité selon l'objectif souhaité (maximiser ou minimiser). Si on copie des individus selon leur valeur « f », ceci implique que les individus ayant des valeurs plus élevées ont une plus grande probabilité de générer des rejetons à la prochaine génération (c.à.d. les nouveaux individus), ce qui correspond à une version artificielle de la notion « survie des plus forts » de Darwin.
- ✓ **Reproduction / Croisement (Cross-over)** : Le cross-over utilisé par les algorithmes génétiques est la transposition informatique du mécanisme qui permet dans la nature, la production de chromosomes qui héritent partiellement des caractéristiques des parents. Son rôle fondamental est de permettre la recombinaison des informations présentes dans le patrimoine génétique de la population. Cet opérateur est appliqué après avoir effectué l'opérateur de « sélection » sur la population P où une population P' de $n/2$ individus est créée, ce nombre devant être doublé afin que la nouvelle génération soit complète. Il va donc être créé de manière aléatoire ($n/4$) couples qui seront capables de se "reproduire". L'ensemble des paramètres des parents est alors copié et recombiné de façon à former deux descendants possédant des caractéristiques issues d'eux.

La figure 3.2 illustre quelques schémas pour différents types de croisement.

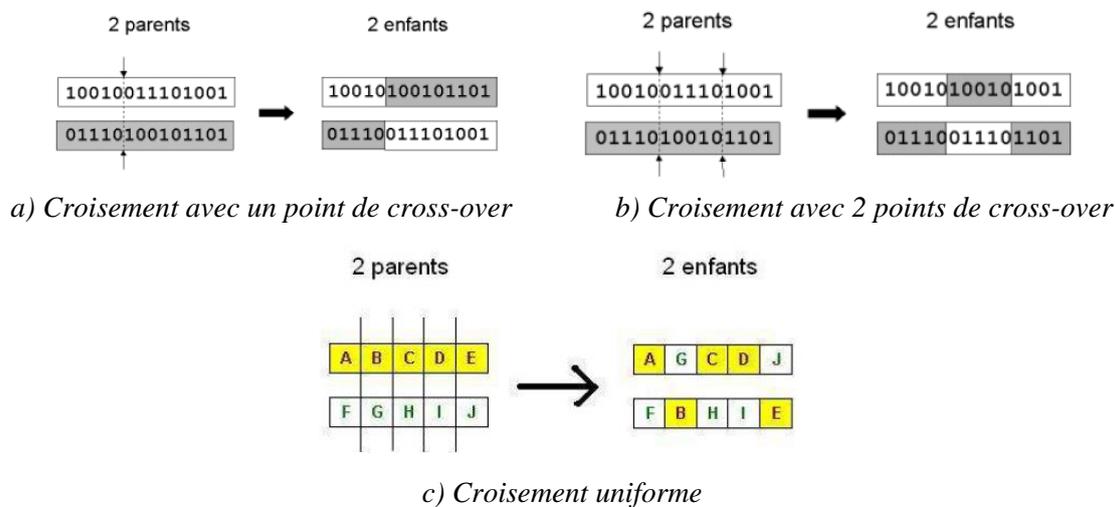


Figure 3.2 : Différents types de croisement (cross-over)

L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche. Par exemple considérons deux gènes A et B pouvant être améliorés par mutation. Il est peu probable que les deux gènes améliorés A' et B' apparaissent par mutation dans un même individu. Mais si un parent porte le gène mutant A' et l'autre le gène mutant B', l'opérateur de croisement permettra de combiner rapidement A' et B' et donc de créer un nouvel individu possédant cette combinaison grâce à laquelle il est possible qu'il soit encore plus adapté que ses parents. L'opérateur de croisement assure donc le brassage du matériel génétique ainsi que l'accumulation des mutations favorables. En termes plus concrets, cet opérateur permet de créer de nouvelles combinaisons des paramètres des composants.

Il convient de noter que la probabilité de croisement est proportionnelle au nombre de points ; plus il y a des points et plus il y aura d'échange de segments, de paramètres, et d'informations et donc plus de diversité.

- ✓ **Mutation** : Ce processus joue un rôle secondaire dans un algorithme génétique mais il est, quand même, important car ce dernier assure qu'aucun point dans l'espace de recherche n'aura une probabilité nulle d'être atteint. La mutation consiste donc à l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits) se trouvant en un locus bien particulier, lui aussi déterminé de manière aléatoire. Ce processus peut donc être résumé tel que le présente la figure 3.3 ainsi que l'exemple ci-après :

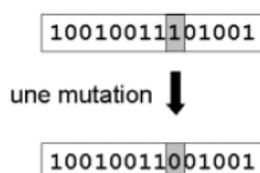


Figure 3.3 : opérateur de mutation

Comme exemple de mutation d'un bit : $A_1 = 00101 \Rightarrow A'_1 = 01101$

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein d'une population de solutions et évite la convergence prématurée vers un extremum local.

Cet opérateur dispose de 4 grands avantages, à savoir :

- Garantir la diversité de la population, ce qui est primordial pour les algorithmes génétiques.
- Eviter le phénomène connu sous le nom de dérive génétique qui se produit généralement lorsque certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment d'autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes.
- Limiter les risques d'une convergence prématurée, causée par exemple par une méthode de sélection élitiste imposant à la population une pression sélective trop forte. En effet, dans le cas d'une convergence prématurée, on se retrouve avec une population dont tous les individus sont identiques mais ne sont que des optimums locaux. Tous les individus étant identiques, le croisement ne changera rien à la situation. En effet, l'échange d'informations par cross-over entre des individus strictement identiques est bien sûr totalement sans conséquences.
- Atteindre la propriété d'ergodicité, qui est une propriété garantissant que chaque point de l'espace de recherche puisse être atteint. En effet, une mutation pouvant intervenir de manière aléatoire, au niveau de n'importe quel locus, assure avec certitude mathématique que n'importe quelle permutation de la chaîne de bits peut apparaître au sein de la population et donc que tout point de l'espace de recherche

peut être atteint. Grâce à cette propriété, le pouvoir d'atteindre l'optimum global est assuré.

- ✓ **Remplacement** : Cet opérateur consiste à réintroduire les descendants obtenus par application successive des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation (de la population P' dans la population de leurs parents P). Le rapport entre le nombre d'individus nouveaux introduits dans la population P et le nombre d'individus de cette population est connu sous le nom de *génération gap*.

Il existe essentiellement 2 méthodes différentes de remplacement :

- Un remplacement stationnaire : dans ce cas, les enfants remplacent automatiquement les parents sans tenir compte de leurs performances respectives, et le nombre d'individus de la population ne varie pas tout au long du cycle d'évolution simulé. Cela implique d'initialiser la population initiale avec un nombre suffisant d'individus. Cette méthode peut être mise en œuvre de 2 façons différentes :
 - La première se contente de remplacer la totalité de la population P par la population P' . Cette méthode est connue sous le nom de remplacement générationnel et on a donc un *génération gap* qui vaut 1.
 - La deuxième méthode consiste à choisir une certaine proportion d'individus de P' qui remplaceront leurs parents dans P (proportion égale à 100 % dans le cas du remplacement générationnel).

Ce type de remplacement engendre une population ayant une grande variation, ce qui favorise la dérive génétique qui se manifeste d'autant plus que la population est de petite taille.

- Un remplacement élitiste : dans ce cas, au moins l'individu possédant les meilleures performances d'une génération est conservé pour la suivante, où le nouvel individu ne peut prendre place au sein de la population que s'il remplit le critère d'être le plus performant des individus de la population précédente. De ce fait, la taille de la population n'est pas figée au cours du temps.
- ✓ **Convergence** : Cette étape représente la fin du processus où, généralement, les règles qui indiquent que l'algorithme a atteint son objectif sont les suivantes :
 - ✓ *Lorsqu'il n'y a pas d'amélioration de la qualité de la solution après avoir réalisé un certain nombre d'itérations ;*
 - ✓ *Quand une gamme de générations et de temps est atteinte ;*
 - ✓ *Quand une solution acceptable est obtenue.*

Cependant, un algorithme génétique peut donc s'écrire suivant la forme générale suivante :

- ✓ *Initialiser la population initiale P .*
- ✓ *Evaluer P .*

- ✓ *Tant Que (Pas Convergence) faire :*
 - *P' = Sélection des Parents dans P*
 - *P' = Appliquer Opérateur de Croisement sur P'*
 - *P' = Appliquer Opérateur de Mutation sur P'*
 - *P = Remplacer les Anciens de P par leurs Descendants de P'*
- e) *Evaluer P*
- ✓ *Fin TantQue*

La figure 3.4 résume les principales tâches d'un algorithme génétique.

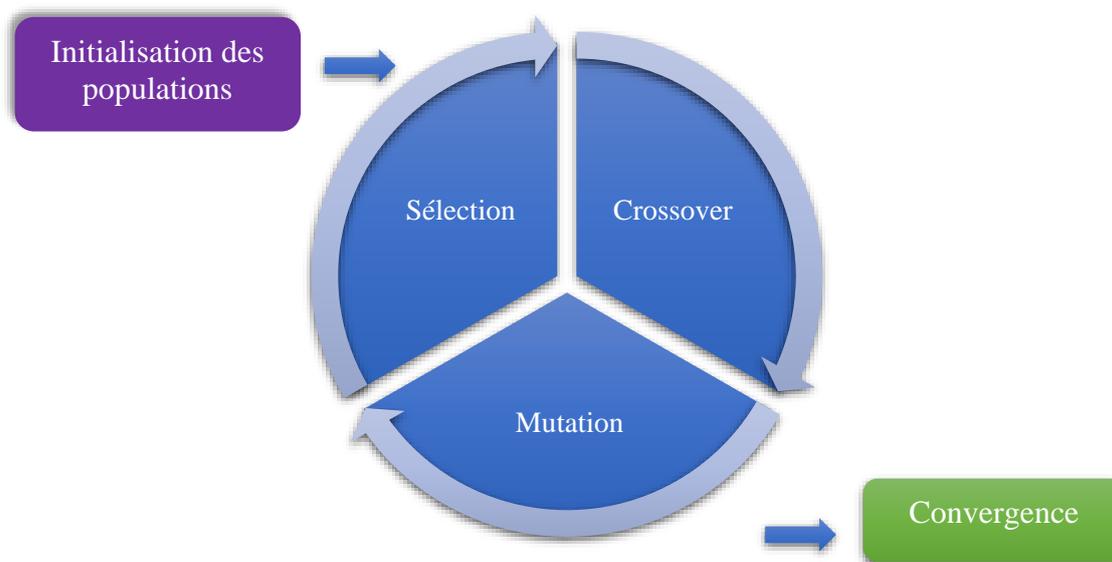


Figure 3.4 : Processus général de fonctionnement d'un AG évolutif

Il est important de noter que l'évaluation des solutions déduite par l'AG se fait en considérant à la fois les deux critères suivants :

- Les contraintes : qui représentent les conditions qui doivent être respectées lors du processus ; le cas échéant, la solution sera rejetée ;
- Fonction objectif : qui représente la cible de l'algorithme où dans le cas d'un processus multi-objectifs, les poids seront associés, à chacune des valeurs correspondantes, selon leurs importances.

3.3 L'optimisation multi-objectifs des AG

Les algorithmes génétiques sont caractérisés par leurs capacités spécifiques d'extraire les solutions optimales des problèmes les plus complexes et cela à travers leurs possibilités d'établir des fonctions multi-objectifs. Contrairement à une optimisation à objectif unique (ou à critère unique ou encore mono-objectif) dont la solution optimale est généralement clairement définie, les fonctions multi-objectifs comportent un ensemble de solutions qui sont généralement des « compromis » où cet ensemble est généralement dénommé « l'ensemble des solutions optimales de Pareto » (Francisci, 2002).

Les solutions proposées par l'algorithme sont considérées comme étant optimales dans le sens où aucune autre solution, dans l'espace de recherche des solutions, n'est supérieure à cette dernière lorsque tous les objectifs sont considérés dans le traitement simultanément.

Afin de bien valoriser l'utilité des AG dans la résolution de problèmes d'optimisation multi-objectifs dans l'aspect de conception des bâtiments, d'une manière générale, et en particulier dans le cadre de notre travail de recherche qui consiste à proposer une approche capable d'extraire une conception structurale à partir de modèles BIM-3D architectural en se basant seulement sur l'aspect géométrique ainsi que les critères et les paramètres essentiels exigés et recommandés par les règles techniques de calcul des structures, il convient de présenter quelques définitions essentielles pour l'établissement de cette approche.

Lors d'une conception structurale d'un bâtiment, la réflexion d'un ingénieur de structure est principalement encadrée par deux aspects. Le premier consiste en des contraintes relatives à la fois à l'architecture de l'ouvrage (comprenant la géométrie du bâtiment ainsi que la répartition des espaces architecturaux selon l'aménagement proposé) ainsi que les critères techniques et réglementaires relatifs aux calculs et dimensionnement des structures. Pour sa part, le second aspect concerne l'objectif que l'ingénieur veut atteindre, et qui consiste à avoir une ossature à la fois stable, résistante et optimale. En d'autres termes, ceci peut correspondre donc à la recherche de l'équilibre adéquat entre les volets de l'efficacité qui lui doit être maximisé, tandis que celui relatif au coût doit être minimisé.

Par conséquent, l'approche de l'optimisation multi-objectifs s'avère la plus convenable pour le traitement de ce type de sujets, où l'ensemble des paramètres considérés lors de l'établissement de la conception structurale peut être défini dans l'algorithme soit explicitement, comme étant à la fois des critères et des objectifs d'optimisation, ou bien formulés comme étant des contraintes seulement. On peut citer, à titre d'exemple, le respect des espaces libres des chambres qui doit être considéré comme contrainte alors que la longueur et la disposition d'un voile peut être à la fois une contrainte et aussi un objectif.

Afin de bien comprendre le processus d'optimisation multi-objectifs, certaines définitions nécessitent méritent d'être précisées.

3.3.1 Le problème d'optimisation :

Le problème d'optimisation multi-objectifs peut généralement s'écrire en considérant les paramètres suivants :

Soit :

- « n » : l'ensemble des paramètres qui représentent les variables de décision ;
- « k » : l'ensemble des fonctions d'objectifs;
- « m » : l'ensemble de contraintes ;

Les fonctions multi-objectifs ainsi que les contraintes sont des fonctions de variables de décision, le but de l'optimisation est donc de :

$$\text{Maximiser : } \{ y_1 = f_1(x), y_2 = f_2(x), \dots, y_k = f_n(x) \} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\text{Sachant que : } g_i(x) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \dots \dots \dots (3.2)$$

Où chaque paramètre représente :

y : le vecteur objectif pour n variables dans l'espace des objectifs Y ;

x : le vecteur de décision pour n variables dans l'espace des décisions X ;

$f_i(x)$: la fonction objectif ;

$g_i(x)$: les contraintes qui déterminent l'ensemble des solutions probables qui peuvent être réalisées.

3.3.2 La satisfiabilité :

Cet aspect est aussi très important à comprendre dans le processus de l'optimisation multi-objectifs, car il décrit la difficulté d'avoir des solutions qui répondent à l'ensemble des objectifs simultanément car certains parmi eux ont un caractère conflictuel. Donc une solution intermédiaire entre ces différents objectifs peut être un compromis acceptable.

3.3.3 La domination et l'optimalité :

Elle est définie par le principe qui fait qu'une décision dominante ne peut être considérée comme étant optimale sauf si elle ne peut être améliorée davantage sur aucun objectif sans avoir causé l'endommagement d'au moins un autre objectif. Ces solutions sont appelées « *les solutions optimales de Pareto* » ou « *solutions non-inférieures* », qui ne sont pas forcément celles les plus dominantes.

Ce compromis entre les décisions et les objectifs, permet d'avoir un ensemble de solutions optimales, où aucune ne peut être classée comme étant meilleure que les autres sans qu'une information de préférence ne soit incluse.

3.3.4 Entre recherche & prise de décision :

Généralement, dans la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs, deux aspects essentiels relatifs à la recherche et la prise de décision nécessitent d'être bien considérés.

Le premier concerne le processus d'optimisation dans lequel l'ensemble de satisfiabilité est échantillonné pour les solutions optimales de Pareto, alors que le second concerne le problème de la sélection des solutions à partir de l'ensemble optimal.

Selon la manière dont les processus d'optimisation et de décision sont gérés, les méthodes d'optimisation multi-objectifs peuvent être classées en trois catégories (Cormier, 2008) :

- *Prise de décision avant recherche* : où les objectifs sont associés à un seul critère qui inclut implicitement les informations de préférences données par le preneur de décision ;
- *Recherche avant la prise de décision* : l'optimisation est élaborée sans définition de préférence. Le résultat du processus de recherche est un ensemble de solutions (idéalement optimales) dans lequel le choix final est pris par le preneur de décision.

- *Prise de décision durant la recherche* : le preneur de décision peut articuler les préférences durant le processus d'optimisation interactif, où après chaque étape d'optimisation, un certain nombre de compromis est présenté sur la base duquel le preneur de décision spécifie davantage d'informations de préférence, pour guider la recherche.

Le groupement de multiples objectifs en un seul critère d'optimisation offre l'avantage de l'utilisation des approches classiques d'optimisation à objectif unique sans qu'elles soient modifiées, mais à condition d'avoir des connaissances du domaine, une chose qui n'est souvent pas disponible. Cependant, faire une recherche avant la prise de décision ne nécessite point cette exigence, mais exclut l'apport du preneur de décision à travers la définition des préférences afin de réduire la complexité de l'espace de recherche. Enfin, l'intégration des deux aspects, dans une seule approche, offre une opportunité prometteuse pour exploiter les avantages de ces deux aspects « recherche & décision » (Francisci, 2002).

3.4 Elaboration d'un algorithme génétique pour la génération des structures optimisées

Dans le cadre de notre projet de recherche, un certain nombre d'algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs a été élaboré pour l'identification et la génération d'un ensemble de solutions optimales de conceptions structurales en suivant le processus décrit ci-dessous.

3.4.1 Le principe

Le processus adopté pour la génération d'une conception structurale à travers un algorithme génétique ayant une fonction multi-objectifs, est élaboré selon les étapes suivantes :

- Extraction des données géométriques nécessaires utilisées comme « inputs » à partir d'un modèle architectural BIM-3D ;
- Définition des contraintes et critères de conception propres au système structural ;
- Génération aléatoire d'une première population de conception structurale ;
- Opérations génétiques d'optimisation selon la fonction multi-objectifs ;
- Sélection des solutions optimales
- Finalisation du choix.

L'organigramme détaillé de ces différentes tâches est présenté par la figure 3.5.

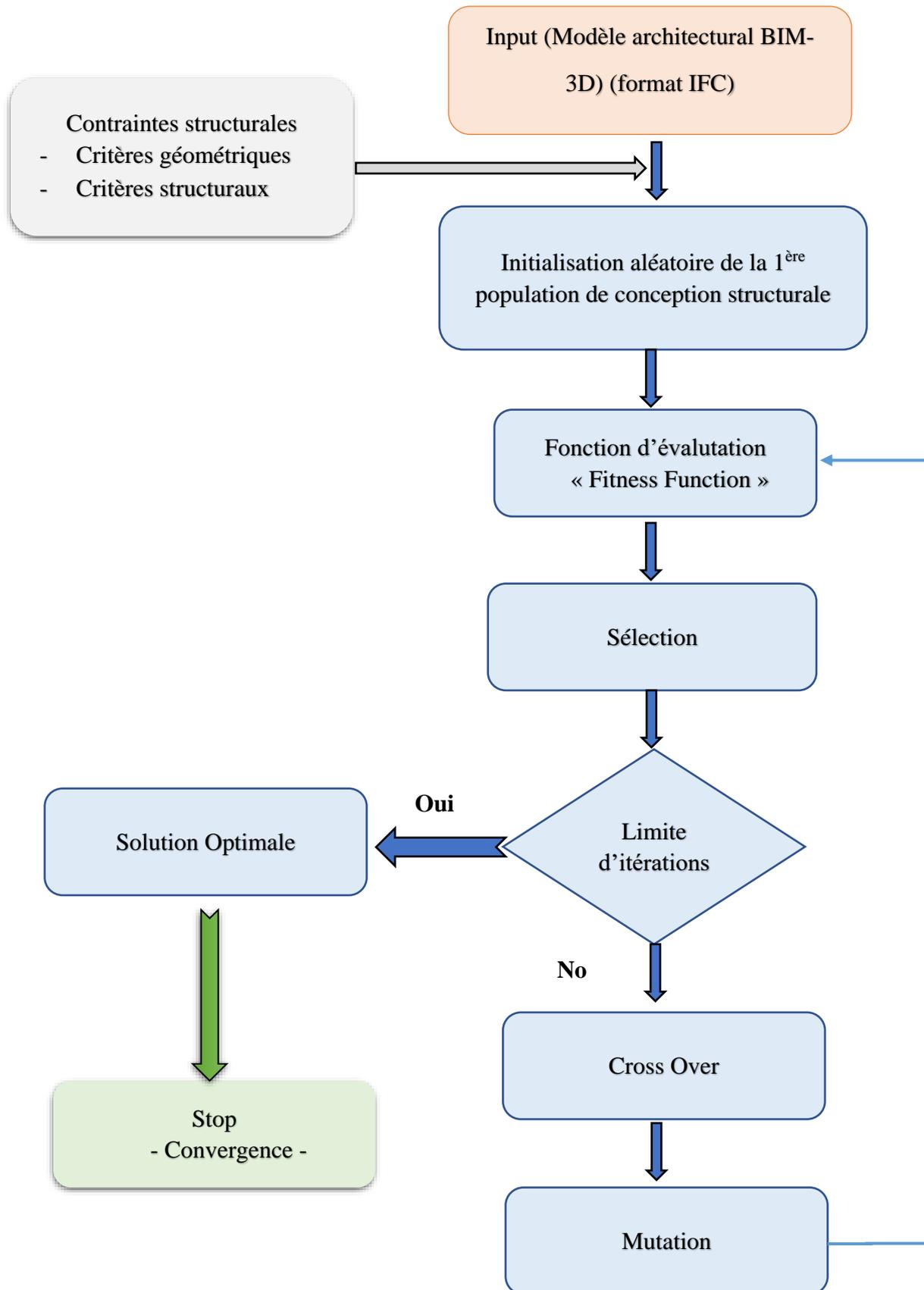


Figure 3.5 : Processus de l'algorithme génétique

3.4.2 Extraction des données géométriques « Inputs » du bâtiment

Cette étape consiste à importer la géométrie architecturale du bâtiment à partir d'un modèle BIM « 3D » en utilisant principalement les formats de fichier « IFC » qui sont caractérisés par leur efficace interopérabilité lors des inter-échanges entre les divers outils et logiciels. Ce fichier comporte l'ensemble des données géométriques et physiques détaillées du bâtiment, ainsi que ceux de ces éléments constitutants.

L'algorithme va donc identifier et extraire les informations nécessaires à partir de ce fichier, afin d'établir l'évaluation des différents critères géométriques nécessaires à l'élaboration de la conception, tels que :

- La géométrie globale du bâtiment en matière de longueur, largeur, et hauteur ;
- Les limites des planchers ;
- Les séparations en murs intérieurs et extérieurs ;
- La répartition des ouvertures (portes / fenêtres) ;
- La verticalité des murs.

Cette phase d'identification et d'importation des données input représente l'une des phases les plus importantes pour le fonctionnement de l'AG, car elle définit le gabarit dans lequel doivent s'inscrire les variantes structurales jusqu'à l'obtention de la solution structurale optimisée.

D'une manière générale, les murs architecturaux sont représentés dans un plan X-Y par un ensemble de lignes bidirectionnelles, où chaque segment de mur est caractérisé par ses coordonnées de début et de fin, alors que les planchers sont définis par leurs limites de contour. Le reste des données géométriques tels que les dimensions du bâtiment sont utilisées directement à partir du modèle BIM-3D.

Figure 3.6-3.8 présentent les données nécessaires que l'algorithme doit judicieusement extraire du modèle architectural.

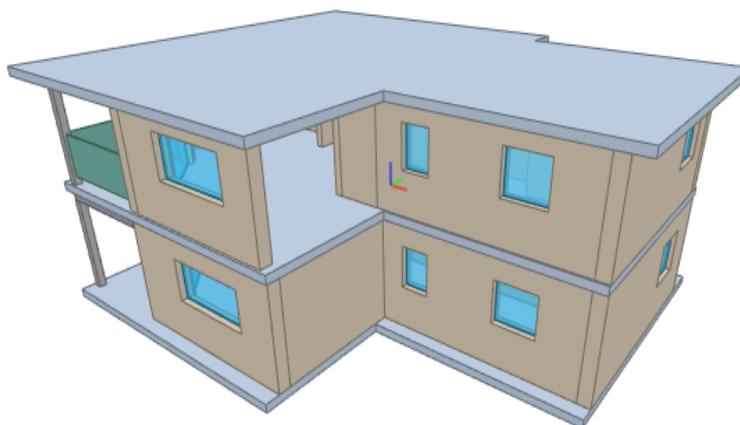


Figure 3.6 : Vues en 3D du modèle d'architecture BIM

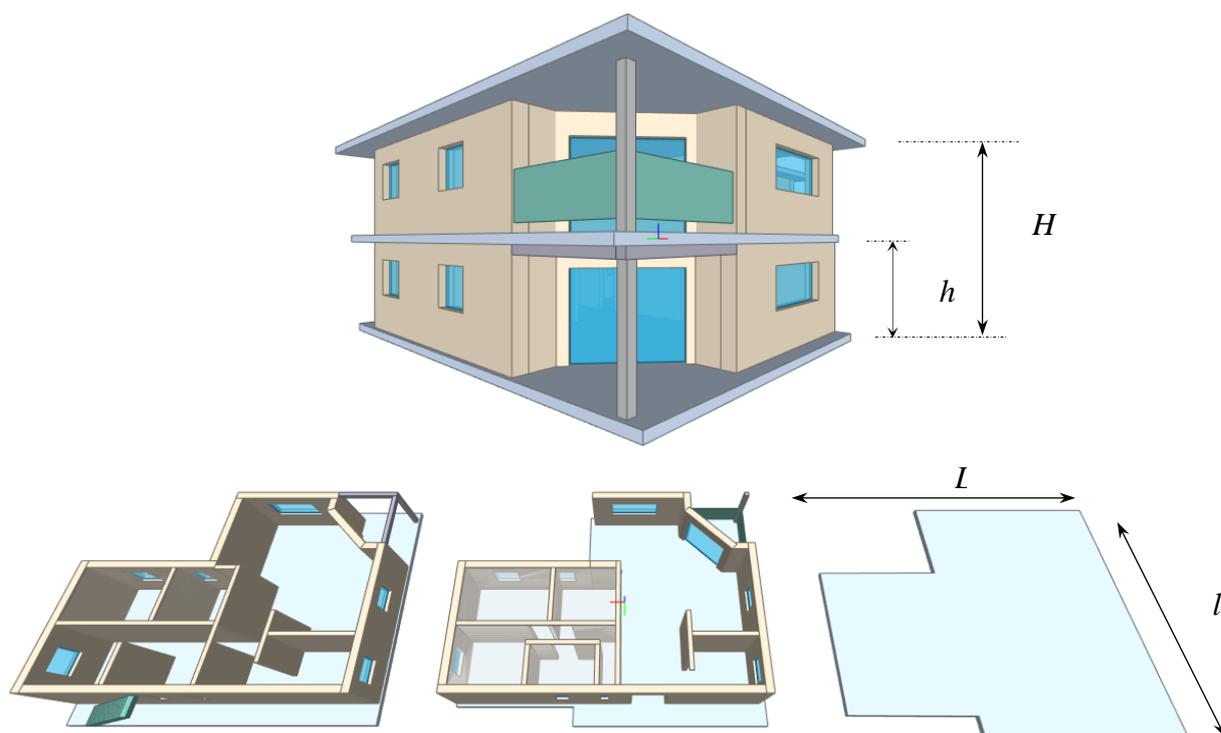
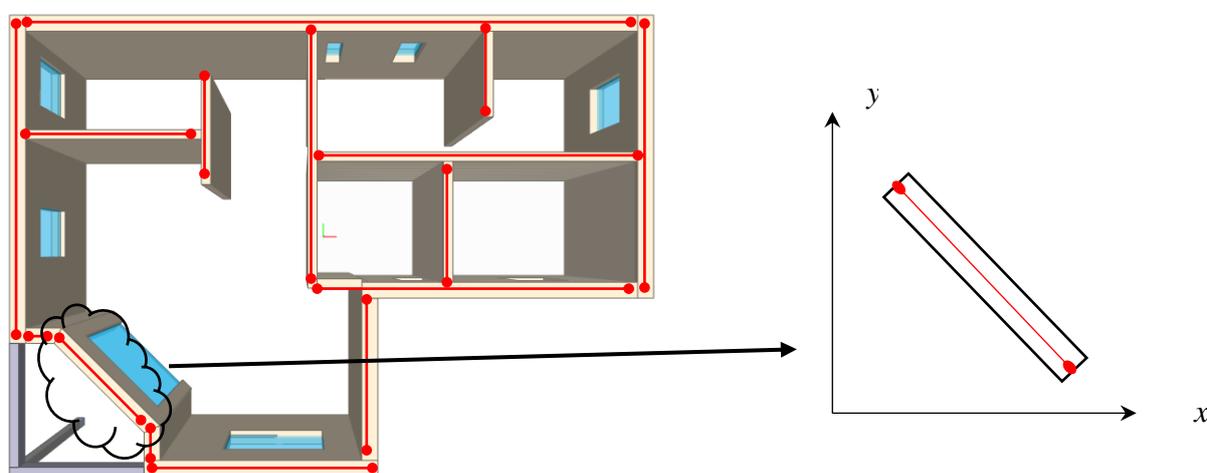


Figure 3.7 : Données géométriques à extraire du modèle BIM-3D

Une fois identifié, l'ensemble des murs architecturaux, relatifs aux cloisonnements, sera représenté par un système de vecteurs, paramétrés par leurs points de début et de fin dans un plan XY.



a) représentation sur modèle 3D

b) représentation d'un mur type

Figure 3.8 : Représentation des murs par de vecteurs bidirectionnels

3.4.3 Les contraintes

D'une manière générale, les critères et les contraintes essentielles à intégrer dans l'AG peuvent être classés en deux catégories principales, à savoir :

- 1- La première catégorie concerne les critères à caractère géométrique relatifs à l'architecture du bâtiment, tels que : les limites dimensionnelles de l'ouvrage (longueur, largeur, hauteur), l'aménagement des espaces intérieurs, la répartition des murs de cloisonnement, la disposition des ouvertures (portes et fenêtres). Les critères de cette catégorie représentent les mêmes contraintes quels que soit la nature et le type du système structural adopté.
- 2- La deuxième catégorie des critères concerne les exigences techniques et réglementaires d'une conception structurale, en considérant les techniques de calcul de structure d'une manière générale, et ceux relatifs aux codes et normes parasismiques en particulier, tels que : la quantité nécessaire des éléments structuraux de contreventements et de stabilité vis-à-vis des charges latérales et gravitaires respectivement, la disposition adéquate de ces éléments, ainsi que d'autres. Ces critères peuvent être à caractère général pour n'importe quel système constructif, comme ils peuvent être spécifiques à un système structural bien donné.

La figure 3.9 résume les critères et exigences d'ordre général, catégorisés selon leurs importances, et qui peuvent être utilisés par la suite comme étant des contraintes ou des fonctions objectifs dans l'algorithme.

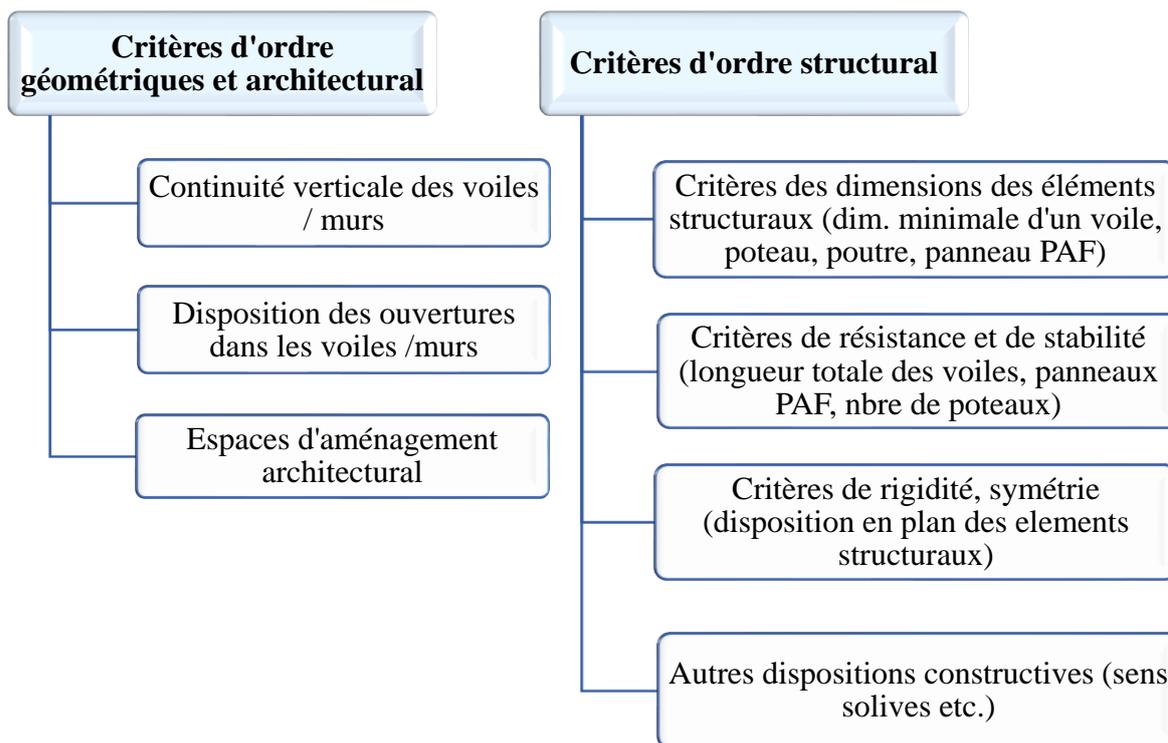


Figure 3.9 : Classifications des critères géométriques et structuraux

Plus de détails spécifiques à chaque système constructif seront définis dans les chapitres 4 et 5 dédiés à l'application des algorithmes élaborés pour les systèmes structuraux « voiles – dalles » en béton armé, et « panneaux en charpente métallique légère » respectivement.

3.4.4 La fonction multi-objectifs

Une fois que l'algorithme a identifié les critères géométriques et ceux d'ordre structural qui sont typiques à chaque système constructif, la fonction multi-objectifs est alors définie, les objectifs pouvant être tels que :

- ✓ Critère de résistance latérale (Quantité des éléments de contreventement tels que les voiles, panneaux de contreventement, poteaux etc.)
- ✓ Critère de résistance aux charges gravitaires (Répartition des éléments porteurs pour couvrir la totalité de la surface) ;
- ✓ Critère de symétrie (Excentricité de torsion dans les planchers $e_{x,y}$);
- ✓ Critère de rigidité de torsion (Rayon de gyration de torsion).

Dans notre travail de recherche, deux systèmes constructifs différents - à savoir les structures en voiles – dalles en béton armé et ceux en panneaux en charpente métallique légère - ont fait l'objet d'application d'algorithmes génétiques. Pour chaque cas, une fonction multi-objectifs a été bien définie selon les contraintes et les cibles recherchées, les détails étant donnés aux chapitres 4 et 5 relatifs à chaque système respectivement.

Il est à noter que d'autres contraintes et fonctions objectifs peuvent être ajoutées ou modifiées, selon le besoin du concepteur et selon le type du système considéré.

3.4.5 Génération aléatoire des solutions

Après avoir défini les contraintes ainsi que la fonction multi-objectifs, l'algorithme génère aléatoirement, dans un premier temps, un ensemble de populations qui répond aux exigences de certaines contraintes imposées, laquelle population sera appelée la population initiale. Cet ensemble de solutions sera, par la suite, évalué et valorisé à travers la fonction « Fitness » afin de sélectionner ceux qui répondent le mieux aux critères.

L'évolution de l'algorithme consiste à établir une série d'opérations de croisements « cross over » entre les solutions, suivies par des mutations où, à chaque rotation du processus, l'algorithme conservera, parmi les nouvelles solutions, celles qui correspondent le mieux aux critères de performance.

Le nombre d'itérations joue un rôle important dans le déroulement de l'algorithme afin d'assurer la convergence. Il est déterminé à travers plusieurs simulations en constatant la stabilité des résultats donnant les meilleures solutions pour chaque système considéré.

Les éléments structuraux porteurs et de contreventement – qui sont les gènes et les chromosomes dans une configuration biologique – sont générés aléatoirement selon une distribution normale qui s'écrit comme suit :

$$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \dots\dots\dots (3.3)$$

Où :

La moyenne est la dimension optimale de l'élément structural (longueur optimale du voile/panneau)

$$\mu = L_{w,opt} \dots\dots\dots (3.4)$$

L'écart type est le maximum de la différence entre les dimensions extrêmes et optimales qui est donné par :

$$\sigma^2 = \max\{L_{w,max} - L_{w,opt} , L_{w,opt} - L_{w,min}\} \dots\dots\dots (3.5)$$

Chaque élément structural est disposé d'une manière aléatoire sur les murs de cloisonnement du plan architectural, en suivant en premier lieu la probabilité d'un positionnement qui tend plutôt vers la périphérie bord de la dalle afin d'accélérer la convergence de l'algorithme vers une solution optimale.

3.4.6 Fonction de croisement « Crossover »

Le principe de la fonction de croisement « crossover » est basé sur le croisement de deux configurations sélectionnées de la population initiale, afin de générer une nouvelle configuration composée des éléments structuraux de la première solution et en complétant le reste à partir de ceux de la deuxième. Sur cette base, la nouvelle solution comprendra forcément les caractéristiques des deux parents et respectant les contraintes imposées.

La figure 3.10 présente les démarches de ce processus.

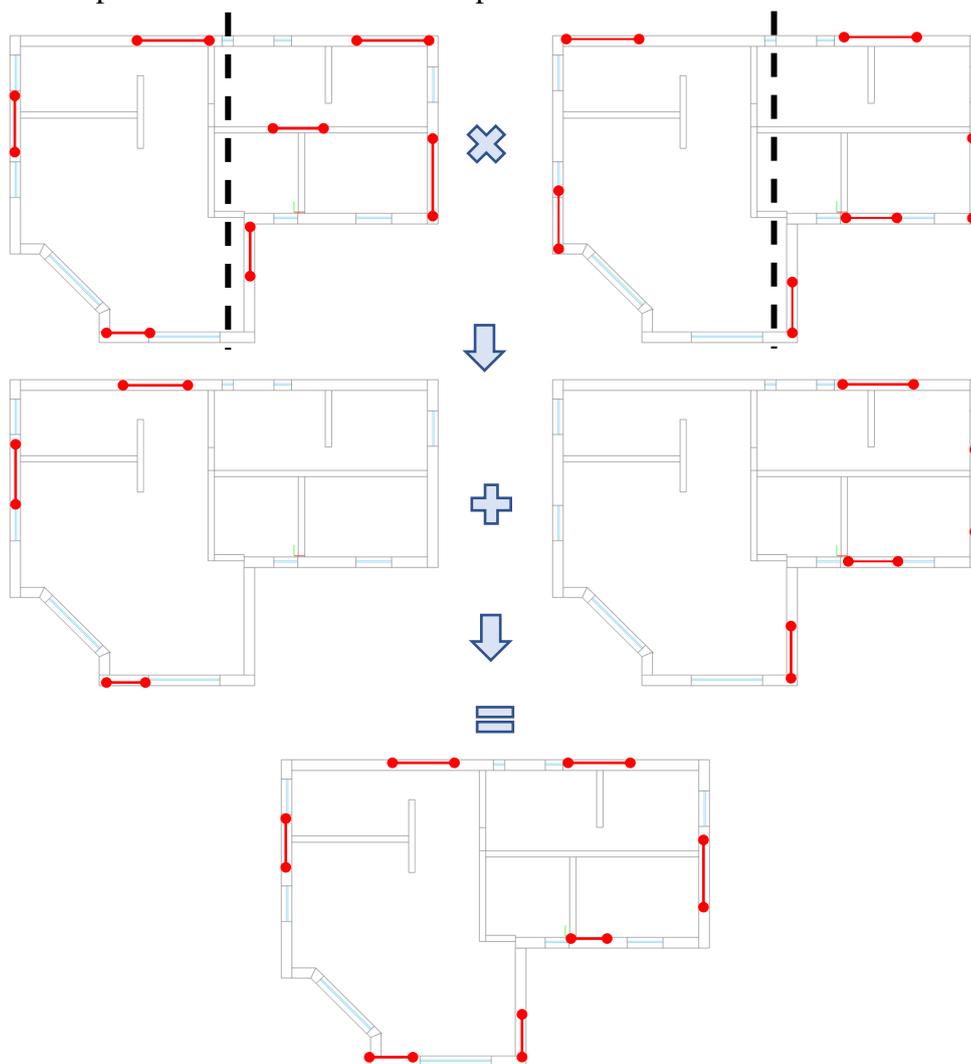


Figure 3.10 : Croisement entre deux solutions

3.4.7 Fonction de mutation

L'objectif de l'intégration de la mutation, dans le processus de l'algorithme génétique, est d'explorer au maximum les solutions probables afin d'éviter la limitation que peut imposer l'algorithme lors de l'utilisation des caractéristiques originales des parents.

La fonction de mutation peut être introduite dans l'algorithme comme étant une donnée d'entrée sous forme d'un paramètre empirique, afin d'accorder au processus la possibilité de porter des améliorations dans les nouvelles solutions générées aléatoirement après le croisement.

Dans notre travail, deux mutations typiques ont été considérées, à savoir :

- ✓ Augmentation de la dimension des éléments structuraux (longueur des voiles BA / panneaux CM) : où cette extension concernera les éléments ayant une dimension inférieure à celle qui est autorisée, quelle que soit la nature de l'élément, qu'il soit existant ou nouvellement inséré, voir figure 3.11.
- ✓ Réduction de la dimension des éléments structuraux (longueur des voiles BA / panneaux CM) : au contraire de l'augmentation, si un élément n'a pas atteint la longueur minimale autorisée, il sera complètement éliminé, voir figures 3.11 (c) et (d).

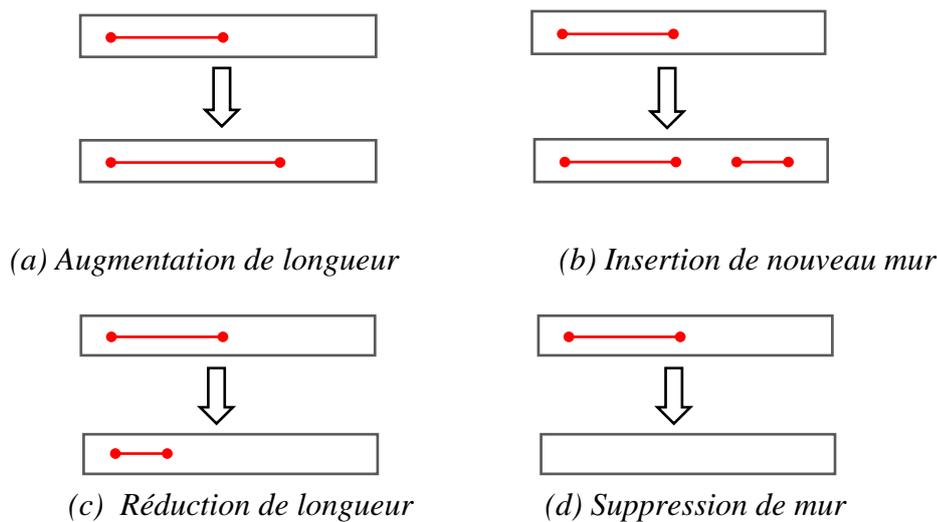


Figure 3.11 : Application de la mutation sur les murs

3.4.8 La sélection

Enfin, pour chaque critère un vecteur d'évaluation « v » est alors généré par la fonction de fitness « f_v » pour une solution donnée, dont la valeur est définie comme suit :

$$f_v = v \cdot w \dots\dots\dots (3.6)$$

w : est le vecteur des poids empiriques des critères de la fonction multi-objectifs qui sont donnés en fonction de leurs importances lors de l'évaluation de la solution.

3.4.9 Finalisation et convergence

D'une manière générale, le déroulement de l'algorithme génétique est arrêté par un critère de convergence qui définit la précision ou le degré de « fitness » de la solution et/ou après un nombre prédéfini d'itérations qui est fixé par l'utilisateur. Pour le présent cas, seul le critère du nombre d'itérations est utilisé pour arrêter le processus après avoir constaté que la convergence se stabilise pour plusieurs essais au-delà de ce nombre.

3.5 Code de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique a été élaboré en utilisant le code Python, dont le développement détaillé de ce dernier est mis à disposition pour les chercheurs en open source sur le site « github.com », dont le lien est donné comme suit :

<https://github.com/ressay/ArchToCE>

3.6 Conclusion

Ce chapitre est dédié à la conception et l'application d'un algorithme génétique pour la génération automatique d'une conception structurale optimisée à partir d'un modèle architectural en BIM-3D. En premier lieu, une description détaillée du principe de fonctionnement des algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs est donnée. Ensuite, l'application pour la conception structurale optimisée est exposée. A ce titre, une stratégie a été développée pour la définition du schéma structural à partir d'un modèle architectural en IFC qui permet de générer toutes les possibilités structurales potentielles qui seront optimisées par l'AG. Le protocole de définition et d'intégration des contraintes structurales et la fonction multi-objectifs à partir des règles générales de conception et des critères de résistance et de stabilité a été élaboré pour le cas d'un système structural quelconque. Enfin les opérations de fonctionnement de l'algorithme génétique pour l'optimisation de la conception structurale en termes de génération de la population initiale, le processus de sélection, de croisement et de mutation des individus (layout structural) ainsi que le critère d'arrêt ont été proposés.

La mise en œuvre de l'algorithme pour deux systèmes structuraux différents : structure voiles-dalles en BA et en panneaux en charpente métallique laminée à froid fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Application de l'algorithme génétique pour la conception des structures dalles-voiles en béton armé

4.1. Introduction

Après avoir exposé les différents aspects nécessaires à l'identification et la génération d'une conception structurale optimisée, en utilisant les algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs, et dans le but de tester et valoriser l'efficacité ainsi que les performances de cette approche, ce chapitre expose une première application qui consiste à automatiser et optimiser la conception structurale des systèmes voiles- dalles en béton armé.

Ce chapitre est organisé en trois volets dont le premier est dédié à la présentation du système constructif voiles-dalles en BA ainsi que le comportement structural des éléments structuraux constituants. Le deuxième volet porte sur les critères essentiels à considérer lors d'une conception parasismique, et qui peuvent être utilisés comme étant des contraintes et/ou des paramètres de la fonction objectif de l'algorithme génétique. Le dernier volet est réservé à l'évaluation de la performance de l'algorithme génétique en matière de génération des solutions structurales optimisées pour une variété de configurations architecturales extraites de modèles BIM-3D.

4.2. Présentation du système structural « dalle – voile » en BA

Le type de structure en « dalles – voiles » en béton armé est l'un des concepts traditionnels les plus utilisés dans de nombreux programmes de construction de logements à travers le monde. Ce type est caractérisé par la capacité d'assemblage des planchers avec les voiles porteurs qui permet d'atteindre un efficace monolithisme global, apportant une redondance structurale très favorable à la sécurité globale du bâtiment.

La conception en voiles - dalles présente aussi d'autres avantages qui relèvent autant de la performance structurale que des possibilités d'organisation spatiale architecturale, où elle offre la possibilité de réaliser des projets ayant des géométries difficilement réalisables avec d'autres solutions constructives ainsi que par d'autres matériaux. La disposition des voiles dans la structure - même s'ils ne sont pas parallèles – joue un rôle primordial à travers la transmission des charges et des actions gravitaires et latérales vers le système des fondations.

4.2.1. Le concept

Une conception en voiles - dalles est généralement représentée par une composition de parois verticales pleines et autoporteuses jouant le rôle d'appuis, associées aux surfaces du plan horizontal des dalles. Ce concept structural est connu sous le nom typologique, dit « structure à base de murs porteurs et/ou de contreventement ». Il existe par ailleurs d'autres concepts où ces murs sont associés dans les structures avec d'autres éléments porteurs telles les structures à base de portiques auto-stables en poteaux – poutres.

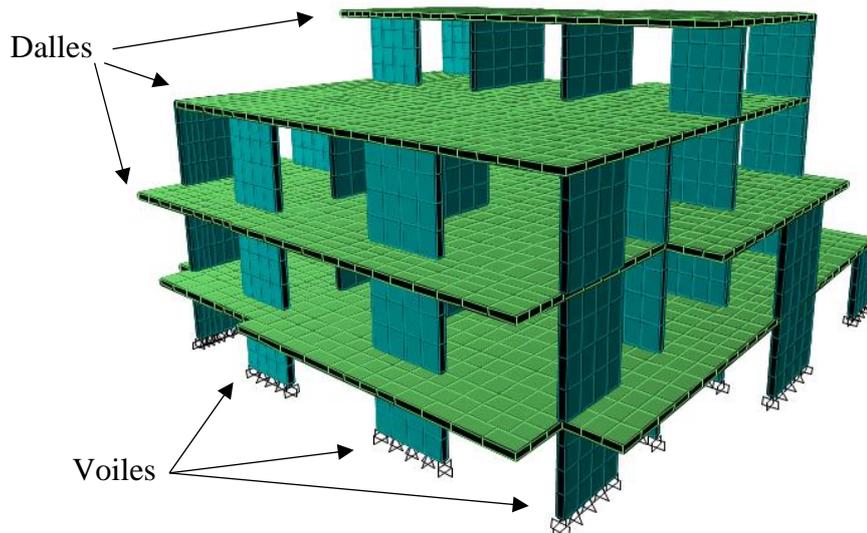


Figure 4.1 : Vue en 3D-BIM d'une structure en voile - dalle

Comme les dalles, les voiles sont caractérisés par leurs faibles épaisseurs par rapport aux deux autres dimensions qui se trouvent en plan. Un voile s'étend sur un plan vertical et supporte des charges verticales et horizontales essentiellement contenues dans ce même plan. Par contre, la dalle est une structure étendue sur les deux directions horizontales en plan, supportant des charges essentiellement verticales.

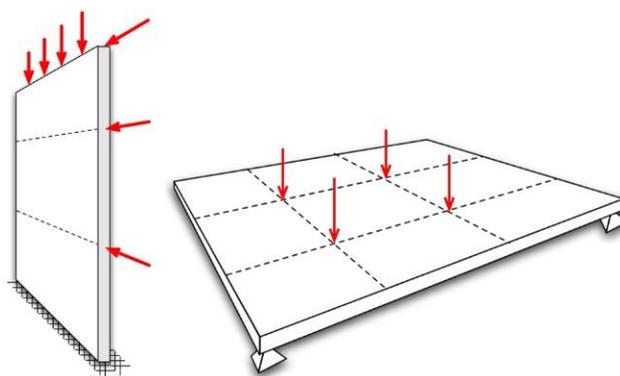


Figure 4.2 : Un voile supporte des charges dans son plan ; une dalle qui supporte des charges orthogonales à son plan.

Bien que ces éléments (Dalle / Voile) aient les mêmes caractéristiques géométriques, leur comportement structural est totalement différent à cause de leurs dispositions ainsi que le type des actions qu'ils doivent supporter. De ce fait et d'un point de vue comportemental, ces éléments sont étudiés suivant deux schémas statiques distincts, à savoir : i) les voiles comme étant des éléments « membranaires », et ii) les dalles comme étant des éléments « plaques ». Cependant, dans certaines configurations, les deux cas de charges peuvent se présenter en même temps avec un modèle mixte de « plaque avec efforts membranaires ».

Les voiles sont caractérisés par une faible raideur hors plan vis-à-vis de l'importante raideur en réponse aux forces contenues dans leur plan, alors que les dalles sont plutôt caractérisées par leurs importantes raideurs hors plan.

Cependant, dans un calcul structural les deux éléments doivent être ductiles⁴, car c'est cette caractéristique qui assure la stabilité de l'ouvrage sous les conditions de chargements extrêmes, comme par exemple les séismes. Il est à noter que l'application de différents états de sollicitation (statique et/ou dynamique, gravitaire et /ou latérale) entraînent, bien sûr, différentes réponses dans ces éléments, selon le rôle structural de chacun dans une structure.

4.2.2. Comportement structural des voiles

D'un point de vue structural et d'une manière générale, un voile peut intégrer un ensemble de fonctions, tels que :

- ✓ La reprise des charges gravitaires du sommet jusqu'à sa base (Mur porteur),
- ✓ La reprise des forces horizontales agissant dans son plan (contreventement),

La reprise des charges gravitaires est assurée par un simple effet de compression, où le chargement doit se trouver dans le plan du voile autant que possible. Dans tous les cas, un voile comprimé devra avoir une raideur assez suffisante pour assurer sa tenue au flambement (connu aussi sous le nom de l'effet du second ordre local des éléments) qui est une déformation hors plans, où la résistance face à cette déformation ne peut être gérée qu'à travers le respect d'une épaisseur minimale à cet égard.

Cependant, la résistance des voiles sous les efforts de traction, de flexion ainsi que de cisaillement est principalement reprise par une disposition adéquate d'une section d'armatures suivant les sollicitations appliquées. La disposition du ferrailage dans les voiles donne plus de flexibilité dans leurs utilisations, telle que la réalisation de grandes ouvertures.

En plus de leur fonction de portance des charges gravitaires, les voiles occupent aussi un rôle majeur dans la stabilité des structures vis-à-vis des sollicitations latérales tels que le vent et les séismes, en réduisant les déformations globales de la structure sous ce type de charges et en augmentant ainsi considérablement la ductilité et la capacité de résistance des bâtiments à travers l'accroissement important de leurs rigidités (Chithambar et al., 2016).

Cependant, le comportement de ces éléments sous les efforts horizontaux dépend principalement du rapport de leurs hauteur / largeur connu sous le nom de « l'élancement », à savoir :

- Un voile élancé tend vers un comportement qui s'apparente à celui d'une poutre : le couple de renversement généré par les efforts extérieurs et celui des réactions à la base est équilibré par un couple parallèle de fibres comprimées-fibres tendues ;
- Un voile court se comporte comme étant une console courte, où le système de fibres tendues / fibres comprimées n'est pas parallèle, mais organisés comme un ensemble montant – diagonale d'un treillis ;

En d'autres termes, les voiles élancés travaillent « à la flexion » alors que les voiles courts travaillent « à l'effort tranchant » (Borra et al., 2015 ; Abu Eusuf et al., 2013), et ce sans oublier,

⁴ La ductilité : c'est la capacité à se déformer plastiquement sans se rompre, et en conditions extrêmes de pouvoir résister en subissant des déformations importantes au-delà de l'apparition d'une première rupture

bien sûr, leurs résistances aux chargements gravitaire à travers l'effet membranaire. Il est à noter aussi que, indépendamment de leur élancement, les voiles résistent aux forces horizontales aussi par l'effet stabilisant de leur poids propre.

Les deux catégories de voiles sont généralement distinguées à travers un ratio de leur hauteur par rapport à la largeur avec une valeur moyenne de « $H/L \leq 2$ » (où H, L : sont respectivement la hauteur et la longueur d'un voile) (Tang et al., 2014), où la disposition des aciers d'armatures doit être faite différemment afin de bien tenir compte de la façon dont ils répondent aux efforts extérieurs. D'une manière générale, les armatures sont placées en double nappes orthogonales, avec une remarquable concertation des aciers dans les zones tendues sur les extrémités des voiles.

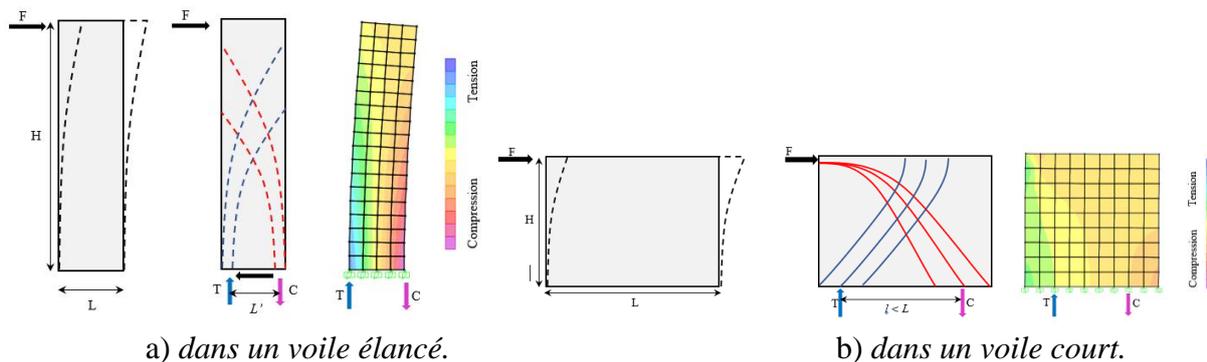


Figure 4.3 : Lignes isostatiques

Dans le cas d'insuffisance et / ou d'absence des armatures dans les zones les plus sollicitées par les différents cas de chargement (latérales ou gravitaires), divers modes de ruines peuvent se produire, voir Figure 4.4.

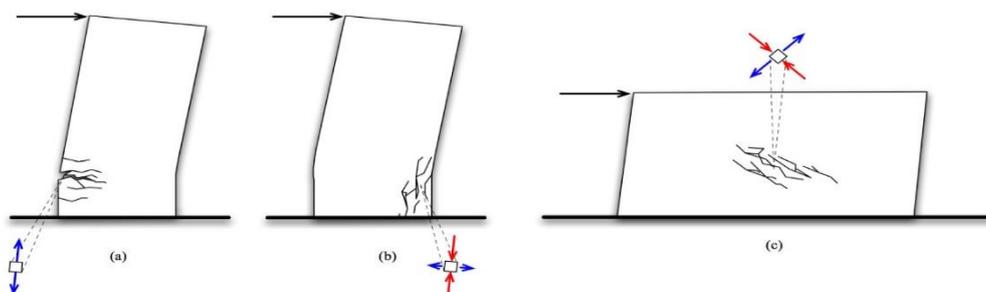


Figure 4.4 : Modes de ruine dans un voile sous chargement latéral : (a) Rupture des aciers tendus ; (b) Rupture du béton comprimé -fendage- ; (c) Rupture au centre du voile par traction et/ou compression des bielles inclinées à 45°.

Figure 4.5 montre le schéma des deux types de ruines des voiles en béton armé sous l'effet de la tension et de la compression sous un chargement latéral, suivant le spécimen de Su et Wong (Su et al., 2007).



Figure 4.5 : Modes de ruine sur un essai réel

Cependant, et comme n'importe quel système structural, avoir une conception efficace en matière de ductilité et de résistance, nécessite le respect des règles de conception et de calcul en général et ceux du génie parasismique en particulier (Men et al. 2014). Parmi les règles les plus caractéristiques et essentielles qu'il est primordial de respecter, il convient de citer ce qui suit :

a- La longueur minimale d'un voile individuel :

La longueur d'un voile de contreventement dans une structure est principalement gérée par deux entités, dont la première concerne le minimum qu'un élément doit disposer pour qu'il soit considéré comme étant un voile de contreventement, où cette entité est définie selon la réglementation parasismique par une longueur égale à 4 fois l'épaisseur du voile (RPA99v2003, EC8 2005). D'autres chercheurs tels que Fardis et al. ont proposé une longueur de 1.5 m pour les bâtiments à faible hauteur et 2.0 m pour les bâtiments à hauteur moyenne (El Ghazouli, 2009).

Sur cette base, la longueur d'un voile individuel pour le cas des bâtiments ayant une hauteur moyenne peut être encadrée entre un minimum de 0.60 m – correspondant à 4 fois l'épaisseur minimale réglementaire égale à 15 cm – et un maximum de 6.0 m, où la longueur optimale est celle qui permet d'avoir un bras de levier suffisant pour produire une répartition adéquate et raisonnable des efforts relatifs à la traction et la compression à la base des voiles (Plumier et al., 2003).

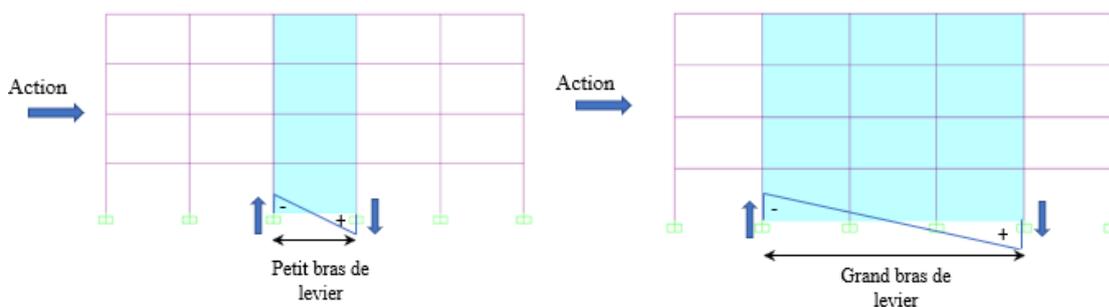


Figure 4.6 : Effet de la longueur des voiles sur la génération des efforts

b- La longueur totale nécessaire des voiles :

La deuxième entité concerne la longueur totale optimale de l'ensemble des voiles nécessaires dans une direction donnée de la structure, pour laquelle plusieurs valeurs ont été proposées, dans ce sens. Parmi les plus remarquables d'entre elles, nous citons : i) les valeurs de $(1/3).H$ à $(1/5).H$ (H : la hauteur totale du bâtiment) proposées par Bachman, suggérées pour les bâtiments ayant une hauteur basse à moyenne à condition que ces voiles soient continus sur toute la hauteur (Bachman, 2002) ; ii) la seconde approche est celle de Fardis qui est fonction du rapport entre les efforts de flexion avec ceux de cisaillement au niveau des voiles ($L_s = M/V$) et cela sans tenir compte de l'effet du chargement axial gravitaire, où une valeur égale à $1/6$ de la hauteur totale est alors proposée (Fardis, 2009) ; iii) la troisième approche consiste à établir une relation entre la surface nécessaire des voiles en plan (longueur x épaisseur) par rapport à celle du plancher en fonction du système structural ainsi que la hauteur du bâtiment, où un ratio minimum de 1,0% a été jugé suffisant pour contrôler la déformée latérale de la structure avec un taux maximal de 2.0% afin de remplir les critères de résistance selon Burak (Burak et al., 2013).

Afin d'apprécier ce paramètre, un travail similaire à cette dernière approche a été effectué à travers l'établissement d'une analyse numérique paramétrique sur plusieurs types de structure, et cela dans le but d'avoir un ratio minimum entre la longueur totale des voiles nécessaire pour reprendre les efforts dans une direction donnée en fonction de la surface du plancher et la hauteur du bâtiment. Pour ce faire, un total de 15 modèles prototypes ont été élaborés et analysés, en faisant à chaque fois varier la hauteur totale de la structure de 3.0 m à 100 m avec un pas de 10 m, ainsi que la surface des planchers entre 100 m^2 et 600 m^2 par niveau avec un pas de 100 m^2 , voir figures 4.9 et 4.10.

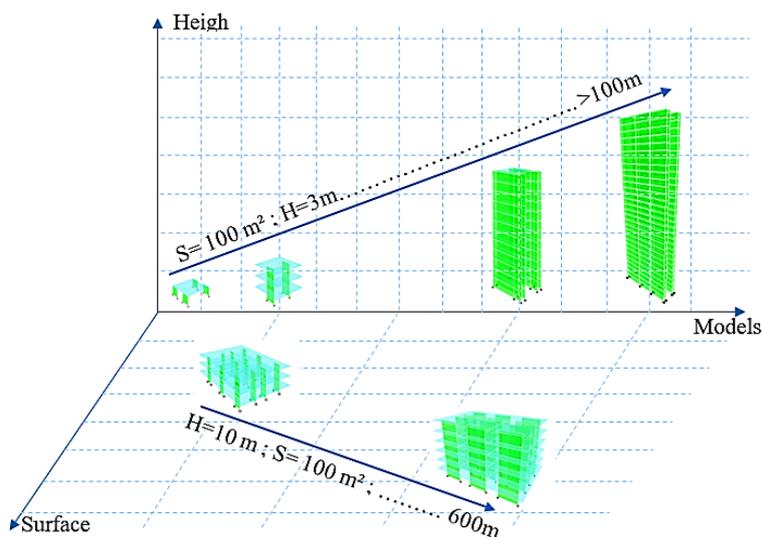


Figure 4.7 : Variation des prototypes analysés en fonction de leurs (hauteurs / surfaces)

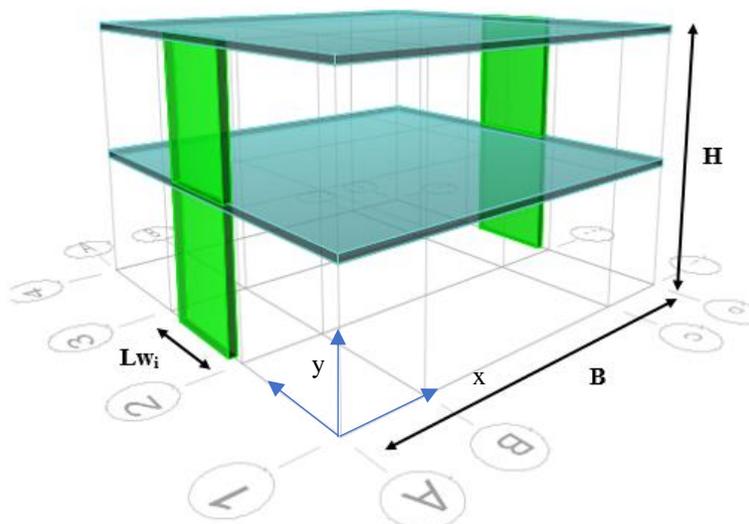


Figure 4.8 : Modèle prototype d'une structure en Voile / dalle

Les paramètres essentiels fixés pour le contrôle des résultats sont principalement basés sur les deux critères fondamentaux d'une conception structurale, à savoir le critère de stabilité globale de la structure ainsi que celui de la résistance.

Le premier a été validé par le biais de la vérification des déplacements inter-étages du bâtiment, en fixant la limite du déplacement à la valeur réglementaire de 1.0 % de la hauteur d'étage, où tel qu'il est présenté sur la figure 4.11 l'ensemble des déplacements sont sur la même intervalle, entre 0.11% et 0.15%.

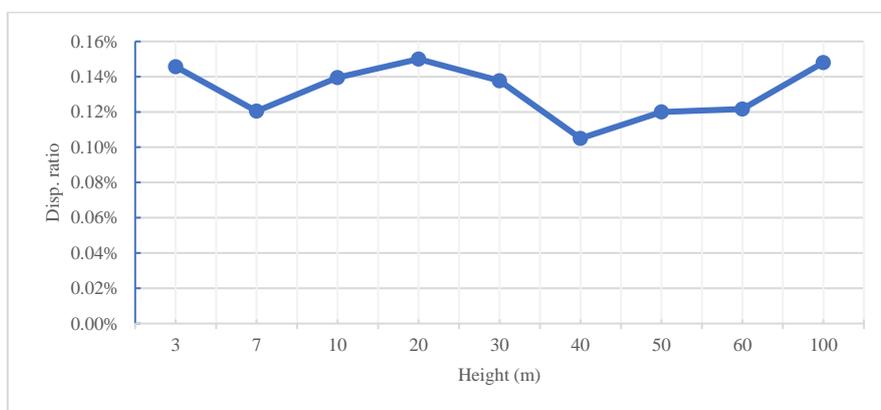


Figure 4.9 : Variation des déplacements par rapport à la hauteur

Le second paramètre qui correspond à la résistance des voiles, a été validé par la conservation d'un même ratio de ferrailage sur les zones tendues aux bords des voiles. Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus pour l'ensemble des prototypes analysés, montrant la longueur des voiles nécessaire et adéquate pour reprendre un effort de traction F_y moyen - raisonnable d'un point de vue calcul et dimensionnement – égale à 1,07 MN/ml, ainsi qu'un pourcentage d'armatures de 1.58 % correspondant à la section d'armature disposée sur la longueur tendue au bord du voile (A_s / E).

Tableau 4.1 - Variation de la longueur des voiles par rapport à la hauteur des bâtiments

H (m)	B / H	F _v (kN)	% edge (A _s /E) /m	Total L _w (m)	L _w / H
3.30	3/1	1100	1.58%	2.4	0.72
6.70	3/2	1000	1.44%	4.6	0.69
10.0	1/1	1100	1.58%	6.7	0.67
20.0	1/2	1100	1.58%	13	0.65
30.0	1/3	1050	1.51%	20.0	0.67
40.0	1/4	1050	1.51%	52.0	1.30
50.0	1/5	1020	1.47%	64.0	1.28
60.0	1/6	1050	1.51%	80.0	1.33
100.	1/10	1100	1.58%	130.0	1.30

Ce qu'on peut déduire de ces résultats, est que le rapport entre la longueur totale nécessaire des voiles et la hauteur du bâtiment pour une surface de plancher de 100 m² est d'environ 0,7 pour les bâtiments ayant une hauteur allant jusqu'à 30 m et environ 1,3 pour des hauteurs allant jusqu'à 100 m. Ce ratio augmente proportionnellement à la superficie du plancher (voir la figure 4.12).

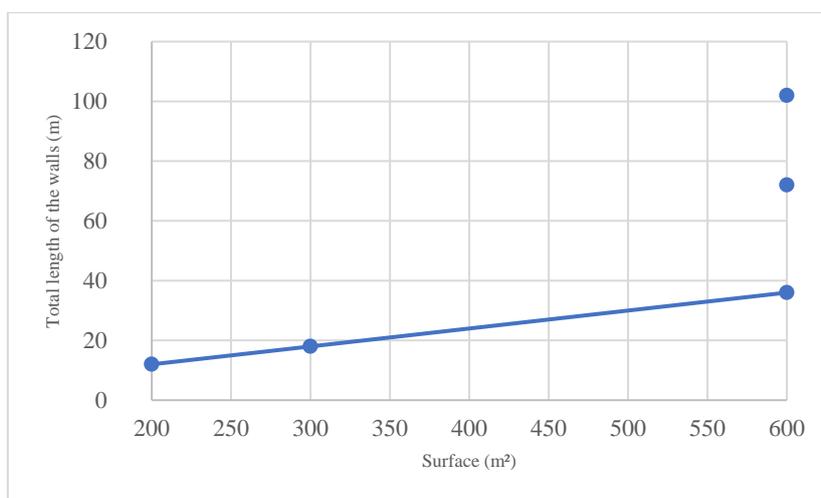


Figure 4.10 : Longueur totale des voiles en fonction de la hauteur et de la surface

Une règle générale pour la longueur totale minimale des voiles (en m) peut donc s'écrire en termes de surface de plancher S_f (en m²) et de hauteur totale du bâtiment H (en m) comme suit :

$$L_w, m = 0,007.H.S_f \text{ pour } H < 30m \dots\dots\dots (4.1)$$

$$L_w, m = 0,013.H.S_f \text{ pour } 30 m < H < 100 m \dots\dots\dots (4.2)$$

(S_f : est la plus grande surface du plancher).

c- Disposition des voiles en plan :

La disposition des voiles de contreventement dans une structure joue un rôle clé dans la stabilité de la structure vis-à-vis des charges latérales telles que les séismes. Une disposition symétrique - d'un point de vue rigidité -, et écartée le plus possible du centre de gravité de la structure permet d'avoir une réponse dynamique adéquate avec une réduction de l'excentricité de torsion et donc une répartition équilibrée des efforts dans l'ensemble des éléments structuraux, tout en augmentant ainsi considérablement la ductilité du bâtiment. Ce constat a été le résultat de nombreux travaux de recherches dont, à titre d'exemple, l'étude de Pardeshi qui a analysé l'effet de la disposition des voiles sur les bâtiments ayant une forme géométrique irrégulière en plan et élancée en hauteur (Pardeshi et al., 2017), et qui ont été confirmés par les travaux de (Kulkarni et al., 2016), et de Sud (Sud et al., 2014).

L'expression de l'excentricité est exprimée par les entités (e_x ; e_y) mesurée respectivement suivant les directions (x ; y), où les coordonnées du centre de rigidité peuvent s'écrire pour un ensemble de voiles de contreventement ayant les mêmes propriétés physiques comme suit (Bourahla, 2007) :

$$x_s = \frac{\sum l_{yi}^3 \cdot x_i}{\sum l_{yi}^3} \text{ et } y_s = \frac{\sum l_{xi}^3 \cdot y_i}{\sum l_{xi}^3} \dots\dots\dots (4.3)$$

Où :

- x_i, y_i : sont les coordonnées relatives aux positions x et y du centre de gravité de chaque voile (i), qui varient selon le nombre total de voiles dans chaque direction ;
- $l_{xi} ; l_{yi}$: étant la longueur d'un voile i donnée dans les directions x et y respectivement ;

Un autre paramètre assez important dans la disposition des voiles est celui de leurs emplacements qui soit aussi loin que possible du centre de gravité du plancher afin d'augmenter la rigidité vis-à-vis de l'effet de la torsion. Cette disposition peut être obtenue en optimisant le ratio du rayon de torsion qui s'exprime par le rapport de (r_y / l_s) pour chaque direction du bâtiment, où la disposition adéquate nécessite d'avoir une certaine régularité en plan ainsi qu'une flexibilité non torsionnelle, et qui ne peut être vérifiée sauf si ce rapport est supérieur à l'unité (EC08, 2005). Pour sa part, l'expression du rayon de torsion pour la direction x s'écrit comme suit :

$$r_y^2 = \frac{\sum (x_i^2 l_{yi}^3 + y_i^2 l_{xi}^3)}{\sum l_{xi}^3} \dots\dots\dots (4.4)$$

Où :

- y : est la direction horizontale perpendiculaire à la direction x considérée ;
- r_y : est le rayon de torsion des parois de cisaillement du plancher considéré ;
- l_s : est le rayon de giration de la masse au sol dans le plan.

Par conséquent, la force que chaque voile reprend – proportionnellement à sa position ainsi que sa longueur, peut s'écrire par l'expression suivante (Davidovici, 1995) :

$$R_i = F \cdot I_i \cdot \left(\frac{1}{\sum I_i} + \frac{dx_i}{I_i x_i^2} \right) \dots \dots \dots (4.5)$$

Où :

- R_i : représente la réaction que doit reprendre chaque voile (i) ;
- F : est la force appliquée sur la structure ;
- I_i : est l'inertie (rigidité) de chaque voile (i).
- x_i (y_i) : est la position x (y) relative au centre de gravité de chaque voile (i),
- d : à définir

La figure 4.11, illustre la répartition des efforts sur les voiles en fonction de leurs positions ainsi que de leurs rigidités.

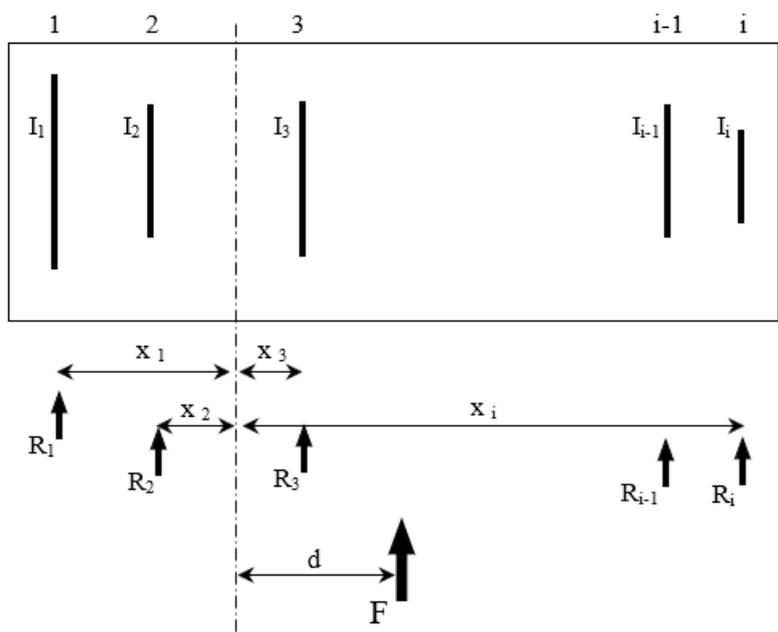


Figure 4.11 : Répartition des forces sur les voiles

d- Continuité verticale du cheminement des charges

Cette condition est aussi assez importante, car c'est à travers la continuité verticale des voiles de contreventements que l'acheminement des efforts latéraux vers les fondations est idéalement transmis, et toute discontinuité peut influencer sur le comportement dynamique de la structure et entrainera une dissymétrie lors de la propagation des efforts dans les voiles, tel qu'il est présenté sur la figure 4.12 suivante (Farzad, 2018).

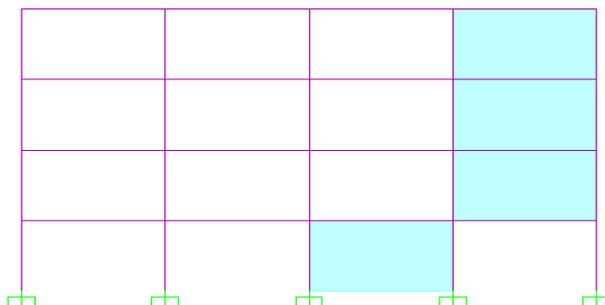


Figure 4.12 : Discontinuité verticale des voiles non autorisée

e- Effet de la variation dimensionnelle des voiles en hauteur

Dans une conception idéale, la réduction des voiles doit se faire d'une manière régressive du bas vers le haut, afin d'assurer une certaine homogénéité entre la rigidité des voiles – à travers la réduction de la longueur des voiles – ainsi que la répartition des efforts latéraux au fur et à mesure de la hauteur du bâtiment (Farzad, 2018). L'arrêt des voiles à certaines hauteurs est toléré par la réglementation, à condition que les voiles restants ne soient pas excessivement sollicités (voir la figure 4.13).

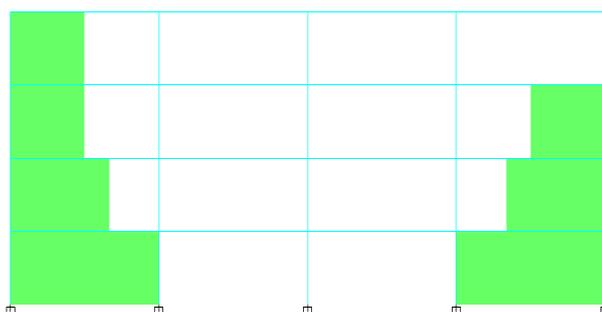


Figure 4.13 : Dégression des longueurs des voiles au fur et à mesure de la hauteur

4.2.3. Comportement structural des dalles

Les dalles sont des éléments structuraux étendus dans un plan horizontal dont la fonction structurale principale est caractérisée par les deux paramètres suivants, à savoir : i) supporter les charges gravitaires à travers un schéma statique correspondant à celui des plaques, connu par la résistance à la flexion et la torsion ; ii) transmettre les forces latérales vers le système des fondations du bâtiment à travers les éléments porteurs (poteaux / voiles), connu par la notion du diaphragme.

Concernant le premier paramètre, une dalle est considérée comme une plaque caractérisée par sa petite épaisseur par rapport aux autres dimensions de sa surface. La figure 4.14 présente la distribution des moments de flexion et ceux de la torsion dans une plaque, où l'orientation des flèches de la normale des lignes en bleu témoignent de la présence de la torsion qui résulte de la déformation variable par flexion présenté en ligne rouge.

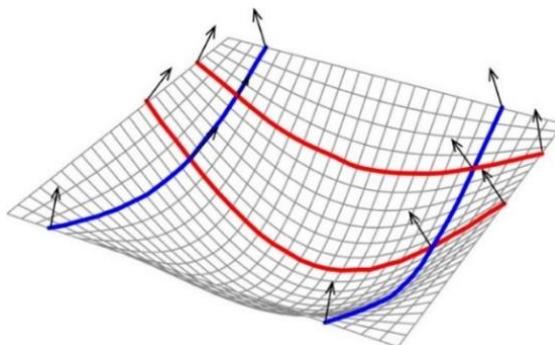


Figure 4.14 : Diagramme de flexion et torsion sur une surface de plaque déformée.

Le deuxième paramètre très caractéristique des dalles est celui de la transmission des forces latérales vers le système de fondations du bâtiment par le biais des éléments porteurs (poteaux / voiles) et du fait de l'importante rigidité de la dalle dans son plan. Cette notion est connue sous l'effet du « diaphragme » (Zacek, 2003 ; AFPS, 2004).

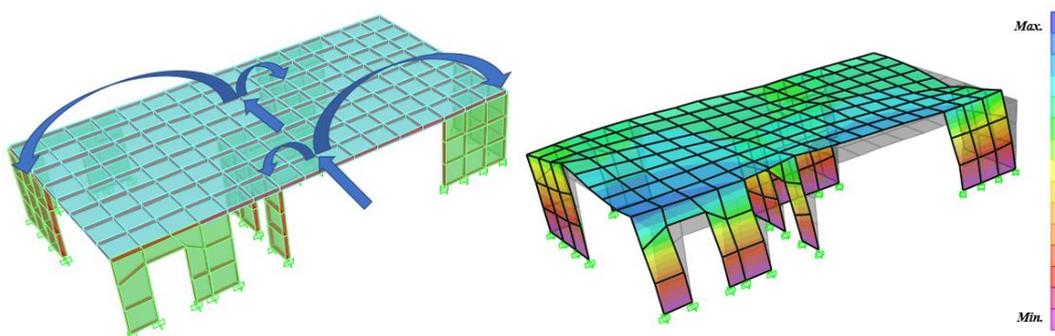


Figure 4.15 : Effet du diaphragme dans les dalles

Afin d'assurer ces deux paramètres, certains guides techniques (ISE, 2012 ; Alasdair, 2009) ont fourni quelques recommandations géométriques sur le rapport entre la portée de la dalle et son épaisseur (ratio = portée / épaisseur) qui peut varier de 20 à 25 fois, selon le type d'appui et l'importance du chargement. Ce ratio peut s'écrire aussi en fonction de la hauteur d'étage « h » et de la distance entre deux appuis « D », comme suit :

$$h \leq D \leq 1.5 \cdot h \dots\dots\dots (4.6)$$

Cependant, la limite des consoles libres des dalles pour une épaisseur usuelle est limitée entre 2.0 m à 2.5 m. La figure 4.16 illustre ces limites pour les structures en dalle – voile.

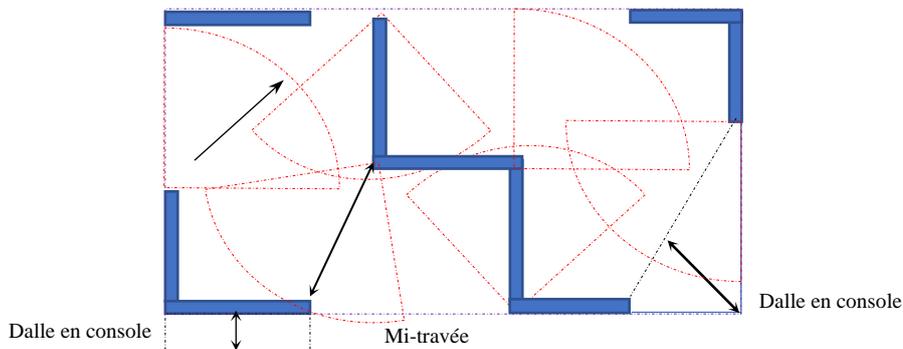


Figure 4.16 : Disposition des voiles pour la structure prototype

4.3. Définitions des contraintes de l'algorithme génétique

Tel que déjà exposé dans le chapitre III, la classification des critères de conceptions peut être catégorisée en deux parties, dont la première est à caractères géométriques, est généralement relative à l'architecture du bâtiment tels que les limites dimensionnelles de l'ouvrage, la continuité verticale des voiles ainsi que leurs dégressions de bas vers le haut, l'existence des ouvertures, etc.

Il est à noter que ces critères peuvent être considérés comme étant des contraintes d'ordre général quel que soit le type de système structural.

La deuxième catégorie concerne les exigences techniques et réglementaires de conception de structure comme la quantité minimale nécessaire de contreventements et de stabilité d'une structure, la disposition des appuis, etc. Ces critères sont spécifiques à chaque type de système structural, et donc doivent être définis pour qu'ils soient utilisés comme des contraintes ou des paramètres de la fonctions objectif de l'AG.

Les critères essentiels pour ce système structural sont les suivants :

4.3.1. La longueur minimale d'un voile individuel :

La longueur minimale d'un voile telle que recommandée par les RPA99v2003 correspond à quatre fois l'épaisseur du voile ($4 \times E_p$ voile). Le cas usuel de la plupart des constructions est d'avoir une épaisseur de 20 cm, et donc une longueur minimale de 80 cm.

4.3.2. La quantité de voiles (longueur totale des voiles) dans chaque direction :

La quantité de voiles exprimée par la somme des longueurs des voiles parallèles à chaque direction principale d'un bâtiment, capable de reprendre les efforts sismiques est donnée par les Eqs 4.1 et 4.2.

4.3.3. Répartition des voiles en plan

La solution conceptuelle consiste à augmenter la rigidité torsionnelle de la structure, et cela ne peut être obtenue qu'à travers une disposition de voiles d'une manière équilibrée en matière de rigidité et le plus loin possible du centre de masse pour chaque direction principale. Cela peut être traduit par une optimisation du rayon torsionnel exprimé par l'Eq. 4.4.

4.3.4. Distance limite entre les voiles :

Ce critère concerne la distance limite entre les appuis pour assurer la rigidité flexionnelle de la dalle et la résistance aux charges gravitaires. A cet effet, la distance « D » entre deux voiles est limitée dans l'intervalle définie par l'Eq. 4.6.

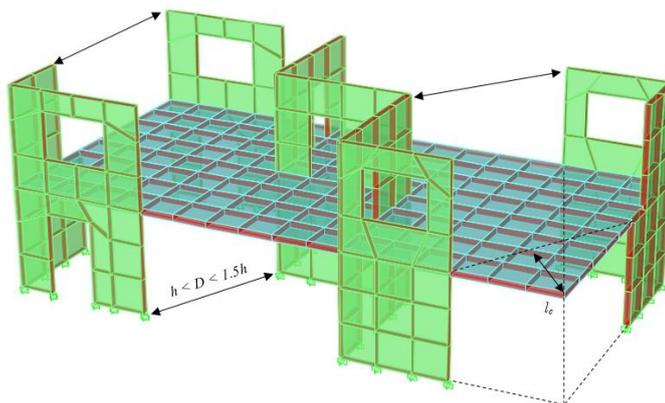


Figure 4.17 : Limites des portées entre les voiles

4.4. La fonction multi-objectifs

Dans le but d'obtenir des solutions structurales optimales, une fonction multi-objectifs est alors implantée dans le processus de l'algorithme génétique, où l'évaluation des objectifs se fait d'une manière complètement indépendante.

Cependant, les limites utilisées pour chaque objectif sont définies comme suit :

- ✓ La longueur totale des murs « $L_{w,t}$ » : plus elle converge vers une longueur optimum « $L_{w,m}$ » mieux c'est. La vérification de cette condition se fait donc par les formules suivantes :

$$\text{Si : } L_{w,t} < L_{w,m} : \text{score} = \left(\frac{L_{w,t}}{L_{w,m}} \right)^3 \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\text{Sinon : } \text{score} = 2 - \frac{L_{w,t}}{L_{w,m}} \dots\dots\dots (4.8)$$

$L_{w,t} = \sum L_{w,i}$: est la longueur totale des murs.

Il est à noter que, lorsque la longueur totale des murs est inférieure à celle de l'optimum (équation 4.7), le « score » est calculé au cube afin de pénaliser ce cas puisqu'il est le minimum requis.

- ✓ La symétrie : ce paramètre est géré par le biais des excentricités torsionnelles e_x et e_y obtenues à travers la disposition des murs dans chaque direction du bâtiment. L'évaluation de ce paramètre est élaborée en utilisant un intervalle normalisé ayant les valeurs [0 ; 1], dont (0) représente le cas d'une symétrie parfaite, alors que (1) se réfère à une excentricité limite prédéfinie ou une excentricité égale à la dimension maximale du plancher en plan.
- ✓ La surface du plancher supportée par un voile : ce critère valorise les surfaces du plancher que les voiles doivent reprendre. Chaque voile doit être disposé d'une manière à supporter la demi surface du plancher - de part et d'autre de son axe - dont la distance maximale est mesurée à « $D/2$ ». Quant aux consoles (sur la périphérie du bâtiment) elles sont limitées par une longueur maximale de $L_c = 2.0$ m (suivant les cas usuels de construction).

La figure 4.18 résume ces limites.

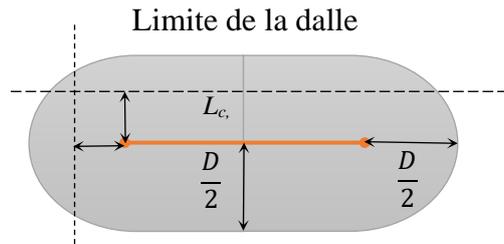
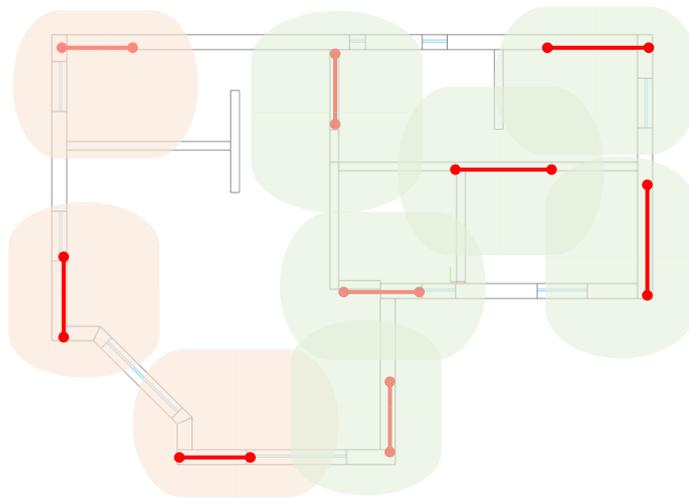
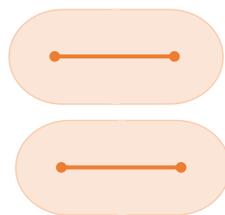


Figure 4.18 : Dimensions limites de la surface du plancher que le voile doit supporter

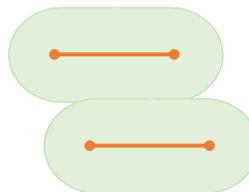
Une disposition adéquate des voiles correspond à celle qui assure une intersection entre les surfaces des planchers (zones en vert). Dans le cas contraire où le chevauchement entre les surfaces n'est pas vérifié (zone en rouge), la solution ne sera pas validée par l'algorithme. La figure 4.19 illustre les deux cas probables.



(a) couverture des surfaces Non-valide



(b) surfaces Non-valide



(c) surface valide

Figure 4.19 : Critère de validation des surfaces suivant la disposition des voiles

L'évaluation de ce critère dans l'algorithme est élaborée par le biais de l'intervalle normalisé $[0 ; 1]$, où la valeur (0) représente le cas d'une répartition sans chevauchement entre les zones de couverture, alors que la valeur (1) correspond au cas d'une couverture complète et adéquate.

4.5. Critère d'arrêt de déroulement de l'AG

D'une manière générale, le déroulement de l'algorithme génétique est arrêté par un critère de convergence qui définit la précision ou le degré de « fitness » de la solution et/ou après un nombre prédéfini d'itérations qui est fixé par l'utilisateur. Pour le présent cas, seul le critère du

nombre d'itérations est utilisé pour arrêter le processus. Pour ce système structural, il a été constaté que la convergence se stabilise pour un nombre de 50 itérations.

4.6. Performances de l'AG-MO à l'optimisation de la conception structurale

Dans le but de vérifier l'efficacité de l'algorithme ainsi que ces performances dans la génération et l'optimisation d'une conception structurale pour le système en voiles – dalles en béton armé, l'analyse a été principalement élaborée en deux temps, à savoir :

- 1- La première concerne l'identification et la génération de l'AG-MO d'une conception structurale optimale en utilisant une fonction multi-objectifs ayant des poids égaux à l'unité ;
- 2- La deuxième analyse a été faite dans le but d'investir la sensibilité de l'algorithme sous l'effet du changement des poids de l'un des objectifs par rapport aux autres.

Avant d'entamer l'exposition des résultats détaillés obtenus à partir des deux analyses, nous présentons en premier lieu les modèles d'architectures en BIM-3D utilisés.

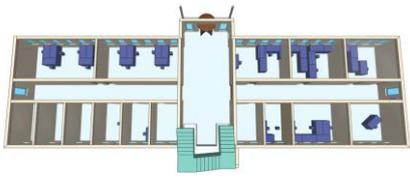
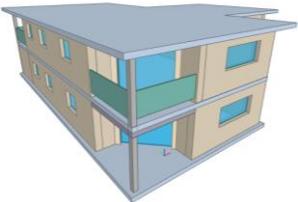
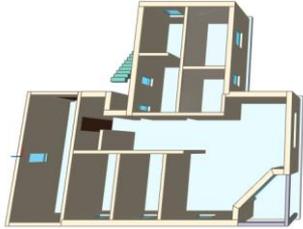
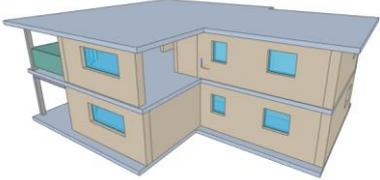
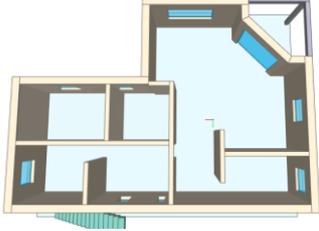
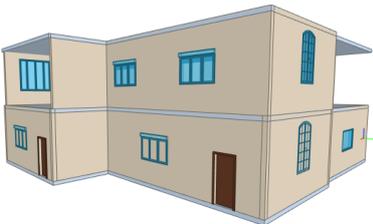
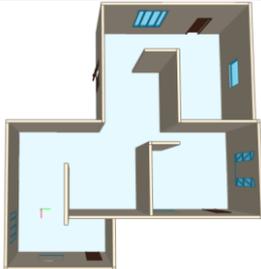
4.6.1. Présentations des modèles architecturaux analysés

L'analyse a été élaborée sur un nombre total de 7 bâtiments, caractérisés par des géométries différentes. Les modèles utilisés sont des modèles BIM tridimensionnels, dont la conception architecturale a été faite par plusieurs architectes à travers le monde, préparés en utilisant principalement le logiciel Autodesk Revit (Dimyadj 2018). Le format de base considéré pour l'importation et l'exploitation des données est celui de type « IFC ».

Les différents modèles utilisés sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau 4.2 : Configuration architecturale des cas étudiés

N°	Dimensions du bâtiment		Vue architecturale en BIM-3D	Vues détaillés (Plan / Elévation)
	L . l . h (m) [Surface : m²]	Nbr. Étages		
1	12 x 10 x 3.0 [120.0 m²]	1		
2	11.8 x 7.1 x 7.0 [83.40 m²]	2		

3	42 x 12 x 12 [504.0 m ²]	4		
4	37.5 x 6.9 x 8.0 [262.5 m ²]	3		
5	16.5 x 14.4 x 5.4 [200 m ²]	2		
6	14.4 x 10.4 x 5.4 [164 m ²]	2		
7	18.4 x 17.2 x 7.80 [226.5 m ²]	2		

4.6.2. Evaluation des conceptions structurales générées et optimisées par l'AG-MO

En premier lieu, l'algorithme a été appliqué sur l'ensemble des modèles déjà décrits, afin de générer des conceptions structurales optimisées. Une fois les solutions générées par l'AG, suivant les contraintes et les cibles de la fonctions multi-objectifs prédéfinies précédemment, une évaluation est alors effectuée en vérifiant ces solutions par rapport aux critères relatifs aux exigences architecturales et structurales fixées auparavant.

La définition des poids des cibles de la fonction multi-objectifs utilisés dans cette première analyse est donnée ci-après.

Tableau 4.3 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG

Modèle	Poids des objectifs		
	Longueur des voiles	Excentricité	Surface (plancher / voile)
1	1.00	0.50	1.00
2	1.00	0.50	1.00
3	1.00	0.50	1.00
4	1.00	0.50	1.00
5	1.00	0.50	1.00
6	1.00	0.50	1.00
7	1.00	0.50	1.00

Cependant, les résultats obtenus à travers les modèles générés par l'AG pour l'ensemble des valeurs utilisées dans la fonction MO sont présentés en ci-dessous, catégorisés selon les types de critères :

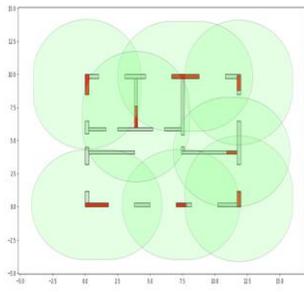
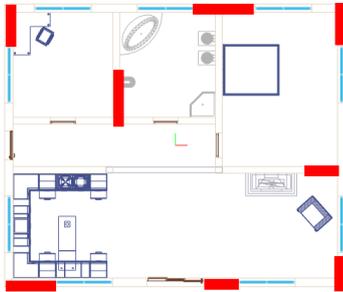
a- Validation des critères d'ordre architectural :

Les résultats obtenus ont montré que la disposition des voiles de contreventement proposée par l'AG-MO respecte les configurations architecturales de l'ensemble des modèles, et ce en matière :

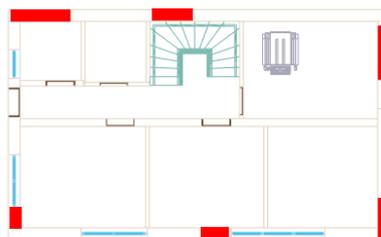
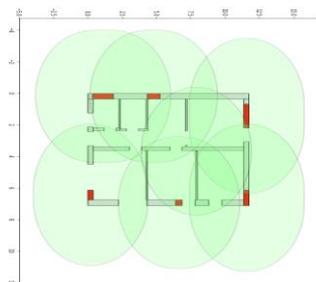
- ✓ D'aménagement des espaces intérieurs selon la répartition des cloisons sur tous les niveaux ;
- ✓ Ainsi que le respect des ouvertures (portes et fenêtres) ;

L'ensemble de ces résultats est clairement observé sur les schémas présentés dans le tableau 4.4.

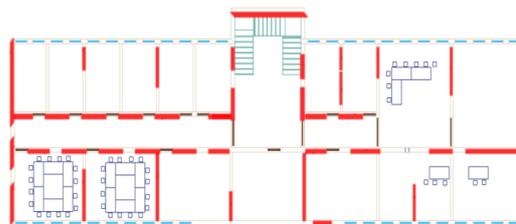
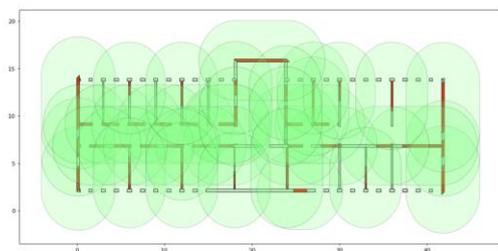
Tableau 4.4 : Disposition des voiles selon la génération de l'AG-MO

N°	Disposition des voiles selon l'AG-MO	Vues détaillées (Plan / Elévation)
1		

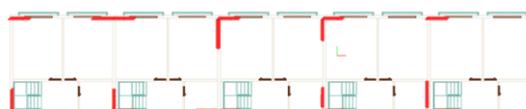
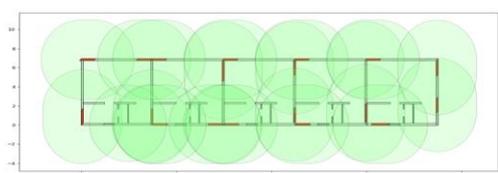
2



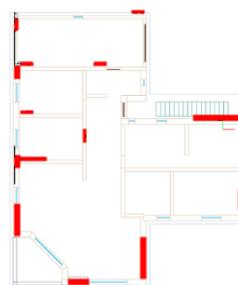
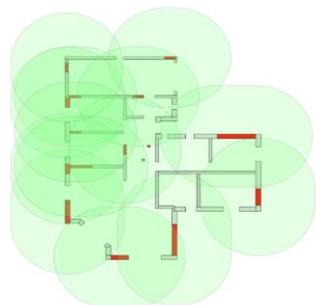
3



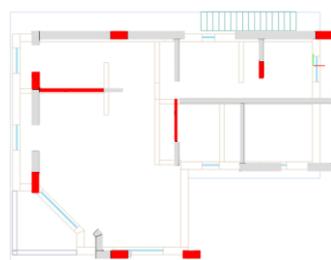
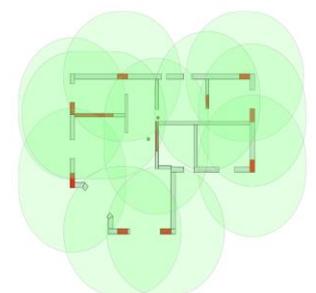
4



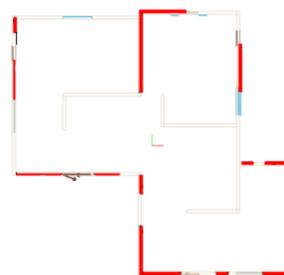
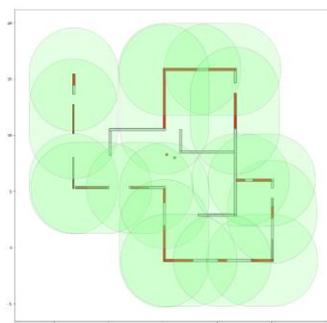
5



6



7



b- Validation des critères d'ordre structural :

L'évaluation des critères d'ordre structural est principalement faite à travers l'établissement de modèles numériques de calcul structural en utilisant un logiciel en éléments finis (FE) compatible BIM (CSI SAP, 2000), selon la configuration proposée par l'AG pour chaque bâtiment.

Il est à noter aussi que l'algorithme propose une multitude de solutions alternatives pour chaque modèle, car il n'existe pas qu'une seule solution. Cependant, la vérification structurale est établie pour une solution choisie pour chaque modèle.

Les résultats relatifs à la vérification de chaque critère sont présentés ci-après :

✓ *Longueur minimale & totale des voiles*

Les solutions proposées par l'AG ont montré que :

- Sur l'ensemble des solutions, la longueur minimale d'un voile individuel a été très bien respectée conformément à l'exigence prédéfinie pour ce critère avec une longueur minimale de 0.80 m ;
- Il a été aussi constaté que cette longueur (de 0.8 m) qui est proche du minimum absolu, a été plutôt proposée pour les structures de petite taille telles que les modèles 1, 2, 5, 6, et 7. Par contre, les structures ayant de plus grandes dimensions telles que les modèles 3 et 4, la longueur minimale des voiles est respectivement aux environs de 1,6 m et 1,8 m, ce qui explique que l'AG a tendance d'adopter des voiles plus longs pour se rapprocher de la longueur optimale, fixée à 2,5 m ;
- Concernant la longueur totale des voiles, sur l'ensemble des solutions proposées par l'AG et pour chaque direction orthogonale (XX / YY), les longueurs sont au moins 2.0% supérieure à la longueur totale minimale requise, tel que donné par l'équation 4.3 ;
- Le rapport des surfaces entre celles des voiles de contreventement (pour une direction donnée) et celle des dalles, est d'au moins 2,0% pour l'ensemble des étages ;
- Concernant les structures comportant des portées importantes, l'AG génère une longueur totale des voiles beaucoup plus longue que le minimum requis ; cela s'explique par la nécessité de ces voiles afin de couvrir toute la surface de la dalle ;
- Un autre constat assez important concerne la répartition des voiles sur la surface du plancher, où l'AG favorise en premier lieu leurs dispositions sur la périphérie plutôt que le centre de la structure. Cela s'explique par la considération du critère de rayon de torsion dans la fonction objectif (voir figures du tableau 4.4).

L'ensemble de ces résultats est exposé dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Résultats sur les longueurs des voiles de contreventement

Modèle	L _{min.} / voile AG L _{w,min}	L _w Totale		S _{w-AG} / S _f	
		L _{w-AG} / L _{w-req.}	X	Y	XX
N°	X, Y				
1	0.90	2.28	2.24	1.0%	0.9%
2	0.80	1.42	1.30	1.4%	1.3%
3	1.60	1.06	1.37	1.8%	2.3%
4	1.80	1.27	1.04	1.4%	1.2%
5	0.80	1.20	1.19	4.0%	4.0%
6	0.80	1.02	1.02	4.0%	4.0%
7	1.0	1.05	1.05	6.0%	6.0%

L_{min.} / voile : longueur minimale d'un voile

L_{w-AG} / L_{w-req.} : rapport entre la longueur totale des voiles générée par l'AG et celle requise

S_{w-AG} / S_f : rapport entre la surface couverte par les voiles et la surface du plancher

✓ Performance de stabilité globale des structures générées

Sur le plan de la stabilité globale, les résultats obtenus ont montré que :

- Le déplacement latéral de l'ensemble des modèles générés par l'AG est conforme à la limite réglementaire ;
- L'ensemble des modes fondamentaux sont des modes de translation sur les deux axes orthogonaux à l'exception du modèle 5 qui a un mode couplé sur le premier. Par contre, aucun mode de torsion pure n'a été enregistré sur les modes fondamentaux.

L'ensemble des résultats est résumé par le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Résultats de la stabilité dynamique globale

Modèle	Dép. Max. %	1 ^{ère} Période T (s)	Ratio de période (T _{AG} / T _{RPA})	Participation massique % (X / Y)		
				mode 1	mode 2	mode 3
1	0.10%	0.09	1.10	0.0 / 99	98 / 0.0	0.6 / 0.1
2	0.28%	0.22	1.06	0.3 / 75	78 / 1.2	0.4 / 5.0
3	0.10%	0.19	1.09	76 / 0.1	0.1 / 74	0.2 / 0.7
4	0.20%	0.19	1.62	0.1 / 58	0.3 / 17	74 / 0.0
5	0.16%	0.16	1.23	5 / 5	3 / 75	75 / 1
6	0.10%	0.11	0.9	41 / 6	40 / 39	5 / 48
7	0.07%	0.10	1.21	70 / 1	4 / 16	0 / 61

T_{AG} : Période du modèle généré par l'AG T_{RPA} : Période empirique du RPA99 ver. 2003

Quant à l'excentricité, les résultats obtenus sur les modèles générés par l'AG sont très acceptables, avec :

- Des rapports de rayon de torsion supérieurs à l'unité pour la plupart, à l'exception de la configuration très étroite du modèle 4 qui a donné un rayon faible à cause des dimensions du bâtiment avec un rapport long./larg. > 4 ;
- Les ratios d'excentricités sont inférieurs à 15%, ce qui est régulier.

L'ensemble des résultats est présenté sur le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Valeurs des rapports du rayon de torsion ainsi que de l'excentricité

Modèle	Ratio du Rayon de torsion		Ratio de l'excentricité %	
	r_x / l_s	r_y / l_s	e_x / L	e_y / l
1	2.58	2.16	7.50 %	8.50 %
2	2.95	2.24	12.7 %	15.5 %
3	2.19	2.82	3.10 %	3.30 %
4	0.50	0.37	1.20 %	0.30 %
5	-	-	6.70 %	6.90 %
6	-	-	0.00 %	13.5 %
7	-	-	3.30 %	1.70 %

✓ *Critère de la surface du plancher couverte par les voiles & chevauchement*

Ce critère est essentiel dans l'AG car il traite spécialement l'aspect de disposition des voiles dans la structure de manière à couvrir la totalité de la surface du plancher avec un minimum de chevauchement. Ce critère permet d'obtenir une répartition uniforme et optimale en termes de nombre et de longueur des voiles.

Ce constat a été clairement observé sur les résultats présentés dans le tableau 4.4 où, sur l'ensemble des solutions, la disposition des voiles a été faite de sorte à couvrir l'ensemble de la surface du plancher, et aucune zone libre n'a été détectée. Le rapport des surfaces entre celles qui chevauchent et la surface couverte par les voiles est inférieure à l'unité pour l'ensemble des configurations.

Cependant, il a été constaté que les ratios entre les surfaces couvertes par les voiles et ceux de la surface totale des planchers ont tendance à être plus grands quand la surface du plancher est petite tel le cas du modèle 2 avec un ratio de 3.4 et les modèles 1, et 6 avec un ratio de 2.8 chacun, alors que, pour le reste, les ratios sont de l'ordre de 1.8 à 2.0.

Le tableau 4.8 expose l'ensemble des résultats pour chaque modèle.

Tableau 4.8 : Rapport de superposition des surfaces

Modèle	Surface plancher S (m ²)	Surface GA		Ratios	
		Ov.	Cov.	Cov/S	Cov/Ov
1	120.0	333.6	188.1	2.8	0.56
2	83.40	279.5	247.2	3.4	0.88
3	504.0	850.0	550.0	1.7	0.65
4	262.5	450.0	330.0	1.7	0.73
5	200.0	362.0	336.0	1.8	0.93
6	164.0	463.0	440.3	2.8	0.95
7	316.5	643.8	543.7	2.0	0.84

S: surface // Cov : couverte // Ov : Chevauchée

✓ Performance de la résistance des voiles

L'analyse des modèles de calcul a montré que les efforts de traction ainsi que les sections d'armatures correspondantes respectent toutes les limites prédéfinies initialement comme contraintes dans l'algorithme. Les résultats enregistrés pour l'ensemble des modèles ont été très satisfaisants avec :

- Des efforts de traction l'ordre de 1.1 MN dans la zone tendue des voiles ;
- Une section de ferrailage maximale correspondant à ces efforts de 1,58% ; 1,65%
- Et un taux de 30 à 50 % des valeurs moyennes des efforts tendus ainsi que leurs ferrailages.

Les résultats détaillés de cette analyse sont présentés sur les tableaux 4.9 et 4.10.

Tableau 4.9 : Résultats du critère de résistance des voiles

Modèle	Efforts & ferrailage Max.		Efforts et ferrailage moyen	
	Max Fv (kN)	Max (As/E) /ml (%)	Avg Fv (kN)	avg(As/B) /ml (%)
1	900	1.29 %	600	0.86 %
2	1150	1.65 %	800	1.15 %
3	1100	1.58 %	600	0.86 %
4	1150	1.65 %	900	1.29 %
5	1150	1.65 %	800	1.15 %
6	650	0.93 %	500	0.72 %
7	1100	1.58 %	700	1.01 %

Tableau 4.10 : Distribution des efforts dans les voiles et les dalles

N°	Distribution des efforts dans les voiles	Distribution des efforts dans les dalles
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

✓ Performance du critère de résistance de la dalle

La validation de ce critère est principalement faite par la vérification de la résistance et la déformation de la dalle, par rapport à la limite de portée maximale prédéfinie sur la formule 4.6. Ce critère est implanté dans l'AG comme une fonction objectif qui consiste à maximiser les zones couvertes afin d'assurer la portance de la totalité de la dalle, et en minimisant leurs chevauchements à travers une disposition uniforme et optimale.

Après analyse, nous avons constaté que les résultats enregistrés sont très concluants, et ce pour les deux aspects, à savoir :

- Pour la résistance, où la distribution des moments de flexion dans les dalles (tel que présenté sur les figures du tableau 4.10) ainsi que leurs valeurs sont raisonnables avec des taux d'armatures qui varient entre 0.30% et 0.50% pour les nappes supérieures (au niveau des appuis) et pas plus de 0.35% pour les nappes inférieures (à mi-travées).
- Pour la déformation, les valeurs des flèches verticales maximales enregistrées sur l'ensemble des modèles sont inférieures à la limite admissible exigée par les codes de calcul des structures en BA ($L_{travée} / 500$), avec un ratio inférieur à 40 % entre les deux valeurs.

L'ensemble des résultats sont illustrés dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11 : Résultats des critères de résistance et déformation des dalles

Modèle	Ratio (M_{design}/M_{yield})		Ratio ferrailage %		Flèche verticale (Calcul / limite)
	Sup.	Mi- travée	Sup.	Mi- travée	
1	0.58	0.32	0.30	0.16	20 %
2	0.71	0.45	0.41	0.23	33 %
3	0.51	0.32	0.27	0.16	39 %
4	0.64	0.45	0.34	0.25	35 %
5	0.71	0.50	0.41	0.33	33 %
6	0.77	0.52	0.29	0.29	36 %
7	0.55	0.55	0.52	0.60	34 %

4.6.3. Etude de sensibilité des poids (coefficients de pondération) des paramètres de la fonction objectif

Dans le but d'évaluer la sensibilité de la variation des poids des différentes cibles de la fonction objectif sur les performances de l'AG, plusieurs analyses ont été élaborées en faisant varier, à chaque fois, les valeurs des coefficients de pondération d'une cible et en fixant le reste des cibles à la même valeur, voir *Tableau 4.12*.

Tableau 4.12 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG

Catégorie	Variation du poids		
	Excentricité	Longueur des voiles	Zone de couverture
1	0.1	1.00	1.00
	1.0	1.00	1.00
	1.5	1.00	1.00
2	0.5	0.50	1.00
	0.5	0.75	1.00
	0.5	1.00	0.5
	0.5	1.20	1.00
	0.5	1.50	1.00
	0.5	2.00	1.00
3	0.5	1.00	0.75
	0.5	1.00	1.25
	0.5	1.00	1.50

Après analyse, nous avons obtenu les résultats suivants :

c- *Effet de la variation du poids de l'excentricité : (catégorie 1)*

La variation du poids relatif au paramètre d'excentricité est principalement élaborée pour contrôler la symétrie structurale en plan du bâtiment. Trois niveaux d'excentricité sont alors proposés, à savoir : 0.1 pour une excentricité faible, 1.0 pour un cas intermédiaire et 1.5 pour une forte excentricité.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13 : Effet de la variation du poids de l'excentricité sur la symétrie du bâtiment

W _{ecc}	0.1		1.0		1.5	
	Ecc-X (%)	Ecc-Y (%)	Ecc-X (%)	Ecc-Y (%)	Ecc-X (%)	Ecc-Y (%)
Bâtiment						
1	2.9	37.3	10.0	12.6	0.4	6.3
2	23.1	72.7	0.0	4.8	1.9	4.5
3	6.1	4.9	0.3	12.5	0.1	0.0
4	8.4	35.0	0.3	0.9	1.0	1.3
5	5.7	6.3	2.4	1.0	0.3	0.7
6	8.1	19.8	2.8	6.8	5.3	0.6

Le tableau montre que lorsque la valeur du poids de l'excentricité est faible ($= 0.1$), les excentricités des planchers peuvent atteindre des taux très importants de l'ordre de 72%, ce qui représente une excentricité quasi incontrôlée. Cependant, ces valeurs peuvent être maintenues à des taux inférieurs à savoir 13% pour un poids égal à l'unité et à 7% pour un poids de 1.5. Ce constat prouve que l'excentricité résultante obéit à la variation de ce paramètre, ce qui est raisonnable comme résultat.

d- Effet de la variation du poids de la longueur des voiles : (catégorie 2)

La variation du poids de la longueur des voiles de contreventement a été appliquée sur une échelle qui varie de 0.5 à 2.0, avec un pas moyen de 0.25.

Les résultats obtenus présentent une répartition très régulière des voiles sur la surface des planchers, où cette disposition proposée par l'AG satisfait à la fois les critères relatifs à la couverture de la surface totale des planchers ainsi que ceux de l'excentricité et le rayon de giration, voir *Figure 4.20*.

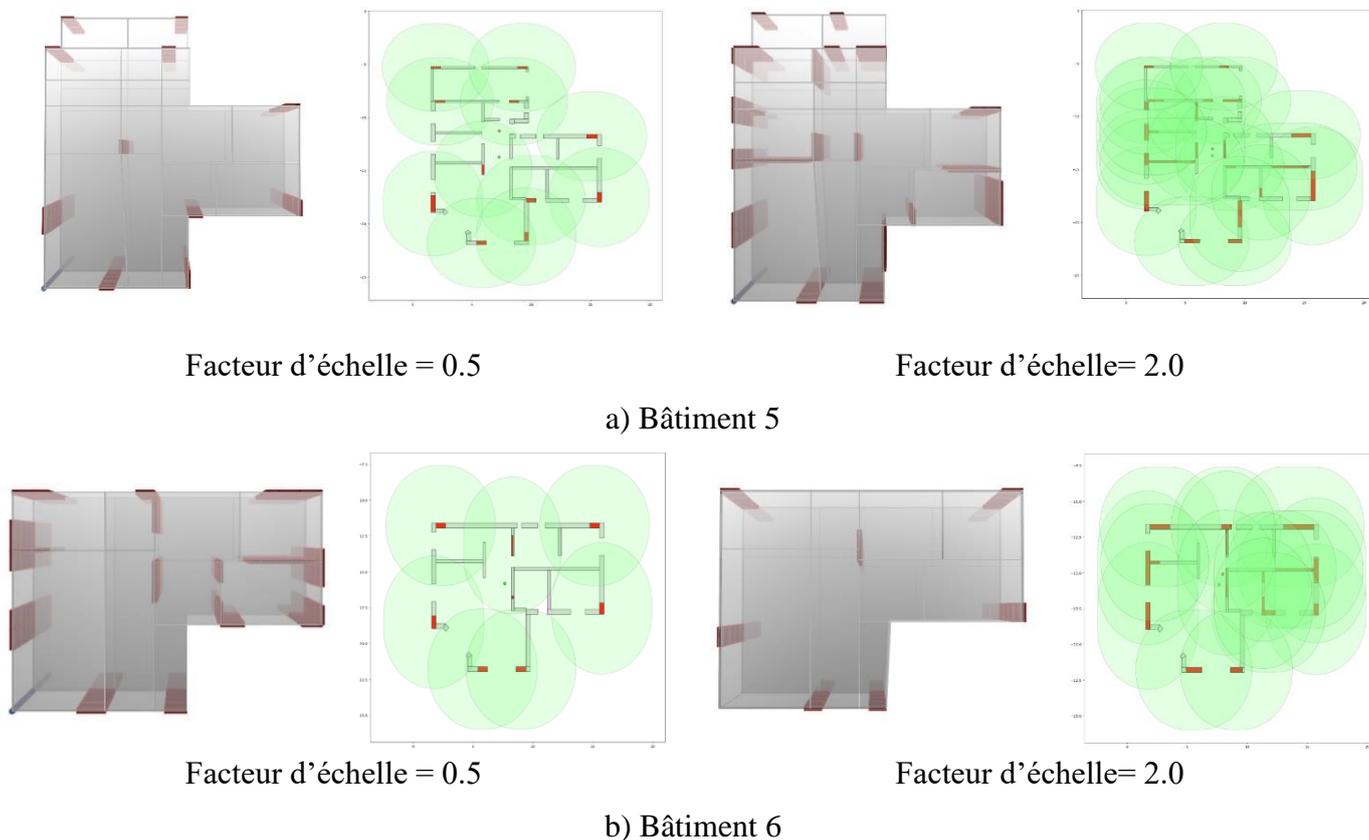


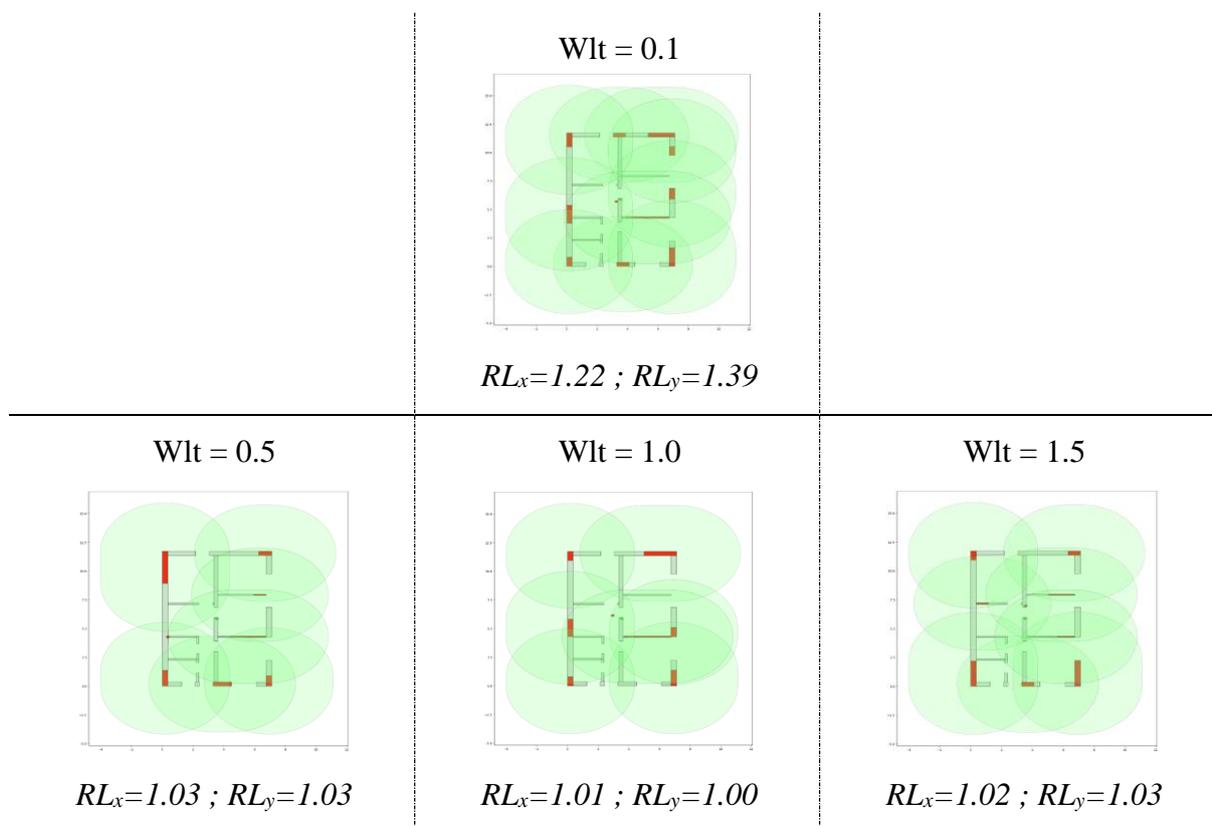
Figure 4.20 : Répartition des voiles et des surfaces de couvertures correspondantes

De plus, les résultats enregistrés ont montré que les ratios relatifs à la longueur totale des voiles dans les deux directions RL_x , et RL_y sont presque constants pour les poids (W_{it}) supérieurs à 0,5, et ce pour l'ensemble. Cela révèle que l'algorithme optimise efficacement cette entité à sa valeur minimale pour une large gamme de valeurs (W_{it}). Cependant, afin de diminuer la dominance de ce paramètre, une valeur faible est alors implantée dans l'algorithme avec ($W_{it} = 0,1$). L'ensemble des résultats est présenté sur les tableaux 4.14 et 4.15.

Tableau 4.14 : Effet de la variation du paramètre de la longueur des voiles

Bâtiments	3		5		6	
W_{lt}	RL_x	RL_y	RL_x	RL_y	RL_x	RL_y
0.1	1.71	1.05	1.27	1.06	1.22	1.39
0.5	1.02	1.00	1.02	1.00	1.03	1.03
1.0	1.05	1.02	1.02	1.03	1.01	1.00
1.5	1.00	1.00	0.99	1.00	1.02	1.03
2.0	1.01	1.00	1.01	1.04	1.00	0.99

Tableau 4.15 : Effet de la variation de la longueur totale



Concernant les efforts développés sur les voiles, les résultats ont été aussi très concluants, où la quantité d'aciers nécessaires pour reprendre les efforts de tractions sont beaucoup plus importants pour les valeurs d'échelles inférieures à l'unité, ce qui est nettement supérieur à la limite maximale fixée au préalable selon le code sismique Algérien (RPA2003), et ce pour l'ensemble des zones sismiques (III, IIa et IIb), à l'exception de la zone de faible sismicité (I).

Ce résultat permet donc d'utiliser cette contrainte comme un paramètre de contrôle de la résistance globale des voiles selon le niveau de sismicité (zone sismique) appliqué. L'ensemble des résultats est résumé par le tableau 4.16 et la figure 4.21.

Tableau 4.16 : Effet de la variation du poids de la longueur des voiles selon les zones sismiques

Variation du poids de la longueur des voiles	Intensité Sismique							
	Forte		→				Faible	
	Zone 3		Zone IIb		Zone IIa		Zone I	
	Fv (kN)	As. (%)	Fv (kN)	As. (%)	Fv (kN)	As. (%)	Fv (kN)	As. (%)
0.50	3000	4.3	2500	3.6	1900	2.7	1100	1.6
0.75	1500	2.2	1200	1.7	950	1.4	550	0.8
1.00	1300	1.9	1150	1.7	990	1.4	800	1.1
1.20	770	1.1	600	0.9	500	0.7	350	0.5
1.50	1100	1.6	900	1.3	600	0.9	400	0.6
1.75	500	0.7	400	0.6	300	0.4	200	0.3

Fy : Force maximale tendue ; As. : ratio de ferrailage en %

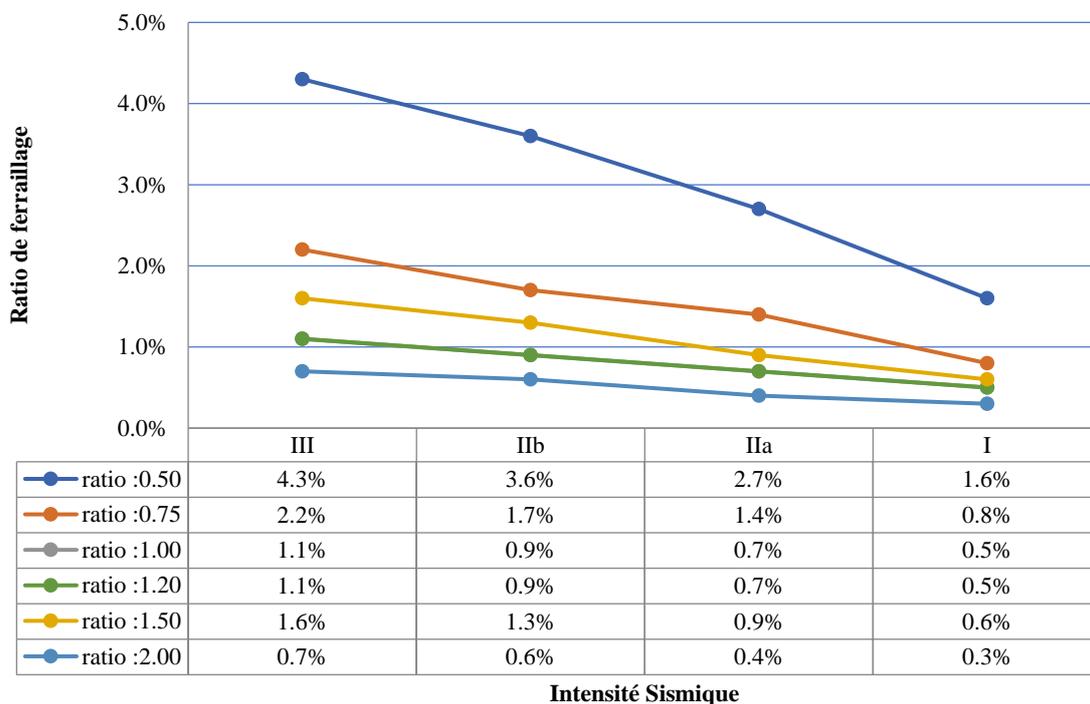


Figure 4.21 : Dégression des sections d'armatures nécessaires dans les voiles en fonction du poids et de l'intensité sismique

e- Effet de la variation du poids de la surface couverte : (catégorie 3)

Afin d'étudier la sensibilité de l'algorithme vis-à-vis de la variation de la portée de la dalle, une échelle à trois valeurs a été proposée avec des valeurs égales à 0,75, 1,25 et 1,50.

Les résultats ont montré que le ratio de la surface couverte varie proportionnellement au facteur d'échelle de portée où, à chaque fois que le facteur augmente, la surface augmente et cela pour les deux bâtiments. Le rapport des surfaces couvertes par rapport à ceux des planchers est au maximum de 3.1.

Tableau 4.17 : Résultats des rapports des surfaces suivant la variation du poids de la portée

Bâtiment	Variation du poids			Résultats de AG	Ratio
	Excentricité	Longueur voiles	Surface	Surface couverte	$S_{\text{couverte}} / S_{\text{plancher}}$
5	-0.5	1.00	0.75	272.0	1.7
	-0.5	1.00	1.25	422.1	2.6
	-0.5	1.00	1.50	499.2	3.0
6	-0.5	1.00	0.75	356.9	1.8
	-0.5	1.00	1.25	533.4	2.7
	-0.5	1.00	1.50	619.8	3.1

Cependant, vu que toutes les dispositions structurales ont le même poids pour le critère de la longueur des voiles (minimum requis), le rapport de surface de chevauchement augmente avec les valeurs croissantes de la portée de la dalle révélant que l'algorithme ne peut pas optimiser davantage le rapport de surface de chevauchement lorsque la longueur minimale L_w est atteinte. La figure 4.22 présente les limites de la zone couverte et la densité de la zone de chevauchement pour les modèles du bâtiment 5 pour les différents poids.

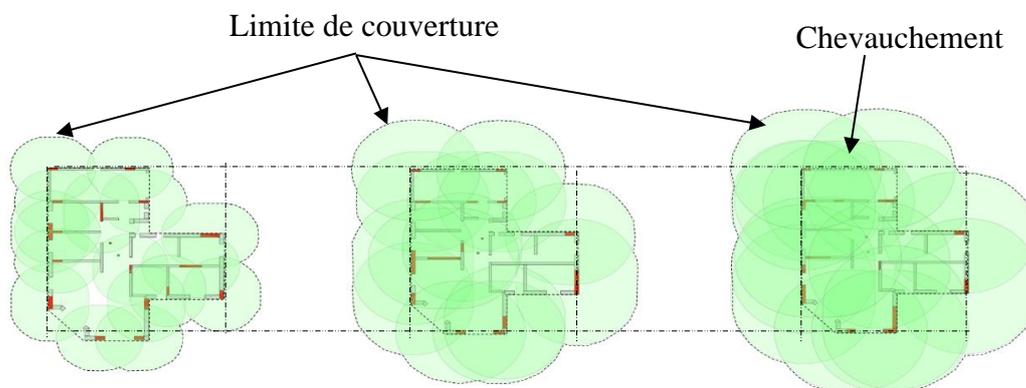


Figure 4.22 : Variation de la zone couverte selon les facteurs de poids de la portée
a) 0.75, b) 1.25 et c) 1.50.

f- Intercorrélation du poids de la surface couverte et la distance entre les voiles

Dans cette analyse, la variation s'est faite sur deux paramètres, dont le premier concerne le changement de la distance entre les voiles, alors que le deuxième concerne la variation du poids de la surface couverte, le reste des poids étant gardé fixe. Le bâtiment N° 5 a été utilisé et l'AG a généré neuf modèles conceptuels différents, selon la définition des paramètres, comme présenté sur le tableau 4.18.

Tableau 4.18 : Variation des paramètres et poids de la fonction MO

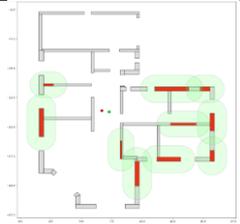
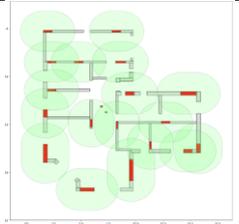
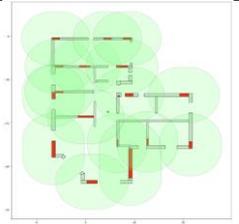
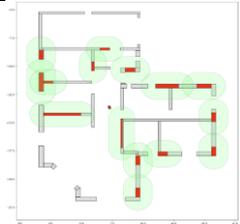
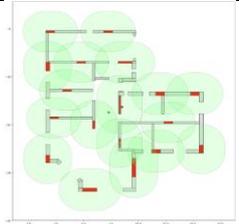
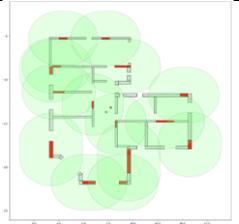
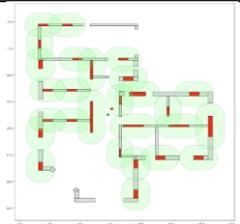
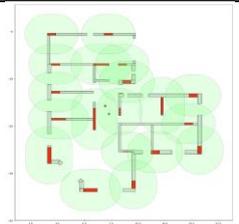
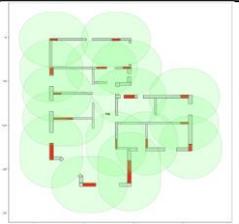
/		Variation des poids / paramètres			
Bât.	Modèles	Excentricité $W_{ecc.}$	Long. Voiles W_{Lw}	Surface couverte W_{co}	Ratio de la distance entre appuis
5	1	-0.50	1.00	1.50	0.25
	2	-0.50	1.00	2.00	0.25
	3	-0.50	1.00	4.00	0.25
	4	-0.50	1.00	1.50	0.50
	5	-0.50	1.00	2.00	0.50
	6	-0.50	1.00	4.00	0.50
	7	-0.50	1.00	1.50	0.75
	8	-0.50	1.00	2.00	0.75
	9	-0.50	1.00	4.00	0.75

Les résultats ont montré que lorsque la portée est courte et que la surface du plancher n'est pas totalement couverte, l'algorithme tend à partager la longueur totale minimale des voiles sur l'ensemble de la surface du plancher avec un maximum possible de surface couverte et un minimum de chevauchement. Concernant la longueur totale des voiles, les ratios (RL_x , RL_y) augmentent proportionnellement avec l'augmentation du poids de la surface couverte W_{co} .

Cependant, une fois que la surface de la dalle est complètement couverte, les ratios relatifs à la longueur totale des voiles RL_x et RL_y restent stables, malgré l'augmentation du poids de couverture W_{co} . Cela prouve que l'optimisation est dominée par le paramètre de la longueur des voiles, il est donc plus pratique d'utiliser des valeurs plus élevées de W_{co} car cela n'augmente pas beaucoup la longueur totale des voiles une fois que la dalle est totalement couverte.

L'ensemble de ces résultats est présenté sur les figures du tableau 4.19.

Tableau 4.19 : Effet de la variation du paramètre de distance et poids de la surface couverte

Variation du poids de la surface couverte	Variation du paramètre de distance entre les voiles		
	0.25	0.5	0.7
$W_{co} = 1.5$	 RL _x = 1.23 ; RL _y = 1.23	 RL _x = 1.47 ; RL _y = 1.21	 RL _x = 1.57 ; RL _y = 1.24
$W_{co} = 2.0$	 RL _x = 1.36 ; RL _y = 1.32	 RL _x = 1.43 ; RL _y = 1.19	 RL _x = 1.44 ; RL _y = 1.20
$W_{co} = 4.0$	 RL _x = 2.09 ; RL _y = 2.03	 RL _x = 1.77 ; RL _y = 1.22	 RL _x = 1.58 ; RL _y = 1.21

Maximisation du partage des voiles avec minimisation des chevauchements, avec Augmentation du ratio RL_{x,y}

Stabilisation des ratios RL_{x,y}

4.6.4. Robustesse et stabilité de l'AG

Cette analyse consiste à étudier avec plus de détail la stabilité et la robustesse de l'algorithme, où cinq applications d'optimisation sont effectuées en utilisant un même poids. Les modèles générés par l'AG sont comparés entre eux en termes de ratios de longueur totale des voiles (RL_x, RL_y), de rapports d'excentricité (ex, ey), de rapport de surface de chevauchement (OA) et de distribution des voiles.

Tels que présentés sur le tableau 4.20, les résultats obtenus ont montré qu'une variation significative des rapports d'excentricité est enregistrée lorsqu'on change les positions des voiles. De plus, le taux d'excentricité maximal ne dépasse pas 4% pour l'ensemble des variantes.

Le rapport des surfaces de chevauchement est presque constant, et la longueur totale des voiles est identique pour toutes les variantes.

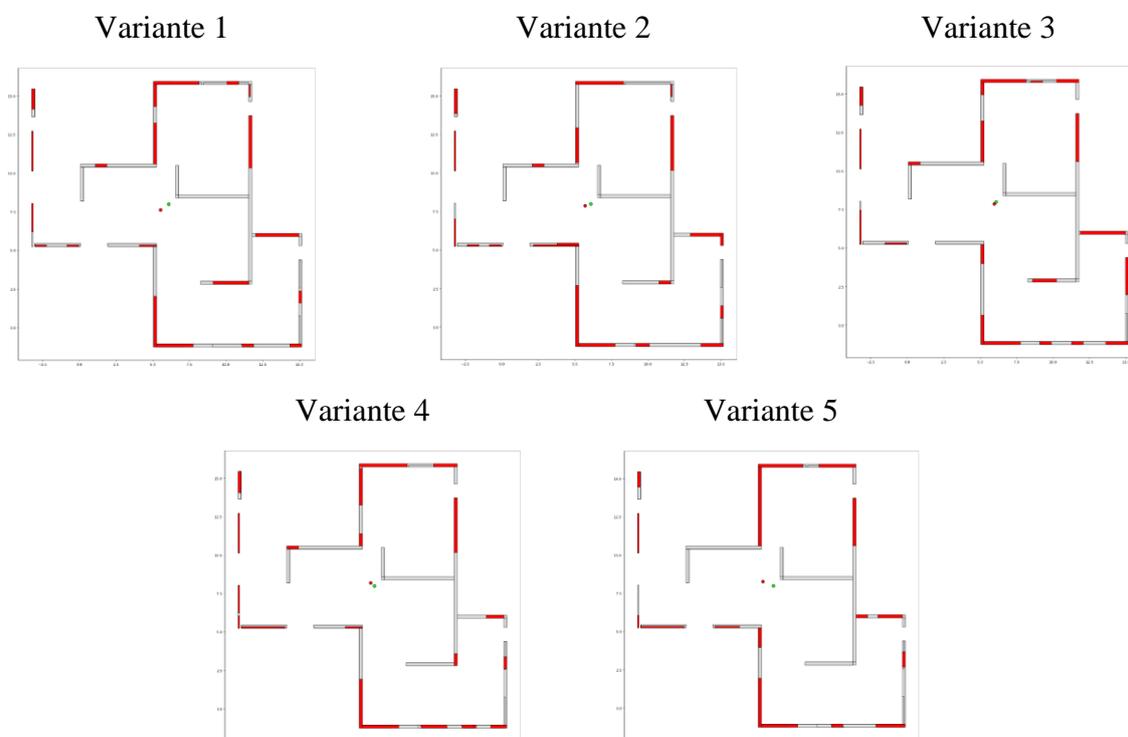
Tableau 4.20 : Comparaison des caractéristiques de dispositions optimisées pour plusieurs solutions.

Variantes	ex	ey	RL _x	RL _y	OA
1	2.99	2.15	1.0	1.0	2.69
2	2.12	0.64	1.0	1.0	2.53
3	0.82	0.70	1.0	1.0	2.53
4	1.42	1.16	1.0	1.0	2.69
5	3.91	1.63	1.0	1.0	2.63

OA : surface de chevauchement

Ces résultats, confirment que l'algorithme génétique fonctionne efficacement et donne des configurations structurales optimisées, stables et fiables avec des caractéristiques structurales très similaires. En raison de la solution de non-unicité, l'AG génère les meilleures dispositions avec quelques différences dans la répartition des voiles, telles que présentées sur les figures du tableau 4.21.

Tableau 4.21 : Différentes disposition des voiles d'une configuration optimisée sur un même bâtiment.



4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé l'application des algorithmes génétiques à fonction multi objectifs pour générer d'une manière automatique une conception structurale optimale qui réponde à la fois aux exigences architecturales ainsi qu'aux critères de conception structuraux des constructions en type « voiles -dalles » en béton armé, tout en considérant les règles de conception génie parasismique. Des modèles architecturaux en BIM-3D ont été principalement utilisés avec une interopérabilité en format IFC.

L'approche consiste à établir une formulation d'un processus d'optimisation multi-objectifs afin de proposer aléatoirement un certain nombre de variantes structurales possibles compatibles avec les contraintes prédéfinies, où l'algorithme élaborera des itérations successives qui se rapprochent progressivement des solutions qui répondent mieux à ces critères.

L'analyse a été principalement faite sur sept (7) configurations architecturales caractérisées par leurs formes géométriques, leurs dimensions en plan et en élévation ainsi que leurs répartitions des espaces en plan. Sur cette base, l'AG a généré un total de 191 solutions conceptuelles, avec des répartitions différentes des voiles, selon les paramètres prédéfinis dans la fonction multi objectifs.

Les résultats obtenus ont été très concluants et satisfaisants, où la performance de l'AG a été clairement démontrée et validée à travers la vérification de ces solutions par des modèles de calculs de structure, et ce en matière de respect des exigences architecturales ou des règles de calcul parasismiques pour les aspects relatifs à la stabilité globale de la structure ainsi que la résistance des éléments structuraux.

Après avoir validé la performance de l'AG, l'influence et l'impact du changement des poids de la fonction multi-objectifs sur la sensibilité de l'algorithme ont été investis, la variation étant faite sur les principales cibles de la fonction, à savoir : le degré de symétrie de torsion du plancher en faisant varier le poids de l'excentricité, la longueur totale des voiles de contreventement, ainsi que la surface couverte du plancher à travers la disposition des voiles. Les résultats obtenus ont confirmé encore une fois la capacité de l'AG à contrôler les critères de conception, afin d'aider à ajuster la procédure d'optimisation en fournissant des plages de poids pouvant être utilisées pour différentes configurations architecturales, et pour différentes zones sismiques en matière d'intensité. De plus, la stabilité et la robustesse de l'AG a été confirmée à travers les différentes configurations proposées sans avoir de solutions dominantes ou de non-unicité.

Enfin, en plus de la liberté que cet algorithme peut fournir aux architectes dans leur conception pour qu'ils puissent explorer des solutions structurales non triviales au sein d'une plate-forme commune, cette approche est ouverte pour toute amélioration future afin d'intégrer davantage d'autres exigences ou d'autres améliorations liées à ce système structural en voiles-dalles en béton armé.

Chapitre 5

Application de l'algorithme génétique pour la conception intelligente des structures en profilés laminés à froid

5.1. Introduction

Après avoir validé les performances ainsi que l'efficacité de l'AG-MO sur les structures en système constructif Voiles - Dalles en béton armé, et dans le but d'élargir l'éventail de son utilisation sur d'autres systèmes, l'algorithme a été appliqué cette fois-ci sur un autre système constructif qui est très courant, à savoir les structures en profilés laminés à froid.

En suivant la même organisation que celle présentée dans le chapitre précédent, le présent chapitre expose en premier lieu une présentation générale de ce système constructif, ainsi que les paramètres structuraux essentiels qui nécessitent d'être considérés lors d'une conception, suivie par la discussion des résultats obtenus par application de l'AG à quelques modèles architecturaux en BIM-3D.

5.2. Présentation du système structural « en profilé laminé à froid »

L'intégration de l'acier comme matériau principal dans l'industrie du bâtiment a connu une remarquable révolution dans le monde depuis plus d'un siècle. Caractérisé par sa résistance, sa fiabilité et sa durabilité, l'acier a gagné une large gamme du marché de l'industrie du bâtiment, et cela à travers son utilisation dans divers domaines de la construction tels que les structures en charpente métallique.

La construction des bâtiments en charpente métallique pour divers usages (habitations, commerciaux, industriels...etc) représente une très grande part du marché de l'industrie du bâtiment, et cela à travers les divers types et systèmes constructifs tels que les constructions conventionnelles en utilisant des profilés laminés à chaud connus sous le nom « Hot Rolled Steel Profils », les constructions en système « P.R.S » basées sur l'utilisation des poutres reconstituées soudées, ou aussi les construction en charpente légère avec des profilés laminés à froid connu sous le nom « P.A.F / CFS : Cold Formed Steel profils».

D'un point de vue structural, les éléments en PAF peuvent être classés en deux catégories principales, dont la première concerne ceux qui travaillent en tant éléments individuels, alors que la seconde concerne ceux utilisés comme panneaux et tabliers tels que présentés par les figures 5.1 (a et b) (Wai-Fah, 1999).

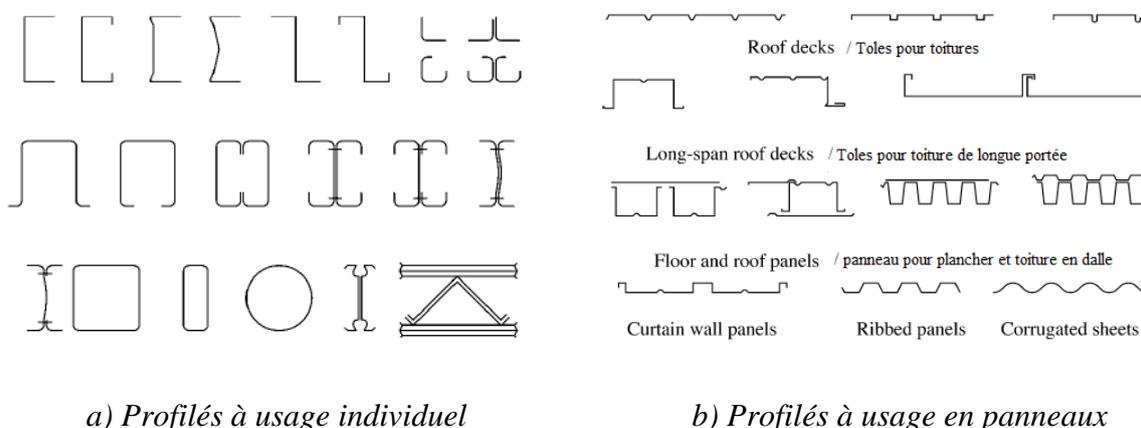


Figure 5.1 : Différentes formes des profilés en PAF

Ces formes et sections des profilés sont généralement utilisées comme des éléments structuraux dans les bâtiments ayant une hauteur totale moyenne, avec un nombre de niveaux maximal de quatre ou cinq étages. Cependant, pour les bâtiments de grande hauteur, les éléments structuraux sont principalement en charpente métallique lourde avec des profilés laminés à chaud, alors que les profilés laminés à froid sont utilisés comme des éléments secondaires, tels que par exemple les poteaux muraux, les solives pour plafonds et panneaux en « PAF ». Donc, les deux types de profilés, en forme lourde (laminé à chaud) ou en forme légère (profilés formés à froid - PAF), peuvent être utilisés soit indépendamment soit sur un même bâtiment où l'un complète l'autre (Yu, 2010).

D'une manière générale, les profilés en PAF sont des sections relativement minces en épaisseur, fabriquées par le procédé de pliage en pliant des tôles ou des bandes d'acier dans des machines de profilage, des presses plieuses ou des freins de pliage (Wolford, 2004). En raison de la facilité et de la simplicité relatives de ce processus ainsi que le coût comparativement faible au formage de rouleaux et de matrices, ce procédé se prête également bien à la fabrication de formes spéciales à des fins architecturales spécifiques.



Figure 5.2 : Structures avec des éléments en type PAF

5.2.1. Le concept

Les structures en profilés préfabriqués laminés à froid sont caractérisées par plusieurs qualités, comparées à ceux en béton et en bois, dont :

- ✓ La légèreté ;
- ✓ La haute résistance et rigidité ;
- ✓ La facilité de préfabrication et de production de masse ;
- ✓ Un montage et une installation rapides et faciles, d'où une élimination substantielle des retards dus aux conditions météorologiques ;
- ✓ Offre plus de précision dans les détails ;
- ✓ Non influençable vis-à-vis des effets de la température ambiante ;
- ✓ Coffrage non nécessaire lors de la construction ;

- ✓ Uniformisation de la qualité ;
- ✓ Économie en transport et en manutention ;
- ✓ Non-combustible ;
- ✓ Recyclable.

La combinaison des qualités, énoncées ci-dessus, offre un système structural ayant plusieurs avantages sur le plan conceptuel, à savoir :

- ✓ Simplicité du procédé de fabrication des éléments en PAF, comparés aux éléments structuraux standardisés en formes laminées à chaud plus épaisses, et donc une bonne production économique ;
- ✓ Flexibilité dans la confection des éléments structuraux avec les différentes formes, même ceux avec des sections non usuelles, et donc le respect des espaces et configurations architecturales ;
- ✓ Facilité de l'emballage et du transport avec des sections emboîtables et donc des expéditions compactes ;
- ✓ Efficacité du système structural en forme de panneaux (avec des murs porteurs et des planchers) vis-à-vis des différents types de sollicitation (gravitaire et latérale), où les planchers peuvent supporter non seulement des charges normales sur leurs surfaces mais peuvent également agir comme des diaphragmes face aux charges latérales telles que le vent et les séismes, alors que les murs assurent la stabilité de l'ouvrage par leurs capacités à porter les charges gravitaires ainsi que leurs très bonnes résistances vis à vis des forces de cisaillement produites par les charges latérales.

Les deux panneaux (Murs / Planchers) sont généralement assemblés entre eux par le biais des connexions en rivetage, en boulonnages, par soudage, ainsi que par des emboitements selon le type et la fonction des éléments utilisés.

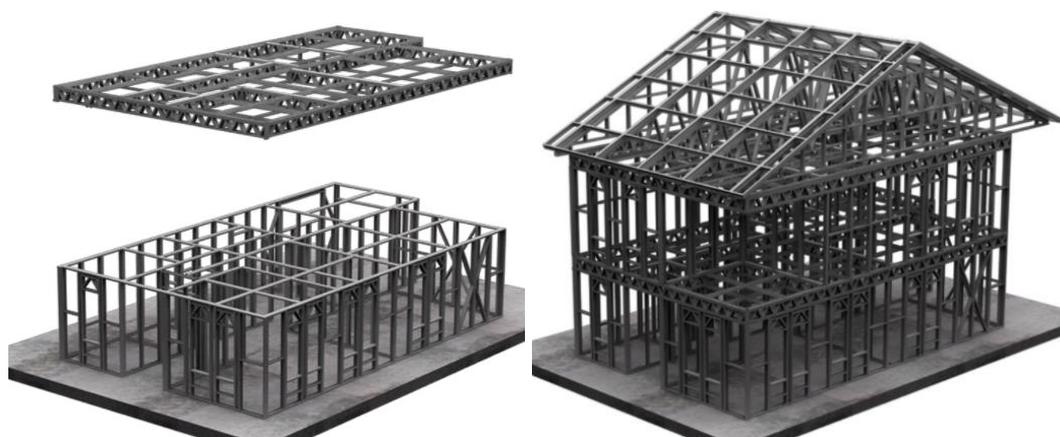


Figure 5.3 : Assemblage des panneaux en PAF

Cependant, la conception structurale d'un ouvrage en charpente métallique légère ainsi que le dimensionnement de ses éléments, sont élaborées en considérant ce qui suit :

Paramètres mécaniques des matériaux :

Selon les spécifications du code Américain « AISI : American Iron and Steel Institute », plusieurs types d'acier différents sont proposés pour être utilisés à la fabrication des éléments en type PAF, dont seize (16) d'entre eux ont été spécifiés par « The North American Specification » pour les applications structurales. Ces classes d'aciers sont identifiées dans les normes ASTM (Yu, 2010), et répertoriées selon les paramètres essentiels suivants :

- Limite d'élasticité : F_y ;
- Résistance à la traction : F_u ;
- Courbe Contrainte-Déformation ;
- Modules : d'Elasticité, Tangent et Cisaillement ;
- Ductilité ;
- Soudabilité ;
- Résistance à la fatigue ;

Cela est ajouté à leurs aspects de forme, de durabilité et de ténacité.

Les classes d'aciers les plus utilisées pour les éléments en PAF sont généralement les nuances S350 à S450 galvanisées, dont la limite d'élasticité est comprise entre respectivement 350 MPa et 450 MPa. Les épaisseurs des profilés en PAF varient de 1,0 à 4,0 mm, galvanisés par un revêtement de zinc de (275 g / m²) afin d'avoir plus de performances et de durabilité.

D'un point de vue loi de comportement, les aciers produits par le procédé laminé à chaud ont un rendement beaucoup plus important comparé à ceux produits par le procédé laminé à froid, d'où deux modèles de comportements à distinguer dont le premier - correspondant aux aciers laminés à chaud - est celui d'un haut rendement présenté par la courbe de contrainte – déformation sur la figure 3.35-a alors que le deuxième – correspondant aux aciers laminés à froid – est celui d'un rendement progressif tel qu'il est présenté sur la courbe de contrainte – déformation de la figure 3.35-b (Yu, 2010).

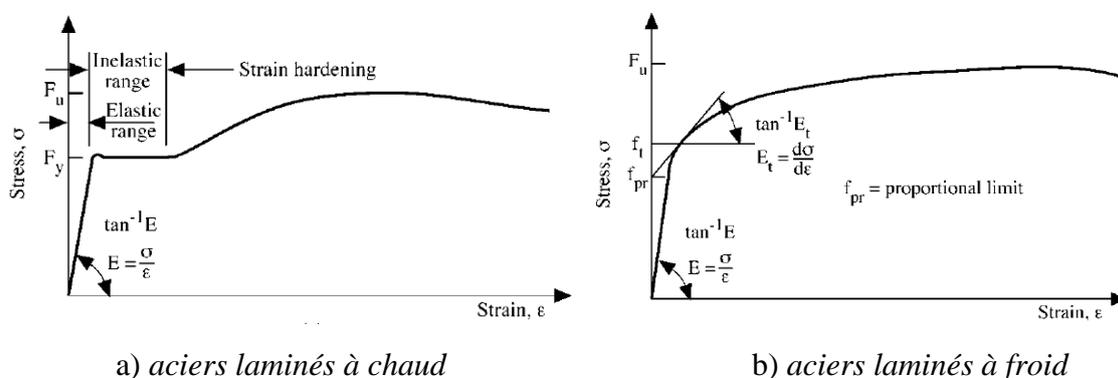


Figure 5.4 : Courbe Contrainte – Déformation des deux types d'aciers

Codes et normes de conception et calcul structural :

D'un point de vue historique, les premières normes d'acier de construction pour les charpentes métalliques ont été adoptées dans les années 1930 pour les aciers laminés à chaud spécifiquement, mais pas pour les profilés formés à froid. C'est à partir de l'année 1946 que la première édition des spécifications relatives aux conceptions des structures en PAF a été publiée aux États-Unis par l'association américaine de l'acier « AISI : l'American Iron and Steel Institute ». En 2001 la première édition de la spécification nord-américaine pour la conception des éléments en PAF a été élaborée conjointement par le comité des spécifications de l'AISI, le comité technique de l'Association canadienne de normalisation (CSA), ainsi que « Camara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO) » du Mexique. Cette spécification a été accréditée par « l'American National Standard Institute : ANSI » en tant que norme ANSI remplaçant la spécification AISI de 1996 et la norme CSA de 1994. Suite à la réussite de l'édition 2001 de cette spécification pendant six ans, elle a été révisée et étendue en 2007 [CFSEI, 2021 ; CFS, 2021).

D'autres pays à travers le monde ont aussi intégré ce système structural « PAF » dans leurs codes de calcul tels que l'Australie et la Nouvelle Zélande en Océanie. En Europe, la Finlande, la France, l'Allemagne, l'Angleterre et la Suède ont intégré ce système dans les Eurocodes depuis l'année 1993, alors qu'en Asie, le système a été adopté par l'Inde, la Russie, le Japon et la Chine. Enfin en Afrique, seules l'Afrique du Sud et l'Éthiopie l'ont adopté.

Actuellement, les dernières versions des normes publiées par l'AISI sont :

- AISI S100-16 / S2-20, Supplément 2 à l'édition 2016 des spécifications nord-américaines pour la conception des éléments en acier formés à froid ;
- AISI S100-16 (2020) w / S2-20, Spécification nord-américaine pour la conception des éléments de charpente en acier formés à froid, édition 2016 -réaffirmée 2020- avec supplément 2 - édition 2020 ;
- AISI S202-20, Code de pratique pour les charpentes en acier formées à froid, édition 2020
- AISI S220-20, Norme nord-américaine pour les charpentes non structurales en acier formées à froid, édition 2020 ;
- AISI S240-20, Norme nord-américaine pour les charpentes en acier formées à froid, édition 2020 ;
- AISI S310-20, Norme nord-américaine pour la conception des panneaux à membrane en acier profilé, édition 2020 ;
- AISI S400-20, Norme nord-américaine pour la conception sismique des systèmes structurels en acier formés à froid, édition 2020.

Calcul et vérification de la résistance :

Le calcul et dimensionnement des profilés en P.A.F (profilés laminés à froid) vis-à-vis de la résistance peut être fait généralement suivants deux méthodes selon le code Américain ANSI/AISC (SSSB, 2016), à savoir :

1. La méthode basée sur les contraintes limites connue sous le nom « ASD - Allowable Stress Design », dont le calcul de la résistance vis-à-vis des efforts internes est basé sur les méthodes d'analyse structurelle sous les charges nominales ou de service des différentes sollicitations (sans pondération), où les résistances requises ne doivent pas dépasser les résistances admissibles réglementaire de conception, suivant la formule de base suivante :

$$R_a = R_n / \Omega \dots\dots\dots (5.1)$$

Avec :

R_a : *Contrainte admissible de calcul* ;

R_n : *Contrainte nominale* ;

Ω : *Facteur de sécurité*.

2. La méthode basée sur le calcul aux états limites connue sous le nom « LRFD : Limit States Design or Load and Resistance Factor Design », dont les calculs sont faits sur la base de deux états limites qui sont : l'état limite de résistance aux différentes charges extrêmes durant la durée de vie de la structure, ainsi que l'état limite de service. Cette méthode est proche des méthodes de calculs aux états limites des EuroCodes EC (Tchoussonnou, 2015). La formule générale de cette méthode est exprimée par l'équation suivante :

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi \cdot R_n \dots\dots\dots (5.2)$$

Avec :

Σγ_i Q_i : *Contrainte nécessaire* ;

φ · R_n : *Contrainte de calcul limite* ;

Les coefficients partiels *γ*, *φ* sont définis dans les codes appropriés.

Concept structural des ossatures en Panneaux Murs - Planchers :

Les concepts structuraux les plus courants dans la construction des bâtiments sont généralement ceux en forme de panneaux d'aciers léger, et qui sont eux-mêmes catégorisés en deux types, dont : i) le premier concerne les ossatures réalisées avec des plaques – ou feuilles – d'acier à l'intérieur du panneau renforcé avec des montants verticaux, alors que ii) le second type est celui des panneaux composés principalement d'éléments individuels à diverses formes telles que les profilés en C, Z, U, et autres. L'ensemble des éléments des deux types d'ossatures est entouré par un cadre rigide. Chaque type parmi ces deux d'ossatures est caractérisé par un comportement structural différent l'un de l'autre.

Les éléments utilisés sur les deux types de panneaux sont généralement dimensionnés suivant la géométrie globale de la structure, ainsi que les détails dimensionnels relatifs à chaque panneau en matière de hauteur, largeur et portée. L'assemblage entre les différents éléments est assuré par des connexions en soudure, par emboîtement, par boulonnage ou par rivetage.

5.2.2. Caractéristiques structurales des panneaux avec feuille (plaque) métallique

Contrairement au système structural avec des profilés individuels, la résistance vis-à-vis des charges latérales (vent, séisme, explosion, etc.) des panneaux en feuilles métalliques légères (avec ou sans remplissage de béton) est assurée par l'ensemble des murs et des planchers jouant le rôle de diaphragme. Des études antérieures ont montré que même des systèmes de membrane relativement flexibles peuvent fournir un support horizontal suffisant pour empêcher le flambement latéral des éléments dans la construction de plancher et de toit. Ces panneaux peuvent non seulement fournir des surfaces d'enceinte et supporter des charges normales gravitaires, mais également ils assurent aussi la stabilité et la résistance du bâtiment grâce à leurs importantes rigidités dans leurs propres plans (Yu, 2010).



Figure 5.5 : Ossature avec des panneaux en acier léger

Les performances structurales des diaphragmes métalliques dépendent généralement de la configuration des panneaux (disposition des éléments constitutants), du type des connexions des éléments, de la résistance et de l'épaisseur des profilés, de la longueur de la portée, de la fonction de chargement ainsi que de son remplissage (béton ou autre). Les figures suivantes 5.6, présentent un panneau typique composé d'une ossature en feuille métallique renforcée avec des montants en profilés d'aciers légers utilisé par Hutchinson (Hutchinson et al. 2017) :

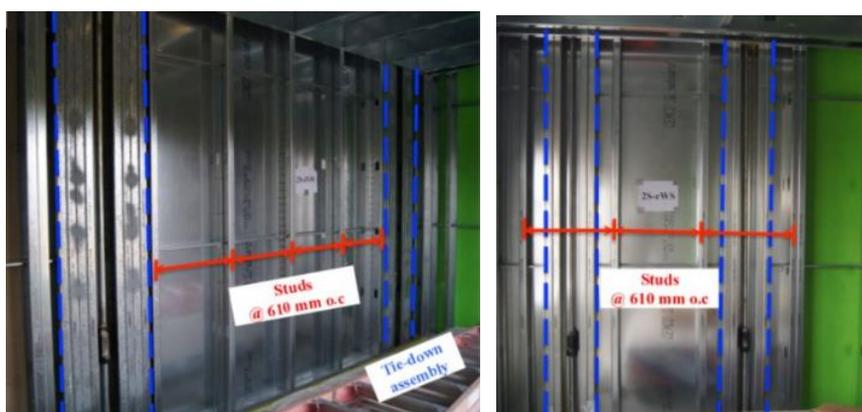


Figure 5.6 : Panneau avec feuille et profilés métalliques légers

La distance usuelle utilisée entre les montants est généralement comprise entre 300 à 600 mm (Lorenzon, 2019).

Afin de bien comprendre le comportement structurel de ces panneaux considérés comme diaphragmes métalliques résistants au cisaillement à travers leurs rigidité, beaucoup de recherches y ont été consacrées notamment de nombreux tests, dont les résultats sont comme suit :

a- Configuration du panneau :

Un panneau est généralement composé d'un cadre périphérique, en profilés, rempli avec une feuille en acier léger et des montants. Les paramètres dimensionnels tels que la hauteur et la largeur des panneaux jouent un rôle majeur sur leurs résistances vis-à-vis des efforts de cisaillement et en particulier s'ils sont discontinus. Les panneaux composés d'éléments continus et reliés au cadre du support présentent une très bonne résistance au cisaillement, et leurs effets vis-à-vis de la hauteur est très faible à négligeable. Cependant, pour ce qui concerne la largeur de la feuille posée à l'intérieur d'un panneau, il a été constaté que plus les feuilles sont larges, plus le panneau devient solide et rigide.

Quant aux profilés, ils sont généralement caractérisés par leurs profondeurs, où ceux ayant une profondeur importante sont beaucoup plus résistants que ceux ayant des profondeurs faibles, ce qui peut impacter défavorablement la stabilité des panneaux surtout quand ils sont disposés près des extrémités car ils seront beaucoup plus vulnérables à la distorsion.

b- Portée des panneaux et espacement entre les éléments :

Les panneaux ayant une portée plus courte fournissent une résistance au cisaillement relativement meilleure que ceux ayant des portées plus longues, ce qui veut dire que la charge de rupture n'est pas particulièrement sensible aux changements de portée. Par contre, la résistance au cisaillement des panneaux est particulièrement augmentée par la réduction des espacements entre les poteaux / pannes, où ce constat est plus prononcé dans les panneaux plus minces.

c- Épaisseur et résistance du matériau :

Si une plaque plane continue est soudée directement au cadre de support, la charge de rupture est quasiment proportionnelle à son épaisseur. Cependant, sur les systèmes avec un panneau renforcé avec des profilés, l'effort de cisaillement est transmis depuis les poutres supports aux éléments du plan résistant au cisaillement à travers les éléments verticaux du panneau. La résistance au cisaillement d'un tel diaphragme peut être améliorée par une augmentation de l'épaisseur des éléments.

d- Perforations et ouvertures :

La présence de réservations au niveau des panneaux peut augmenter légèrement la déflexion du système et diminuer par conséquent la résistance au cisaillement.

e- Types et disposition des connexions :

La résistance au cisaillement des diaphragmes métalliques est affectée non seulement par les types d'assemblages des éléments (soudures, boulons, vis à tôle et autres) mais aussi par leur disposition et leur espacement dans le panneau. Les études existantes ont montré que si les

éléments de fixation sont insuffisants, cela peut engendrer un endommagement sous l'effet de cisaillement, tel que la séparation des éléments de fixation ou la rupture du matériau environnant. D'un autre côté, si le nombre de fixations est très rapproché, le panneau peut se rompre par flambage élastique, ce qui produit des ondes diagonales sur tout le diaphragme. La résistance au cisaillement sera considérablement augmentée par l'ajout de fixations latérales intermédiaires et de connexions d'extrémité.

f- Remplissage avec du béton des planchers :

Un panneau métallique avec un remplissage en béton fournit un diaphragme beaucoup plus rigide et efficace. L'effet de rigidification du remplissage dépend de l'épaisseur, de la résistance et de la densité du matériau, et de la liaison entre le remplissage avec le panneau. L'effet du remplissage avec du béton léger sur les diaphragmes de cisaillement a été étudié par certains chercheurs, et il a été constaté que même si le type de béton est de classe très faible en résistance à la compression (de 0,7 à 1,4 MPa), il peut considérablement améliorer ses performances.

Un autre aspect très important qui est considéré comme étant un critère de conception majeur, est celui de la déflexion des panneaux vis-à-vis du cisaillement qui dépend également de la rigidité membranaire. De nombreuses méthodes pour prédire ce phénomène ont été développées sur un certain nombre de tests spécifiques, où il a été constaté que la déflexion totale d'un système de membrane sans remplissage de béton n'est que le résultat de la combinaison des facteurs suivants :

- Déformation due à la contrainte de flexion ;
- Flèche due à la contrainte de cisaillement ;
- Déformation due au glissement de couture ;
- Flèche due à la distorsion locale des panneaux, provoquée souvent avec le mouvement relatif entre les poutres périphériques et les panneaux aux extrémités ;

5.2.3. Caractéristiques structurales des panneaux avec éléments individuels

L'ossature principale des panneaux avec des éléments individuels est caractérisée par la forme, la disposition, les dimensions ainsi que les épaisseurs de ses éléments. Selon la norme d'Amérique du Nord, les éléments individuels en aciers légers sont partagés en cinq grandes catégories, à savoir :

- Les éléments en S : utilisés le plus souvent comme des montants de mur, les solives de plancher et les chevrons de plafond ou de toit ;
- Les éléments en T : qui sont utilisés pour les plaques supérieures et inférieures (rails) dans les murs, et les solives de bordure dans les systèmes de plancher. Les rails forment également les têtes et les appuis des fenêtres et recouvrent généralement le haut et le bas des en-têtes encadrés ou dos-à-dos ;
- Les éléments en U sont des profilés qui ont une profondeur plus petite que les rails, utilisés pour maintenir d'autres éléments, ainsi que pour les systèmes de support de plafond ;

- Les éléments F sont des profilés utilisés généralement horizontalement sur les murs ou les plafonds ;
- Les éléments en L sont des angles qui -dans certains cas- peuvent être utilisés pour les en-têtes sur les ouvertures, afin de répartir les charges sur les montants adjacents.

Le contreventement de la structure vis-à-vis des charges latérales est assurée principalement par les éléments constituant du panneau, à savoir les poteaux, les poutres, ainsi que les stabilités, dont l'ensemble des profilés est en acier léger.

La figure 5.7 présente une structure typique d'un bâtiment avec des panneaux en éléments individuels.



Figure 5.7 : Ossature typique avec panneaux en éléments individuels et stabilités

Les figures 5.8 a et b, montrent quelques panneaux typiques conçus en éléments individuels, avec et sans palées de stabilité.



a) sans palées de stabilités

b) avec palées de stabilités

Figure 5.8 : Ossature typique d'un panneau en éléments individuels

5.2.4. Caractéristiques structurales des planchers métalliques

Les planchers des structures en aciers laminés à froid sont généralement des planchers collaborant composés d'une tôle d'acier ondulé laminé à froid ainsi qu'une dalle de compression très souvent en béton avec un ferrailage en treillis soudé, où l'ensemble est supporté par des pannes / des solives et des poutres.

La fonction principale de ce type de plancher est d'assurer à la fois : i) la portance des charges gravitaires à travers la résistance de la dalle à la flexion, ainsi que ii) la transmission des forces latérales vers les fondations de la structure par le biais des panneaux muraux sans que la dalle ne se déforme dans son plan. Ce principe est connu sous la notion du diaphragme.

Le concept du plancher collaborant offre plusieurs avantages à la structure tels que :

- ✓ La réduction des sections des poutres – donc leurs poids -, et cela à travers la résistance de l'ensemble (Poutres, pannes / solives avec la dalle en béton) ;
- ✓ Avoir une plus grande rigidité à travers la contribution des poutres, pannes / solives avec la dalle en béton, cela permet par conséquent la réduction de la flèche de la dalle ainsi que celle des éléments poutres / pannes ;
- ✓ Avoir plus de hauteur inter-étage libre, et donc une hauteur globale du bâtiment moins importante aussi, car la rigidité d'un plancher collaborant offre la possibilité d'avoir des poutres peu profondes en retombées.
- ✓ Avoir plus d'espacement libre en plan, car la résistance à la flexion de tels types de plancher permet d'augmenter les espacements entre les appuis, ce qui donne plus de flexibilité à l'aménagement architectural ;

Par conséquent, avoir un bon concept avec le bon choix des matériaux, ainsi que le dimensionnement adéquat de la structure, permet d'avoir une facilité et une rapidité considérables lors de la construction et donc une économie au projet.

La constitution d'un plancher collaborant conventionnelle telle qu'elle est usuellement utilisée dans les bâtiments, est essentiellement composée des éléments suivants :

- ❖ Une série de poutres / pannes en charpente métallique ;
- ❖ Une tôle d'acier ondulée ;
- ❖ Des connecteurs métalliques ;
- ❖ Une dalle en béton armé.

La figure 5.9 suivante, présente une section transversale d'un plancher collaborant usuel avec un remplissage en béton armé qui fait office d'une dalle de compression travaillant comme étant une section en T avec l'intégration de la poutre en dessous.

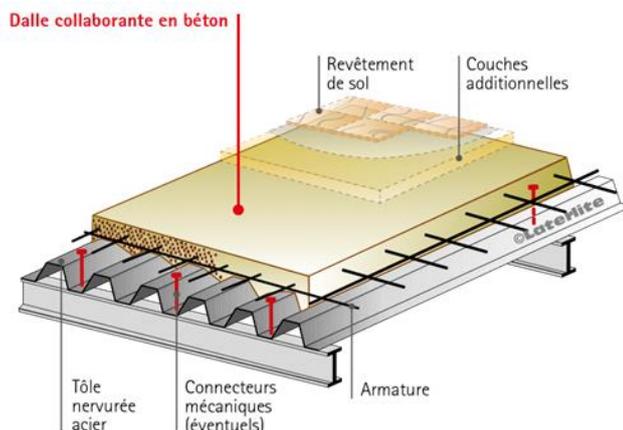


Figure 5.9 : Composition d'un plancher collaborant métallique

Les connecteurs jouent un double rôle, dont le premier consiste à assurer l'adhérence entre les poutres métalliques et la dalle en béton, alors que le second concerne la résistance au cisaillement horizontal, tel qu'il est présenté sur la figure 5.10.

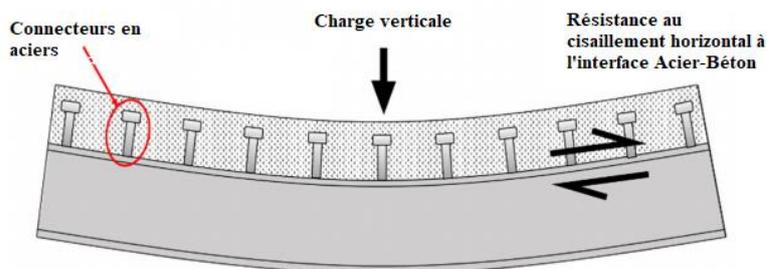


Figure 5.10 : Comportement mécanique d'un plancher collaborant métallique

Sur le plan calcul et dimensionnement, vu que le plancher collaborant est constitué de solives / pannes intermédiaires, le sens porteur nécessite d'être bien défini afin de préciser la direction selon laquelle ces éléments seront disposés. En considérant un plancher ayant une longueur « L » et une largeur « l », la règle générale technique recommande la disposition des pannes / solives suivant le sens le plus petit (voir la figure 5.11).

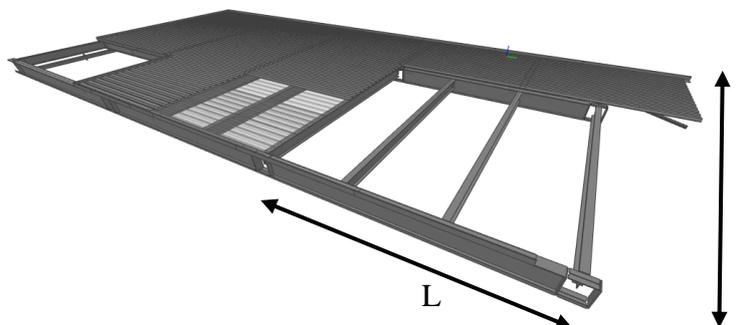


Figure 5.11 : Disposition des pannes / solives

5.3. Définitions des contraintes

Tel que déjà définies, il existe deux catégories de critères de conceptions qui peuvent être considérés dans la génération des structures, la première catégorie étant celle qui considère les paramètres d'ordre géométrique et architectural du bâtiment tels que les dimensions du bâtiment, la répartition des espaces libres, la position des ouvertures, la continuité verticale des panneaux, etc....

La deuxième catégorie est celle qui considère les paramètres essentiels ayant une particularité spécifique pour la conception structurale d'un tel système et qui nécessitent d'être implantés dans l'AG. Ces critères peuvent se résumer comme suit (Skoudarli & Sereirir, 2020):

5.3.1. Sens de portée des planchers :

Une règle limite a été imposée dans l'algorithme selon le rapport entre la longueur et la largeur du plancher ($rap. = L/l$) afin de déterminer le sens de portée de la dalle, dont la vérification de cette condition se fait comme présentée dans l'organigramme de la figure 5.12, pour une dalle rectangulaire ayant une longueur L_x et une largeur L_y .

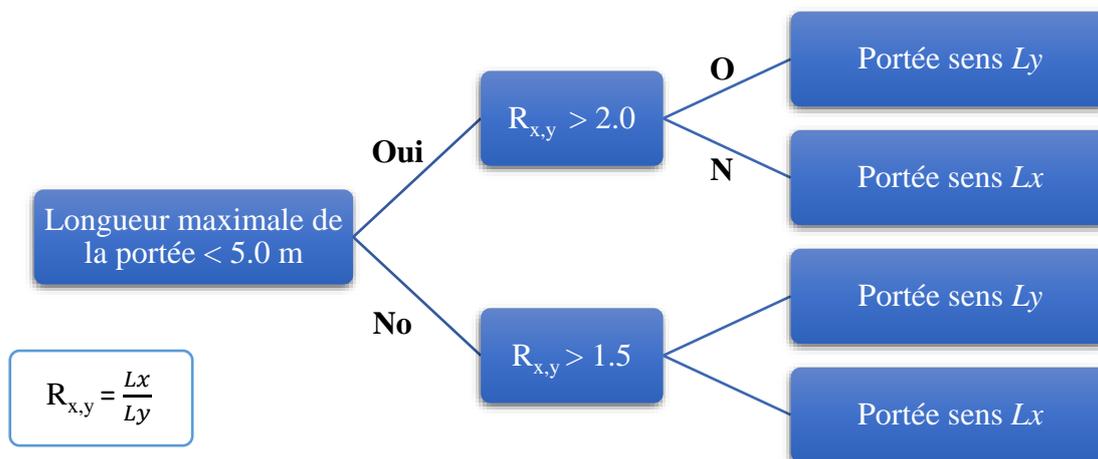


Figure 5.12 : Processus d'identification du sens de portée dans l'AG

Si ces conditions ne peuvent être respectées, tel le cas d'une dalle ayant un rapport de longueur / largeur = 1.0, le choix du sens de portée sera sur le côté comportant moins d'ouvertures, tels qu'illustré sur les figures 5.13.

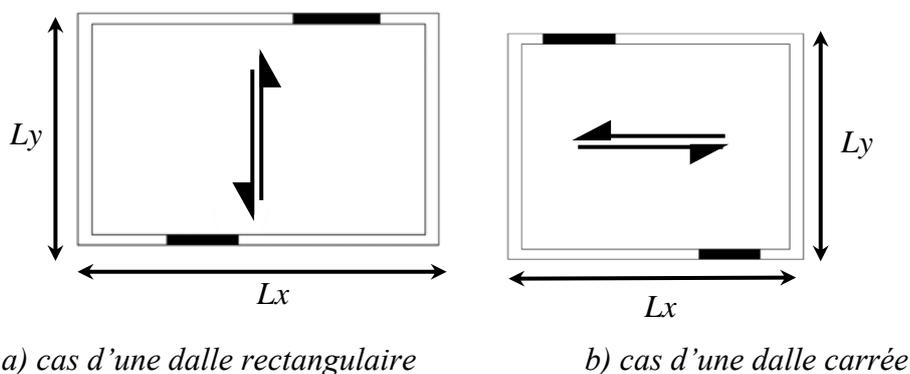


Figure 5.13 : Exemple sur le choix du sens de portée selon le cas

5.3.2. Longueur minimale entre les montants des panneaux muraux :

La distance minimale entre deux montants est généralement prise à 60 cm, tel qu'illustré dans la figure 5.14.



Figure 5.14 : Distance minimale entre deux montants

D'autres références telles que AISI proposent la relation : $l_{min} = \max (60 \text{ cm}, h/4)$, où le rapport entre la hauteur et la largeur de deux montants est pris égal à ($h/w = 4$). Cependant, la longueur optimale est généralement prise égale à : $L_{opt} = h$ (Yu et al., 2010).

5.3.3. Longueur totale des panneaux muraux :

La résistance de la structure vis-à-vis des charges latérales telles que les séismes et le vent est principalement assurée par les panneaux muraux pour chaque direction principale du bâtiment. D'une manière générale, la détermination de la quantité nécessaire des panneaux se fait par rapport aux exigences réglementaires en vigueur dans chaque région et chaque pays. En Algérie, la détermination de la longueur totale des panneaux muraux est basée principalement sur les formules du règlement parasismique Algérien (RPA99 version 2003), où la quantité nécessaire doit être capable de résister à la force séismique « F », calculée selon les paramètres appropriés au projet.

Le calcul de la force pour chaque direction principale, peut être obtenu en utilisant les méthodes usuelles telles que la méthode statique équivalente ou la méthode spectrale. En connaissant la capacité de résistance nominale d'un panneau mural par mètre linéaire « f », la longueur nécessaire peut être obtenue par la relation suivante :

$$L = F/f \dots\dots\dots (5.3)$$

Avec :

- L : la longueur totale nécessaire des panneaux muraux ;
- f : force de résistance nominale d'un panneau mural par unité de longueur ;

F : Force latérale sismique, qui peut être obtenue par l'équation de la méthode statique équivalente, comme suit :

$$F = \frac{A.D.Q}{R}.W \dots\dots\dots (5.4)$$

- A : accélération de zone ;
- D : Coefficient d'amplification dynamique ;
- Q : Facteur de qualité ;
- W : Poids de la structure ;
- R: Coefficient de comportement ;

L'ensemble des paramètres décrits ci-dessus est défini dans le règlement RPA99 version 2003.

5.3.4. Excentricité de torsion et disposition des panneaux muraux :

Ce critère permet d'avoir une disposition de panneaux muraux équilibrée d'un point de vue rigidité afin d'optimiser l'effet d'excentricité accidentelle.

Selon les recommandations de l'EC08 :

$$e_x < 0.3 R_x ; e_y < 0.3 R_y$$

5.4. La fonction multi-objectifs

De manière similaire au système structural en voiles -dalles en béton armé, une fonction multi-objectifs est alors définie en prenant en considération les cibles suivantes :

- ✓ La longueur totale des murs « $L_{w,t}$ » : définie par les mêmes conditions que celle du 1^{er} cas, où plus cette longueur converge vers l'optimum « L_{wm} » mieux c'est. La vérification s'écrit donc par :

$$Si : L_{w,t} < L_{w,m} : score = \left(\frac{L_{w,t}}{L_{w,m}}\right)^3 \dots\dots\dots (5.5)$$

$$Sinon : score = 2 - \frac{L_{w,t}}{L_{w,m}} \dots\dots\dots (5.6)$$

$$L_{w,t} = \sum L_{w,i} : est\ la\ longueur\ totale\ des\ murs.$$

Lorsque la longueur totale est inférieure à l'optimum, le « score » est alors calculé au cube afin de pénaliser ce cas puisqu'il est le minimum requis.

- ✓ Le rayon torsionnelle : ce critère donne à l'algorithme la possibilité de générer une disposition optimale des panneaux muraux dans la structure, où la disposition la plus adéquate consiste à les placer le plus possible vers l'extérieur de la structure.

La valorisation de ce critère est principalement faite à travers les formules suivantes :

$$R_x > I_s ; R_y > I_s \dots\dots\dots (5.7)$$

$$Score\ R_x = \frac{R_x}{I_s} ; Score\ R_y = \frac{R_y}{I_s} \dots\dots\dots (5.8)$$

I_s : est le rayon de giration du plancher

- ✓ La symétrie : ce critère permet à l'algorithme de générer des structures assez symétriques dont le paramètre d'évaluation de l'excentricité torsionnelle e_x et e_y est normalisé dans l'intervalle [0 ; 1], où 1 représente le cas d'une symétrie parfaite, et 0 le cas d'une excentricité limite.

$$Score Ex = 1 - \frac{e_x}{0.3 R_x} ; Score Ey = 1 - \frac{e_y}{0.3 R_y} \dots\dots\dots (5.9)$$

- ✓ Rapport entre le rayon de torsion et les dimensions de la dalle : ce critère gère l'aspect de répartition des panneaux muraux dans chaque direction du bâtiment afin d'avoir une quantité équilibrée dans les deux sens.

La valorisation de ce critère se fait par le biais des formules suivantes :

$$\frac{R_x}{L_x} = \frac{R_y}{L_y} \dots\dots\dots (5.10)$$

La valorisation des résultats du processus d'optimisation est faite selon les deux valeurs suivantes :

$$Score1 = 1 - \left(\frac{R_x}{R_y} - \frac{L_x}{L_y} \right) ; Score2 = 1 - \left(\frac{R_y}{R_x} - \frac{L_y}{L_x} \right) \dots\dots\dots (5.11)$$

Le nombre d'itérations considéré pour ce système est de 150.

5.5. Performances de l'AG-MO à l'optimisation de la conception structurale

Dans le but de voir les performances de l'AG-MO dans la génération des conceptions structurales avec ce système constructif, des applications sur des modèles BIM-3D d'architecture ont fait l'objet d'études.

5.5.1. Présentations des modèles architecturaux analysés

L'analyse a été élaborée sur 3 modèles d'architecture distincts, ayant chacun des caractéristiques géométriques différentes. Les bâtiments considérés sont ceux de projets déjà réalisés en Algérie sur trois sites différents à savoir :

- Le modèle 1 : est implanté à Sidi Bel Abbes.
- Le modèle 2 : est implanté à Chlef.
- Le modèle 3 : est implanté à Constantine.

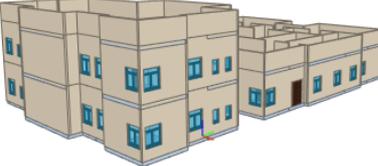
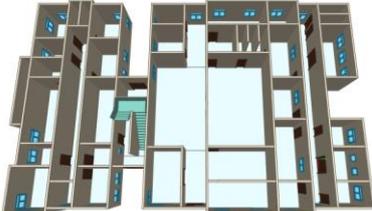
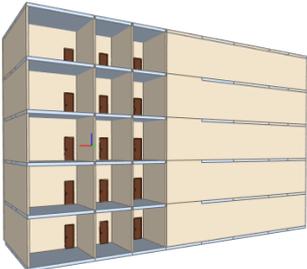
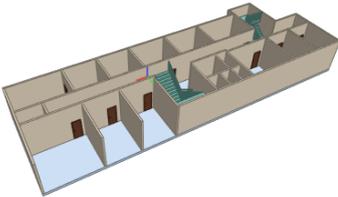
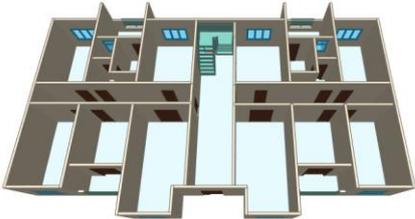
Les trois structures ont été conçues en profilés laminés à froid, dont l'ensemble des panneaux muraux (intérieurs et extérieurs) est constitué de plaques ayant environ les dimensions de 1.22 x 2.44 m en plan et 12 mm d'épaisseur avec le type « Magboard ». Chaque panneau est renforcé par des montants de diverses formes (C, S, T, U et F) espacés entre eux de 60 cm, où l'ensemble est ceinturé périphériquement par des profilés en forme de U.

Les planchers quant à eux sont composés de pannes en C espacées de 60 cm, supportant une dalle remplie par du béton léger sur une épaisseur de 5.0 cm, afin d'augmenter leurs rigidités flexionnelles.

La connexion entre les panneaux muraux et les planchers est principalement assurée par le biais de vis autoportantes.

Le format de base considéré pour l'importation et l'exploitation des données dans les applications de l'AG est celui des « IFC ». Les caractéristiques géométriques des trois bâtiments sont présentées sur le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Configuration architecturale des cas étudiés

<i>Dimensions du bâtiment</i>			<i>Vue architecturale en BIM-3D</i>	<i>Vues détaillées (Plan / Elévation)</i>
<i>N</i>	<i>L . l . h (m)</i> ° <i>[Surface : m²]</i>	<i>Nbr.</i> <i>Étages</i>		
1	30.5 x 20.5 x 7.0 [625.30 m ²]	2		
2	31.5 x 10.1 x 19.5 [318.15 m ²]	5		
3	23.6 x 12.3 x 15.1 [290.30 m ²]	5		

5.5.2. Evaluation des conceptions structurales générées et optimisées par l'AG-MO

L'algorithme a été appliqué sur les 3 modèles BIM-3D, afin de générer une conception structurale optimisée. Les solutions obtenues sont évaluées par l'AG conformément aux contraintes prédéfinies ainsi que les cibles de la fonction multi-objectifs.

L'application de l'AG est principalement faite selon le processus suivant :

a- Identification du sens de portée des planchers

L'algorithme va établir en premier lieu un scan de l'ensemble des éléments constituant le modèle du bâtiment. Par la suite, il vérifiera si la configuration architecturale est conforme aux contraintes spécifiques, prédéfinies sur l'algorithme donné dans la figure 5.12 qui concerne les limites de la portée ainsi que la disposition des solives.

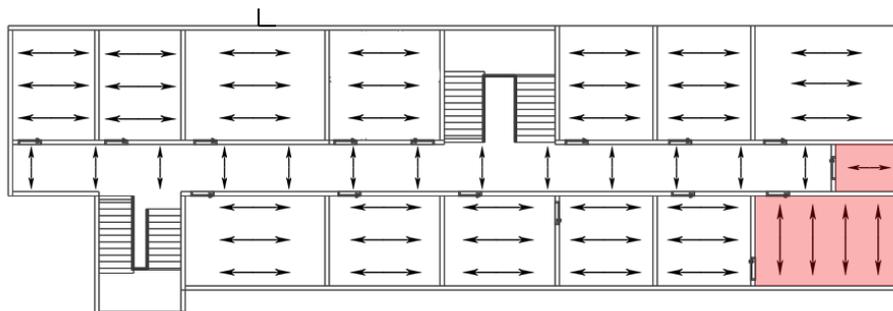


Figure 5.15 : Génération de l'AG du sens de portée et direction des solives

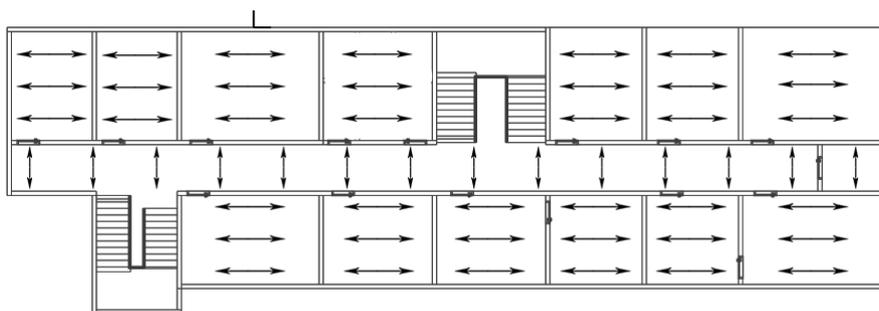


Figure 5.16 : Disposition de la conception conventionnelle des solives

En comparant la disposition du sens de portée des planchers proposée au travers des modèles générés par l'AG (fig. 5.14) avec ceux déjà réalisés (fig. 5.15), nous constatons que les résultats obtenus ont une remarquable similitude, et ce pour la plupart des espaces du bâtiment, à l'exception de deux d'entre eux, où la différence enregistrée est probablement due à l'importation et la lecture des inputs à partir du fichier IFC tel le cas du petit espace (N°1). Cependant, concernant le grand espace (N°2), la disposition proposée par l'AG est la plus correcte d'un point de vue structural -tel qu'il a été défini sur les contraintes-, car celle donnée sur le plan conventionnel est plutôt faite pour des raisons de réalisation et non techniques.

Par conséquent, à partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l'algorithme considère d'une manière assez fiable les conditions de ce critère dans son processus, à savoir l'effet dimensionnel entre les murs ainsi que les ouvertures.

b- Performance de la stabilité globale des structures

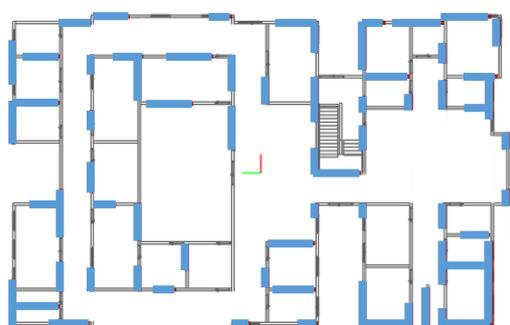
Afin de vérifier la performance de l'AG appliquée sur ce système constructif, une comparaison a été élaborée entre les modèles générés par l'algorithme et ceux déjà réalisés.

L'analyse a montré que la disposition des panneaux muraux proposée par les modèles générés par l'algorithme a été faite d'une manière très satisfaisante car elle respecte l'ensemble des critères prédéfinis pour cet aspect, à savoir :

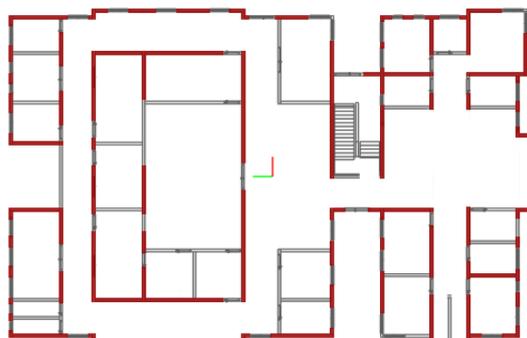
- ✓ La répartition architecturale des cloisons intérieures et extérieures ;
- ✓ Le positionnement des ouvertures (fenêtres et portes) sur l'ensemble des niveaux ;
- ✓ La continuité verticale des murs afin d'assurer le cheminement des efforts vers les fondations.

Les figures suivantes présentent les configurations proposées par l'AG comparées par rapport aux vues en plans architecturales de ce qui a été déjà réalisé.

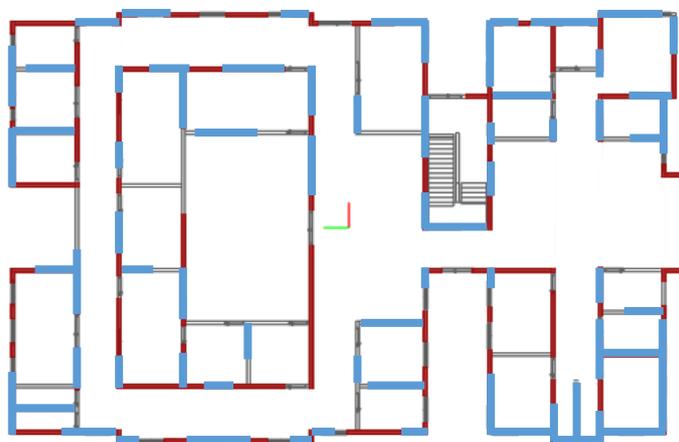
➤ *Bâtiment 1 : Structure avec deux niveaux (Rdc + 1 étage)*



Modèle généré par l'AG



Modèle conception conventionnelle

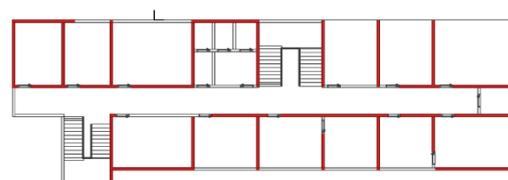


Superposition des deux modèles

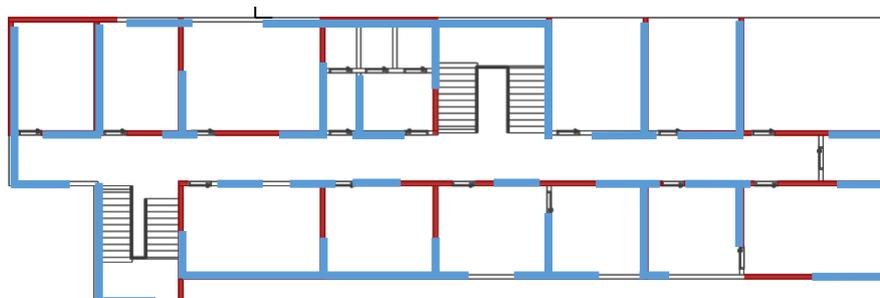
➤ *Bâtiment 2 : Structure avec cinq niveaux (Rdc + 4 étages)*



Modèle généré par l'AG



Modèle conventionnel



Superposition des deux modèles

➤ *Bâtiment 3 : Structure avec cinq niveaux (Rdc +4 étages)*

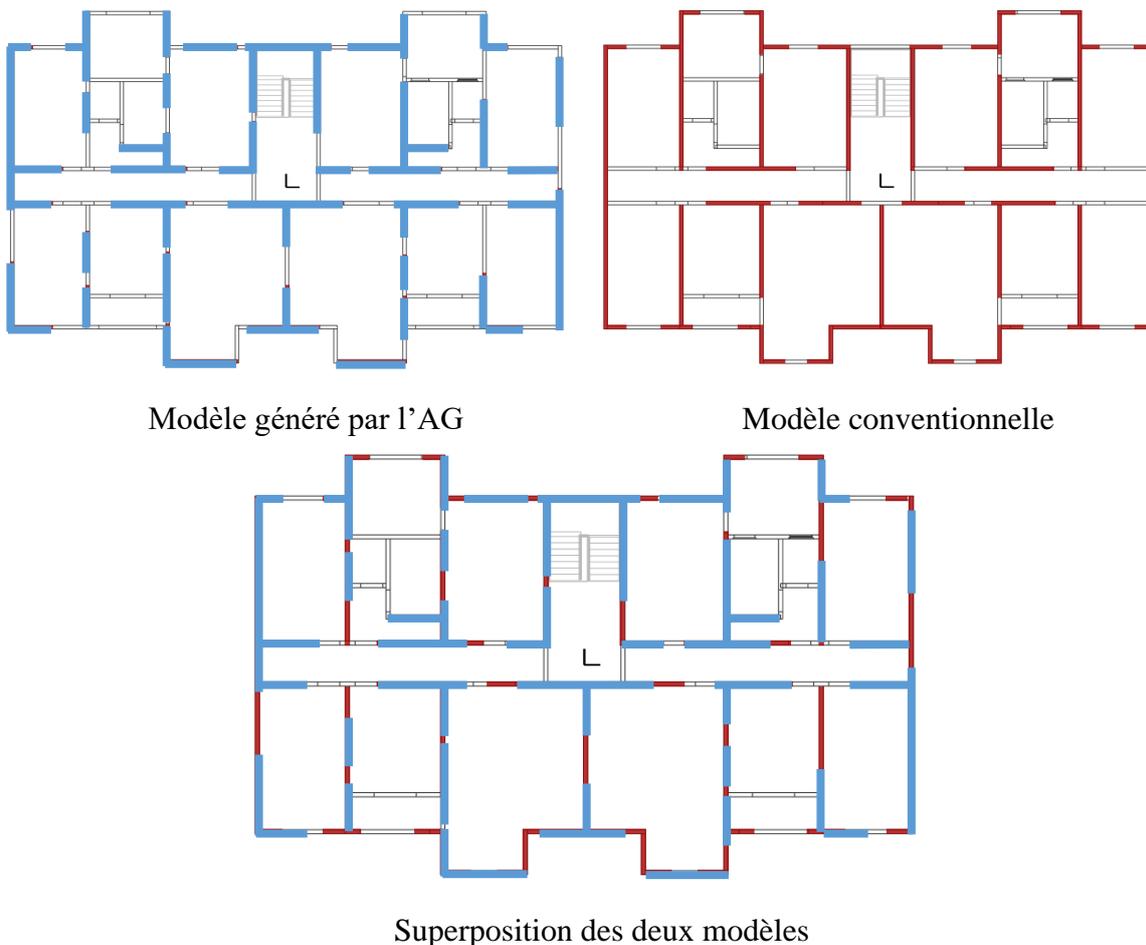


Figure 5.17 : Comparaison entre les deux modèles

Comme le présente *Figure 5.17*, pour les trois bâtiments, la répartition des murs générée par l'AG est assez similaire à ce qui a été déjà fait sur les plans de référence, mise à part quelques petites différences sur les longueurs de certains murs. Cette différence est due aux respects de l'algorithme aux contraintes relatives au processus probabiliste utilisé, ainsi qu'aux limites de longueurs min/max des murs individuels initialement prédéfinies.

c- Longueurs et répartitions des murs en plan

D'un point de vue de la longueur individuelle des murs, l'analyse des modèles générés par l'AG a montré que pour l'ensemble des structures, les longueurs minimales et maximales ont été très bien respectées, avec des ratios de + 20% par rapport à la longueur minimale – fixé comme contrainte à 0.6 m de longueur – et de -7.0 % par rapport à la longueur maximale – fixé comme contrainte à 3.0 m de longueur. De plus, la plupart des longueurs des murs convergent à la longueur optimale « L_{opt} » prédéfinie initialement sur les équations 5.4 et 5.5, ce qui signifie que l'algorithme peut être considéré comme un outil très efficace qui assure une répartition adéquate des panneaux en PAF en plan de la structure, tout en reprenant la force optimale des murs pour chaque configuration proposée.

D'un point de vue quantité globale de murs, pour chaque direction XX et YY, l'algorithme a proposé une longueur totale de panneaux en PAF au moins 5,0% supérieure à la longueur totale minimale définie par l'équation 5.3. Donc, l'algorithme a tendance à proposer une quantité totale de murs proche de la longueur optimale, capable de garantir à la fois la résistance et la stabilité de la structure.

Concernant la répartition des murs dans le plan, il est clair que les panneaux sont décalés plutôt vers la périphérie de la structure, et cela à cause de l'implémentation du critère relatif au rayon de torsion comme une fonction objectif. Une telle disposition a engendré une excentricité très faible sur les modèles générés, ce qui est très intéressant dans la stabilité des structures.

Cependant, il a été aussi constaté que pour les bâtiments ayant une grande surface en plan avec un nombre de niveau faible avec 1 ou 2 niveaux, la quantité minimale requise des PAF est relativement petite, ce qui peut provoquer une certaine irrégularité dans les résultats de l'algorithme.

5.5.3. Effet du changement des poids de la fonction objectif (Analyse des résultats)

L'effet de la variation du poids des différentes cibles de la fonction objectif lors de l'application de l'AG dans la génération des conceptions structurales en système PAF, a été fait en variant l'échelle des valeurs des poids de la longueur des panneaux ainsi que celle de l'excentricité indépendamment et en gardant ceux du rayon torsionnel et le ratio (Dim/rayon) égaux à l'unité.

Cette variation a été élaborée sur les trois modèles architecturaux, où les valeurs considérées sont illustrées par le tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Poids des cibles de la fonction multi-objectifs de l'AG

Poids des objectifs			
Longueur des PAF	Excentricité	Rayon torsionnelle	Ratio Rayon/Dim.
1.50	0.50	1.00	1.00
1.00	1.00	2.00	1.00
1.00	1.50	3.00	1.00

a- Effet de la variation du poids de l'excentricité

Après avoir appliqué les différentes valeurs du paramètre d'excentricité sur les trois modèles, il a été constaté que l'excentricité résultante enregistrée sur les planchers des conceptions optimisées varie aussi avec le changement du poids d'excentricité où elle devient plus faible lorsque le poids devient plus important. Le tableau 5.3 montre que les excentricités le long des directions x et y sont dans la plage de 0,9% à 4% pour un poids de 1 et restent dans une plage de 0,1% à 0,3% pour un poids du facteur d'échelle de 1,5.

Tableau 5.3 : Effet du changement du poids de l'excentricité dans la fonction multi-objectifs de l'AG

Valeurs du poids d'excentricité	Model 1		Model 2		Model 3	
	Ratio X_{Ecc}	Ratio Y_{Ecc}	Ratio X_{Ecc}	Ratio Y_{Ecc}	Ratio X_{Ecc}	Ratio Y_{Ecc}
0.50	1.8 %	0.9 %	3 %	4 %	0.9 %	1.32 %
1.00	0.4 %	0.8 %	3.5 %	3%	0.25%	0.32 %
1.50	0.1 %	0.1 %	0.2 %	0.3%	0.1 %	0.19 %

b- *Effet de variation du paramètre relatif au rayon torsionnel*

Le paramètre du rayon torsionnel consiste à orienter l'algorithme génétique pour produire une répartition équilibrée des PAF sur l'ensemble de la surface avec la priorité de disposer d'un maximum de panneaux vers l'extérieur en premier lieu.

Afin d'apprécier davantage l'effet de ce paramètre lors du processus de génération des structures par l'AG, une analyse de variantes est alors élaborée sur les trois modèles, en faisant changer ce paramètre par 3 valeurs distinctes, à savoir 1, 2 et 3 respectivement. Le reste des poids relatifs aux autres facteurs est maintenu égal à l'unité.

Au vu du tableau 5.4 suivant, il est clair que la quantité des panneaux en PAF sur les murs extérieurs augmente de manière proportionnelle en fonction de l'augmentation du rayon de torsion. Le même résultat a été également constaté pour la variation de l'excentricité enregistrée sur les planchers.

Tableau 5.4 : Effet du changement du poids du rayon torsionnel

Modèle	Variation du poids du rayon de torsion	% des PAF sur la périphérie	Excentricité	
			Ratio X_{Ecc}	Ratio Y_{Ecc}
1	1	18 %	1.8 %	0.9 %
	2	21 %	2.8 %	1.9 %
	3	24 %	4.3 %	3.5 %
2	1	33 %	3 %	4 %
	2	34 %	0.4 %	2 %
	3	43 %	4 %	7.4 %
3	1	41 %	1.3 %	2 %
	2	46 %	2.5 %	0.9 %
	3	58 %	3 %	1 %

c- Effet du ratio « Rayon / Dim. »

Ce rapport « Rayon / Dimensions » consiste à garantir une meilleure répartition des PAF en matière de dimensions et tend aussi à éviter leur concentration dans une seule direction. Contrairement aux modèles qui n'ont pas pris en compte ce paramètre dans l'AG, les résultats obtenus sur ceux ayant pris en charge ce facteur ont montré que les solutions générées présentent une répartition équilibrée des PAF et une stabilité globale adéquate de la structure. Après avoir fait plusieurs simulations, il s'est avéré qu'une valeur égale à 1.0 est la plus optimale pour l'AG. La figure 5.18 montre, à titre indicatif, une disposition générée par l'AG sans tenir compte de ce paramètre.

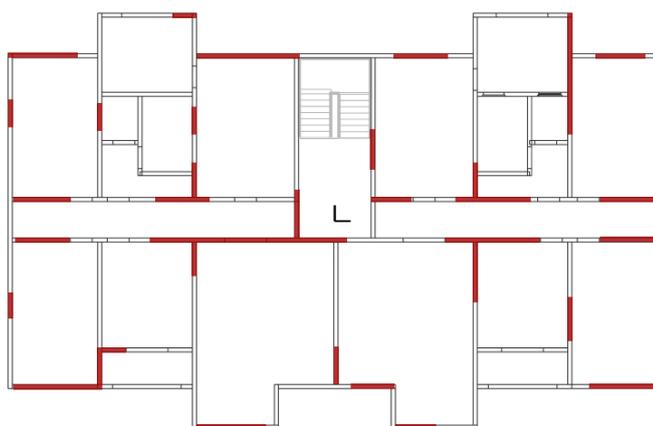


Figure 5.18 : Répartition des PAF sans tenir compte du rapport Rayon / Dim. dans les modèles générés par l'AG

d- Effet du paramètre relatif à la longueur minimale des panneaux PAF

Ce paramètre est primordial pour le processus d'optimisation par l'AG car sans la définition de ce paramètre qui consiste à assurer une quantité minimale nécessaire pour reprendre les efforts sismiques, les solutions générées par l'AG seront soit surdimensionnées pour la quantité des panneaux ce qui va encombrer donc l'aménagement architecturale, soit sous-dimensionnées auquel cas le critère de résistance ne sera pas satisfait. La figure 5.19 montre, à titre d'exemple, l'effet de non prise en charge de ce paramètre dans l'AG.

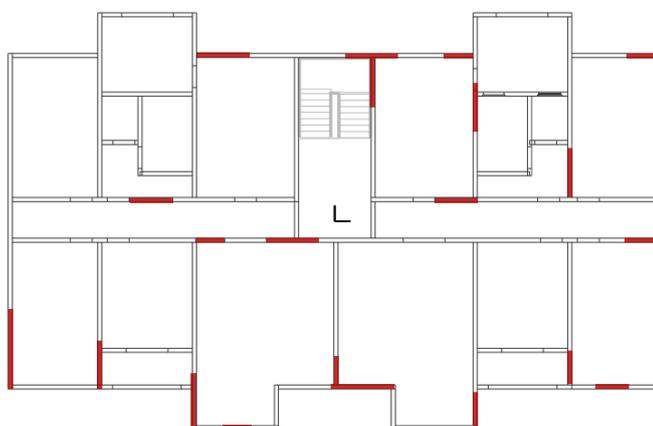


Figure 5.19 : Répartition des PAF sans tenir compte du minimum requis par l'AG

5.6. Conclusion

Le présent chapitre expose les résultats d'analyses obtenus lors de l'application des algorithmes génétiques à fonction multi objectifs capables d'extraire des conceptions optimisées qui répondent aux exigences architecturales structurales de ce type de constructions en système PAF – Panneaux avec des profilés laminés à froids -, en important les inputs à partir des modèles BIM-3D en format IFC.

L'analyse a été principalement faite sur trois (3) configurations architecturales distinctes caractérisées par leurs formes géométriques et leurs dimensions, où l'AG-MO a généré un certain nombre de solutions conceptuelles, suivant la définition des cibles de la fonction objectif.

De manière similaire au cas du système constructif en voiles – dalles, les résultats obtenus pour les systèmes en PAF sont également très satisfaisants, car la performance de l'AG a été validée à travers la génération de l'AG des modèles qui respectent l'ensemble des exigences prédéfinies auparavant.

Chapitre 6

Conclusions & Recommandations

Conclusion

A l'instar d'autres secteurs, le domaine de l'industrie de la construction connaît un essor fulgurant. Bien qu'à évolution lente, ce secteur connaît de nombreux changements en faisant appel aux nouvelles technologies où le BIM figure parmi les leaders. Il s'agit d'un processus numérique basé sur le partage d'informations durant toute la durée de vie d'un bâtiment et ce depuis sa conception jusqu'à sa démolition. A ce titre, le présent travail de recherche s'inscrit dans cette perspective d'aide à la conception structurale d'une manière totalement automatique et intelligente, depuis le premier stade du projet (phase avant-projet). Cette réflexion est développée afin d'améliorer davantage le processus suivi dans la démarche du BIM.

Une autre raison majeure qui a fortement augmenté l'intérêt de cette réflexion – confortée par l'analyse bibliographique -, réside dans le développement remarquable des nouvelles technologies numériques dans l'industrie AEC tels que les plateformes BIM-3D, l'interface interdisciplinaire et l'automatisation de la conception structurale qui restent à l'état actuel faiblement investies par les chercheurs.

L'intégration donc d'une conception structurale automatisée et optimisée au niveau de la phase préliminaire d'un projet figure au cœur de cette réflexion afin d'obtenir une panoplie de solutions plus progressives et optimisées, ce qui économise les ressources aux étapes ultérieures du cycle de vie du projet.

Le principe de fonctionnement de l'approche proposée s'appuie sur l'application des algorithmes génétiques à fonction multi-objectifs comme outil d'optimisation. L'algorithme codé en Python, est conçu pour effectuer les opérations suivantes :

- Lire une configuration architecturale en format IFC extraite d'un modèle en BIM-3D ;
- Définir les positions potentielles des éléments structuraux conformément à la géométrie et la distribution des murs et cloisons de l'architecture en respectant la continuité verticale des éléments structuraux ;
- Générer une population initiale de structures en respectant les contraintes structurales pré-établies selon le type ou le système structural ;
- Faire évoluer les populations par un processus de croisement et de mutation en faisant, à chaque itération, une sélection basée sur la fonction multi-objectifs qui intègre les bonnes règles de conception et les critères de résistance et de stabilité.
- Après un nombre d'itérations prédéfini, l'algorithme génère une solution structurale optimisée.

L'évaluation des performances de l'algorithme a été faite à travers deux séries de tests sur deux systèmes structuraux différents, à savoir : les structures en voiles - dalles en béton armé, et les structures en panneaux en charpente métallique laminée à froid. Une dizaine de modèles d'architecture en BIM-3D caractérisés par des formes géométriques et des dimensions variées ont fait l'objet d'évaluation par application de l'algorithme. Plus de 200 solutions conceptuelles optimisées pour les deux systèmes ont été obtenues et analysées par l'établissement de modèles numériques de calcul ou par comparaison avec des conceptions conventionnelles. Les résultats obtenus pour la quasi-totalité des cas ont été très satisfaisants, où la performance de l'AG a été clairement démontrée et validée.

Après validation des performances de l'algorithme, une deuxième analyse concernant l'influence et l'impact de la variation des poids des cibles de la fonction multi-objectifs sur la sensibilité de l'algorithme a été effectuée. Les résultats obtenus témoignent de la puissance et capacité de l'algorithme à contrôler et ajuster les caractéristiques structurales des solutions alternatives.

Enfin, une dernière analyse a été menée, cette fois-ci, dans le but d'étudier la stabilité et la robustesse de l'algorithme. A ce titre, l'algorithme a été appliqué sur un certain nombre de modèles pour les deux systèmes structuraux, en utilisant les mêmes poids pour l'ensemble des objectifs. Les solutions générées par l'algorithme ont été comparées en termes de ratios de longueur totale des voiles/panneaux, de rapports d'excentricité, de rapport de chevauchement des surfaces couvertes ainsi que de distribution des voiles. Les résultats obtenus ont confirmé, encore une fois, l'efficacité de l'AG à concevoir des configurations structurales optimisées, stables et fiables avec des caractéristiques structurales très similaires.

Recommandations

Cette approche permet aux différents utilisateurs (architectes et ingénieurs) d'avoir plus de latitude dans leurs conceptions et fournit un outil très efficace pour explorer plus d'alternatives de solutions structurales dans une même plate-forme. Toutefois et comme pour tout travail, ce sujet peut être étendu et amélioré car l'algorithme reste ouvert pour recevoir et intégrer des perfectionnements tels que :

- L'ajout et/ou la modification des contraintes ou des objectifs ;
- L'adapter pour d'autres systèmes structuraux ;
- Utiliser d'autres outils d'IA d'optimisation ;
- Intégrer cet algorithme sur des logiciels BIM, afin de visualiser les solutions structurales générées, directement sur le modèle BIM-3D.

Références Bibliographiques

Abrishami S., Goulding J., Ganah A., (2013), Exploiting Modern Opportunities in AEC Industry: A Paradigm of Future Opportunities, AEI-ASCE 2013, 10 – 17, DOI: 10.1061/9780784412909.031.

Abrishami S., Goulding J., Ganah A., Rahimian F., (2014), G-BIM Framework and development process for integrated AEC design automation, Creative Construction Conference CC2014, Procedia Engineering 85 (2014) 10 – 17, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.523.

Abrishami S., Goulding J., Ganah A., Rahimian F., (2014), Integration of BIM and generative design to exploit AEC conceptual design innovation, ITcon Vol. 19, pg. 350, www.itcon.org - Journal of Information Technology in Construction - ISSN 1874-4753

Abrishami S., Goulding J., Rahimian F., Ganah A., (2015), Virtual Generative BIM Workspace for Maximising AEC Conceptual Design Innovation: A Paradigm of Future Opportunities, Construction Innovation January (2015), DOI: 10.1108/CI-07-2014-0036.

Abu Eusuf M., Khairuddin A. R., Mohd W. N., Al Hasan A., (2013), Shear Wall Construction in Buildings: A Conceptual Framework on the Aspect of Analysis and, Applied Mechanics and Materials Vols. 268-270 pp 706-711, Trans Tech Publications, Switzerland, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.706.

AFPS, (2004), Guide de la conception parasismique des bâtiments, Edition Eyrolles, ISBN : 2-212-11347-1.

Alasdair N. B., (2009), Eurocode 2: Span/depth ratios for RC slabs and beams, LLP. Thomasons, The Structural engineer, Technical Guidance Note, Vol 87, No 20, [Consulté le 20 Décembre 2020], <http://anbeal.co.uk/ec2spantodepth.html>.

Allen B. (2017), The Future of BIM Will Not Be BIM and It's Coming Faster Than You Think, Bill Allen, Autodesk university, [Consulté le 03 Février 2020], <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Future-BIM-Will-Not-Be-BIM-and-Its-Coming-Faster-You-Think-2017>.

Anup T., (2018), AUTOMATION IN DESIGN - can we think of automation in design phase? [Edition 1, Volume 1]

Arciszewski T., Mustafa M., Ziarko W., (1987), A methodology of design knowledge acquisition for use in learning expert systems, International Journal of Man-Machine Studies, 27(1):23-32, DOI: 10.1016/S0020-7373(87)80042-1.

Autodesk (2003), White paper, Building Information Modeling, San Rafael, CA, USA. [Consulté le 9 Décembre 2017], http://www.laiserin.com/features/bim/autodesk_bim.pdf

Azhar S. (2011), Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry, Leadership Manage. Eng., 11(3): 241-252, [Consulté le 03 Février 2020], [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).

Bachman H. (2002), Conception parasismique des bâtiment, Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités, Directives de l'OFEG – BWG, Bienne.

Bedrick J., FAIA, Reinhardt J., (2019), BIMForum, Level of Development (LOD) Specification part I & commentary for building information models and data, Copyright April

© 2019, [Consulté le 09 Janvier 2020], <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>

Bendsoe M.P., Sigmund O., (2003), *Topology optimization: Theory, methods, and applications*, Springer-Verlag, New-York, ISBN: 978-3-662-05086-6.

Bentley, [Consulté le 06 Janvier 2020], <https://www.bentley.com/fr/solutions/building-design-and-analysis>

BIM Alliance Sweden (2017), Stockholm, Sweden, [Consulté le 21 Janvier 2020], <https://www.bimalliance.se/om-oss/in-english/>.

BIM ASI (2015), *Building Information Modeling*, Austrian Standards Institute, Vienna - Austria, [Consulté le 22 Janvier 2020], <https://www.austrian-standards.at/infopedia-themencenter/infopediaartikel/building-information-modeling-bim/>.

BMVI (2015), Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, *Roadmap for Digital Design and Construction*, Berlin, Germany, [Consulté le 21 Janvier 2020], https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/road-map-for-digital-design-and-construction.pdf?__blob=publicationFile.

Bollinger E. (2006), *IFCs Connect, ARCHITECTUREWEEK, Design Tool*, [Consulté le 06 Janvier 2020], http://www.architectureweek.com/2006/0628/tools_1-1.html

Borra S., RajKiran P.M.B. N., Naga R. Sk., (2015), *Design Method of Reinforced Concrete Shear Wall Using EBCS*, *American Journal of Engineering Research (AJER)*; e-ISSN : 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936 Volume-4, Issue-3, pp-31-43, 2015.

Borrmann A., König M., Koch C., Beetz J. (2018), *Building Information Modeling: Why? What? How?*, *Technology Foundations and Industry Practice ; Chapitre 1*, Springer, [Consulté le 31 Décembre 2019], DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3_1

Bouguerra K., Lim Yaik-Wah, Ali K. N. B., (2020), *An Investigation of the Challenges and the Best Practices of BIM Implementation in the Algerian AEC Industry*, *International Journal of Advanced Science and Technology* Vol. 29, No.02, (2020), pp. 287-300, ISSN: 2005-4238 IJAST.

BOURAHLA N., (2007), *Résistance des matériaux de base*, GECOTEC, Alger 2007.

Bozdoc M. (2003), *The history of CAD*, [Consulté le 31 Décembre 2019], <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm>

BS-ME (2011), *BuildingSMART in the Middle East. UAE: BIM survey*, *The Building Information Modeling Summit QATAR*, [Consulté le 22 Janvier 2020], https://media.thebimhub.com/filer_public/1a/0d/1a0d534d-788e-4d2b-a87a-4a5b9bf5a091/buildingsmart_in_the_middle_east_bim_survey_2011.pdf.

Building without barriers, the business case of interoperability, [Consulté le 19 Janvier 2020], https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2019/05/buildingSMART-A5_Brochure_V10_.pdf

BuildingSmart France – Mediaconstruct (2020), *Travailler avec les IFC, Comprendre et utiliser le format universel du BIM, Qu'est-ce que les IFC ?*, [Consulté le 19 Janvier 2020], <https://bimstandards.fr/travailler-avec-les-ifc/qu-est-ce-que-les-ifc/>

BuildingSmart, BIM, [Consulté le 19 Janvier 2020], <https://www.buildingsmart.org/?s=bim>

Burak B., Comlekoglu H.G., (2013), Effect of shear wall area to floor area ratio on the seismic behavior of reinforced concrete buildings, *Journal of Structural Engineering* 2013.139:1928-1937. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000785](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000785)

CAD-BIM Technology Center (2012), The US Army Corps of Engineers Roadmap for Life (USACE), Cycle BIM Edition, Washington, D.C., USA, [Consulté le 21 Janvier 2020], <https://cadbimcenter.erd.c.dren.mil/default.aspx?p=a&t=1&i=13>

CFS (2021), Cold Formed Steel, From Wikipedia, the free encyclopedia, [Consulté le 24 Janvier 2021], https://en.wikipedia.org/wiki/Cold-formed_steel.

CFSEI (2021), Cold Formed Steel Engineers Institute, History, [Consulté le 24 Janvier 2021], <https://www.cfsei.org/history>.

Cherkaoui H. (2019), L'intelligence artificielle et le futur du monde de la construction, [Consulté le 20 Octobre 2019], <https://www.aproplan.com/fr/blog/efficacite-chantier-construction/artificial-intelligence-future-construction>

Chithambar G.A., Jagan S., Muthukannan M., (2016), Study on the location of shear wall in a structure using ETABS nonlinear, *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, ISSN: 2394-2827, Special Issue, [Consulté le 20 Décembre 2020], http://www.ijraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/13-286-147426916151-55.pdf

Cormier G., (2008), Algorithmes Génétiques, Chapitre 1 - pp1-11, Université de Moncton, [Consulté le 20 Décembre 2020], http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/SystemesIntelligents/AG.pdf

CSI UniFormat (2021), A uniform classification of construction systems and assemblies, [Consulté le 10 Février 2021], <https://www.csiresources.org/standards/uniformat>

CSI, SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, California. [Consulté le 24 Juin 2019], <https://www.csiamerica.com/building-information-modeling..>

CURT_WP-1202 (2004), The Architectural/Engineering Productivity Committee of The Construction Users Roundtable, Collaboration, integrated information and the project lifecycle in building design, construction and operation, [Consulté le 09 Janvier 2020], <https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>

Darko A., Chana A. P. C., Adabre M. A., Edwards D. J., Hosseini M. R., Ameyaw E. E., (2020), Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities, *Automation in Construction* 112 -103081, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>.

Davidovici V., (1995), Formulaire du béton armé, Volume 2, © Groupe Moniteur, Paris 1995.

Dimiyadi J., Henderson S., Dimalen D., (2018),

Eastman C., Theicholz P., Sacks R., Liston K., (2011), BIM HandBook, A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors; Second edition, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-18528-5.

Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C., (1974), An Outline of the Building Description System, Research report No 50, Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University, [Consulté le 31 Décembre 2019], <http://eric.ed.gov/?id=ED113833>

EC-08 (2005) Eurocode 8, Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, Partie 1: règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, 2005 NF EN.

El Ghazouli A. Y. (2009), Seismic design of buildings to Eurocode 08, calculation of action effect (Section 5.7.2), 1st edition, © 2009 Spon Press.

El-Abbasy M.S., Elazouni A., Zayed T., (2016), MOSCOPEA: multi-objective construction scheduling optimization using elitist non-dominated sorting genetic algorithm, *Automation in Construction* 71 (2016) 153–170, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.038>.

El-Abbasy M.S., Elazouni A., Zayed T., (2017), Generic scheduling optimization model for multiple construction projects, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, ISSN 0887-3801, 31 (4) : 04017003, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000659).

EU-BIM (2017), Manuel pour l'introduction du « Building Information Modelling (BIM) » par le secteur public européen, Action stratégique pour la performance du secteur de la construction : générer de la valeur, de l'innovation et de la croissance, EUBIM- TSKGROUP, [Consulté le 22 Janvier 2020], <http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2018/02/GROW-2017-01356-00-00-FR-TRA-00.pdf>.

Fardis M. N., (2009), Seismic design, Assessment, and retrofitting of concrete buildings base on EC08, Springer Netherlands, DOI : 10.1007/978-1-4020-9842-0.

Farzad N., (2018), The seismic design handbook, chapters: architectural considerations, design for drift and lateral stability, seismic design for reinforced concrete structures, Springer Nature, Switzerland 2018, [Consulté le 20 Décembre 2020], <https://link.springer.com/book/doi.org/10.1007/978-1-4615-1693-4>.

Fenves S. J., Rivard H., Gomez N., (2000), SEED-Config: a tool for conceptual structural design in a collaborative building design environment, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 233-247, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0954-1810\(00\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0954-1810(00)00018-2).

Francisci D., (2002), Algorithmes évolutionnaires et optimisation Multi-objectifs en data mining, Rapport de recherche, Laboratoires I3S/RR-2002-12-FR, Centre National de la Recherche, [Consulté le 20 Décembre 2020], <https://www.i3s.unice.fr/~mh/RR/2002/RR-02.12-D.FRANCISCI.pdf>.

Gerges M., Austin S., Mayouf M., Ahiakwo O., Jaeger M., Saad A., Tamer-El Gohary (2017), An investigation into the implementation of Building Information Modeling in the Middle East, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Vol. 22, pg. 1-15, ISSN 1874-4753, [Consulté le 22 Janvier 2020], https://www.itcon.org/papers/2017_01-ITcon-Gerges.pdf.

Gerold F., Beucke K., Seible F., (2012), Integrative Structural Design, *Journal of computing in civil engineering*, American Society of Civil Engineers, November/December, 2012.26:720-726, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000180.

Hamidavi T., Abrishami S., Ponterosso P., Begg D., (2018), Optimisation of Structural Design by Integrating Genetic Algorithms in the Building Information Modelling Environment,

World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:12, No:9, DOI: 10.5281/zenodo.1474597

Hamidavi T., Abrishami S., Ponterosso P., Begg D., (2018), Optimisation of Structural Design by Integrating Genetic Algorithms in the Building Information Modelling Environment, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:12, No:9, DOI: 10.5281/zenodo.1474597

Hamidavi T., Abrishami S., Ponterosso P., Begg D., (2019), Optimisation of conceptual structural design in BIM, Conference: 21st Young Researchers' Conference 2019 (Institution of Structural Engineers IStructE), DOI: 10.13140/RG.2.2.28546.12486.

Harris V. (2019), BIM in South Africa, 2019 Global Report, [Consulté le 23 Janvier 2020], <https://www.biminstitute.org.za/bim2019report/>.

Hicham S. (2018), Can computers design buildings? What automation means to architects, [Consulté le 03 Février 2020], <https://www.geospatialworld.net/article/can-computers-design-buildings-what-automation-means-to-architects/>.

Hu Z.-Z., Zhang X.-Y., Wang H.-W., Kassem M., (2016), Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools, Automation in Construction, Volume 66, pp 29-42, [Consulté le 14 Septembre 2018], <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.001>.

Hugo M. (2016), Maquette numérique 3D pour la construction : visualiser les connaissances métier et interagir avec des dispositifs immersifs, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, France, [Consulté le 20 Octobre 2019], <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707797>.

Hugo M. (2016), Maquette numérique 3D pour la construction : visualiser les connaissances métier et interagir avec des dispositifs immersifs, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, France. [Consulté le 20 Octobre 2019], <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01707797>.

Hutchinson T., Wang X., Hegemier G., Meacham B., Kamath P., Sesma F., Holcomb K., (2017), Earthquake and post-earthquake fire performance of a midrise cold-formed steel framed building, Conference : SEAOC , [Consulté le 24 Janvier 2021], https://www.researchgate.net/publication/327262082_Earthquake_and_post-earthquake_fire_performance_of_a_mid-rise_cold-formed_steel_framed_building.

ICT Report (2016), Inquiry into the role of smart ICT in the design and planning of infrastructure, The Parliament of Australia, [Consulté le 22 Janvier 2020], https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/House/ITC/Smart_ICT

ISE (2012), The Institution of Structural Engineers, Element size estimation, Technical Guidance Note, Vol 90, No 17, Level 1, October 2012, https://www.academia.edu/5657028/TheStructuralEngineer_28_Technical_Guidance_Note.

Jin R., Zuo J., Hong, J. (2019), Scientometric Review of Articles Published in ASCE's Journal of Construction Engineering and Management from 2000 to 2018, 145(8): 06019001, American Society of Civil Engineers, DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001682.

Johnson G., Gross M.D., Hong J., and Do E.Y., (2009), Computational Support for Sketching in Design: A Review, Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction, 2(1), 1-93. DOI: 10.1561/1100000013

Jootoo A., Lattanzi D., (2018), Extraction of Structural System Designs from Topologies via Morphological Analysis and Artificial Intelligence, MDPI, *Designs* 2018, 2, 8; <https://doi.org/10.3390/designs2010008>

K. Kim, Walewski J., Cho Y.K. (2016), Multiobjective construction schedule optimization using modified niched pareto genetic algorithm, *Journal of Management in Engineering* 32(2):04015038, , [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000374](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000374).

Kazi R. H., Grossman T., Cheong H., Hashemi A., Fitzmaurice G., (2017), DreamSketch: Early Stage 3D Design Explorations with Sketching and Generative Design, UIST conference, Quebec, Canada, Association for Computing Machinery ACM, ISBN 978-1-4503-4981-9/17/10, [Consulté le 20 Aout 2020], <https://doi.org/10.1145/3126594.3126662>.

Kulkarni A., Dabir V., (2016), Study of variations in dynamic stability of tall structure corresponding to shear wall positions : Case Study, *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, ISSN (e): 2250 – 3005, Volume 06, Issue, 05, [Consulté le 20 Décembre 2020], http://www.ijceronline.com/papers/Vol6_issue5/B06506011.pdf

Lee J., Hyun H., (2019), Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms, *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, ISSN 0733-9364, 145(1):04018116, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001585](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001585)

Liu B., Wang M., Zhang Y., Liu R., & Wang A. (2017), Review and Prospect of BIM Policy in China, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245, [Consulté le 22 Janvier 2020], doi:10.1088/1757-899X/245/2/022021, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/2/022021/pdf>.

Lorenzon G. D., Martino A. D., (2019), Earthquake Response of Cold-Formed Steel-Based Building Systems: An Overview of the Current State of the Art, *MDPI Journal, Buildings*, 228; DOI:10.3390/buildings9110228,

McGraw-Hill Construction (2014), *The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How contractors Around the World are Driving Innovation With Building Information Modeling, Design and Construction Intelligence – SmartMarket Report*, [Consulté le 02 Février 2020], https://www.icn-solutions.nl/pdf/bim_construction.pdf.

Mehran D. (2016), Exploring the Adoption of BIM in the UAE Construction Industry for AEC Firms, *Procedia Engineering* 145:1110-1118, [Consulté le 22 Janvier 2020], DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.144

Men J., Shi Q., He Z., (2014), Optimal design of tall residential building with RC shear wall and rectangular layout, *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol 3, N° 4, 285-296, [Consulté le 20 Décembre 2020], <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2253-optimal-design-of-tall-residential-building-with-rc-shear-wall-and-with-rectangular-layout.pdf>

Mora R., Rivard H., Bédard C., (2006), Computer representation to support conceptual structural design within a building architectural context, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 76-87, DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:2(76).

Mora R., Rivard H., Bédard C., (2006), Computer representation to support conceptual structural design within a building architectural context, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 76-87, DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:2(76)

National Building Information Modeling Standard, (2007), Version 1, Part 1: Overview, Principles, and Methodologies, Transforming the building Supply Chain Through Open and Interoperable Information Exchange, 1st Edition [Consulté le 19 Janvier 2020], https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf

National Building Specification NBS (2020), National BIM Library, Newcastle upon Tyne, UK, [Consulté le 21 Janvier 2020], <http://www.nationalbimlibrary.com/>.

National Institute of Building Sciences NIBS (2015), National BIM Standard United States Version 3, Washington DC, USA, [Consulté le 21 Janvier 2020], <http://www.nationalbimstandard.org/>.

Navisworks, [Consulté le 06 Janvier 2020], <https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview>

NBIMI (2012), National Building Information Modelling Initiative, Vol.1. A strategy for the focussed adoption of building information modelling and related digital technologies and processes for the Australian built environment sector, Report to the Department of Industry, Innovation, Science, Research and Tertiary Education, Sydney, Australia, buildingSMART Australasia , [Consulté le 22 Janvier 2020], https://buildingsmart.org.au/wp-content/uploads/2014/03/NationalBIMInitiativeReport_6June2012.pdf.

NIBS (2015), National BIM Standard United States Version 3, National Institute of Building Sciences, Washington DC, USA, [Consulté le 31 Décembre 2019] <http://www.nationalbimstandard.org/>

Ogwueleka A. C., Ikediashi D. I. (2017), The Future of BIM Technologies in Africa: Prospects and Challenges, Integrated Building Information Modelling, Doi: 10.2174/9781681084572117010016, [Consulté le 23 Janvier 2020], https://www.researchgate.net/publication/318654090_The_Future_of_BIM_Technologies_in_Africa_Prospects_and_Challenges.

Pardeshi R. T., Bhadange P. M., Hasija S. V., Khan Mayur S. I., Marade B., Pansare R. H., Rupchandani K. M., (2017), Analysis of Irregular High-rise Building Using Shear Walls at Different Locations, International journal of recent trends in engineering and research, IJRTER, Volume 03, Issue 02, [ISSN: 2455-1457], [Consulté le 20 Décembre 2020], <https://www.ijrter.com/papers/volume-3/issue-2/analysis-of-high-rise-irregular-shape-building-with-shear-wall-at-different-locations.pdf>

PennState College of Engineering (2019), BIM Uses within the BIM Project Execution Plan, The Computer Integrated Construction Research Group, The Pennsylvania State University, State College, PA, USA, [Consulté le 31 Décembre 2019], <http://bim.psu.edu/uses/>

Pinot G. (2019), Comment l'intelligence artificielle bouleverse t'elle la notion d'usage ?, [Consulté le 20 Octobre 2019], <https://www.construction21.org/france/articles/fr/comment-l-ia-bouleverse-t-elle-la-notion-d-usage.html>

Plan Transition Numérique dans le Bâtiment PTNB (2016), Guide de Recommandation à la maîtrise d'ouvrage. Paris, France, [Consulté le 21 Janvier 2020], <http://www.batiment-numerique.fr/uploads/DOC/Guides%20et%20Etudes/PTNB%20-%20Guide%20Methodo%20MOA.pdf>

Plumier A., Doneux C., Caporaletti V., Ferrario F., Stoica D., (2003), Guide technique parasismique Belge pour maisons individuelles, Département M&S de l'Université de Liège.

René I., (2018), Evaluation of a Novel Approach for Automated Inventive Conceptual Design of Building Structures, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 12 (2018) 550-562, DOI: 10.17265/1934-7359/2018.08.002

René I., Chechurin L., (2016), Application of TRIZ in building industry: study of current situation, *Procedia CIRP* Volume 39, Pages 209-215, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.190>

René I., Chechurin L., Perlova E., (2017), Early design stage automation in Architecture-Engineering-Construction (AEC) projects, Conference: the 35th eCAADe, Volume: 1, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, [Consulté le 20 décembre 2020], https://www.researchgate.net/publication/320034398_Early_design_stage_automation_in_Architecture-Engineering-Construction_AEC_projects

Rgd (2020), The Central Government Real Estate Agency – BIM Standard, Rijksgebouwendients, The Netherlands [Consulté le 21 Janvier 2020], <https://english.rijksvastgoedbedrijf.nl/expertise-and-services/b/building-information-modelling-bim>.

Rivard H., Fenves S. J., (2000), A representation for conceptual design of buildings, *Journal of Computing in Civil Engineering* 14(3), DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2000)14:3(151).

RPA99v2003, Règles parasismiques Algériennes RPA99 version 2003 – DTR BC 2.48, Centre national de recherche appliquée en génie parasismique, Alger, Janvier 2004, ISBN 9961-923-13-8.

Saka A. B., Chan D. W. M., (2019), A Scientometric Review and Metasynthesis of Building Information Modelling (BIM) Research in Africa, *MDPI – Buildings* 9(4)-85, doi:10.3390/buildings9040085, [Consulté le 23 Janvier 2020], <https://www.mdpi.com/2075-5309/9/4/85>.

Salehi H., Burgueño R., (2018), Emerging artificial intelligence methods in structural engineering, *Engineering Structures* 171 : 170–189, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>.

Shukla A. K., Janmajaya M., Abraham A., Muhuri P. K., (2019), Engineering applications of artificial intelligence: A bibliometric analysis of 30 years (1988–2018), *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 85 - 517-5132, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.010>.

Sid B., (2006), Optimisation Topologique de Structures par Algorithme Génétiques, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Science pour l'Ingénieur et Microtechniques, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France.

Singh P., (2018), Application of emerging artificial intelligence methods in structural engineering-a review, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 05 Issue: 11 / Nov 2018, e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072, [Consulté le 20 décembre 2020], <https://www.irjet.net/archives/V5/i11/IRJET-V5I11164.pdf>

Skoudarli A., Sereir El Hirts A., (2020), Optimization of Cold Formed Steel Structures Using Genetic Algorithm in a BIM Environment, Thèse Master, Département de génie civil, Ecole nationale polytechnique, 2020.

SmartMarket Report (2017), The Business value of the BIM in the Middle East, Design and Construction Intelligence, Dodge Data & Analytics, [Consulté le 22 Janvier 2020], <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/business-value-of-bim-in-middle-east-smr-2017-1.pdf>.

Smith L., Kron Z., Ransom L., Smolker D., (2020), Generative Design For Architecture, Engineering & Construction, [Consulté le 20 Aout 2020], <https://blogs.autodesk.com/revit/2020/04/08/generative-design-in-revit/>.

Soibelman L., Pena-Mora F., (2000), Distributed multi-reasoning mechanism to support conceptual structural design, Journal of Structural Engineering, vol. 126, no. 6, pp. 733-742, ref 29, ISSN: 0733-9445.

Solibri, About BIM & IFC, [Consulté le 19 Janvier 2020], <https://www.solibri.com/bim-ifc>

Souquet A., François-Gérard R., (2004), Algorithmes Génétiques, Thèse de fin d'année, Tutorat de Mr Philippe Audebaud, [Consulté le 20 Octobre 2020], <http://deptinfo.unice.fr/twiki/pub/Linfo/PlanningDesSoutenances20032004/Radet-Souquet.pdf>

SSSB (2016), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, An American National Standard, [Consulté le 24 Janvier 2021], <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16-spec-and-commentary.pdf>.

Staatsbygg, Norway (2020), BIM Manual V 1.2.1. [Consulté le 21 Janvier 2020], <https://www.statsbygg.no/Files/publikasjoner/manualer/StatsbyggBIM-manual-ver1-2-1eng-2013-12-17.pdf> (Accessed January 21, 2020).

Stone J. R., Blockley D. I., Pilsworth B. W., (1989), Towards machine learning from case histories Stone, Civil Engineering Systems, 6:3, 129-135, DOI: 10.1080/02630258908970553.

Su R.K.L., Wong S.M., (2007), Seismic behaviour of slender reinforced concrete shear walls under high axial load ratio, Engineering Structures, Volume 29, Issue 8, Pages 1957-1965, August 2007, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.020>

Sud A., Shekhawat R. S., Dhiman P., (2014), Effect of different shear wall configurations on seismic response of a moment-resisting frame, European Scientific Journal /SPECIAL/ edition ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431, [Consulté le 20 Décembre 2020], <https://core.ac.uk/download/pdf/236409938.pdf>

Tang T.O., Su R.K.L., (2014), Shear and flexural stiffnesses of reinforced concrete shear walls subjected to cyclic loading, The Open Construction and Building Technology Journal, 8 104-121, <http://dx.doi.org/10.2174/1874836801408010104>.

Tareq M. A. (2019), Study on the Development of BIM/DPD Around the World and Relevant Application in Western Canada, , BuildWorks Canada, [Consulté le 22 Janvier 2020], <https://www.edmca.com/media/284369/study-on-the-development-of-bim-dpd-around-the-world-and-relevant-application-in-western-canada.pdf>.

Tchoussonnou Y. S. S., (2015), A brief comparison between the eurocode 3 and american aisc-360 in the design of large span structures, Department of Civil Engineering, Architecture and Building, Coventry University, [Consulté le 24 Janvier 2021], DOI: 10.13140/RG.2.1.4404.4966.

TEKLA BIMsight, [Consulté le 06 Janvier 2020], <https://www.tekla.com/tekla-bimsight/>

Tjell J. (2010), Building Information Modeling (BIM) - in Design Detailing with Focus on Interior Wall Systems, Thèse de Master. The Technical University of Denmark conducted at University of California, Berkeley, USA, [Consulté le 31 Octobre 2019], https://buildingsmart.no/sites/buildingsmart.no/files/2010_ucb-dtu_janni_tjell.pdf

U.S General Services Administration GSA (2020), 3D-4D Building Information Building, GSA BIM Guide Series, Washington, D.C., USA, [Consulté le 21 Janvier 2020], <https://www.gsa.gov/real-estate/design-construction/3d4d-building-information-modeling>

Valente C. (2015), Le BIM (Maquette numérique) et la préparation du chantier, Méthodes BTP 2015, [Consulté le 09 Janvier 2020], <https://methodesbtp.com/articles/bim-preparation-chantier-batiment/>

Van Berlo L. (2020), IFC Specifications DataBase, BuildingSmart International, [Consulté le 19 Janvier 2020], <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>

Van Nederveen, G. A., Tolman, F.P., (1992), Modelling multiple views on buildings, Automation in Construction 1(3), pp 215–224. doi:10.1016/0926-5805(92)90014-B

Wai-Fah C., Yu W-W., (1999), Structural Engineering Handbook, Cold-formed-steel structures, Section Seven, (Editor) CRC Press LLC, ISBN 10: 0849326745.

Wolford D. S., Yu W.W., (2004), Standard Handbook for Civil Engineers (Fifth edition), Cold-formed-steel design and construction (Section Ten), (Editor) Accessed on Digital Engineering Library @ McGraw-Hill (www.digitalengineeringlibrary.com) Copyright The McGraw-Hill Companies.

Yazdani H., Khatibinia M., Gharehbaghi S., Hatami K., (2017), Probabilistic performance based optimum seismic design of RC structures considering soil–structure interaction effects, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 3 (2) : G4016004, <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000880>.

Yu W.W., LaBoube R. A., (2010), Cold-formed-steel design and construction (Fourth Edition), (Editor) Copyright by John Wiley & Sons, Inc, ISBN 978-0-470-46245-4.

Zacek M., (2003), Conception parasismique niveau avant-projet, Collection conception parasismique. ISBN : 2-913962-00-9.