



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا



Faculty of Sciences and Technology  
نيابة عمادة الكلية المكلفة بما بعد التدرج والبحث العلمي والعلاقات الخارجية  
ViceDeanship of Post-Graduate, Scientific Research and External Relations

# THÈSE

En vue de l'obtention du  
Diplôme de Doctorat

*Présentée par :*

**Mr TERKI HASSAINE Mohammed Issam Eddine**

*Intitulé*

## **Optimisation des Structures du Génie Civil par Application des Méthodes Heuristiques et de l'Analyse Multicritère**

**Domaine** : Sciences & Technologie  
**Filière** : Génie Civil  
**Option** : Optimisation des Structures

*Soutenue publiquement devant le jury composé de :*

<b>Nom &amp; Prénom</b>	<b>Qualité</b>	<b>Etablissement de rattachement</b>
Pr. KADRI Tahar.	Président	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Pr. DJEDID Abdelkader	Examineur	Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen
Pr. OUISSI Mohammed Nabil	Examineur	ENIV (Ecole National des Ingénieurs de la Ville)
Dr. BENSOUA Mohamed	Examineur	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Pr. BOURDIM Sidi Mohammed El- Amine	Directeur de Thèse	Centre Universitaire de Maghnia
Dr. ZELMAT Yassine	Co-directeur de Thèse	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

Année Universitaire  
2023/2024

# Remerciements

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers le Tout-Puissant, le BON DIEU ALLAH, pour m'avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires tout au long de cette recherche.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur BOURDIM Sidi Mohammed El Amine, ainsi qu'à mon co-directeur de thèse, M. ZELMAT Yassine, sans oublier Professeur A. BENANANE pour m'avoir offert l'opportunité de rejoindre l'équipe de recherche. Je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour la confiance, la disponibilité, la rigueur et les précieux conseils qu'ils m'ont apportés pendant la réalisation de ce travail de recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers le Président Pr KADRI Tahar et les membres du jury, à savoir le Professeur DJEDDID Abdelkader, le Professeur OUISSI Mohammed Nabil, ainsi que Dr. BENSOULA Mohamed pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant respectivement de présider et de participer au jury de soutenance.

Je profite de cette occasion pour remercier chaleureusement le Directeur du laboratoire (L.M.P.C) Dr ZAOUI Mohammed ainsi et tous mes collègues, qu'ils aient contribué de près ou de loin au bon déroulement de mes travaux au cours de mes années de thèse.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toute ma famille, qui m'a constamment encouragé et soutenu, ainsi qu'envers ma femme, qui m'a accompagné dans toutes mes décisions. Sans elle, je n'aurais jamais atteint mes objectifs.

# Résumé

Avec le développement d'outils informatiques, la conception assistée par ordinateur est devenue un moyen concret aujourd'hui. Les outils de calcul sont généralement destinés à la phase initiale de conception des projets, tandis que les outils permettant une conception préliminaire avant-projet sont rares. La phase de conception présente souvent des situations contradictoires dans le cycle de vie d'un projet de construction. Pour s'assurer de la faisabilité du travail en termes de contraintes structurelles et de mise en œuvre, diverses techniques de traitement doivent être utilisées. Dans cette thèse, nous proposons un cheminement pour résoudre le problème de conception globale d'une structure métallique bidimensionnelle en utilisant la méthode des Algorithmes d'optimisation. Nous adoptons un modèle mathématique modifié pour la conception de structures métalliques à barres subissant des déformations plastiques. Cette approche globale prend en compte les dimensions spécifiques des éléments de la structure ainsi que leur rigidité. Il est également essentiel de considérer la nature des appuis au sol et la conception des assemblages. En prenant en compte ces facteurs, nous pouvons obtenir des solutions optimales répondant aux exigences de performance et de sécurité de la structure. Pour minimiser le volume de la structure, une évaluation de la dispersion des caractéristiques géométriques des profilés HEA et IPE a été réalisée. L'algorithme utilisé pour résoudre le problème d'optimisation de programmation non linéaire sous contraintes est implémenté dans un environnement expérimental MATLAB. Cette tâche est donc essentielle et inévitable, car elle pourrait avoir des impacts très bénéfiques sur le plan macro-économique de notre pays.

Nous avons réalisé des analyses non linéaires sur un portique 2D et les avons comparées pour trois configurations optimisées différentes. Bien que cette étude présente certaines limitations, les résultats suggèrent qu'il est essentiel d'intégrer plusieurs paramètres dans un algorithme pour sélectionner de manière efficace les profils les plus adaptés pour la conception d'un portique métallique conforme aux normes réglementaires, tout en minimisant le poids et les coûts. Notre vision future consiste à formaliser des règles expertes qui pourraient considérablement aider les ingénieurs des bureaux d'études à prendre les bonnes décisions dès le début de la phase de conception des projets de construction métallique.

**Mots-Clés** : Optimisation ; Algorithmes génétiques ; Conception optimale; Vulnérabilité ; Méthode Push-over ; Comportement non linéaire ; Programmation.

# ***Abstract***

With the development of computer tools, computer-aided design has become a concrete means today. Calculation tools are generally intended for the initial phase of project design, while tools for preliminary design before a project are rare. The design phase often presents contradictory situations in the life cycle of a construction project. To ensure the feasibility of the work in terms of structural constraints and implementation, various processing techniques must be used. In this thesis, we propose a path to solve the problem of overall design of a two-dimensional metal structure using the Optimization Algorithms method. We adopt a modified mathematical model for the design of metal structures with bars undergoing plastic deformations. This comprehensive approach takes into account the specific dimensions of the structure's elements as well as their rigidity. It is also essential to consider the nature of the ground supports and the design of the assemblies. By taking these factors into account, we can obtain optimal solutions that meet the performance and safety requirements of the structure. To minimize the volume of the structure, an evaluation of the dispersion of geometric characteristics of HEA and IPE profiles has been performed. The algorithm used to solve the nonlinear programming optimization problem under constraints is implemented in an experimental MATLAB environment. This task is therefore essential and unavoidable, as it could have very beneficial impacts on the macroeconomic level of our country.

We have conducted nonlinear analyses on a 2D steel frame and compared them for three different optimized configurations. Although this study has some limitations, the results suggest that it is essential to incorporate multiple parameters into an algorithm to effectively select the most suitable profiles for the design of a metal portal frame in compliance with regulatory standards, while minimizing weight and costs. Our future vision is to formalize expert rules that could significantly assist engineers in design offices in making the right decisions at the beginning of the metal construction project design phase.

**Keywords:** Optimization; Genetic algorithms; Optimal design; Vulnerability; Push-over method; Nonlinear behavior; Programming.

# ملخص

مع تطور أدوات الكمبيوتر، أصبح التصميم بمساعدة الكمبيوتر وسيلة ملموسة اليوم. أدوات الحساب مخصصة بشكل عام لمرحلة التصميم الأولي للمشاريع، في حين أن الأدوات التي تسمح بالتصميم الأولي قبل المشروع نادرة. غالبًا ما تعرض مرحلة التصميم مواقف متناقضة في دورة حياة مشروع البناء. ولضمان جدوى العمل من حيث القيود الهيكلية والتنفيذية، يجب استخدام تقنيات المعالجة المختلفة. في هذه الأطروحة، نقترح طريقاً لحل مشكلة التصميم الشاملة لهيكل معدني ثنائي الأبعاد باستخدام طريقة خوارزميات التحسين. تم اعتماد نموذج رياضي معدل لتصميم هيكل القضبان المعدنية التي تتعرض للتشوه البلاستيكي. يأخذ هذا النهج العالمي في الاعتبار الأبعاد المحددة للعناصر الهيكلية بالإضافة إلى صلابتها. ومن الضروري أيضاً مراعاة طبيعة الدعامات الأرضية وتصميم التجميعات. ومن خلال أخذ هذه العوامل في الاعتبار، يمكننا الحصول على حلول مثالية تلبى متطلبات الأداء والسلامة للهيكلي. لتقليل حجم الهيكل، تم إجراء تقييم لتشتت الخصائص الهندسية لعناصر HEA و IPE. تم تطبيق الخوارزمية المستخدمة لحل مشكلة تحسين البرمجة غير الخطية المقيدة في بيئة MATLAB التجريبية. وبالتالي فإن هذه المهمة ضرورية ولا مفر منها، لأنها يمكن أن يكون لها آثار مفيدة للغاية على مستوى الاقتصاد الكلي لبلدنا.

لقد أجرينا تحليلات غير خطية على جسر ثنائي الأبعاد وقمنا بمقارنتها بثلاثة تكوينات محسنة مختلفة. على الرغم من أن هذه الدراسة لديها بعض القيود، تشير النتائج إلى أنه من الضروري دمج العديد من المعلومات في خوارزمية لتحديد الملفات الأكثر ملاءمة بكفاءة لتصميم جسر معدني يتوافق مع المعايير التنظيمية، مع تقليل الوزن والتكاليف. تتمثل رؤيتنا المستقبلية في إضفاء الطابع الرسمي على قواعد الخبراء التي يمكن أن تساعد بشكل كبير مهندسي مكاتب الدراسات على اتخاذ القرارات الصحيحة منذ بداية مرحلة التصميم لمشاريع الإنشاءات المعدنية.

**الكلمات المفتاحية:** التحسين؛ الخوارزميات الجينية؛ التصميم الأمثل؛ الضعف؛ طريقة الدفع؛ السلوك غير الخطي؛ البرمجة .

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	III
<b>Abstract</b> .....	IV
<b>ملخص</b> .....	V
<b>Table des matières</b> .....	VI
<b>Liste des figures</b> .....	X
<b>Liste des tableaux</b> .....	XII
<b>Acronymes</b> .....	XIII
<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b><u>Chapitre I Etat de l'Art et formulation du problème</u></b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	4
<b>I.2 But du présent chapitre</b> .....	6
<b>I.3 Présentation mathématique d'un problème d'optimisation.</b> .....	7
<b>I.4 Aspect du problème</b> .....	8
<b>I.4.1 Problème linéaire - résolu par les méthodes Simplex ou Graphique.</b> .....	9
<b>I.5 Domaine d'étude : La conception globale en charpente métallique CM</b> .....	10
<b>I.6 L'acier dans la construction : les atouts d'un choix</b> .....	10
<b>I.7 Revue de quelques méthodes d'optimisation</b> .....	12
<b>I.7.1 Les algorithmes évolutionnaires (AEs)</b> .....	12
<b>I.7.1.1 Progression des espèces</b> .....	13
<b>I.7.1.2 Vue générale sur les algorithmes évolutionnaires (AEs)</b> .....	13
<b>I.7.2 État actuel de la technique des AEs et hyper heuristiques</b> .....	15
<b>I.8 Les méthodes stochastiques</b> .....	16
<b>I.8.1 Définition</b> .....	16
<b>I.8.2 Techniques de recherche</b> .....	16
<b>I.8.2.1 les méthodes exactes</b> .....	17
<b>I.8.2.2 les méthodes approchées</b> .....	18
<b>I.8.3 Les concepts de recherche par voisinages</b> .....	18
<b>I.8.3.1 La technique de descente</b> .....	18
<b>I.8.3.2 Le recuit simulé</b> .....	19
<b>I.8.3.3 La recherche tabou (TS)</b> .....	20
<b>I.8.4 La classe des AEs</b> .....	20
<b>I.8.5 Optimisation par le concept de colonie de fourmis (ACO)</b> .....	21
<b>I.9 Analyse comparative des algorithmes</b> .....	22
<b>I.10 Comparaison des techniques d'apprentissage</b> .....	23
<b>I.11 Conclusion</b> .....	25

## **Chapitre II Les Algorithmes Génétiques : Méthodes et Domaines d'utilisation**

II.1 Introduction .....	27
II.2 Quelques détails sur les algorithmes génétiques (AGs) .....	28
II.2.1 Analogie avec la biologie et terminologie commune aux deux disciplines .....	28
II.2.2 Origines.....	28
II.2.3 Outils bio inspirés .....	29
II.2.4 Cycle opérationnel d'un Algorithme Génétique (AG).....	30
II.3 Le rôle et les bienfaits des AGs .....	32
II.3.1 La programmation non linéaire.....	32
II.3.2 Définition de l'optimum global et l'optimum local.....	33
II.4 Quelques exemples d'application.....	34
II.5 Règle générale d'un AG .....	34
II.6 Mode opératoire des AGs .....	36
II.7 Le codage.....	38
II.8 La sélection.....	40
II.8.1 La loterie biaisée ou roulette Wheel .....	40
II.8.2 La technique élitiste.....	41
II.8.3 La sélection par tournois.....	41
II.8.4 La sélection universelle stochastique.....	42
II.9 L'opérateur de croisement ou crossover .....	42
II.10 L'opérateur de mutation.....	44
II.11 L'opérateur de remplacement .....	45
II.12 Un petit exemple simple utilisant les différents opérateurs .....	46
II.12.1 Tirage et estimation de la population initiale.....	47
II.12.2 La sélection .....	47
II.12.3 Le croisement.....	48
II.12.4 La mutation .....	48
II.12.5 Retour à la phase d'évaluation .....	49
II.13 Exemple concret sur les AGs : problème du voyageur de commerce .....	50
II.13.1 Représentation du problème.....	50
II.13.2 L'espace de recherche.....	50
II.13.3 Codage des points de l'espace de recherche.....	50
II.13.4 Représentation d'une solution.....	51
II.13.5 Sélection .....	51
II.13.6 Croisement .....	52
II.13.7 Mutation .....	52
II.13.8 Calcul de fitness ou fonction d'évaluation.....	53
II.13.10 Point de comparaison de complexité .....	53
II.14 Conclusion .....	55

### Chapitre III Difficultés posées par les structures métalliques

III.1 Introduction .....	57
III.2 Les premières étapes du processus de fabrication du bâtiment à ossature métallique .....	57
III.3 Le procédé classique de concevoir une construction métallique .....	58
III.4 Objectifs poursuivis par la recherche .....	58
III.5 Formulation du problème général lié à la conception.....	59
III.5.1 Formulation implicite du problème d'optimisation .....	59
III.5.2 Critères d'optimisation .....	60
III.5.3 Description générale des éventuels critères d'optimisation .....	60
III.6 Les changements dans l'optimisation.....	63
III.7 Description globale des variables conceptuelle.....	63
III.8 A propos des contraintes .....	66
III.8.1 Développement du règlement en construction métallique.....	66
III.8.2 Les contraintes réglementaires à l'égard de la sécurité d'ouvrage .....	67
III.8.3 Conception des structures en CM .....	68
III.8.4 Quelques notions générales sur la modélisation d'une structure .....	68
III.8.5 Systèmes supportant les structures de bâtiments .....	69
III.8.5.1 Ossatures articulées .....	70
III.8.5.2 Ossatures en cadres rigides.....	70
III.8.5.3 Ossatures semi-rigides .....	71
III.8.6 Le règlement EUROCODE 3 et ses caractéristiques.....	72
III.9 Choix des méthodologies analytiques - classification .....	72
III.9.1 Analyse plastique.....	73
III.9.2 Classification des sections transversales .....	74
III.9.3 Classification des structures – Effets du second ordre .....	75
III.9.3.1 Prise en compte des imperfections structurelles .....	77
III.9.3.2 Choix de la méthode d'analyse .....	78
III.9.4. Combinaisons d'actions selon l'EUROCODE 3 .....	79
III.9.4.1 Combinaisons aux Etats Limites Ultimes (ELU) .....	80
III.9.4.2 Combinaisons aux Etats Limites de Service.....	81
III.9.4.3 Coefficients de sécurité .....	82
III.9.5. Critères de justification des structures aux états limites ultimes.....	83
III.9.5.1 Limitation des déformations des éléments fléchis.....	83
III.9.5.2 Limitation des déformations horizontales d'ossatures.....	83
III.9.6. Vérification des sections transversales aux E.L.U.....	84
III.10 Conception des systèmes de fondations des structures métalliques...85	
III.10.1 Dimensionnement des attaches en pied de poteau .....	86
III.10.1.1. Dimensionnement de la platine .....	86
III.10.1.2. Dimensionnement des tiges d'ancrage .....	88
III.11 Conclusion.....	89



## Chapitre IV Application des algorithmes génétiques aux structures métalliques

<b>IV.1 Introduction</b> .....	91
<b>IV.2 Les critères d'optimisation</b> .....	91
<b>IV.3 Les variables retenues</b> .....	93
<b>IV.4 Les caractéristiques dimensionnelles des éléments et codage</b> .....	93
<b>IV.4.1 Les caractéristiques dimensionnelles des éléments</b> .....	93
<b>IV.4.2 Codage des solutions de conception</b> .....	94
<b>IV.5 Le type des assemblages et appuis</b> .....	95
<b>IV.5.1 Les assemblages</b> .....	95
<b>IV.5.2 Le type des appuis</b> .....	98
<b>IV.6 L'optimisation en construction métallique avec les AGs</b> .....	99
<b>IV.6.1 Evaluation des chromosomes</b> .....	99
<b>IV.6.2 Vérification des contraintes</b> .....	99
<b>IV.7 Opérateurs des AGs</b> .....	100
<b>IV.7.1 Sélection</b> .....	100
<b>IV.7.2 Croisement</b> .....	100
<b>IV.7.3 Mutation</b> .....	102
<b>IV.8 Application de quelques approches spécifiques en optimisation</b> .....	103
<b>IV.8.1 Hypothèses et données communes aux trois approches</b> .....	104
<b>IV.8.2 Calcul structural et détaillé des trois variantes avec analyse des résultats</b> .....	106
<b>IV.8.2.1 ROBOT Millenium :</b> .....	106
<b>IV.8.2.2 SAP2000 avec Pushover Analysis :</b> .....	107
<b>IV.8.2.3. Comparaison des résultats des variantes traitées</b> .....	115
<b>IV.8.2.4. Vérification</b> .....	115
<b>IV.8.2.5. Méthode de Monte Carlo</b> .....	116
<b>IV.8.2.6. Méthode des Pareto</b> .....	120
<b>IV.8.2.7. Méthode des AGs</b> .....	124
<b>IV.8.2.6. Etude comparative et interprétations des résultats entre les trois méthodes</b> .....	130
<b>IV.8.2.7. Exploitation des résultats</b> .....	132
<b>IV.9 Conclusion :</b> .....	133
<b>Conclusion Générale</b> .....	135
<b>Perspectives</b> .....	137
<b>Bibliographie</b> .....	139

# Liste des figures

Figure I. 1: <i>Principe du « plus court chemin »</i> (Héron d'Alexandrie, 1 <sup>er</sup> siècle Après J-C)	6
Figure I. 2 : Solution d'un problème par les méthodes simplex ou graphique	9
Figure I. 3 : Représentation du minimum local et global d'une fonction.	10
Figure I. 4 : Exemple de minimisation de $f(x)$	17
Figure I. 5 : Les espaces des individus reliés par des décisions et des objectifs	20
Figure II. 1 : Organigramme canonique d'un algorithme génétique (AG).	31
Figure II. 2: Optimum global vs optimum local	33
Figure II. 3: Principe général des algorithmes génétiques.	35
Figure II. 4 : Principe général de la méthode « diviser pour régner »	37
Figure II. 5: <i>Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique</i>	39
Figure II. 6: Une illustration schématique du codage des variables réelles.	39
Figure II. 7: Sélection par la méthode de la roue de loterie.	40
Figure II. 8: Quelques Cas de croisement.	43
Figure II. 9: Exemple d'une mutation.	44
Figure II. 10: Sélection de la population par la méthode de la roue de loterie biaisée	47
Figure II. 11: Exemple de modélisation du graphe sous forme de matrice	50
Figure II. 12: codage d'une solution pour un ensemble de villes dans un tableau.	51
Figure II. 13: Exemple de croisement.	52
Figure II. 14: Exemple de mutation	52
Figure III. 1: Critères de conception.	63
Figure III. 2: Schéma de principe d'une semelle avec la profondeur D.	65
Figure III. 3: Vue de l'ensemble d'une structure de type halle industrielle	68
Figure III. 4: Représentation unifilaire d'un portique	69
Figure III. 5: Ossature d'un bâtiment à étages	69
Figure III. 6: Ossature articulée et contreventée	70
Figure III. 7: Ossature avec cadres rigides	70
Figure III. 8: Forces équivalentes aux effets du second ordre	75
Figure III. 9: Imperfections globales des ossatures	78
Figure III. 10: <i>Organigramme de calcul élastique des sollicitations avec vérification des poteaux pour des bâtiments courants</i>	79
Figure III. 11: Conception des pieds de poteaux articulés et encasté	86
Figure III. 12: Schéma de surface en compression sous la plaque d'assise	87
Figure III. 13: Schéma de surface portante effective	87
Figure III. 14: Exemple d'une ligne de pliage d'une plaque d'assise	88
Figure III. 15: Schéma d'une Tige d'ancrage	88
Figure IV. 1: Structure d'un chromosome.	94
Figure IV. 2: Différents types d'assemblages poutre-poteau (Nizar 2003)	97
Figure IV. 3: Différents types d'assemblages poutre-poutre (Nizar 2003)	97
Figure IV. 4: Dispositions des attaches en pieds de poteaux.	98
Figure IV. 5: Exemple de procédure de croisement entre deux chromosomes.	101
Figure IV. 6: Exemple d'une représentation de mutation dans un chromosome	103

<b>Figure IV. 7: Modélisation de la structure en 2D avec sections de profilés</b>	<b>104</b>
<b>Figure IV. 8: Courbe de capacité pour les trois variantes</b>	<b>109</b>
<b>Figure IV. 9: Rotules plastiques pour les trois variantes</b>	<b>110</b>
<b>Figure IV. 10: Paramètres de performance pour les trois variantes</b>	<b>111</b>
<b>Figure IV. 11: Schéma d'un portique simple</b>	<b>116</b>
<b>Figure IV. 12: Fenêtres de programmation (Monte Carlo) avec l'éditeur MATLAB</b>	<b>119</b>
<b>Figure IV. 13: Fenêtres de programmation (Pareto) avec l'éditeur MATLAB</b>	<b>123</b>
<b>Figure IV. 14: Organigramme de la méthode des AGs</b>	<b>127</b>
<b>Figure IV. 15: Fenêtres de programmation (AGs) avec l'éditeur MATLAB</b>	<b>129</b>
<b>Figure IV. 16: Répartition des coûts d'une construction en C.M</b>	<b>130</b>

# Liste des tableaux

Tableau I. 1: Comparaison des méta-heuristiques étudiées	22
Tableau I. 2: Tableau comparatif des caractéristiques entre quelques méthodes d'optimisation	24
Tableau II. 1: La population initiale	47
Tableau II. 2: Individus sélectionnés par la méthode de la loterie biaisée	48
Tableau II. 3: Application de l'opérateur de croisement par la loterie biaisée	48
Tableau II. 4: Résultat de l'application de l'opérateur de mutation sur les individus engendrés par croisement	49
Tableau II. 5: La nouvelle population après application des différents opérateurs	49
Tableau II. 6: Possibilités de chemins avec temps de calcul en fonction du nombre de villes	54
Tableau II. 7: Possibilités de chemins avec temps de calcul en fonction du nombre de villes	54
Tableau III. 1: Comparaison du gain en résistance obtenu	73
Tableau III. 2 : Combinaisons d'actions aux ELS	82
Tableau III. 3 : Coefficients de combinaison	82
Tableau III. 4: Valeurs de flèches limites	83
Tableau III. 5: Valeurs limites des déformations horizontales d'ossatures	83
Tableau III. 6: Valeurs des facteurs de sécurité	84
Tableau III. 7: Contrainte limite d'adhérence	88
Tableau IV. 1: Codage des profilés standards	93
Tableau IV. 2 : Codage des différents types d'assemblages	96
Tableau IV. 3 : Codage des différents types d'appuis en pieds de poteau	98
Tableau IV. 4: Choix des profilés pour les trois variantes	106
Tableau IV. 5 : Distribution des rotules plastiques	112
Tableau IV. 6: Paramètres de performance	112
Tableau IV. 7: Distribution des rotules plastiques	113
Tableau IV. 8: Paramètres de performance	113
Tableau IV. 9: Distribution des rotules plastiques	114
Tableau IV. 10: Paramètres de performance	114
Tableau IV. 11: Comparaison des résultats des variantes traitées	115

# ***Acronymes***

- ACO** : Optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimization)
- ADN** : Acide Désoxyribo Nucléique
- AEs** : Algorithmes Evolutionnaires
- AGs** : Algorithmes Génétiques
- GLS** : Recherche locale guidée (Guided Local Search)
- SA** : Le recuit simulé (Simulated Annealing)
- SS** : Recherche Scatter (Scatter Search)
- TS** : Recherche tabou
- TSP** : Traveling Salesman Problem (problème du voyageur de commerce)
- VIP** : Importance variable dans la prévision (Variable Importance in Prediction)
- VNS** : Recherche à voisinages variables (Variable Neighbourhood Search)

# ***Introduction Générale***

La recherche de modèles logiques et efficaces pour la conception reste une priorité dans le domaine d'ingénierie civil, et ce malgré tout le progrès obtenu dans ce domaine, sur les plans architectural, technologique et économique. Cependant, il est toujours nécessaire de continuer à améliorer ces travaux ou produits. L'objectif est donc d'optimiser les performances du bâtiment à différents niveaux.

De manière générale, les méthodes utilisées pour résoudre ce problème visent à trouver des solutions optimales globales (Skaržauskas, Jankovski, and Atkočiūnas 2009). Ces méthodes sont généralement regroupées en deux catégories :

- Les approches conventionnelles ;
- Les approches métaheuristiques.

D'une part, les approches conventionnelles reposent sur des modèles mathématiques complexes et présentent des inconvénients communs tels que la limitation à l'espace bidimensionnel et une sensibilité accrue aux extrema locaux. De plus, ces approches nécessitent un temps d'exécution élevé lors de la résolution des problèmes de vérification, en particulier dans l'étude de problèmes non linéaires (Skaržauskas, Jankovski, and Atkočiūnas 2009). C'est pourquoi l'optimisation des structures repose sur des méthodes issues de la programmation mathématique et de l'utilisation de la méthode des éléments finis, en prenant en compte les principes énergétiques de la mécanique des structures et les propriétés plastiques des matériaux utilisés dans les structures ((Skaržauskas, Jankovski, and Atkočiūnas 2009) ; (Palizi and Saedi Daryan 2020) ; (Skaržauskas, Jankovski, and Atkočiūnas 2009) ; (Buontempo 2019).

D'autre part, les approches métaheuristiques regroupent des méthodes artificielles telles que les algorithmes évolutionnaires tels que les algorithmes génétiques (Vallée and Yildizoglu 2001), la programmation génétique (Souquet Amédée 2004), la programmation évolutive et les stratégies évolutives (Naima ZERARI 2006), ainsi que les colonies de fourmis (HACHIMI 2013) et les essaims particuliers (Salehan and Deldari 2022).

Les algorithmes d'optimisation utilisés sont conçus pour minimiser une fonction. En réalité, pour maximiser une fonction, il suffit simplement de minimiser son opposé. Il s'agit d'une méthode qui combine les mathématiques et l'informatique pour modéliser, analyser et résoudre analytiquement ou numériquement des problèmes visant à déterminer une ou plusieurs solutions peuvent être trouvées pour atteindre un objectif quantitatif tout en tenant compte de contraintes éventuelles. La précision des résultats et des prédictions dépend de l'adéquation du modèle utilisé et de l'efficacité de l'algorithme et des méthodes numériques utilisées. Les algorithmes d'optimisation traditionnels et heuristiques ont été largement utilisés pour trouver l'optimum global d'un problème ou d'une fonction, également appelé fonction coût. Dans le domaine de l'optimisation des structures métalliques, l'approche couramment utilisée consiste à minimiser le poids de la structure. Cependant, les assemblages représentent rarement plus de 5% du poids total d'une structure. En effet, le coût d'une structure

## Introduction Générale

---

est principalement constitué par le coût de la main-d'œuvre, qui dépend essentiellement de la complexité des assemblages. Une conception optimisée de la structure basée uniquement sur le critère du poids peut donc conduire à des dispositions constructives qui ne sont pas optimales en termes de coût de réalisation.

Une part importante (70-80 %) du coût total du projet est engagée à cette étape du processus de production d'un ouvrage en construction métallique (BENANANE Sofiane 2019). Par conséquent, il est essentiel de procéder à des vérifications une fois que le concepteur a fait les choix principaux concernant la forme de l'ouvrage et la disposition des différentes composantes, le système porteur, le système de fondation, etc. Ces décisions ont un impact considérable sur les caractéristiques techniques et économiques du projet ainsi que sur la réalisation de l'ouvrage.

Il est donc crucial de garantir la cohérence des décisions prises à cette phase. Cependant, lorsque l'intégration des contraintes techniques est insuffisante au départ, cela peut entraîner des incohérences et nécessiter une remise en question des solutions proposées. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires et des retards dans la réalisation.

D'autre part, la manière dont les assemblages sont modélisés peut influencer de manière importante la répartition des charges internes dans la structure, ainsi que les charges qui doivent être prises en compte dans les fondations. C'est pourquoi l'utilisation et la justification des assemblages semi-rigides sont désormais autorisées. La prise en compte du comportement des nœuds lors de l'analyse globale est une approche novatrice mais prometteuse. Les avantages économiques de cette approche ont fait l'objet de diverses analyses comparatives. Les logiciels d'analyse appropriés et les outils de calcul disponibles facilitent grandement sa mise en œuvre en permettant de caractériser les nœuds.

L'optimisation du processus de conception globale des structures du génie civil nécessite une anticipation des problèmes de construction dès les phases précoces de la conception de la structure du bâtiment. Il est essentiel de prendre des décisions techniques concernant le système porteur chargé d'assurer la stabilité de la construction, la sécurité des occupants, etc. Dans ce contexte, nous avons développé une méthodologie d'optimisation basée sur la minimisation du coût global de réalisation pour les structures métalliques. Pour les structures en béton armé, nous avons adopté une stratégie visant à minimiser le poids de l'ouvrage, tout en tenant compte des délais de réalisation. Ce coût comprend les coûts des matériaux, de fabrication et de montage de la superstructure métallique ainsi que les coûts des matériaux et de réalisation des systèmes de fondation.

Dans ce travail, notre objectif est d'améliorer les modèles mathématiques et les algorithmes de calcul pour optimiser les structures métalliques en tenant compte des propriétés plastiques de l'acier afin d'obtenir une résistance effective des barres. Les travaux antérieurs ont montré que les exigences de rigidité et de plasticité étaient uniquement appliquées aux sections nodales des éléments. Dans cette approche, nous proposons des conditions de rigidité et de plasticité contrôlées qui permettent de

## Introduction Générale

---

concevoir précisément les éléments sans augmenter le nombre d'éléments locaux. Cela est particulièrement important lorsque les éléments d'une structure sont soumis à une charge uniformément répartie. Pour ce faire, nous utilisons une formulation non classique aux éléments finis (Skaržauskas, Jankovski, and Atkočiūnas 2009), qui évite l'analyse de l'historique de chargement pour les modèles physiques non linéaires du matériau. Contrairement à la formulation par éléments finis géométriquement compatibles, cette approche permet d'éviter les problèmes mentionnés. Le but est d'optimiser la fonction objectif. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser les Algorithmes Génétiques, qui nous permettent d'obtenir des résultats pour tous types de problèmes étudiés. Cette approche d'optimisation globale tient compte non seulement des dimensions des éléments, mais aussi des caractéristiques des appuis et des types d'assemblages.

La thèse est structurée en quatre chapitres. Chaque chapitre aborde un objectif bien déterminé, qui forment l'ensemble du travail effectué :

Après cette introduction générale, le chapitre I dresse un état de l'Art non détaillé mais explicite des méthodes d'optimisation multi-objectif en accordant une importance particulière aux méthodes des algorithmes d'optimisation utilisées dans nos travaux de recherche. Aussi, on aborde brièvement quelques définitions générales des méthodes d'optimisation qui se divisent en deux volets déterministes et non déterministes avec les formulations des problèmes traités dans cette thèse.

Dans le chapitre II, on va présenter avec quelques détails les méthodes méta-heuristiques les plus utilisées et mettre l'accent sur celles que nous avons étudiées : la méthode des algorithmes génétiques, son fonctionnement et les différents opérateurs de cette méthode avec un exemple d'application de ces opérateurs.

Par la suite, dans le chapitre III, on va traiter la formulation du problème de conception globale pour résoudre des problèmes d'optimisation des structures métalliques. Il sera nécessaire de tracer une vue globale sur les différents critères d'optimisation, les variables et les contraintes.

Le chapitre IV est une application de la méthode des algorithmes génétiques aux structures métalliques avec programmation sous MATLAB. Dans cette partie, nous discuterons les différents aspects de la modélisation en mettant le point sur la nature de la fonction objectif, le type des variables et les opérateurs retenus pour l'optimisation dans chaque cas d'étude.

Enfin, dans la conclusion générale, on offre une réponse claire sur la problématique déclarée. Compte tenu des résultats obtenus, on dégage des conclusions pertinentes. Comme, on exhorte des recommandations pour les futurs travaux de recherche dans le domaine.



***Chapitre I***  
***Etat de l'Art et***  
***formulation du problème***

## I.1 Introduction

Le principal problème en mécanique des structures, lorsqu'il s'agit d'optimiser la forme consiste à rechercher la configuration idéale d'une structure, qui combine à la fois une légèreté maximale (poids) et une résistance optimale. Des problèmes de ce genre sont fréquemment rencontrés dans des domaines comme le génie civil, l'aéronautique, ou la construction automobile, pour lesquels toute économie de poids permet à la fois de faire des bénéfices de la matière première mais surtout obtenir des performances très importants (comme par exemple, une voiture légère qui consomme moins de carburant). Dans la réalité, on cherche également à répondre à d'autres contraintes de technologies, telles que la forme optimale en matière d'aérodynamisme, d'acoustique, de faisabilité industrielle et de coûts de production. Cependant, afin de simplifier la problématique et de se concentrer sur les défis fondamentaux de l'optimisation de formes, on ne prendra pas en considération ces contraintes supplémentaires dans tout ce qui suit.

De manière classique, étude faite au niveau du bureau d'études, l'ingénieur adopte une approche itérative en créant des prototypes dont la conception dépend de son expérience et de son instinct. Cette méthode "manuelle" s'avère être à la fois onéreuse et peu précise. Elle a été remplacée, de plus en plus, par des logiciels de modélisation numérique et d'optimisation, pour nous permettre d'analyser de nombreuses possibilités sans avoir à fabriquer de prototypes et automatiser la recherche de la forme optimale. La majorité de ces programmes de calcul parviennent à automatiser ce processus en utilisant une représentation limitée de la forme, généralement basée sur un ensemble restreint de paramètres descriptifs, tels que des points de contrôle situés sur les bords. En analysant les variations de performance par rapport à ces paramètres, on peut itérativement améliorer une forme de départ.

Cependant cette méthode, dite d'analyse de sensibilité, présente deux inconvénients majeurs.

- D'une part, elle est très coûteuse en temps de calcul, car si la forme s'éloigne trop de la géométrie initiale, il peut être nécessaire de remailler la structure au cours des itérations.
- D'autre part, et c'est là son plus grave défaut, le résultat obtenu dépend fortement du choix initial et de la finesse de la discrétisation. En effet, les formes successives ne varient que par leur frontière, tandis que leur topologie reste fixe : la structure garde le même nombre de composantes, de bords et de trous, et la dimension de ces derniers est limitée par la taille du maillage, aussi bien numériques (Dureisseix 2003) que théoriques (Jahanshahi and Pouraghajan 2013).

D'une manière précise et mathématique, la sensibilité du résultat au choix initial peut s'expliquer par la présence de nombreux minima locaux, tandis que l'absence de convergence du résultat lors de l'affinement du maillage découle du fait que le problème est mal posé.

Il est important de rappeler que lorsque les formes admissibles doivent satisfaire des conditions de régularité, il est possible de démontrer l'existence d'une forme optimale.

En revanche, en l'absence de contraintes spécifiques sur la frontière, il n'y a généralement pas de garantie d'existence d'une forme optimale. (Durand 2004), les contre-exemples dans (Buontempo 2019).

D'un point de vue pratique, cette méthode offre la possibilité d'optimiser une structure de manière automatique, sans imposer de restrictions explicites ou implicites sur sa topologie. De plus, elle permet d'éviter les problèmes numériques couramment rencontrés, comme décrits précédemment, tout en conservant un coût de calcul très compétitif.

Concluons cette introduction en disant que ce travail est une présentation, assez informelle du point de vue mathématique, de travaux plus complets (pour plus de détails, voir notamment le document (De Gournay 2005), (Bradley et al, 1997), (Mrabet 2017)).

## I.2 But du présent chapitre

Verbe « Optimiser » du mot adjectif « Optimisation » ou aussi « d'une manière optimale » est un terme, actuellement, fréquemment et largement utilisé pour la description et la conduite des processus de conception pour le développement des produits. C'est également le fait d'offrir à quelque chose, que ce soit une machine, une entreprise, etc., les conditions les plus propices pour obtenir le meilleur rendement possible ou en tirer le meilleur parti. Ceci signifie que l'optimisation est une amélioration ou un perfectionnement d'une conception en termes d'un ou plusieurs aspects tel que la performance et la qualité.

Cependant, on peut définir d'une autre manière par le principe du « plus court chemin » par Héron d'Alexandrie Ingénieur, un mécanicien et mathématicien grec (Figure I.1) dans le contexte de l'optique, comme suit :

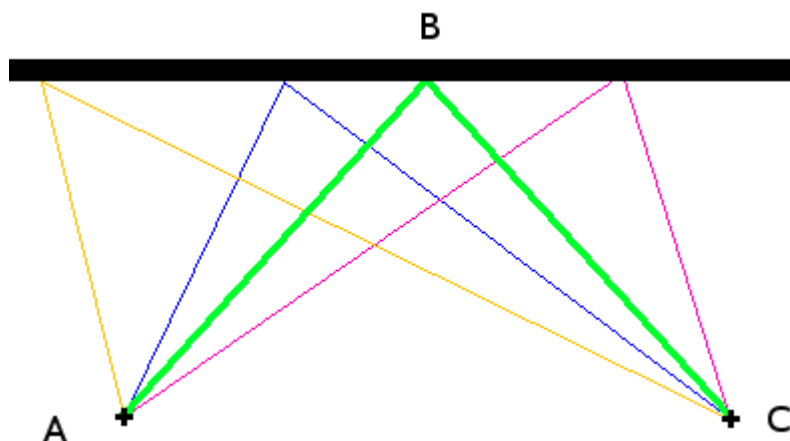


Figure I. 1: Principe du « plus court chemin » (Héron d'Alexandrie, 1<sup>er</sup> siècle Après J-C)




Le plus court chemin pour aller de A à C en passant par un point de la droite est obtenu lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle réfléchi (sur la figure, il s'agit du chemin vert passant par B).

Dans l'histoire des mathématiques, le terme « optimisation » est un processus déjà entamé en 1939 par le mathématicien Leonid Kantorovitch qui commençait des travaux théoriques sur l'optimisation linéaire afin d'en tirer des applications concrètes à l'optimisation de la production économique planifiée de l'Union soviétique. On peut dire aussi, d'une manière technique très spécifique que l'hypothèse de base derrière une telle définition, c'est que le processus de conception qui est vu comme étant un processus décisionnel, par lequel on choisisse une forme fonctionnelle appropriée parmi beaucoup de solutions alternatives.

Cette conception est vue comme étant un processus décisionnel, par lequel on choisit la forme fonctionnelle appropriée parmi plusieurs solutions alternatives. Cette expression de la configuration fonctionnelle est alors développée en choisissant par la suite, des valeurs appropriées pour des quantités et attributs de la conception, celles décrivant amplement la configuration actuelle.

### I.3 Présentation mathématique d'un problème d'optimisation.

Dans ce paragraphe, nous allons évoquer très brièvement la question d'existence de forme optimale. Il faut retenir que son existence est loin d'être la règle (en l'absence de contraintes géométriques ou de régularité). Cette section permettra aussi d'introduire le problème d'optimisation de structures (ou de formes) qui est défini par trois données :

-  un modèle (typiquement une équation aux dérivées partielles) qui permet d'analyser le comportement mécanique d'une structure,
-  un critère que l'on cherche à minimiser ou maximiser, et éventuellement plusieurs critères (on parle aussi de fonction objectif qui est en général le coût),
-  un ensemble admissible de variables d'optimisation qui tient compte d'éventuelles contraintes que l'on impose aux variables.

Parmi les problèmes d'optimisation de formes, on peut citer trois types « du plus facile au plus difficile » :

- Optimisation de formes paramétriques (par exemple une épaisseur, un diamètre, des dimensions) ceci nous donne une limite considérable sur la variété des formes possibles.
- Optimisation de formes géométriques c'est-à-dire faire varier les frontières sans toucher à la topologie (par exemple sans changer le nombre de trous).
- Optimisation de formes topologiques, là on cherche à avoir la meilleure forme possible et ça sans aucune restriction même s'il faut changer de topologie.

Pour cela, notre but est de faire un calcul numérique de structures ou formes optimales (approche "automatique" et non par "essais et erreurs" ) en tenant des conditions d'optimalité (nécessaires et/ou suffisantes) qui sont très importantes pour la théorie de la caractérisation des formes optimales et pour le numérique (c'est-à-dire

la base d'algorithmes du type méthode de gradient) et on parcourt les questions théoriques sur l'existence, l'unicité, ou les propriétés qualitatives des solutions. Il s'agit d'une difficulté typique de l'optimisation de formes géométrique qu'il est important de contourner pour des raisons théoriques tout autant que numériques.

A travers ça, on peut écrire un problème de minimisation de dimension  $n$  sous la forme suivante :

Minimiser  $f(x) \in R, x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$  avec :

$$\left. \begin{array}{l} g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, p \\ h_j(x) = 0, j = 1, \dots, q \end{array} \right\} \text{ (I-1)}$$

$$x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max}, k = 1, \dots, n$$

Où  $f(x)$  est le critère à minimiser appelé aussi fonction objectif,

$x$  est un vecteur à  $n$  variables  $x_k$  qui représentent les paramètres du problème à minimiser.  $g_i(x)$  et  $h_j(x)$  représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité.

$x_k^{\min}$  et  $x_k^{\max}$  désignent les contraintes de domaine et

$R^n$  est l'espace de recherche borné par les contraintes de domaine.

La solution d'un problème de minimisation est alors donnée par un ensemble de paramètres  $x^*$  pour lesquels la fonction objectif présente une valeur minimale, en respectant les contraintes d'égalité et d'inégalité du domaine.

Un problème de minimisation est dit contraint s'il contient au moins une fonction contrainte  $g_i(x)$  ou  $h_j(x)$  dans sa description. Si ces deux fonctions du problème (I-1) ne sont pas définies, le problème est non-contraint.

#### I.4 Aspect du problème

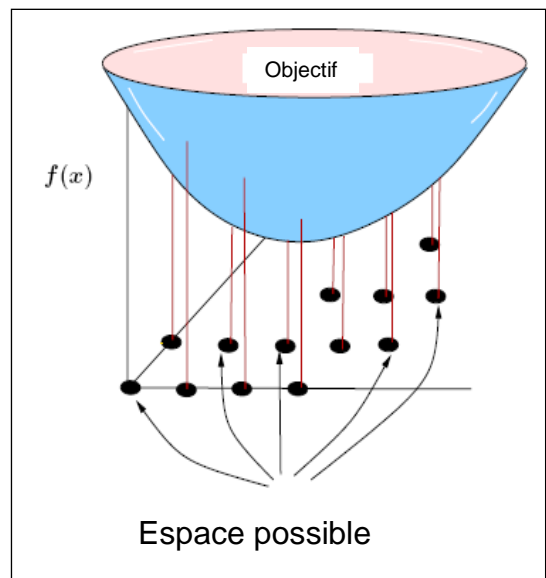
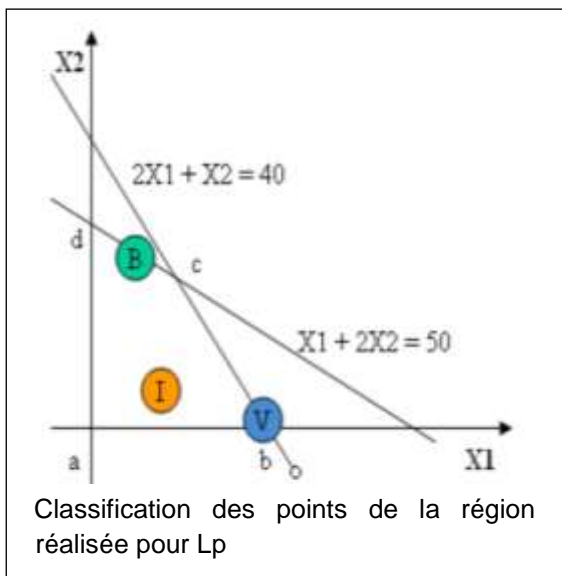
Nous avons défini le problème d'optimisation comme étant la minimisation d'une fonction, parfois soumise à des contraintes. Cependant, il existe des situations où nous sommes plutôt intéressés à trouver un point de maximisation, c'est-à-dire, à maximiser la fonction objectif.

Dans ce cas, il est généralement préférable de transformer le problème de maximisation en problème de minimisation, car ces méthodes sont souvent implémentées en s'appuyant sur des critères de minimisation de la fonction objectif.

Cette transformation du problème d'optimisation peut être facilement obtenue à l'aide d'une simple fonction de transformation appliquée directement sur la fonction objectif originale.

**I.4.1 Problème linéaire - résolu par les méthodes Simplex ou Graphique.**

La solution du problème linéaire réside dans les limites de la faisabilité de la région.



**Figure (a) :** Solution d'un problème linéaire **Figure (b) :** Solution tridimensionnelle d'un problème non linéaire

**Figure I. 2 :** Solution d'un problème par les méthodes simplex ou graphique

La solution non linéaire des problèmes se situe à l'intérieur et aux limites de la région possible.

- Points minima/maxima locaux : Un point ou une solution  $x^*$  se trouve au point local s'il n'y a pas d'autre  $x$  dans son quartier inférieur à  $x^*$
- Points minima/maxima globaux : Un point ou une solution  $x^{**}$  se situe au niveau mondial indiquer s'il n'y a pas d'autre  $x$  dans tout l'espace de recherche inférieur à  $x^{**}$

Dans l'espace de recherche  $R^n$ , un point  $x^*$  représente un minimum local, s'il existe un voisinage de  $x^*$  noté  $V(x^*)$ , tel que :

$$\forall x \in V(x^*) \Rightarrow f(x) \geq f(x^*) \tag{I-2}$$

Cette relation signifie que dans le voisinage de  $x^*$ , il n'existe aucun point pour lequel  $f(x)$  est inférieur à  $f(x^*)$ .

Un point  $x^*$  de l'espace de recherche  $R^n$  est un minimum global si:

$$\forall x \in R^n \Rightarrow f(x) \geq f(x^*) \tag{I-3}$$

On peut dire aussi que le minimum global est le plus petit minimum local de l'espace de recherche, comme nous le montre la Figure I.3

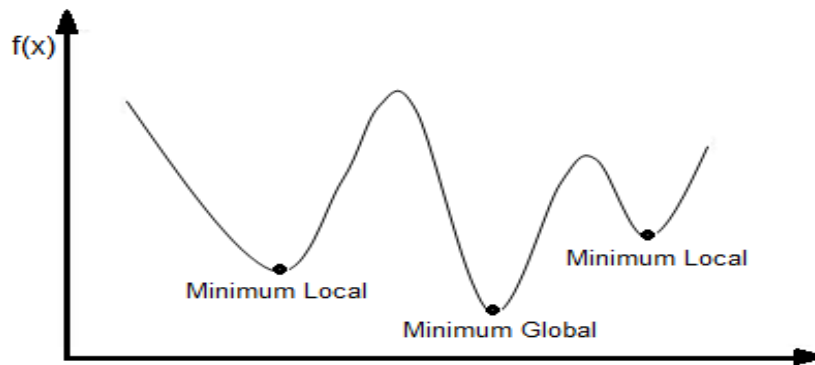


Figure I. 3 : Représentation du minimum local et global d'une fonction.

- une fonction est dite uni-modale : il y a un minimum local,
- une fonction est dite multimodale : Dans le cas contraire, elle contient plusieurs minimums locaux.

## I.5 Domaine d'étude : La conception globale en charpente métallique CM

Au moment de la réalisation d'un projet, la majorité des décisions sont prises lors de l'étape de conception. Ces dernières vont engendrer une répercussion à tous les niveaux du processus de réalisation d'un projet, jusqu'à l'organisation du chantier.

Les choix effectués lors de l'élaboration du schéma structurel, notamment en ce qui concerne la disposition des éléments et la sélection des types de liaisons, revêtent une importance primordiale à la fois dans la phase globale de conception et dans la réalisation concrète de l'ouvrage. Une absence d'anticipation au cours de cette phase initiale de conception peut générer des répercussions significatives sur la phase de conception détaillée et sur la construction finale de la structure. Ce manque d'anticipation dans cette phase d'un projet, peut être alors très préjudiciable à sa réalisation, en termes de coûts supplémentaires, de délais et de qualité.

Dans le processus de réalisation d'une structure en acier, la conception des assemblages et des fondations a été reconnue comme étant un point critique pour les bureaux d'études. La multiplicité des solutions et le manque d'homogénéité au niveau des pratiques rendent difficile l'optimisation globale du processus. On va essayer de déterminer la fonction fitness et la validation de son concept pour les systèmes à base d'algorithmes génétiques. Cette fonction nous permet la recherche de chemins optimaux pour les modèles à analyser et étudier l'importance de leur prise en compte dès les phases précoces de conception.

## I.6 L'acier dans la construction : les atouts d'un choix

Il existe de nombreux éléments qui influencent le choix d'un matériau de construction, allant de la disponibilité locale des produits à leurs coûts de production. Par conséquent, il est extrêmement difficile de comparer directement les différents matériaux, d'autant plus que la prise en compte d'une seule caractéristique ou d'un seul élément de construction peut nous orienter vers une option spécifique.

Bien que l'acier soit en concurrence avec d'autres matériaux dans le domaine de la construction, c'est surtout au niveau de la structure que la compétition avec le béton et la maçonnerie se fait sentir. Ces matériaux se différencient de l'acier non seulement par leur forme, leur texture, mais également par leurs méthodes de fabrication, le travail sur site et les contrôles effectués.

Traditionnellement, les matériaux sont comparés en fonction du coût par unité de surface d'une structure construite. Cependant, ces comparaisons simplistes ne tiennent pas compte des nombreux facteurs qui influencent la construction d'un bâtiment dans son ensemble. Bien qu'il y ait de nombreux aspects à prendre en compte lors d'une telle comparaison, il est possible d'identifier facilement les principaux facteurs, qui peuvent être repris et résumés rapidement.

- **Poids des matériaux :**

Cet aspect a diverses implications, la principale étant que l'utilisation d'un acier à haute résistance entraîne généralement une réduction significative du poids total de la structure. Cette économie de poids réalisée compense largement le coût potentiellement plus élevé de ce type d'acier. En plus de cela, une structure plus légère présente d'autres avantages, tels que la réduction des frais de transport et d'expédition. De plus, elle entraîne une diminution des coûts d'assemblage grâce à une manipulation plus facile en utilisant des équipements moins puissants et donc moins coûteux.

- **Coût de fabrication :**

La simplification globale du processus de construction peut être réalisée en réduisant le nombre d'éléments de la structure et avec des dimensions, ainsi que des assemblages standard lorsque cela est possible, car les coûts de fabrication et de montage dépendent davantage du nombre de pièces que de leur poids.

D'un autre côté, l'assemblage des éléments en acier en dehors du site réduit les coûts élevés de main-d'œuvre associés au montage sur place. Lorsque cela est faisable, l'application de la protection contre l'incendie avant le montage permet également de réduire deux aspects importants : le nettoyage et la main-d'œuvre sur le site (Belhadji Ali Nizar, 2003).

- **Intégration des éléments techniques :**

La présence de structures telles que des poutrelles ajourées ou des poutres à grande portée, offre des possibilités pratiquement illimitées pour l'intégration des éléments techniques. Même après l'achèvement du bâtiment, il est extrêmement facile d'effectuer de nouvelles installations avec une structure en acier. Par exemple, une structure en acier dotée d'un plancher cellulaire permet le passage de câbles électriques et téléphoniques qui restent facilement accessibles.

- **Coût des fondations :**

Une structure en acier présente un poids inférieur à celui des structures réalisées avec des matériaux traditionnels. Dans certaines situations, lorsque le sol ne peut pas supporter des charges lourdes ou lorsqu'il y a des éléments techniques souterrains,



l'utilisation d'une structure en acier permet de réduire le volume des fondations, ce qui entraîne des économies significatives.

- **Le recyclage :**

L'acier est le matériau le plus largement recyclé à travers le monde. Toutes les formes d'acier peuvent être recyclées indéfiniment sans perdre leur résistance ou toute autre propriété. De plus, la majorité des structures et des planchers en acier sont fabriqués à partir d'acier recyclé provenant notamment de vieux véhicules ou d'appareils électroménagers ou les déchets de bâtiments (Nizar 2003).

La récupération des déchets ferreux demeure la principale voie de valorisation en Algérie. Selon un rapport de l'Agence nationale des déchets datant de 2020, le volume annuel de métal recyclé s'élève à 628 915 tonnes, comprenant la fonte, l'acier et le fer.

Il est relevé dans ce document que les plus importantes usines de transformations de métallurgie sont : Tosyali à Oran et le complexe sidérurgique d'El-Hadjar, à Annaba.

## **I.7 Revue de quelques méthodes d'optimisation**

À l'heure actuelle, tous les systèmes qui peuvent être représentés au moyen d'un modèle mathématique sont soumis à une optimisation visant à obtenir une solution approximative à un problème donné. Par conséquent, la précision des résultats et des prédictions dépendra de la pertinence du modèle utilisé, de l'efficacité de l'algorithme de traitement numérique, ainsi que des ressources déployées pour cette tâche.

Les algorithmes d'optimisation utilisés sont généralement écrits pour minimiser une fonction. Si l'on désire maximiser une fonction  $f(x)$ , il suffira de minimiser son opposée.

Récemment, ces méthodes classiques et heuristiques sont largement utilisées afin de trouver l'optimum global dans une fonction objectif du problème qui est dans notre étude, le coût de l'ouvrage.

La raison peut en être leur approche informatique fiable pour résoudre de tels problèmes difficiles. De nombreuses métaheuristiques sont proposées depuis quelques années.

### **I.7.1 Les algorithmes évolutionnaires (AEs)**

Les AEs sont des méthodes d'optimisation stochastiques basées sur une simulation sommaire de l'évolution naturelle des populations.

Les techniques de programmation s'inspirent du principe de l'évolution des espèces décrit par Darwin. Ce principe de base bien que simple, reflète bien la théorie de Darwin sur l'évolution des espèces qui explique comment depuis l'apparition de la vie, les espèces ont su évoluer de façon innovante et souple dans le sens d'une meilleure adaptation à l'environnement, tout en permettant aux seuls individus bien adaptés à leur espaces de se reproduire (BENANANE Sofiane 2019).

En 1975, John Langton a parlé pour la première fois d'algorithmes génétiques (une sous-famille d'AEs), mais ce n'est que récemment (vers le début des années 1990) que cette technique est venue au premier plan, devenant, avec les techniques liées à la vie artificielle plus généralement, une voie de renouvellement pour le génie logiciel et l'intelligence artificielle. Le succès de cette manière de programmation n'est pas surprenant quand on sait que la simplicité de cette technique n'est égalée que par sa puissance.

En effet, cette légèreté de mise en œuvre a ajouté tout le charme des algorithmes génétiques et donne une impression rafraîchissante d'avoir insufflé un peu de vie et de créativité dans l'ordinateur. Cet aspect révolutionnera peut-être la manière que l'on a de voir les machines qui nous entourent. Ce texte se propose juste, en attendant une couverture plus ambitieuse, de présenter le principe élémentaire qui est à la base de la programmation génétique (Hamchaoui 1997).

#### **I.7.1.1 Progression des espèces**

Soit un environnement quelconque dans lequel vit une population primitive et peu adaptée à cet environnement. Cette population n'est pas uniforme : certains individus sont mieux armés et d'autres ne le sont pas pour pouvoir profiter des ressources offertes par cet espace de vie (tel que : nourritures, abris, etc.) afin de faire face aux dangers qui y rôdent (prédateurs, intempéries, etc.).

Donc, les individus mieux équipés ont une probabilité de survie qui est plus grande que leurs congénères et auront plus de chances de pouvoir se reproduire.

Cette reproduction entre individus bien adaptés, va permettre une transmission à leurs enfants des caractéristiques qui feront leur excellence. Cette résultante de population sera donc globalement mieux adaptée à cet environnement que la précédente puisque la plupart des individus auront hérité de plusieurs caractéristiques de l' "élite" de la génération précédente (puisque chacun hérite à la fois de sa mère et de son père).

La population va évoluer vers une adéquation toujours meilleure avec l'environnement, avec une combinaison des caractéristiques élémentaires et bien adaptées et en saupoudrant le tout d'un peu de hasard.

#### **I.7.1.2 Vue générale sur les algorithmes évolutionnaires (AEs)**

Les AEs reposent sur une population de solutions possibles à une tâche d'optimisation. Ils ont recours à un opérateur de sélection qui favorise l'exploitation aux opérateurs stochastiques/génétiques qui favorisent aussi l'exploration.

Un AE dans un cadre global, est considéré comme une approche efficace pour résoudre de larges catégories de problèmes d'optimisation. Les opérateurs stochastiques ou de sélection doivent être désignés avant de démarrer, et leurs paramètres doivent être réglés en fonction du problème de test.

Ainsi, parmi les principales difficultés que rencontre un utilisateur d'AEs est le choix de tels opérateurs. Ensuite, dans la conception d'AEs, on se doit de fixer leurs paramètres de façon judicieuse. C'est une décision très importante suivant le

problème objectif pour l'optimisation combinatoire : l'ensemble des problèmes d'optimisation sur un espace fini donnent des algorithmes qui ont la même performance moyenne, et ensuite, sur tous les problèmes aucun algorithme ne vaut mieux qu'une recherche aléatoire.

Le problème de l'ajustement des paramètres des AEs est généralement divisé en deux cas, le réglage des paramètres et le contrôle des paramètres (Eiben. et al, 2003). Le réglage des paramètres est une situation plus facile à gérer parce que les valeurs des paramètres ne changent pas pendant une exécution d'AE, par conséquent seulement une valeur simple par paramètre est exigée (BENANANE Sofiane 2019) : C'est la méta-optimisation, elle vise à ajuster de manière optimale les paramètres afin de résoudre efficacement un problème spécifique qui s'inscrit dans un autre problème d'optimisation plus vaste.

L'objectif est d'optimiser les valeurs des paramètres pendant la recherche. Ainsi, une étape pratique et efficace pour surmonter cet obstacle consiste à permettre aux AEs de gérer automatiquement ces réglages de paramètres qui continue d'être l'un des sujets de recherche les plus dynamiques en programmation évolutionnaire.

L'amélioration de la qualité des solutions dépend de plusieurs facteurs, comme l'évaluation de la fitness, la diversité de la population et le taux de convergence.

Donc, il est intéressant, d'assimiler plusieurs paramètres ou valeurs de paramètres dans une approche dont la diffusion de données/informations sur l'espace de solutions contribuera à faire mieux évoluer la recherche. De cette manière, on doit incorporer plusieurs états dans le présent travail, donc plusieurs types ou valeurs de paramètre, dans un même algorithme afin de bénéficier des avantages que peut apporter chacun parmi eux (Bercachi 2010).

Dans cette vision des choses, on mène la notion d'état aux AEs où chaque état peut modeler n'importe quel élément de l'AE ainsi que n'importe quel paramètre ou valeur de paramètre de l'algorithme (Fuyuan and Qimei 2007).

Une approche largement pratiquée pour identifier une bonne série de paramètres pour une classe particulière de problèmes se traduit à travers l'expérimentation. En principe, le choix des paramètres est fonction de la structure du problème, et donc, un choix rigide peut ne pas convenir (Eiben, Hinterding, and Michalewicz 1999).

L'approche typique de réglage des paramètres dans la conception d'algorithmes est habituellement effectuée par des tests expérimentaux avec des valeurs différentes, suivis de la sélection de celles qui donnent les meilleurs résultats sur le problème en cours d'essai. Par contre, ajuster le nombre de paramètres possibles et leurs différentes valeurs, indique que c'est une activité très longue et consommatrice de ressources.

Il existe deux manières de traiter ce problème : les méthodes déterministes et les méthodes adaptatives.

- 1- Les méthodes déterministes utilisent en général une simple équation pour calculer une valeur approximative de paramètres afin de l'ajuster selon le problème. Elles n'utilisent pas des informations sur l'état actuel de la recherche, et l'équation utilisée ne change pas durant l'exécution de l'algorithme.
- 2- Les méthodes adaptatives utilisent des informations sur l'état actuel de la recherche, mais la valeur de la meilleure fitness et le taux de succès sont des informations à l'état brute ; elles subissent parfois ultérieurement un échec dans le processus. Par contre, elles sont des méthodes efficaces lorsque l'unique sélection disponible (basée sur la fonction de fitness) peut empêcher de mauvais paramètres de procéder largement à de futures générations.

#### Interprétation :

Cette description sommaire de l'histoire des AEs nous guide vers la performance et efficacité de beaucoup d'algorithmes dépendant clairement de l'ajustement de leurs paramètres, qui, à son tour, dépend du problème à résoudre. Par exemple, l'exécution des AEs dépend largement d'un réglage minutieux des taux d'opérateur. Le choix et l'ajustement des bonnes valeurs des paramètres suivant le problème à résoudre sont, cependant, une tâche dure.

#### **1.7.2 État actuel de la technique des AEs et hyper heuristiques**

Il est bien connu que les AEs sont difficiles à résoudre ou à contrôler et la durée coûte cher. Ils tirent souvent profit de la parallélisation pour résoudre/contrôler les paramètres, et par la suite diminuer le coût du temps de calcul. Des efforts considérables ont été déployés par la communauté sur les AEs afin de contrôler les paramètres critiques.

La majorité de ces méthodes était basées sur des stratégies parallèles (utilisant une architecture hautement parallèle).

Dans la dernière décennie, des réalisations parallèles sont devenues populaires dans le but de rendre les AEs plus flexibles et plus opérants. En divisant la population en plusieurs sous-populations, on atteint des résultats de qualité dans un temps d'exécution acceptable même pour des problèmes d'optimisation difficiles.

C'est ça le but de l'importance du contrôle des paramètres. Le fait de pouvoir auto-régler/auto-ajuster les valeurs des paramètres, d'après l'exigence, au fur et à mesure du processus d'optimisation.

Des méthodes similaires pour la gestion de multiples heuristiques de niveau inférieur sont présentées dans ce document (Nareyek et al. 2005). Dans ce travail, à chaque heuristique de bas niveau est associée une fonction d'utilité et un poids/facteur de préférence. Ces outils servent à restructurer les voisinages des solutions quand un ou plusieurs optima locaux sont rencontrés. Les résultats notés étaient très positifs selon la mesure du taux de succès.

Dans un autre ouvrage de (Burke, Kendall, and Soubeiga 2003) il a été proposé deux types d'hyper heuristiques. Le premier est une hyper heuristique aléatoire qui choisit à

plusieurs reprises une heuristique de bas niveau uniformément au hasard, et l'applique jusqu'à ce qu'un certain critère d'arrêt soit rempli.

Le deuxième type d'hyper heuristiques est basé sur une fonction-de-choix (Choice-Function) qui classe de manière adaptative les heuristiques de bas niveau.

Donc la fonction-de-choix renvoie pour chacune des heuristiques de bas niveau, ses améliorations récentes et le temps CPU (en secondes) écoulé depuis son dernier appel.

#### Interprétation :

On est parvenu à prouver, que pour certaines classes de problèmes, ces méthodes génériques fournissent des solutions pratiques de haute qualité dans un délai beaucoup plus court que celui du développement d'autres approches telles que la recherche tabou et les AEs simples, et en utilisant relativement peu, de connaissances de domaine.

## I.8 Les méthodes stochastiques

### I.8.1 Définition

Les méthodes stochastiques sont caractérisées par :

- Un processus de création aléatoire ou pseudo-aléatoire (la création de points est aléatoire, il faut la conditionner dans un intervalle de valeurs, sa création devient guidée) des points dans l'espace d'état,
  - Une heuristique qui permet de guider la convergence de l'algorithme.
- Ces méthodes stochastiques sont utilisées dans des problèmes où on ne connaît pas d'algorithme de résolution en temps polynomial et pour lesquels on espère trouver une solution approchée de l'optimum global.

Dans la pratique, les méthodes stochastiques qui sont les plus utilisées avec succès sont : la méthode Monte Carlo, le recuit simulé, les algorithmes évolutionnaires, le branch and bound stochastique et la méthode tabou. Ces méthodes permettent :

- Une facilité d'implantation,
- Une flexibilité par rapport aux contraintes des problèmes,
- Une qualité élevée des solutions.

### I.8.2 Techniques de recherche

On doit chercher l'optimum exact ou une approximation de ce dernier en utilisant les méthodes de recherche permettant un échantillonnage de l'espace des objectifs réalisables.

Dans la mesure où la notion d'optimalité est parfaitement évidente dans le cas d'un objectif unique, ces méthodes correspondent exactement aux méthodes de résolution des problèmes mono objectifs. Afin de converger vers l'optimum, ces méthodes doivent présenter à la fois :

- Une **capacité d'exploration** suffisante pour explorer l'ensemble de l'espace de recherche (au mieux l'espace des valeurs réalisables  $X_f$ , au pire l'espace de décision

$X$  complet). la convergence a tendance à être ralenti par cette aptitude, mais elle est nécessaire afin d'éviter le piègeage par les optima locaux,

- Une **capacité d'exploitation** satisfaisante afin d'être à même d'utiliser les résultats déjà obtenus pour faire converger plus rapidement l'algorithme vers l'optimum.

Le maintien de la diversité et la convergence se traduit par l'obtention de l'**efficacité** et l'**efficience**.

-L'efficacité c'est la caractéristique de la capacité de la méthode à trouver l'optimum avec précision.

-L'efficience caractérisant sa capacité à trouver l'optimum ou un voisinage de l'optimum en un temps de calcul restreint.

L'efficience permet ainsi d'assurer la **parcimonie** de la méthode, c'est-à-dire de réduire le nombre d'évaluations nécessaires, où une évaluation correspond au calcul des objectifs et des contraintes pour une solution. D'un point de vue pratique, c'est souvent l'efficience qui prime.

On distingue quelques principales familles de méthodes de recherche :

#### 1.8.2.1 les méthodes exactes (ou méthodes déterministes)

Ces méthodes conduisent toujours au même optimum. Elles se caractérisent par une exploration méthodique de l'espace de recherche selon un processus prédéfini. Par exemple, les méthodes de gradient, la méthode du simplex (Nelder Mead) (Smith 2005) ou encore l'algorithme de séparation - évaluation (Branch and Bound). Et donc on doit éviter ce phénomène de piègeage par un optimum local, pour cela, des améliorations ont été apportées, telles les méthodes de "multi start" ou du "tunneling", voir la Figure I .4 (Christelle REYNES 2007), mais celles-ci restent coûteuses, donc peu efficaces.

On peut dire que, Les méthodes déterministes peuvent être très efficaces, mais pour des problèmes de grande taille, tel que les problèmes multimodaux ; la probabilité de trouver l'optimum global dépend essentiellement d'une bonne connaissance du problème.

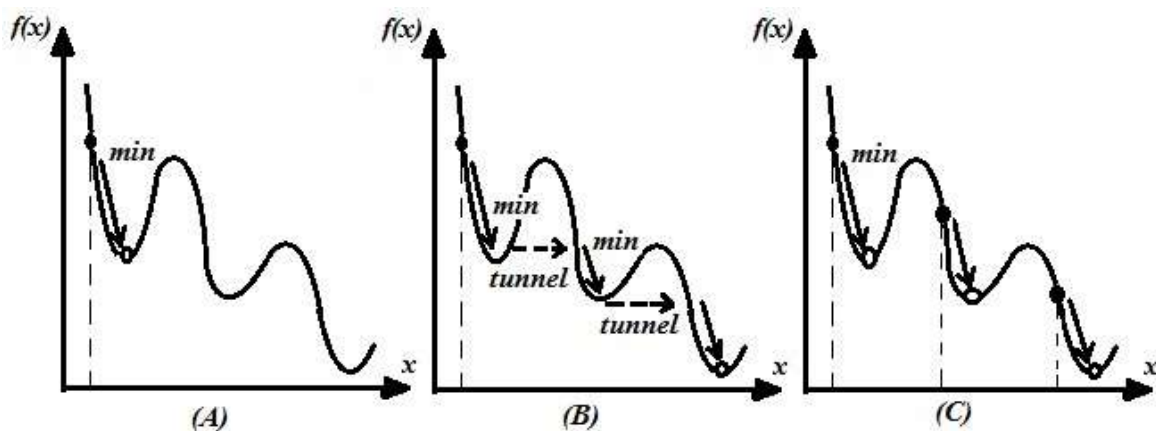


Figure I. 4 : Exemple de minimisation de  $f(x)$

(A) : piègeage par un optimum local pour un problème de minimisation.

(B) : méthode du "tunneling". La principale difficulté réside dans l'élaboration de la fonction de tunneling.

(C) : la méthode "multi start". La principale difficulté réside dans le choix du maillage de l'espace de recherche.

### **I.8.2.2 les méthodes approchées** (ou méthodes stochastiques ou méthodes non déterministes)

Ces méthodes peuvent nous conduire à des solutions différentes du même problème. Elles sont caractérisées par un processus (ou générateur) de création aléatoire ou pseudo-aléatoire (c'est-à-dire conditionnées par certaines règles) des points dans l'espace de recherche et une méthode (heuristique ou métaheuristique) donnant ainsi la convergence de l'algorithme. Ces méthodes sont utilisées pour trouver une solution approchée de l'optimum global dans le cas de problèmes fortement multimodaux et à grand nombre de variables. La convergence de l'algorithme est assurée soit par une heuristique (méthode de Monte-Carlo) soit par une métaheuristique (AEs, recuit simulé, recherche tabou, colonies de fourmis, etc.). Il s'agit généralement de méthodes directes permettant de travailler sans dérivation et même sans formulation analytique des fonctions objectif. Elles sont par conséquent adaptées aux problèmes combinatoires comme aux problèmes non-linéaires, définis sur des espaces aussi bien continus que discrets ou mixtes, avec ou sans contraintes. C'est donc vers ce type de méthodes que l'on choisit de nous orienter pour l'optimisation des structures composites.

Dans les paragraphes suivants, on va présenter l'exposé des méthodes approchées les plus classiques pour mettre en valeur les concepts appliqués au guidage de la recherche aléatoire afin d'augmenter l'efficacité des algorithmes.

### **I.8.3 Les concepts de recherche par voisinages**

Nous présentons ici dans leurs principes quelques métaheuristicues basées sur des concepts de descente et, plus généralement, de voisinage. Ces méthodes font évoluer la configuration courante de manière itérative en le remplaçant par une autre issue de son voisinage : on parle de mouvement.

Certaines méthodes comme le *Recuit Simulé* supposent de n'évaluer que quelques points de chaque voisinage mais d'autres, comme la *Recherche Tabou*, préconisent l'examen de tous les voisins pour réaliser un mouvement.

#### **I.8.3.1 La technique de descente**

Il s'agit d'une méthode simple permettant d'atteindre l'optimum local le plus proche de la solution initiale. Intuitivement, il est facile d'appréhender le principe de fonctionnement de la méthode en constatant que lors d'une promenade en montagne, pour trouver le sommet le plus proche de soi, il suffit de monter tant que cela est possible. L'algorithme consiste ainsi à sélectionner à chaque itération une nouvelle solution, meilleure que la solution courante, dans un voisinage de celle-ci. Ce mouvement est répété jusqu'à aboutir à un voisinage ne présentant aucune possibilité d'amélioration.

Diverses méthodes existent pour tenter de se rapprocher de l'optimum global, on peut citer par exemple :

- Technique de **relance**
- Technique du **chemin aléatoire**
- Les méthodes de **Recherche à Voisinage Variables**

La descente est une méthode largement utilisée qui permet avec un temps de développement assez court de bien dégrossir un nouveau problème et de calculer rapidement une première approximation de l'optimum global.

### I.8.3.2 Le recuit simulé

La méthode de recuit simulé s'inspire du processus de recuit physique des matériaux. Ce processus utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un solide cherche un état d'énergie minimale qui correspond à une structure stable du solide.

Les origines du recuit simulé remontent aux expériences réalisées par Metropolis dans les années 50 pour simuler l'évolution d'un tel processus de recuit physique. Tout nouvel état est obtenu en faisant subir un déplacement (une perturbation) aléatoire à un atome quelconque. Le processus se poursuit par une décroissance régulière de la température jusqu'à l'obtention d'une configuration d'équilibre thermostatique.

Le changement du recuit simulé consiste en une séquence itérative visant à rechercher des configurations à moindre coût, tout en autorisant de manière contrôlée des configurations qui détériorent la fonction de coût. Dans le cas contraire, une configuration est acceptée en fonction d'une probabilité  $P$  qui dépend de deux éléments : d'abord, de l'ampleur de la détérioration (les détériorations légères ont plus de chances d'être acceptées), ensuite, d'un paramètre de contrôle  $T$ , qui représente la température du recuit (une température élevée augmente la probabilité d'accepter des détériorations). La température du processus de recuit est régulée au moyen d'une fonction décroissante qui détermine un schéma de refroidissement. Les deux paramètres de cette méthode font sortir à la fois la durée des paliers et la formule qui calcule la séquence décroissante des températures. Dans la pratique, l'algorithme s'interrompt et renvoie la configuration optimale dès lors qu'aucune configuration voisine n'a été acceptée pendant un nombre spécifique d'itérations à une certaine température, ou lorsque la température atteint zéro.

Le recuit simulé est une méthode directe, qui nécessite seulement l'évaluation de la fonction objective. Des problèmes de toute sorte, même de nature discontinue et complexe peuvent donc être traités. Pour appliquer cet algorithme, il faut seulement fournir un ensemble de paramètres définissant le système et une fonction objectif définissant son état.

Par contre, cette méthode ne gère explicitement aucune contrainte. Dans le cas d'un problème d'optimisation avec contraintes, le concepteur devra lui-même gérer ces fonctions en introduisant par exemple un terme de pénalisation dans la fonction objectif.



### I.8.3.3 La recherche tabou (TS)

La méthode de **recherche tabou** (ou *TS* pour *Tabu Search*) a été formalisée par Glover 1986. Sa principale particularité tient dans la mise en œuvre de mécanismes inspirés de la mémoire humaine.

Sa démarche est dérivée de la méthode de descente, et à chaque itération, la recherche tabou consiste à sélectionner le meilleur élément parmi les voisins, même si cela entraîne une détérioration de la solution actuelle. Cette approche vise à éviter de rester coincé dans des optima locaux, mais elle peut potentiellement entraîner des cycles. Pour surmonter ce problème et corriger cette lacune, un mécanisme particulier appelé "l'aspiration" est mis en œuvre. Ce mécanisme permet de lever l'interdiction d'une configuration précédemment considérée comme tabou lorsque les circonstances le justifient.

La **méthode tabou** constitue une métaheuristique flexible qui permet d'incorporer aisément des connaissances propres au problème traité. De nombreux cas d'application de la recherche tabou sont disponibles dans la littérature (par exemple dans (Bercachi 2010)...etc.)

### I.8.4 La classe des AEs

La classe des AEs regroupe une grande diversité de méthodes dont les plus célèbres sont les **Algorithmes Génétiques (AGs)**, popularisés par (Nizar 2003). De façon générale, trois éléments caractérisent un algorithme évolutionnaire :

- Le maintien d'un ensemble de solutions candidates.
- Le processus de sélection des meilleures solutions en fonction de leur qualité
- Leur manipulation par des opérateurs génétiques, le plus souvent de type croisement et mutation.

La qualité d'un individu est représentée par une valeur scalaire : la **fonction de qualité**, noté  $F_i$  pour l'individu  $i$ . Celle-ci est calculée par rapport aux fonctions objectif et aux contraintes. Il est donc nécessaire de pouvoir décoder chaque individu  $i \in I$  et remonter au vecteur de décision  $x_i = m(i)$  afin de calculer le vecteur objectif  $y_i = f(x_i)$  sur lequel il faut appliquer la fonction de qualité, voir la Figure I.8 (BENANANE Sofiane 2019) :

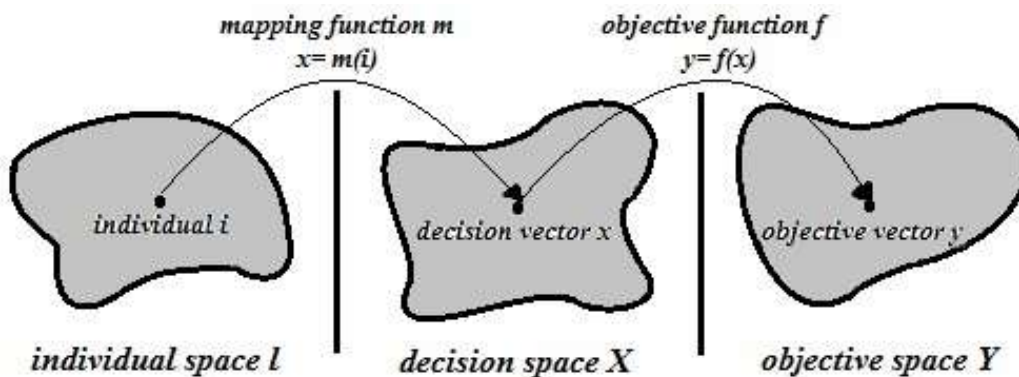


Figure I. 5 : Les espaces des individus reliés par des décisions et des objectifs

Dans la terminologie associée à l'analogie darwinienne, le vecteur  $i$  correspond au *génotype* de l'individu, transcrit en un *phénotype*  $x_i$  à partir duquel il faut estimer les performances  $y_i$  de la solution.

### **1.8.5 Optimisation par le concept de colonie de fourmis (ACO)**

L'optimisation par colonie de fourmis (ACO) est une métaheuristique récente. Cette méthode nous dirige directement vers le comportement d'une colonie de fourmis qui évoluent dans un milieu et échangent des informations en laissant sur leur parcours une piste de phéromones. Dans ACO, chaque fourmi est un agent qui construit une solution et la piste de phéromones représente une information qui sera utilisée de façon probabiliste pour faire évoluer les fourmis-solutions (Ghojogh, Sharifian, and Mohammadzade 2018).

Dans le contexte d'ACO, on considère que les fourmis se déplacent sur un graphe de valeur. Pour construire ce graphe, on définit un ensemble  $E = \{e^1, e^2, \dots, e^k\}$  d'éléments pour constituer les solutions (c'est une sorte d'alphabet de base pour la construction des solutions). On construit alors un graphe qui a ces éléments pour sommets. Les fourmis vont alors pouvoir construire les solutions en parcourant les arcs du graphe. A chaque étape, la fourmi va choisir son déplacement de façon probabiliste en se basant sur :

- L'information localement disponible (phéromone laissée par les autres fourmis et coût des éléments),
- Sa propre mémoire (qui stocke l'état de la solution en construction),
- Les contraintes du problème.

Ainsi, à chaque position, la fourmi a la possibilité d'effectuer autant de mouvements qu'il y a d'éléments connectés à l'élément courant  $e_j$ . Alors, pour chacun des déplacements possibles  $i$  ( $i \in \{1, \dots, k\}$ ), la fourmi aura une probabilité  $p_i$  d'effectuer ce déplacement, probabilité qui dépendra de l'ensemble des caractéristiques précédemment citées. On peut alors essayer de représenter la progression d'une fourmi sous la forme d'un pseudo-code. Les fourmis progressent de façons indépendantes et asynchrones. Une fois que sa solution est complète, chaque fourmi peut effectuer le trajet à rebours et mettre à jour la piste de phéromones en fonction de la qualité de la solution finale obtenue.

Pour éviter une convergence trop rapide (et donc le risque d'obtenir un optimum local), on peut prévoir une évaporation de la piste de phéromones au cours du temps. On peut aussi rajouter une sorte d'observateur global qui considère l'ensemble des fourmis et agit en tenant compte de l'ensemble des informations. Par exemple, on peut rajouter des phéromones sur le chemin de la meilleure fourmi (Nguyen, Reiter, and Rigo 2014).

## I.9 Analyse comparative des algorithmes

Après avoir étalé brièvement quelques méthodes métaheuristiques courantes, on remarque, qu'il existe des points communs à certaines méthodes ainsi que des originalités. Pour cela, on doit mettre en perspective ces méthodes, en choisissant une série de descripteurs communs qui sont les suivants :

- Exploration espace : indique par quels mécanismes l'espace des solutions est exploré et s'il est exploré simultanément par une ou plusieurs solutions en construction,
- Voisinage exploré : indique comment est définie la structure des voisinages utilisés ainsi que leur intervention dans l'algorithme,
- Aléatoire : indique les étapes de l'algorithme qui incluent des mécanismes aléatoires,
- Déterministe : indique les étapes de l'algorithme qui incluent des mécanismes déterministes,
- Mémoire : indique la présence (ou non) d'une mémoire et la méthode utilisée le cas échéant,
- Coopération : indique l'utilisation (ou non) d'une coopération entre solutions et la méthode utilisée le cas échéant,
- Maintien de l'hétérogénéité : indique les étapes au cours desquelles on cherche à maintenir une certaine hétérogénéité afin de mieux explorer l'espace des solutions en prenant le risque d'engendrer une détérioration des solutions proposées.

La comparaison des méta-heuristiques présentées en fonction de ces critères se trouve dans le Tableau I.1 (Bercachi 2010):

**Tableau I. 1:** Comparaison des méta-heuristiques étudiées

Méthode	Exploration espace	Voisinage	Aléatoire
<b>VNS</b>	par un individu génération solution initiale définition des voisinages	plusieurs types de voisinages définis préalablement	génération solution initiale génération d'une solution dans le k'eme voisinage
<b>SA</b>	par un individu génération solution initiale recherche locale	défini pour la recherche locale	exploration voisinage acceptation probabiliste
<b>TS</b>	par un individu génération solution initiale recherche locale	défini pour la recherche locale modifié par les tabous	génération solution initiale
<b>AG</b>	par plusieurs individus génération population initiale mutations	défini pour les mutations combinaisons entre individus	génération population initiale mutation croisement sélection probabiliste

<b>ACO</b>	par plusieurs individus initialisation fournis déplacements autorisés	déplacements autorisés	initialisation fournis choix probabiliste du déplacement
------------	---	---------------------------	--

avec les précisions suivantes:

Méthode	Déterministe	Mémoire	Coopération	Hétérogénéité
<b>VNS</b>	recherche locale	–	–	–
<b>SA</b>	élitisme	–	–	évolution température
<b>TS</b>	recherche locale	utilisation des tabous	–	tabous
<b>AG</b>	élitisme	hérédité	croisement	sélection probabiliste
<b>ACO</b>	–	piste de phéromones	Utilisation piste de phéromones	déplacement probabiliste évaporation phéromones

## I.10 Comparaison des techniques d'apprentissage

Cette comparaison fait référence à l'évaluation et à l'analyse des différentes méthodes, algorithmes et approches utilisés dans le domaine de l'apprentissage automatique (machine learning). L'objectif de cette comparaison est de déterminer quelle technique est la plus appropriée pour résoudre un problème spécifique, en fonction de divers critères tels que la performance, la robustesse, la vitesse de convergence et les ressources requises.

La comparaison des techniques d'apprentissage implique souvent les étapes suivantes :

1. **Sélection des techniques** : Identifier les méthodes d'apprentissage potentielles qui sont pertinentes pour le problème à résoudre. Cela peut inclure des algorithmes de classification, de régression, de regroupement, etc.
2. **Définition des critères d'évaluation** : Déterminer les mesures de performance ou de succès appropriées pour évaluer chaque technique. Cela pourrait inclure des métriques telles que l'exactitude, la précision, le rappel, la F-mesure, l'erreur quadratique moyenne, etc.
3. **Collecte de données** : Rassembler un ensemble de données approprié pour tester les techniques d'apprentissage. Les données doivent être représentatives du problème et comprendre à la fois des données d'entraînement et de test.
4. **Entraînement et évaluation** : Appliquer chaque technique aux données d'entraînement, ajuster les paramètres, et évaluer leurs performances sur les données de test en fonction des critères définis.

5. **Comparaison des résultats** : Analyser les performances des différentes techniques en fonction des critères d'évaluation. Identifier les forces et les faiblesses de chaque méthode pour le problème spécifique.
6. **Sélection de la meilleure technique** : Basé sur les résultats de la comparaison, choisir la technique qui répond le mieux aux exigences du problème. Il est important de prendre en compte la performance, mais aussi d'autres facteurs tels que la simplicité, la capacité à généraliser, et les ressources nécessaires.

La comparaison des techniques d'apprentissage est une étape essentielle pour guider la sélection et l'application des méthodes d'apprentissage automatique dans des projets réels. Cela aide à éviter l'utilisation de méthodes inappropriées et à maximiser les chances de succès dans la résolution des problèmes.

On remarque que la comparaison entre les différentes méthodes d'apprentissage est très rare dans la littérature, mais ceci n'empêche pas de trouver quelques études qui illustrent la performance de chacune selon la conception du problème et le mode de fonctionnement des algorithmes.

On tient compte de plusieurs paramètres : la simplicité de la méthode, la facilité d'adaptation au problème, la possibilité d'intégrer des connaissances spécifiques, la qualité de la meilleure solution trouvée, et la rapidité en termes de temps de calcul nécessaire pour trouver une solution satisfaisante. (Eiben, Hinterding, and Michalewicz 1999); (Cosmin Porumbel, 1979).

Voici un tableau comparatif entre les méthodes de Pareto, de Monte Carlo et des algorithmes génétiques en termes de principes, d'applications et d'avantages :

**Tableau I. 2: Tableau comparatif des caractéristiques entre quelques méthodes d'optimisation**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Méthode de Pareto</b>	<b>Méthode de Monte Carlo</b>	<b>Méthode des Algorithmes Génétiques</b>
<b>Principe</b>	Identifier les solutions non-dominées pour atteindre un compromis optimal entre des objectifs contradictoires.	Utiliser des échantillons aléatoires pour estimer des résultats numériques complexes.	Utiliser des opérations inspirées de l'évolution biologique pour optimiser des solutions dans un espace de recherche.
<b>Applications</b>	Gestion de projet, conception de produits, économie d'énergie, optimisation multi-objectif.	Simulation numérique, évaluation de risques, intégration numérique.	Optimisation de paramètres, conception de circuits, recherche de solutions complexes.
<b>Avantages</b>	Permet de visualiser les compromis entre différentes	Peut traiter des problèmes complexes et non linéaires.	Peut trouver des solutions dans des espaces de

	métriques. Ne nécessite pas de connaître la fonction de distribution sous-jacente.	Fournit des estimations de probabilité pour des événements rares.	recherche vastes et complexes. Peut-être parallélisé pour accélérer la convergence.
<b>Inconvénients</b>	Ne fournit pas une solution unique, nécessite une sélection subjective de la solution finale. Ne fonctionne bien que pour des problèmes avec des objectifs quantitatifs clairs.	Peut nécessiter un grand nombre d'échantillons pour obtenir des résultats précis. Ne garantit pas la convergence vers une solution optimale.	Peut converger vers un minimum local. Le réglage des paramètres peut être délicat. Peut-être coûteux en termes de ressources computationnelles.

En général, les études de comparaison de performance des AGs avec les autres montrent une meilleure performance et une certaine robustesse dans la résolution des problèmes avec leur emploi. Et elle fait la conclusion que les AGs offrent la possibilité d'étendre la méthode vers une stratégie d'adaptation et d'apprentissage.

Cependant plusieurs tendances favorisent l'émergence de systèmes hybrides pour renforcer la robustesse du système d'apprentissage (X.L.Fàbrega 2006).

## I.11 Conclusion

Après avoir exploré les différentes possibilités d'optimisation et d'amélioration de la productivité de ce processus, ces méthodes convergentes toutes pour un même objectif c'est réduire les coûts de production des ouvrages.

Deux grandes familles de méthodes nous permettent de résoudre un problème d'optimisation qui sont :

- les méthodes dites déterministes (méthodes exactes) sont propices à une recherche d'optimum local mais ne permettent pas de sortir des creux (puits) pour rechercher un optimum global.

- les méthodes dites non-déterministes (méthodes approchées ou méthodes stochastiques) tentent d'éviter une convergence vers un optimum local.

Cependant, elles ne permettent pas une recherche locale efficace.

De ce fait, on peut dire que la méthode des algorithmes génétiques (AGs) s'avère la mieux adaptée du moment qu'elle offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques d'optimisation.

Cet état de l'art va nous permettre de proposer une formulation du problème d'optimisation globale des structures du Génie civil en général, et de la construction métallique en particulier.

Dans le large panorama des méthodes d'optimisation discrètes adaptées aux problèmes d'optimisation des structures, nous avons choisi une étude comparative entre l'approche conceptuelle de Pareto, la méthode de Monte Carlo et la technique des algorithmes génétiques que nous allons présenter dans le chapitre suivant pour résoudre ce problème d'optimisation.

***Chapitre II***  
***Les Algorithmes***  
***Génétiques : Méthodes et***  
***Domaines d'utilisation***

## II.1 Introduction

Une méthode de recherche inspirée des mécanismes de l'évolution naturelle des êtres vivants, elle est utilisée dans plusieurs domaines : c'est la méthode des algorithmes génétiques.

Charles Darwin publie en 1860, dans son livre intitulé : « l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature », le rejet de l'existence «des systèmes naturels figés », déjà adaptés pour toujours à toutes les conditions extérieures, en exposant la théorie de l'évolution des espèces qui est la suivante : « sous l'influence des contraintes extérieures, les êtres vivants se sont graduellement adaptés à leur milieu naturel au travers de processus de reproductions » (Eiben, Hinterding, and Michalewicz 1999).

Darwin proposa alors, une théorie qui clarifie l'évolution des espèces en mettant en avant quatre lois :

- La loi de croissance et de reproduction.
- La loi d'hérédité qu'implique quasiment la loi de reproduction
- La loi de variabilité, résultant des conditions d'existence.
- La loi de multiplication des espèces qui amène la lutte pour l'existence et qui a pour conséquence la sélection naturelle.

Par la suite, en 1866, Mendel a commencé par recombinaison des gènes chez les végétaux et l'adresse aux sociétés scientifiques des quatre coins du monde et parvient à publier un article retraçant dix années d'expériences d'hybridation. Il y a eu des réactions plus défavorables que favorables de la part du monde scientifique qui n'était pas prêt à reconnaître la qualité de ses résultats. Ce n'est qu'en 1900 que trois nouveaux articles, signés par Hugo de Vries, Carl Correns et Erich von Tschermak, ont été publiés, révélant des résultats similaires à ceux de Mendel et confirmant ainsi les travaux de ce dernier. C'est à partir du XXe siècle que la notion de mutation génétique a été pleinement établie, comme l'indique (Durand 2004).

Le système reçoit toutes les caractéristiques nécessaires pour les conditions d'exploitations connues au moment de la phase de sa conception, donc les problèmes de traitement de l'information sont résolus de manières figées : ceci empêche une adaptation à des conditions d'environnement inconnues, variables ou évolutives. De ce fait, les chercheurs en informatique étudient donc des méthodes pour permettre aux systèmes d'évoluer spontanément en fonction de nouvelles conditions : **c'est l'émergence de la programmation évolutionnaire.**

Dans les années 1960, John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (the canonical génétique algorithmes AGC) dans son livre « Adaptation in Natural and Artificial Systems ». Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique) (Maskaoui 2017).

Ce modèle sera la base aux recherches ultérieures et sera plus particulièrement repris par David Goldberg qui publiera durant cette année, un ouvrage de



vulgarisation des algorithmes génétiques, et ajouta à la théorie des algorithmes génétiques des idées nouvelles qui stipulent que :

- un individu est lié à un environnement par son code d'ADN.
- une solution est liée à un problème par son indice de qualité ((EL MASKAOUI, BOUSSHINE, and GUERLEMENT 2017)).

Nous traiterons ici, seulement les algorithmes génétiques fondés sur le Néodarwinisme, c'est-à-dire l'union de la théorie de l'évolution et de la génétique moderne. Ils s'appuient sur différentes techniques dérivées de cette dernière : croisement, mutation, sélection...

### II.2 Quelques détails sur les algorithmes génétiques (AGs)

On sait déjà, que Les AGs sont basés sur des phénomènes biologiques et utilisent la notion de sélection naturelle en l'appliquant à des solutions potentielles au problème donné. La solution est approchée par « bonds » successifs, comme dans une procédure de séparation et évaluation (branch & bound).

#### II.2.1 Analogie avec la biologie et terminologie commune aux deux disciplines

D'une manière très brève, tout organisme vivant constitué de cellules et dont les noyaux comportant des chromosomes, sont des chaînes d'ADN. L'élément de base de ces dernières est appelé nucléotide. Aussi, sur chacun des chromosomes il y a une suite de nucléotides constituant ainsi un ensemble qui code les fonctionnalités d'un organisme (tel que la couleur des yeux ou de cheveux...), appelé gène. La position de ce dernier sur le chromosome définit son locus. L'ensemble des gènes est appelé génotype et l'ensemble du patrimoine génétique d'une espèce est appelée génome. Aussi, un même gène avec différentes versions est appelé allèles.

#### II.2.2 Origines

L'utilisation des AGs dans la résolution de problèmes était à l'origine, le résultat des recherches effectuées par John Holland avec ses collègues de l'Université du Michigan, dès 1960. L'innovation présentée par ce groupe de chercheurs était la prise en compte d'une approche de la résolution de problèmes par les algorithmes génétiques avec utilisation de l'Opérateur enjambeur (cross-over). Et c'est cet opérateur qui permet le plus souvent d'approcher l'optimum d'une fonction en combinant les gènes contenus dans les différents individus de la population. Le premier résultat de ces recherches a été la publication en 1975 de *Adaptation in Natural and Artificial System*.

Par la suite, David Goldberg, a popularisé la méthode des algorithmes génétiques à travers son livre "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning" (1989).

Les AGs sont des algorithmes évolutionnistes, comme cité précédemment et ceci a conduit au développement de nombreux algorithmes inspirés de la nature pour l'informatique évolutionniste. On peut dire que les gènes conservés au sein d'une population sont les plus adaptés aux besoins de l'espèce par rapport à son

environnement. En effet, un avantage compétitif va se traduire par une meilleure reproduction des individus qui permet la transmission des allèles à la population.

### II.2.3 Outils bio inspirés

L'existence d'un processus important dans un groupe d'organismes d'une même espèce a été mis en évidence par la génétique, c'est le brassage génétique au moment de la phase de la reproduction lorsque les chromosomes de deux organismes fusionnent et donnent un nouvel organisme.

Les algorithmes génétiques vont nous permettre une évolution des solutions des populations de manière progressive. L'explication réelle de cette analogie en utilisant l'opération d'algorithmes génétiques utilise la terminologie réadaptée suivante :

1 **Chromosome** : désigné par un vecteur ou un caractère subit une perturbation sur l'un au moins de ces gènes, c'est l'une des solutions à un problème considéré ;

2 **Population** : le problème considéré possède plusieurs solutions, l'ensemble est appelé population ;

3 **Gène** : il représente une partie du chromosome, il est constitué de plusieurs bits ou caractères qui codent le chromosome ;

4 **Aptitude** : c'est une évaluation de la « fonction de remise en forme » ou aussi on peut dire que c'est un diplôme d'évaluation conformément à une solution ;

5 **Crossover** : c'est générer un nouveau mélange de solutions existantes ;

6 **Mutation** : c'est une modification aléatoire d'une solution et sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme.

7 **Génération** : ensemble d'individus de la population ayant été créés à la même date.

8 **Fonction de performance** : (fitness) représente la mesure de performance d'un individu au sein d'une population.

Lors de l'exécution d'un typique algorithme génétique, Raphaël Cerf a démontré que le processus de convergence dépend principalement de la mutation et le croisement pouvant être éliminé en théorie, cependant, l'opérateur de croisement fait bien souvent toute la richesse de l'algorithme génétique par rapport à des méthodes de type recuit simulé (Ghojogh, Sharifian, et al 2018).

Pour chaque génération/itération de l'algorithme, les solutions sont sélectionnées, rassemblées en paires et recombinaées pour permettre la création de nouvelles solutions et remplacer les "moins bonnes" selon un certain critère, ainsi de suite. Une fonction d'évaluation associe une valeur d'adaptation (fitness) à chaque individu dans le but de déterminer sa pertinence par rapport au problème (critère de sélection).

La nature assure la pérennité aux seuls individus bien adaptés à l'environnement de se reproduire, avec les meilleures caractéristiques, lesquelles sont recombinaées entre elles (chaque enfant reçoit de bonnes caractéristiques à la fois de son père et de sa mère) pour former à chaque génération de nouveaux individus toujours mieux adaptés à leur environnement.

Pour résumer, Lerman et Ngouenet en 1995 distinguent 4 principaux points qui font la différence fondamentale entre ces algorithmes et les autres méthodes (Mrabet 2017):

1. Dans les AGs, on utilise un codage des paramètres, et non pas les paramètres eux-mêmes.
2. Les AGs travaillent sur toute une population de points, au lieu d'un point unique.
3. Les AGs n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
4. Les AGs utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.

La simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes ont conduit à un nombre croissant de travaux en domaines divers ces dernières années.

### **II.2.4 Cycle opérationnel d'un Algorithme Génétique (AG)**

Un AG est un processus itératif qui s'exécute dans un cycle de population. Ce dernier représente le passage d'une population à la génération suivante. L'évolution génétique d'une population procède en sélectionnant des individus sur la base de leurs pertinences à résoudre le problème relatif à l'espace de solution mesuré par la fonction fitness.

#### Interprétation :

Les éléments les plus pertinents ont la chance à se reproduire par l'intervention d'un croisement entre deux chromosomes ou bien une mutation au niveau des gènes. La succession des cycles conduit à explorer les états possibles et augmente la performance à résoudre le problème posé. Le critère d'arrêt d'algorithme peut être la convergence de l'ensemble des solutions vers le même extremum ou quand le meilleur individu de la population atteint un seuil de performance fixé. Le plus souvent le processus est arrêté au bout d'un nombre d'itérations fixé a priori.

Ce processus peut être schématisé comme suit (figure II.1) :

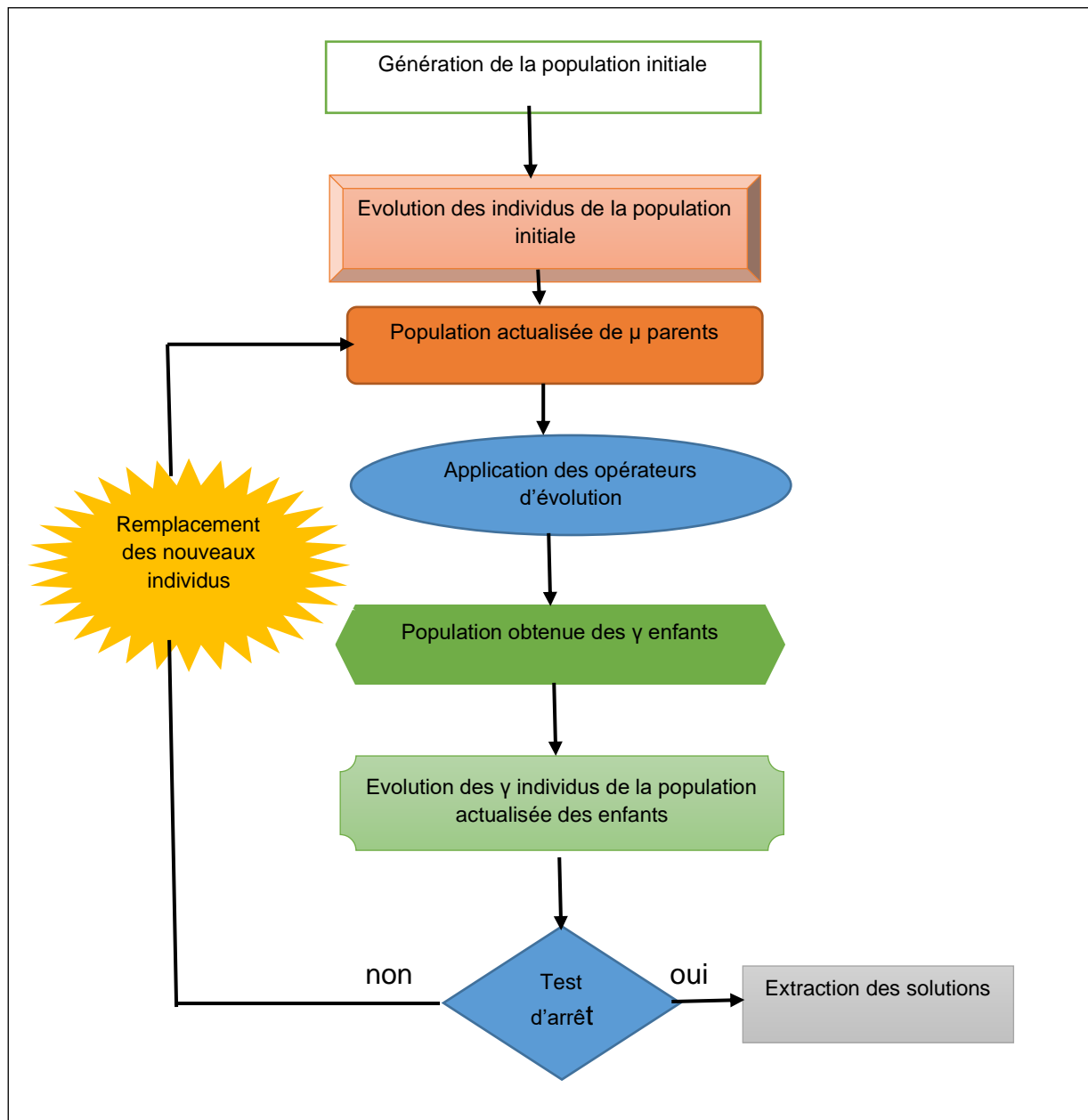


Figure II. 1 : Organigramme canonique d'un AG.

La Figure II.1 représente l'organigramme canonique d'un AG. On procède à simuler l'évolution d'une population d'individus divers (généralement tirée aléatoirement au départ) pour laquelle on va appliquer différents opérateurs (recombinaisons, mutations...) et qui est soumise à une sélection, à chaque génération. Si la sélection s'opère à partir de la fonction d'adaptation, alors la population converge vers une amélioration. C'est une procédure qui ne nécessite aucune connaissance du problème : on peut considérer ça comme une boîte noire comportant des entrées (les variables) et des sorties (les fonctions objectif). L'algorithme ne fait que manipuler les entrées, lire les sorties, manipuler à nouveau les entrées de façon à améliorer les sorties, etc. C'est une méthode qui a été mise en pratique par les éleveurs depuis des milliers d'années : ils ont réussi à façonner de nombreuses espèces animales

selon leurs souhaits, sans avoir de connaissances en génétique ou en biologie moléculaire.

L'objectif est donc double :

- Primo, modéliser ces phénomènes permet de mieux les comprendre, et mettre en évidence les mécanismes qui sont à l'origine de la vie;
- Secundo, exploiter ces phénomènes d'une manière libre et diversifier.

Le domaine de l'évolution artificielle a connu un réel développement ces 15 dernières années. Pourtant, l'idée de simuler sur ordinateurs des phénomènes évolutionnaires remonte à plus loin (les années 50). Des concepts tels que la représentation des chromosomes par des chaînes binaires étaient déjà présents.

Premièrement, cet essor est principalement dû à l'accroissement exponentiel des moyens de calculs mis à la disposition des chercheurs, ce qui leur permet d'afficher des résultats expérimentaux pertinents et prometteurs.

Deuxième est l'abondance du biologiquement plausible.

On a trois types d'AEs qui ont été développés isolément et à peu près simultanément, par différents scientifiques : la programmation évolutionniste (Ghojogh, Sharifian, and Mohammadzade 2018), les Stratégies d'évolution (Christelle REYNES 2007) et les Algorithmes Génétiques (Vallée and Yildizoglu 2001).

Dans les années 90, ces trois champs ont commencé à sortir de leur isolement et ont été regroupés sous le terme anglo-saxon d'Evolutionary Computation.

### II.3 Le rôle et les bienfaits des AGs

Les AGs présentent trois (03) avantages :

- Optimisation de structure composite comportant de nombreux optima locaux. Les AGs peuvent sortir de ces optima locaux afin de converger vers un optimum global.
- Les AGs donnent plusieurs solutions. En effet, une famille de solutions est obtenue, ce qui permet d'atteindre plusieurs optima. Par conséquent, cette particularité nous conduit à une optimisation riche en solutions potentielles. Elle permet aussi d'intégrer des contraintes en post traitement qui ne peuvent pas être prises en compte directement dans l'AG.
- Les AGs permettent aussi bien le traitement de problèmes dépendant de variables discrètes que de variables continues.

#### II.3.1 La programmation non linéaire

La fonction objectif et les limitations sont non linéaires. Pratiquement ils recouvrent toutes les catégories, ce qui fait sortir les autres sous forme de cas particuliers.

Bien entendu, des méthodes mathématiques de résolution portent en général le même nom, pour toutes ces catégories. Nous allons nous limiter aux méthodes de programmation non linéaires qui sont directement en relation avec l'optimisation des structures.

### II.3.2 Définition de l'optimum global et l'optimum local

Comme règle générale, les solveurs renvoient un minimum (ou un optimum) local. Le résultat peut être un minimum (ou un optimum) global, mais ce résultat n'est pas garanti.

Un minimum local d'une fonction est un point où la valeur de la fonction est inférieure à celle des points proches, mais éventuellement supérieure à celle d'un point éloigné.

Un minimum global est un point où la valeur de la fonction est inférieure à celle de tous les autres points réalisables.

Soit un problème d'optimisation mono-objectif  $P_0$  et  $C$  l'ensemble des solutions admissibles du problème.

- si l'on peut prouver que  $\forall x \in C, f(x_g) < f(x)$ , alors on dira que  $x_g$  est l'optimum (minimum) global du problème  $P_0$ ;

-s'il existe un ensemble  $V \subset C$ , contenant  $x_{loc}$ , tel que :

$$\forall x \in V, f(x_{loc}) < f(x), \text{ avec } x \neq x_{loc} \quad (\text{II -1})$$

alors on dira que  $x_{loc}$  est un optimum (minimum) local du problème  $P_0$ . Cette notion est illustrée sur la Figure II.2 :

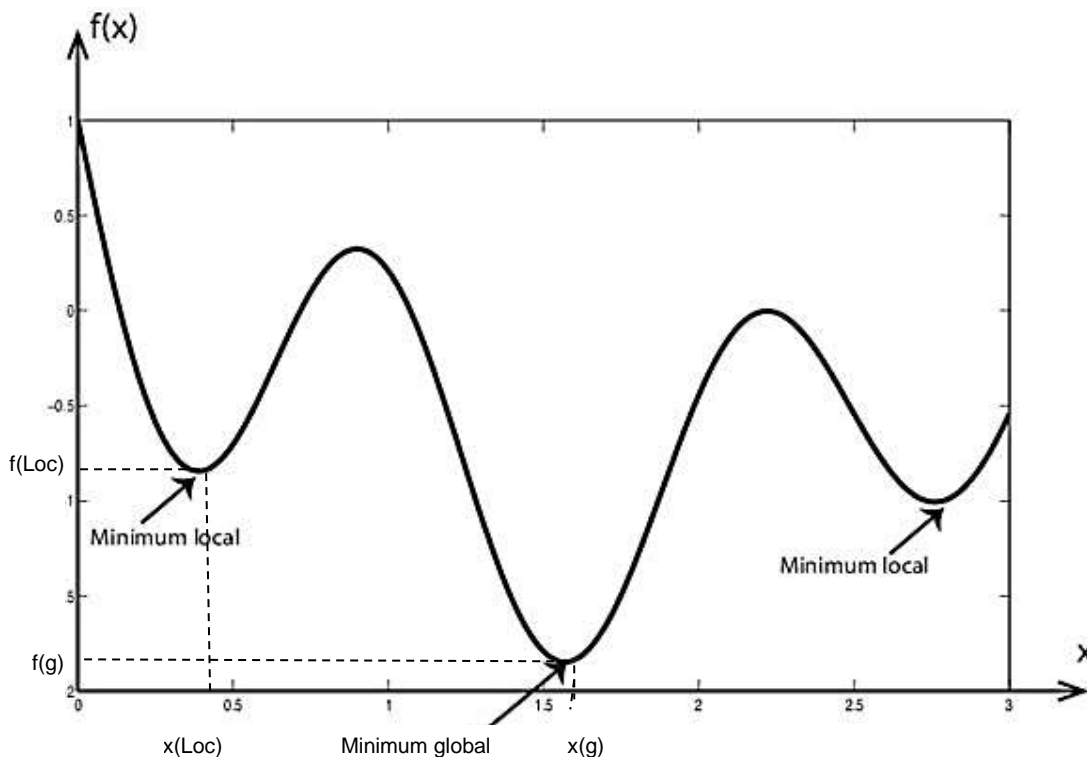


Figure II. 2: Optimum global vs optimum local

## II.4 Quelques exemples d'application

Les AGs ont un aspect important : Ils sont basés sur des opérateurs qui simulent l'évolution d'une population. Ils sont utilisés avec succès dans plusieurs domaines diversifiés tels que : l'optimisation d'emploi du temps, de contrôle de systèmes industriels, de réseaux d'antennes ou encore de commutateurs optiques adiabatiques. Ils sont aussi utilisés dans le domaine de la mécanique, notamment pour l'optimisation de dimensionnement de structures composites stratifiées, optimisation de partitionnement et requêtes de bases de données. On peut dire aussi que les algorithmes génétiques sont utilisés à des fins ludiques sur des jeux qui se jouent en solitaire, avec une fonction d'évaluation déjà calculée via le jeu, tels que : Flappy Bird – Mario – Pacman ect....

## II.5 Règle générale d'un AG

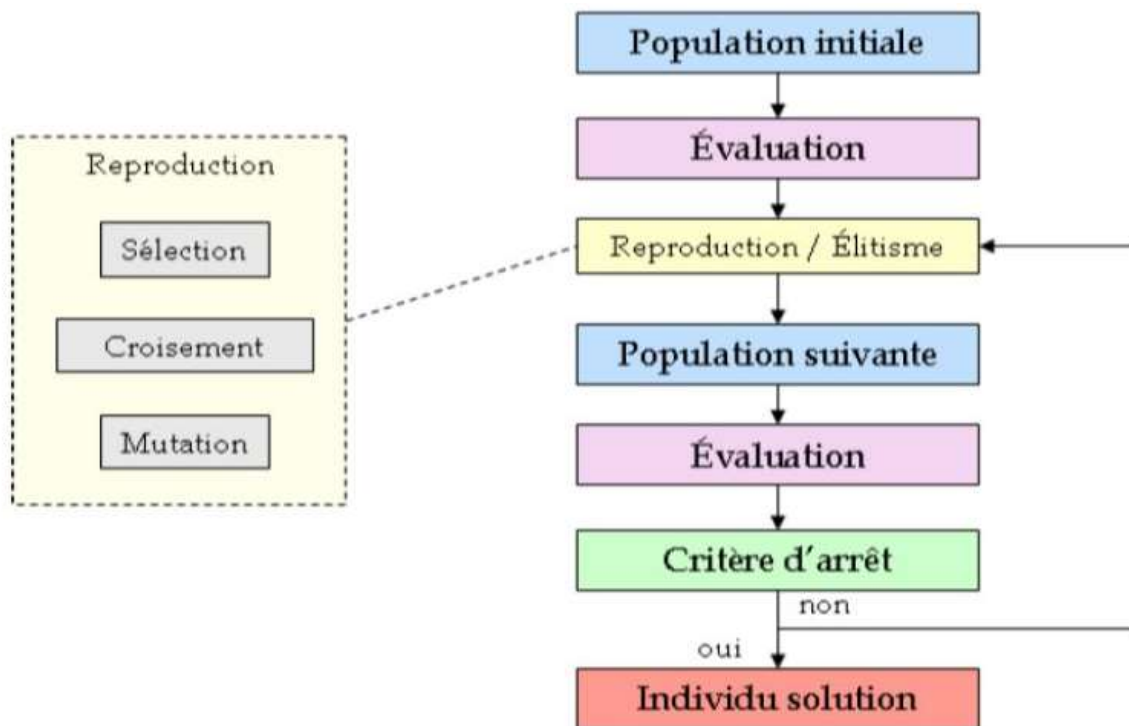
On doit savoir, qu'un AG établit une analogie entre l'ensemble des solutions d'un problème et l'ensemble d'individus d'une population naturelle, et recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Afin de permettre la résolution de problèmes, on doit connaître les principes suivants :

Raphaël Cerf a montré d'ailleurs que le processus de convergence dépend principalement de la mutation, et le croisement pouvant être éliminé en théorie. Par conséquent, la preuve théorique de convergence n'est pas utile presque dans la pratique et donc l'opérateur de croisement fait bien souvent la richesse de l'algorithme génétique par rapport aux méthodes type recuit simulé (Cosmin Porumbel 1979).

En général, on débute avec une population de base qui est composée le plus souvent de chaînes de caractères qui correspondent chacune à un chromosome et on utilisera le codage binaire (ex : 0100110).

Le contenu de la population initiale est généré d'une manière aléatoire et on attribue à chacune des solutions une note qui correspond à son adaptation au problème. Par la suite, on effectue une sélection au sein de cette population.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la Figure II.3 :



**Figure II. 3:** Principe général des AGs

On commence par initialisation d'une population initiale d'individus de façon aléatoire. Décodage des chaînes pour l'évaluation des performances. Calcul de la fonction d'adaptation. Si le critère est atteint donc on a l'individu solution sinon on applique l'élitisme pour la reproduction qui est la technique de la conservation du meilleur individu dans la génération suivante. Génération de la nouvelle population par sélection-croisement-mutation, la figure II.3 présente le cas où les enfants et les individus mutés remplacent les parents. Différents critères d'arrêt du processus peuvent être choisis :

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut-être fixer a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou devient suffisamment lente.

On a défini maintenant d'une manière brève, le déroulement des AGs.

Il est nécessaire d'approfondir les mécanismes de sélection de population ainsi que la notion de diversité qui en découle. Aussi, on va définir les opérateurs évoqués dans l'organigramme de l'algorithme évolutionnaire.

Donner une image détaillée des outils principaux des AGs.



## II.6 Mode opératoire des AGs

On utilise la méthode des AGs lorsqu'il n'existe pas de solutions ou pas de méthodes exactes pour résoudre un ou des problèmes qui n'ont pas de valeurs calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique.

En utilisant les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique comme base, un ensemble de solutions, appelées génotypes, est généré de manière aléatoire. Ces solutions sont ensuite soumises à une stratégie de "survie des plus aptes", simulant ainsi le processus d'évolution des espèces les mieux adaptées ou les plus optimales. La population évolue de manière successive au fil des générations, en effectuant des croisements et des mutations entre les meilleures solutions. Ce processus est répété un certain nombre de fois jusqu'à ce que la solution globalement optimale soit obtenue.

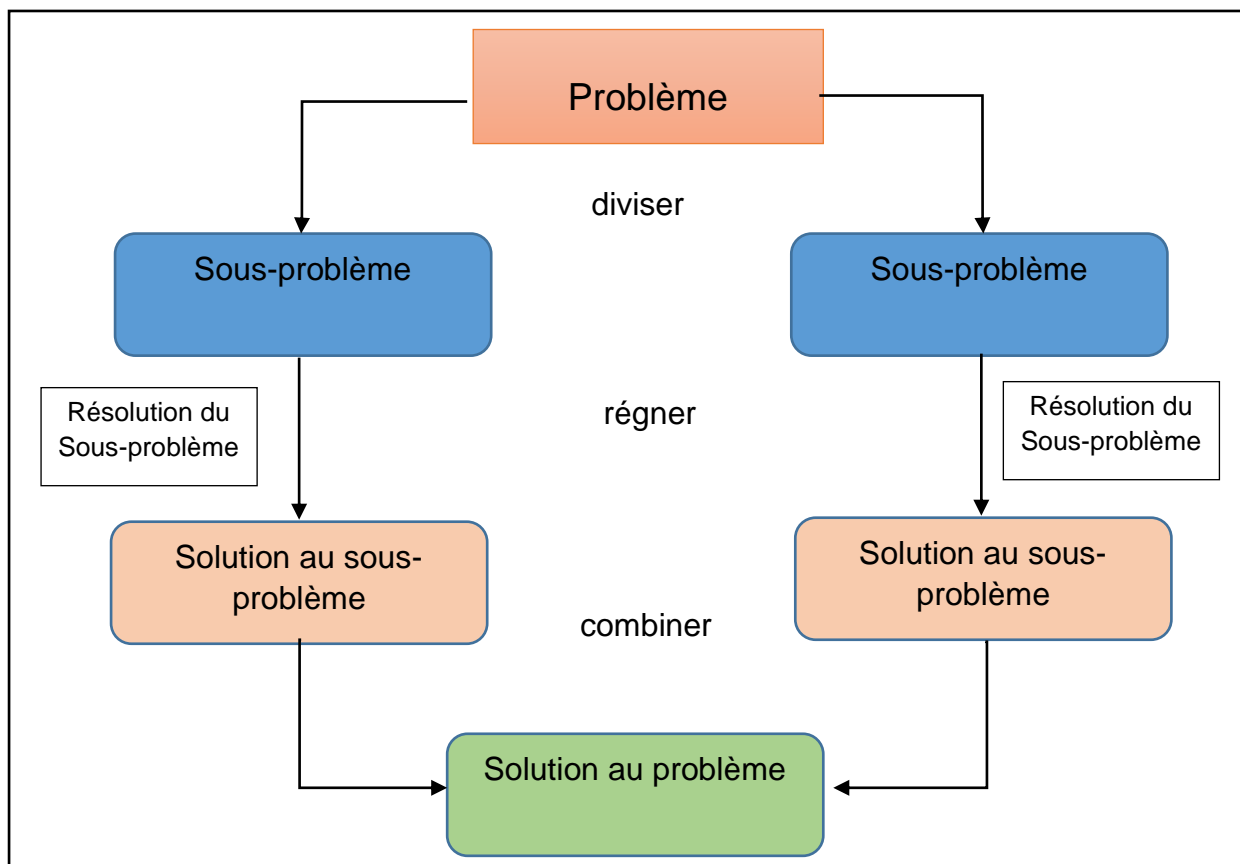
Ce mécanisme d'évolution et de sélection est indépendant du problème à résoudre, seules trois fonctions changent :

- La fonction représentative du problème avec un codage bien particulier de chaque information caractérisant une solution possible, chaque information représente alors un gène et toutes les valeurs que peuvent prendre cette caractéristique représente les allèles possibles pour ce gène, et en concaténant tous ces gènes pour obtenir un chromosome qui lui donne une solution dans son intégralité
- La fonction inverse qui à partir d'un chromosome permet d'obtenir une solution par décodage du génome.
- Enfin, la fonction qui évalue l'adaptation d'une solution à un problème, sa pertinence. Cette technique est d'application générale.

En effet, on n'a pas une idée claire sur la manière ou une méthode requise pour résoudre le problème, quand on utilise les AGs. Il est seulement nécessaire de fournir une fonction permettant de coder une solution sous forme de gènes (et donc de faire le travail inverse) ainsi que de fournir une fonction permettant d'évaluer la pertinence d'une solution au problème donné.

Cette représentation nous permet donc d'étudier des propriétés quasiment impossibles à solutionner dans leur milieu naturel, ou résoudre des problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnables. On peut utiliser la méthode « diviser pour régner » mais ce n'est toujours le cas. Cette méthode est souvent décrite en trois phases comme la montre la Figure II.4.

1. Diviser : on divise le problème initial en plusieurs sous-problèmes indépendants (souvent en découpant la donnée initiale).
2. Régner : on résout chacun des sous-problèmes.
3. Combiner : on mutualise les réponses des sous-problèmes pour résoudre le problème initial.



**Figure II. 4 :** Principe général de la méthode « diviser pour régner »

Les AGs sont utiles dans pratiquement tous les domaines et plus particulièrement, dans les domaines suivants :

- Optimisation : optimisation de fonctions, planification, etc...
- Apprentissage : classification, prédiction, robotique, etc...
- Programmation automatique : programmes LISP, automates cellulaires, etc...
- Etude du vivant, du monde réel : marchés économiques, comportements sociaux, systèmes immunitaires, etc...

Les AGs présentent des différences par rapport aux autres paradigmes dont on peut citer :

- Utilisation d'un codage des informations : les caractéristiques d'une solution sont représentées par un ensemble de gènes (il y a une bijection entre la solution et sa représentation codée)
- Traitement d'une population "d'individus", de solutions : ce qui introduit donc du parallélisme.
- L'évaluation de l'optimum du système ne dépend du domaine choisi.

- On utilise des règles probabilistes tel que : non énumération de l'espace de recherche, exploration d'une certaine partie en étant guidé par un semi hasard (c'est-à-dire on ne doit pas être piégé par un optimum local).

Un AG a généralement la forme suivante :

- 1) Initialiser la population initiale P.
  - 2) Evaluer P.
  - 3) Tant Que (Pas Convergence) faire :
    - a) P' = Sélection des Parents dans P
    - b) P' = Appliquer Opérateur de Croisement sur P'
    - c) P' = Appliquer Opérateur de Mutation sur P'
    - d) P = Remplacer les Anciens de P par leurs Descendants de P'
    - e) Evaluer P
- Fin Tant Que

Le critère de convergence peut être de nature diverse, par exemple :

- Adaptation de la population au problème avec un taux minimum,
- Il ne faut que le temps de calcul soit long,
- Une combinaison de ces deux points.

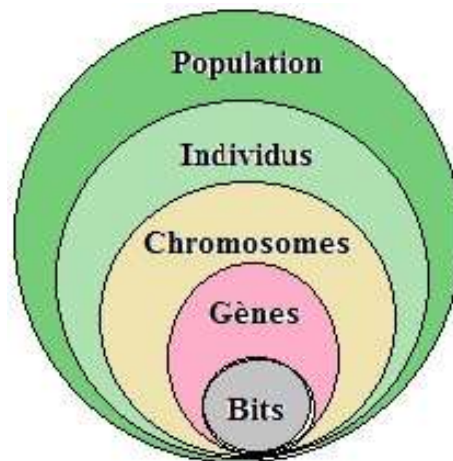
### II.7 Le codage

On assimile chaque paramètre d'une solution à un gène, toutes les valeurs prises par ce dernier sont des allèles de ce gène, pour cela, on doit trouver une manière de coder chaque allèle différent de façon unique (c'est-à-dire établir une bijection entre l'allèle "réel" et sa représentation codée).

On définit un chromosome comme une suite de gènes, on peut par exemple choisir de regrouper les paramètres similaires dans un même chromosome (chromosome à un seul brin) et chaque gène sera repérable par sa position ou son locus sur le chromosome en question.

On représente chaque individu par un ensemble de chromosomes, et une population par un ensemble d'individus.

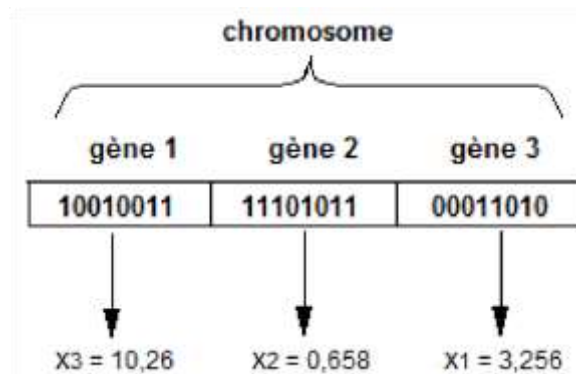
La Figure II.5 illustre bien les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique :



**Figure II. 5:** Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique (Portillo Juan and Negro Valdecantos 2022).

On peut citer trois types de codage régulièrement utilisés, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

- 1- Le codage binaire : c'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire  $\{0,1\}$ . Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes, sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de l'espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.
- 2- Le codage réel peut-être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle, comme cela est illustré dans la Figure II.6:



**Figure II. 6:** Une illustration schématique du codage des variables réelles.

- 3- Le codage de Gray : dans le cas d'un codage binaire, on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. C'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux éléments voisins en termes de distance de Hamming ne

codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : **Cette codification a comme propriété : Entre un élément (n) et un élément (n+1), donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère** (Cosmin Porumbel 1979).

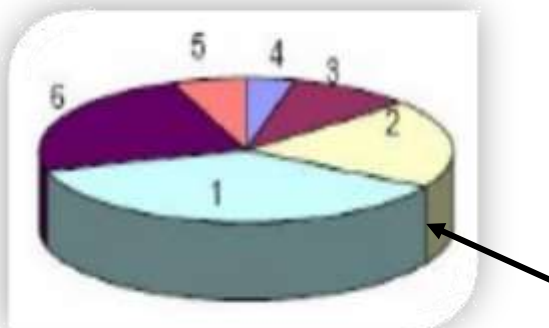
## II.8 La sélection

Cet opérateur va nous permettre de définir quels seront les individus qui vont être dupliqués dans la nouvelle population et qui vont servir de parents (application de l'opérateur de croisement). Soit  $n$  le nombre d'individus, on doit en sélectionner  $n/2$  (l'opérateur de croisement nous permet de repasser à  $n$  individus). L'opérateur de sélection est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale la probabilité de survie d'un individu est directement liée à son efficacité relative au sein de la population.

Il existe plusieurs formes de sélection, on va citer succinctement les plus connues : La méthode de la "loterie biaisée", la méthode "élitiste" la sélection par tournois, la sélection universelle stochastique et la sélection par tournoi.

### II.8.1 La loterie biaisée ou roulette Wheel

C'est la plus connue et la plus utilisée. On constate que chaque individu a une chance d'être sélectionné proportionnelle par rapport à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème et plus ils ont de chances d'être sélectionnés. Afin d'utiliser l'image de la "roue du forain", chaque individu se voit attribué un secteur dont l'angle est proportionnel à son adaptation, sa "fitness". On fait tourner la roue et quand elle cesse de tourner on sélectionne l'individu correspondant au secteur désigné par une sorte de "curseur", qui pointe sur un secteur particulier de celle-ci après qu'elle soit arrêtée de tourner comme indiqué sur la Figure II.7.



Individu 1  
Individu 2  
Individu 3  
Individu 4  
Individu 5  
Individu 6

Figure II. 7: Sélection par la méthode de la roue de loterie.

Cette méthode, bien que largement répandue, elle a pas mal d'inconvénients :

- En effet, elle a une forte variance. Ce phénomène est bien sûr très dommageable car cela va complètement à l'encontre du principe des AGs qui veut que les meilleurs individus soient sélectionnés de manière à converger vers une solution la plus optimale possible. Donc l'inconvénient majeur de cette méthode repose sur le fait qu'un individu n'étant pas le meilleur peut tout de même dominer la sélection.
- A l'inverse, on peut arriver à une domination écrasante d'un individu "localement supérieur". Donc elle peut aussi engendrer une perte de diversité par la domination d'un super individu. Imaginons par exemple qu'on ait un individu ayant une fitness très élevée par rapport au reste de la population, disons dix fois supérieure, il n'est pas impossible qu'après quelques générations successives on se retrouve avec une population ne contenant que des copies de cet individu. On se retrouve donc face à problème connu sous le nom de "convergence prématurée" ; l'évolution se met donc à stagner et on n'atteindra alors jamais l'optimum, on restera bloqué sur un optimum local.
- Un autre inconvénient est sa faible performance vers la fin de la recherche quand l'ensemble des individus se ressemblent.

### **II.8.2 La technique élitiste**

Cette méthode consiste à sélectionner les  $n$  individus dont on a besoin pour la nouvelle génération  $P'$  en prenant les  $n$  meilleurs individus de la population  $P$  après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus. Il faut signaler que cette méthode est encore pire que celle de la loterie biaisée puisqu'elle amènera à une convergence prématurée encore plus rapidement et surtout de manière encore plus sûre que la méthode de sélection de la loterie biaisée ; en effet, la pression de la sélection est trop forte, la variance est nulle et la diversité est inexistante, du moins le peu de diversité qu'il pourrait y avoir ne résultera pas de la sélection mais plutôt du croisement et des mutations.

### **II.8.3 La sélection par tournois**

La sélection par tournois est la méthode avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Le principe est le suivant : on effectue un tirage avec remise de deux individus de  $P$ , et on les fait "combattre". Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité  $p$  compris entre 0.5 et 1. On répète ce processus  $n$  fois de manière à obtenir les  $n$  individus de  $P'$  qui serviront de parents. La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de  $P$  permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection.

### II.8.4 La sélection universelle stochastique

La sélection universelle stochastique est une méthode qui semble être très peu utilisée et la variance est faible, donc peu de diversité introduit, on se contentera d'exposer sa mise en œuvre, nous n'entrerons donc pas dans les détails. On prend l'image d'un segment découpé en autant de sous segments qu'il y a d'individus. Les individus sélectionnés sont désignés par un ensemble de points équidistants.

$$\begin{cases} p_u = \theta + (u - 1)f_{moy} & u = 1, 2, \dots, N \\ p_v = \sum_{j=1}^v f(I_j) & v = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (\text{II -8})$$

Le pseudo code de la sélection stochastique universelle est donné ci-après :

```

u=1  v=1  pour
i=1,..., N faire
    tant que  $p_u < p_v$  faire
        Sélectionner  $I_i$ 
        Incréments  $u$ 
    fin
fin

```

Cette sélection est également précédée par un réajustement de la fonction d'adaptation.

### II.9 L'opérateur de croisement ou crossover

L'opérateur de croisement (crossover) utilisé par les AGs 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. La Figure II.8 illustre le croisement à n points généralisé.

Cet opérateur est appliqué après avoir appliqué l'opérateur de sélection sur la population P; on se retrouve donc avec une population P' de  $n/2$  individus et on doit doubler ce nombre pour que notre nouvelle génération soit complète.

On va donc créer de manière aléatoire  $n/4$  couples et on les fait se "reproduire".

Les chromosomes (ensembles de paramètres) des parents sont alors copiés et recombinaison de façon à former deux descendants possédant des caractéristiques issues des deux parents.

En effet, plus le nombre de points de croisements est grand et plus la probabilité de croisement sera élevée et plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information. Aussi, plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité.

Ci-dessous, la Figure II.8.a illustrant un cas de croisement en un point, la Figure II.8.b pour un croisement en deux points, et enfin la Figure II.8.c représentant un cas de croisement avec  $l_g - 1$  points de croisements (on notera d'ailleurs sur ce schéma que l'échange d'un segment avec son homologue ne se fait pas toujours) :

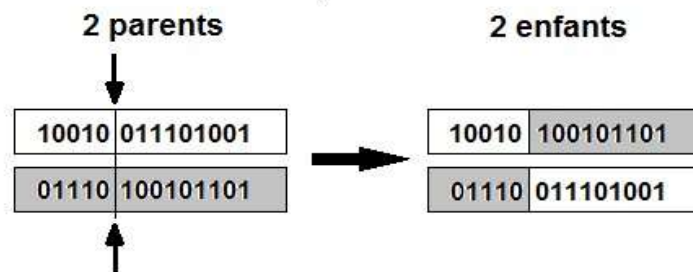


Figure (a) : Cas de croisement avec un point de crossover.

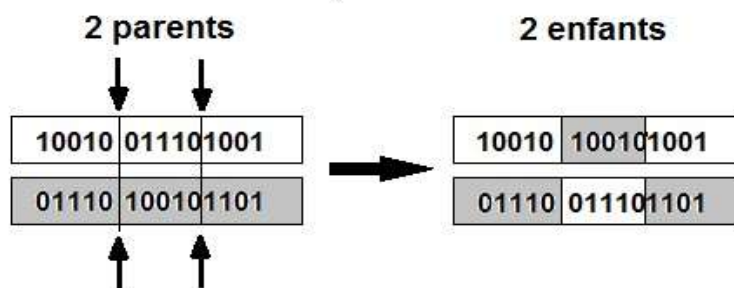


Figure (b) : Cas de croisement avec 2 points de crossover.

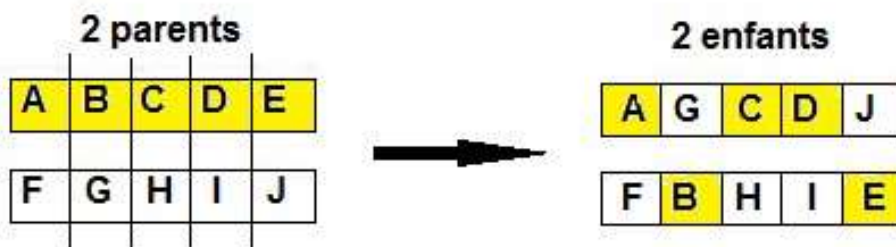


Figure (c) : Cas de croisement uniforme.

Figure II. 8: Quelques Cas de croisement.

On peut citer aussi une autre méthode très utilisée dans le cas des problèmes modélisés par un codage binaire, il s'agit du **croisement uniforme**.

L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche. Par exemple, si on considère 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. Par contre, 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, créer un nouvel individu possédant cette combinaison, grâce à laquelle il est possible qu'il soit encore plus adapté que ses parents.



On peut dire donc que l'opérateur de croisement assure le brassage du matériel génétique et l'accumulation des mutations favorables. En termes concrets, cet opérateur permet de créer de nouvelles combinaisons des paramètres des composants.

Malgré tout, il est possible que l'action conjointe de la sélection et du croisement ne permette pas de converger vers la solution optimale du problème.

## II.10 L'opérateur de mutation

Cet opérateur consiste à changer la valeur allélique d'un gène avec une probabilité  $p_m$  très faible (voir la Figure II.9), généralement comprise entre 0.01 et 0.001.

On peut aussi prendre  $P_m = 1 / l_g$  où  $l_g$  est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome.

Une mutation consiste simplement à inverser un bit (ou plusieurs bits), mais vu la probabilité de mutation c'est extrêmement rare, se trouvant en un locus bien particulier et lui aussi déterminé de manière aléatoire ; on peut donc résumer la mutation de la manière suivante :

On utilise une fonction censée nous retourner *true* avec une probabilité  $P_m$ .

**Pour** chaque locus **faire**

Faire appel à la fonction

**Si** cette fonction nous renvoie *true* **alors**

on inverse le bit se trouvant à ce locus

**FinSi**

**FinPour**

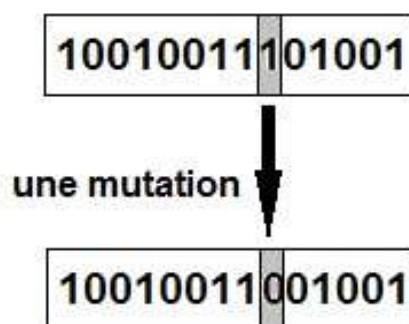


Figure II. 9: Exemple d'une mutation.

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 de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur", il introduit du "bruit" au sein de la population. Cet opérateur offre quatre grands avantages :

- Garantit la diversité de la population, ce qui est important pour les AGs.
- Permet d'éviter un phénomène connu sous le nom de **dérive génétique**. On parle de dérive génétique quand certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment des autres gènes et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes.
- Permet aussi, de 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 crossover entre des individus strictement identiques est bien sûr totalement sans conséquences ; on aura beau de choisir la méthode de croisement qu'on veut, et on se retrouvera toujours à échanger des portions de chromosomes identiques et la population n'évoluera pas.

L'évolution étant bloquée, on n'atteindra jamais l'optimum global. La mutation entraînant des inversions de bits de manière aléatoire permet de réintroduire des différences entre les individus et donc de nous extirper de cette situation. Il est quand même utile de garder à l'esprit que ceci n'est pas une solution "miracle" et qu'il est bien entendu plus intelligent de ne pas utiliser de méthodes de sélection connues pour entraîner ce type de problème.

- La mutation permet d'atteindre la propriété d'ergodicité qui nous octroi la garantie 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, on a la certitude mathématique que n'importe quelle permutation de notre chaîne de bits peut apparaître au sein de la population et donc, tout point de l'espace de recherche peut être atteint.

Grâce à cette propriété on est donc sûr de pouvoir atteindre l'optimum global et éviter l'optimum local.

## II.11 L'opérateur de remplacement

C'est un opérateur qui est simple à utiliser, il consiste à réintroduire les descendants obtenus par application successive des trois opérateurs successifs : de sélection, de croisement et de mutation (la population P') dans la population de leurs parents (la population P).

De ce fait, ils vont remplacer une certaine proportion de ceux-ci, proportion pouvant bien sûr être choisie. Le rapport entre le nombre d'individus nouveaux qui va être introduit dans la population P et le nombre d'individus de cette population est nommé TAILLE\_POPULATION.

On cite essentiellement deux méthodes de remplacement différentes (Souquet Amédée 2004) :

1) Le **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, 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 **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).

De plus dans bien des cas, étant donné que même un enfant ayant une faible performance remplace forcément un parent, on n'atteint pas la meilleure solution mais on s'en approche seulement.

2) Le **remplacement élitiste** : dans ce cas, on garde au moins l'individu possédant les meilleures performances d'une génération à la suivante. En général, on peut partir du principe qu'un nouvel individu (enfant) prend place au sein de la population que s'il remplit le critère d'être plus performant que le moins performant des individus de la population précédente.

Ce type de stratégie améliore les performances des AEs dans certains cas. Mais présente aussi un désavantage en augmentant le taux de convergence prématuré.

Dans ce cas-là, le taux de remplacement n'est pas de 100 %, la taille de la population augmente donc au cours des générations successives, on dit qu'il y a **overcrowding** (surpeuplement). Il faut donc trouver un moyen pour sélectionner les parents qui seront supprimés, qui vont mourir.

## II.12 Un petit exemple simple utilisant les différents opérateurs

Cet exemple va permettre de mettre en œuvre sur une génération tous les opérateurs cités auparavant de manière à pouvoir observer le résultat de l'application successive de chacun d'eux.

Nous reprenons l'exemple qui est dû à (D.E. Goldberg 1989). Ça consiste à trouver le maximum de la fonction  $f(x) = x$  sur l'intervalle  $(0, 31)$  où  $x$  est un entier naturel.

La première étape consiste à coder la fonction. Par exemple, nous utilisons un codage binaire de  $x$ , la séquence (chromosome) contenant au maximum 5 bits. Ainsi, nous avons  $x = 2 \rightarrow \{0,0,1,0\}$ , de même  $x = 31 \rightarrow \{1,1,1,1,1\}$ . Nous recherchons donc le maximum d'une fonction de fitness dans un espace de 32 valeurs possibles de  $x$ .

Plus la valeur de  $x$  sera élevée plus on se rapprochera du maximum de la fonction identité et donc plus la fitness sera grande.

### II.12.1 Tirage et estimation de la population initiale

Nous fixons la taille de la population à  $N = 4$ . Nous tirons donc de façon aléatoire 4 chromosomes sachant qu'un chromosome est composé de 5 bits, et chaque bit dispose d'une probabilité  $\frac{1}{2}$  d'avoir une valeur 0 ou 1.

Le maximum, 16, est atteint par la deuxième séquence. Voyons comment l'algorithme va tenter d'améliorer ce résultat.

Tableau II. 1: La population initiale

Individu	Séquence	Fitness	% du total
1	00101	5	14.3
2	10000	16	45.7
3	00010	2	5.7
4	00110	12	34.3
Total		35	100

### II.12.2 La sélection

Une nouvelle population va être créée à partir de l'ancienne, on opte par le processus de sélection de la roue de loterie biaisée ou partielle :

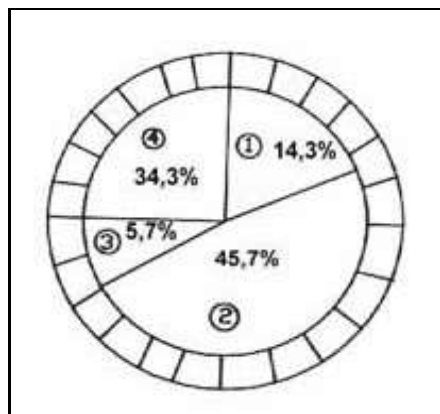


Figure II. 10: Sélection de la population par la méthode de la roue de loterie biaisée

On fait tourner la roue 4 fois de suite, en général on fait tourner  $n/2$  fois, soit 2 fois dans ce cas, mais le nombre 2 étant trop petit on décide de la faire tourner 4 fois. On obtient la nouvelle population :

**Tableau II. 2:**Individus sélectionnés par la technique de la loterie partielle

Individu	Séquence
1	10000
2	01100
3	00101
4	10000

### II.12.3 Le croisement

Les parents sont sélectionnés au hasard. Nous tirons aléatoirement un lieu de croisement (site ou *locus*) dans la séquence. Le croisement s'opère alors à ce lieu avec une probabilité  $p_c$ . Le tableau II.3 donne les conséquences de cet opérateur en supposant que les chromosomes 1 et 3, puis 2 et 4 sont appariés et qu'à chaque fois le croisement s'opère (par exemple avec  $p_c = 1$ ).

Les points de crossover sont eux aussi tirés au hasard. On obtient le résultat suivant :  
Résultat de l'application de l'opérateur de croisement avec un point de crossover sur les individus sélectionnés par la loterie biaisée

**Tableau II. 3:**Application de l'opérateur de croisement par la loterie biaisée

$l = 3$	$l = 2$
100 00	01 100
001 01	10 000
10001	01000
00100	10100

### II.12.4 La mutation

Dans cet exemple à codage binaire, la mutation est la modification aléatoire occasionnelle (de faible probabilité) de la valeur d'un bit (inversion d'un bit). Nous tirons ainsi pour chaque bit un chiffre aléatoire entre 0 et 1 et si ce chiffre est inférieur à  $p_m$  alors la mutation s'opère. Le tableau 3, avec  $p_m = 0.05$ , met en évidence ce processus.

**Tableau II. 4:**Résultat de l'application de l'opérateur de mutation sur les individus engendrés par croisement

Anc. Chr.	Tirage aléatoire	Nveau Bit	Nveau Chr.
10001	15 25 36 <b>04</b> 12	1	10011
00100	26 89 13 48 59	–	00100
01000	32 45 87 22 65	–	01000
10100	47 <b>01</b> 85 62 35	1	11100

Maintenant que la nouvelle population est entièrement créée, on peut faire la nouvelle évaluation.

### II.12.5 Retour à la phase d'évaluation

Le maximum est maintenant de 28 (séquence 4). Nous sommes donc passés de 16 à 28 après une seule génération. Bien sûr, nous devons recommencer la procédure à partir de l'étape de sélection jusqu'à ce que le maximum global « 31 », soit obtenu, ou bien qu'un critère d'arrêt ait été satisfait.

**Tableau II. 5:**La nouvelle population après application des différents opérateurs

Numéro	Chaîne	Fitness	% du total
1	10011	19	32.2
2	00100	4	6.8
3	01000	8	13.5
4	11100	28	47.5
Total		59	100

#### Interprétation :

Le seul intérêt de cet exemple est de montrer une trace simple, sur une génération, de l'application successive des différents opérateurs. Bien sûr, un tel "problème" peut être résolu sans l'utilisation d'AGs.

Dans la partie suivante nous allons exposer différents problèmes qui sont considérés comme difficiles, nécessitant un temps de calcul important avec une approche algorithmique classique, et exposer des mises en œuvre possibles à l'aide d'AGs. On montrera en quoi ce processus améliore la rapidité de résolution, ou carrément permet une résolution qui n'aurait pas été possible autrement vu la taille des entrées du problème et sa complexité en temps.

## II.13 Exemple concret sur les AGs : problème du voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce est un exemple classique appartenant à des problèmes NP-complets (Bercachi 2010).

Problématique : ça consiste à visiter un nombre  $N$  de villes en un minimum de distance sans passer deux fois par la même ville. Il faut donc d'optimiser le coût d'un parcours dans un graphe complet possédant un certain nombre de sommets, en passant une et une seule fois par chacun. On a vu qu'il y a des méthodes déterministes pour résoudre le problème, mais le temps de calcul est très long : elles reviennent à parcourir toutes les solutions possibles et à déterminer la moins coûteuse.

Le but : est donc de montrer comment modéliser le problème à partir d'algorithmes génétiques et utiliser les divers opérateurs que nous avons à disposition, qui ont été définis antérieurement.

Ceci nous conduira ensuite à montrer les avantages de cet outil par rapport à une résolution de type déterministe.

### II.13.1 Représentation du problème

Le problème du voyageur de commerce peut se modéliser à l'aide d'un graphe complet de  $n$  sommets et les arrêtes sont pondérées par un coût strictement négatif. Pour l'implantation de notre algorithme, l'instance sera modélisée comme distance euclidienne sur  $n$  points du plan, pour construire la matrice de coût.

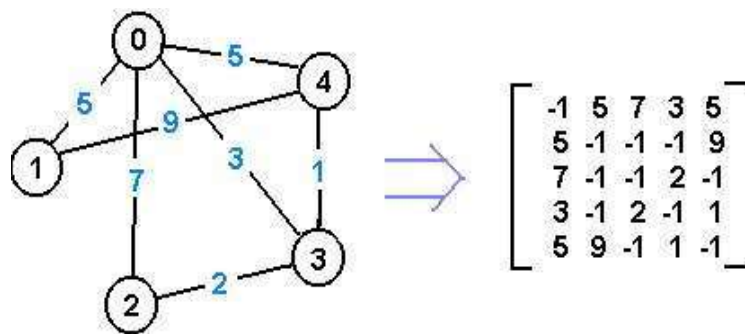


Figure II. 11: Exemple de modélisation du graphe sous forme de matrice

### II.13.2 L'espace de recherche

L'espace de recherche est l'ensemble des permutations de  $\{1, 2, \dots, n\}$ .

Une de ces permutations représente un point de cet espace de recherche.

### II.13.3 Codage des points de l'espace de recherche

Une première idée serait de coder chaque permutation (c'est à dire : chaque point de l'espace de recherche) par une chaîne de bits.

Par exemple, pour  $n = 10$  :

0011 0111 0000 0100 0001 0010 0101 0110

représente la permutation :

3 7 0 4 1 2 5 6

On s'aperçoit bien que chaque élément de l'ensemble de permutation soit codé sur :

$i = E ( \ln ( n ) / \ln ( 2 ) )$  bits , E étant la fonction de partie entière.

Sachant qu'une permutation est de taille  $n$ , la chaîne de bits sera alors de taille  $n * i$ .

### II.13.4 Représentation d'une solution

Comme nous l'avons déjà dit le voyageur de commerce doit revenir à son point de départ et passer par toutes les villes une fois et une seule. Nous avons donc codé une solution par une structure de données comptant autant d'éléments qu'il y a de villes, c'est à dire une permutation. Chaque ville y apparait une et une seule fois. Il est alors évident que selon la ville de départ que l'on choisit on peut avoir plusieurs représentations différentes du même parcours (Vallée and Yildizoglu 2001).

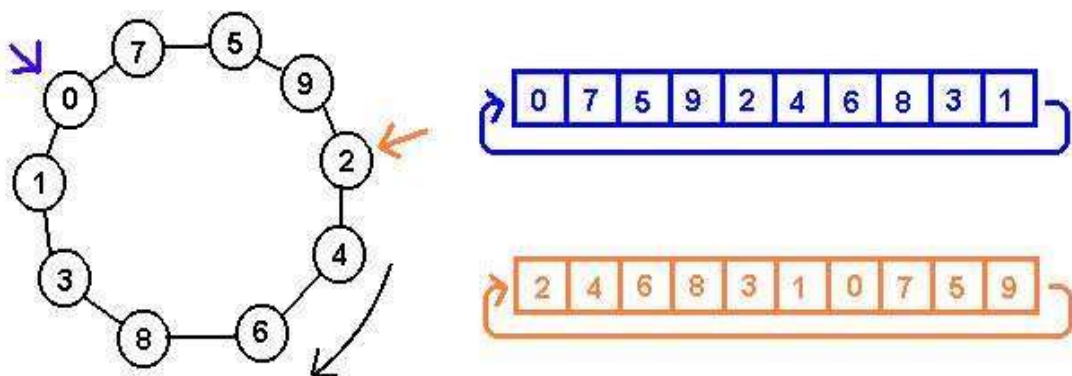


Figure II. 12: codage d'une solution pour un ensemble de villes dans un tableau.

### II.13.5 Sélection

Nous utilisons ici la méthode de sélection par roulette biaisée. On calcule d'abord la valeur moyenne de la fonction d'évaluation dans la population :

$$\bar{f} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f(P_i),$$

où  $P_i$  est l'individu  $i$  de la population et  $m$  la taille de la population. La place d'un individu  $P_i$  dans la roulette est proportionnelle à  $f/f(P_i)$ . On sélectionne alors  $m/2$  individus pour la reproduction. Il y a aussi la possibilité d'avoir une politique d'«élitisme». C'est à dire qu'à chaque étape de sélection le meilleur chromosome est automatiquement sélectionné.



**II.13.6 Croisement**

On considère deux parcours, il faut combiner ces deux parcours pour en construire deux autres. Nous pouvons suivre la méthode suivante :

1. On choisit aléatoirement deux points de découpe.
2. On interverti, entre les deux parcours, les parties qui se trouvent entre ces deux points.
3. On supprime, à l'extérieur des points de coupe, les villes qui sont déjà placées entre les points de coupe.
4. On recense les villes qui n'apparaissent pas dans chacun des deux parcours.
5. On remplit aléatoirement les trous dans chaque parcours.

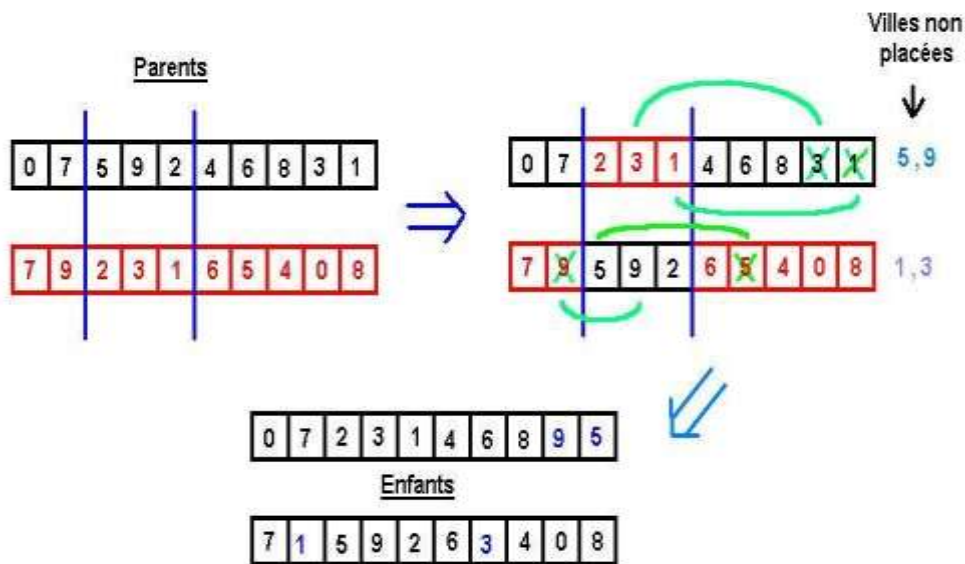


Figure II. 13: Exemple de croisement.

**II.13.7 Mutation**

Il s'agit ici de modifier un des éléments d'un point de l'espace de recherche, soit d'une permutation. Dans notre cas, cela correspond donc à une ville. Quand une ville doit être mutée, on choisit aléatoirement une autre ville dans ce problème et on intervertit les deux villes.

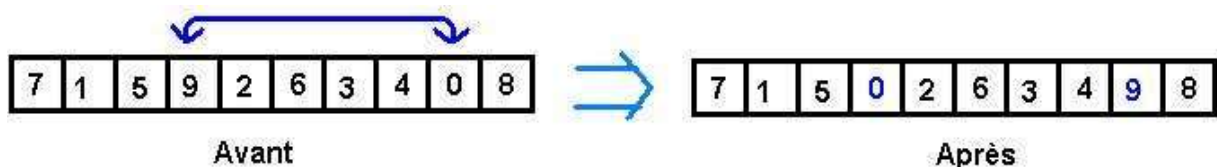


Figure II. 14: Exemple de mutation

### II.13.8 Calcul de fitness ou fonction d'évaluation

Le seul impératif sur la valeur d'adaptation est qu'elle soit croissante avec l'adaptation de la solution au problème. Un parcours valide renverra une valeur supérieure à un individu (solution potentielle) qui n'est pas solution au problème. On pourra décider par la suite qu'une solution non correcte sera de fitness négative et dans l'autre cas sera alors positive.

Lorsque cette dernière éventualité se produit, il faut que le comportement suivant soit respecté, à savoir : plus notre chemin sera court, plus la fitness qui lui est associée sera forte.

On en déduit alors rapidement qu'il faut que la valeur d'adaptation varie dans le sens inverse de la distance correspondante au parcours. Par souci de simplicité, on pourra éventuellement choisir comme valeur d'adaptation, l'inverse de la longueur du parcours.

On s'aperçoit bien alors que cet algorithme est aléatoire (ou dit approximatif) dans le sens où elle se base sur des méthodes de calculs non déterministes. L'expérience (c'est à dire la programmation) montre que les résultats obtenus sont convaincants, nous parvenons à obtenir un ensemble de bonnes solutions en un temps raisonnable.

### II.13.10 Point de comparaison de complexité

Le problème du voyageur de commerce "The Traveling Salesman Problem." consiste donc à trouver le chemin le plus court qui passe par un ensemble donné de villes, visitant chaque ville exactement une fois et revenant à la ville de départ. Knuth aborde ce problème sous un angle algorithmique en présentant diverses techniques, notamment :

1. **Méthode de la force brute** : Il explore l'idée de résoudre le TSP en examinant toutes les permutations possibles des villes et en calculant la longueur de chaque itinéraire. Cependant, il souligne que cette approche devient rapidement inefficace pour un grand nombre de villes en raison de la croissance exponentielle du nombre de permutations.
2. **Méthodes heuristiques** : Knuth présente également des méthodes heuristiques pour résoudre le TSP de manière plus efficace, bien que ces méthodes ne garantissent pas la solution optimale. Il discute de l'algorithme du plus proche voisin, qui consiste à choisir à chaque étape la ville la plus proche non visitée. Il aborde également d'autres heuristiques telles que l'algorithme de l'arbre couvrant minimum.
3. **Programmation dynamique** : Knuth explore en détail l'approche de la programmation dynamique pour résoudre le TSP, qui consiste à diviser le problème en sous-problèmes plus petits et à résoudre ces sous-problèmes de manière récursive. Cette approche est plus efficace que la force brute pour un grand nombre de villes, mais elle reste coûteuse en termes de calcul.

En résumé, Donald E. Knuth aborde le problème du voyageur de commerce dans "The Art of Computer Programming" en examinant différentes approches

algorithmiques pour le résoudre, allant de la force brute aux méthodes heuristiques et à la programmation dynamique. Ses discussions fournissent une base solide pour comprendre les défis et les stratégies de résolution du TSP.

### Complexité via une méthode de résolution classique (méthode déterministe) :

Un calcul rapide de la complexité montre qu'elle est en  $O(n!)$  où  $n$  est le nombre de villes. En supposant que le temps pour effectuer un trajet est d'un (1)  $\mu\text{s}$ , le tableau II.6 témoigne de l'explosion combinatoire.

**Tableau II. 6:** Possibilités de chemins avec temps de calcul en fonction du nombre de villes

<i>NB VILLES</i>	<i>NB POSSIBILITES</i>	<i>TEMPS DE CALCUL</i>
5	120	120 $\mu\text{s}$
10	181440	0.18 ms
15	43 MILLIARDS	12 h
20	60 E +15	1928 ans
25	310 E + 21	9,8 Milliards A.

### Complexité via une méthode de résolution avec algorithmes génétiques (méthode approximative) :

Un calcul de complexité de l'algorithme abstrait nous montre qu'elle est en  $O(n^2)$  ou  $n$  est le nombre de villes.

Détail du calcul :  $O(\text{AGs}) = O(n^2) + O(\text{Muter}) + O(\text{Croiser}) + O(\text{Sélection Naturelle})$

$$= O(n^2) + O(n) + O(2n) + O(n)$$

$$= O(n^2)$$

**Tableau II. 7:** Possibilités de chemins avec temps de calcul en fonction du nombre de villes

<i>NB VILLES</i>	<i>NB POSSIBILITES</i>	<i>TEMPS DE CALCUL</i>
5	25	25 $\mu\text{s}$
10	100	100 $\mu\text{s}$
15	225	225 $\mu\text{s}$
20	400	400 $\mu\text{s}$

Les résultats entre la méthode déterministe et approximative ne sont pas comparables en soi, elles utilisent des méthodes différentes pour arriver à des résultats différents. Comme dis précédemment, dans un cas, on cherche la solution optimale, dans le second, une solution presque optimale.

On remarque bien à l'aide de ces calculs que pour parvenir à ces solutions, on consomme respectivement un temps exponentiel (explosion combinatoire) et un temps polynomial (quadratique) par rapport au nombre de villes.

### II.14 Conclusion

A travers ce chapitre, on peut dire que les applications des AGs sont multiples, on peut citer :

- Optimisation des fonctions numériques ;
- Traitement d'image ;
- Optimisation d'emplois du temps ;
- Contrôle de systèmes industriels (Cosmin Porumbel 1979) ;
- Cryptographie, apprentissage des réseaux de neurones (Souquet Amédée 2004), etc.

Les exemples d'application cités ci-dessus, nous ont permis de nous rendre compte que le codage des données pour modéliser un problème est complexe. D'autre part, nous avons aperçus les difficultés pour choisir d'une manière pertinente, de bons paramètres pour les différents opérateurs à savoir : mutation, croisement, sélection, et remplacement. On doit gérer même les choix par rapport aux opérateurs eux-mêmes, sachant que certains sont plus appropriés au problème et qu'ils permettent d'optimiser.

La naissance d'un nouvel individu, nécessite la prise aléatoire d'une partie des gènes de chacun des deux parents. On appelle ce phénomène, qui est issu de la nature croisement (crossover). Il s'agit d'un processus essentiel pour explorer l'espace des solutions possibles. Une fois la sélection terminée, les individus sont aléatoirement répartis en couples.

Enfin, l'opérateur de mutation, en générant de nouveaux gènes, il a pour rôle l'exploration de la totalité (en théorie) de l'espace d'état, ce qui correspond à la propriété d'ergodicité de parcours d'espace, essentielle aux AG pour leurs propriétés de convergence. En effet les preuves théoriques de convergence des AG peuvent fonctionner sans croisement, mais pas sans mutation.

Il faut signaler que, les AGs seuls ne sont pas très efficaces dans la résolution d'un problème. Mais, ils apportent par conséquent, assez rapidement une solution acceptable. Néanmoins, il est possible de l'améliorer assez efficacement en le combinant avec un algorithme déterministe.

Nous traiterons dans le chapitre suivant, la problématique des structures métalliques en utilisant la méthode des algorithmes génétiques et appliquer bien sûr, les différents opérateurs cités ci-dessus afin de la résoudre.

***Chapitre III***  
***Difficultés posées par les***  
***structures métalliques***

### III.1 Introduction

Ce chapitre aborde la manière dont nous formulons le problème de conception globale pour résoudre les problèmes d'optimisation des structures métalliques. Il présente également une vue d'ensemble des différents critères d'optimisation, variables et contraintes associées.

Notre attention se concentre les étapes du processus et principalement sur la première qui est la conception du bâtiment, où des décisions cruciales sont prises concernant les éléments techniques essentiels du système porteur. Ce système est responsable de la stabilité de la construction, ainsi que de la sécurité des occupants.

### III.2 Les premières étapes du processus de fabrication du bâtiment à ossature métallique

Pendant la première phase, il est essentiel de déterminer la configuration, l'emplacement et l'orientation spatiale de la structure, ce qui nécessite de prendre de nombreuses décisions importantes. De plus, il est souvent nécessaire de proposer des dimensions préliminaires pour les composants structurels à ce stade précoce de la conception.

On distingue deux caractéristiques essentielles :

- le nombre considérable de décisions à prendre par les concepteurs et ;
- leur impact significatif sur les phases ultérieures du projet.

Ces décisions revêtent une importance capitale, car elles influencent directement l'évaluation du coût global du projet ainsi que les délais nécessaires à sa réalisation.

En effet, il est remarquable que plus de 80 % des ressources financières nécessaires à la production d'un bâtiment sont influencées par les décisions prises au cours des premiers 10 % du processus de conception (Nizar 2003). Cette constatation est soutenue par une étude qui indique que le coût total du projet représente entre 70 et 80 % du budget (Maskaoui 2017). Par conséquent, il est crucial de veiller à ce que les décisions prises durant cette phase soient cohérentes et judicieuses.

Le concepteur doit définir des critères d'évaluation et être en mesure d'évaluer et de comparer un ensemble de solutions en fonction de ces critères. D'un autre côté, dans le processus de prise de décision, il est essentiel de proposer un ensemble de solutions qui respectent les contraintes liées aux variables ou paramètres de décision.

Dans le domaine de la construction métallique (CM), ces variables concernent les caractéristiques des objets techniques, telles que la nature, la forme, les dimensions et les composants.

Pour formuler le problème d'aide à la décision associé à la conception globale des structures en CM, il est nécessaire d'étudier en premier lieu les critères d'optimisation: leur nature, leur évaluation et leur prise en compte par rapport au problème de conception globale.

### III.3 Le procédé classique de concevoir une construction métallique

Maintenant, le processus de conception d'une construction métallique présente des lacunes et est loin d'être optimal. Une optimisation globale efficace est difficile à atteindre, car la conception ne prend pas en compte toutes les contraintes liées au projet simultanément. Cela inclut les contraintes réglementaires ainsi que celles liées au fonctionnement, au confort, à l'esthétique, à la durabilité, à l'économie, etc.

De plus, cette optimisation globale tant recherchée ne peut être réalisée que si toutes les variables impliquées dans le processus de conception, de réalisation et de maintenance sont analysées simultanément, sans exception.

À l'heure actuelle, une solution de conception n'est qualifiée d'optimale que si elle prend en compte le maximum de critères et de variables, en accordant une attention particulière à ceux qui sont les plus importants, tout en respectant toutes les contraintes.

En effet, il est possible de concevoir une superstructure optimale qui est associée à une infrastructure coûteuse, ce qui conduit à une structure globale non économique et donc non optimale. Les deux sous-ensembles de la structure de l'ouvrage sont étroitement liés, ce qui rend le choix encore plus délicat.

D'un autre côté, il est crucial de prêter une attention particulière à la conception des assemblages lors de l'optimisation globale de la conception des structures. Les nœuds doivent être conçus en tenant compte des exigences pratiques de fabrication et de l'économie. Dans ce contexte, les caractéristiques spécifiques des nœuds doivent être prises en compte lors du calcul de la structure. Malgré les preuves économiques émanant de différentes recherches, cette approche n'a pas encore été largement adoptée dans la pratique.

Un autre point essentiel concerne les objectifs à atteindre lors d'une opération d'optimisation. L'approche traditionnelle d'optimisation des structures métalliques vise à minimiser le poids de la structure. Cette approche est également observée dans des travaux de recherche récents, tels que ceux réalisés par (Jayachandran, 2003) et la méthodologie proposée par (Ede et al. 2018), etc.

En réalité, le programme de montage et les coûts des systèmes de fondation ont une influence significative sur l'économie du projet. Ainsi, une optimisation globale doit prendre en compte à la fois la superstructure et les fondations. Une nouvelle approche de conception est nécessaire pour les professionnels de la construction métallique. Selon cette approche, une dimension optimale doit viser à réduire le coût global de production, même si cela conduit à une structure plus lourde.

### III.4 Objectifs poursuivis par la recherche

La méthode vise la recherche de solutions de conception globale optimales pour aider le concepteur, en phase initiale de conception, à répondre aux questions suivantes selon les données du projet émanant du programme du maître d'ouvrage, de l'enveloppe budgétaire, de l'esquisse architecturale, de l'étude géotechnique, des normes et textes réglementaires en vigueur et de l'environnement économique, Quelles décisions faudra-t-il prendre pour les choix de parties suivantes :

- Faut-il encastrier ou articuler les appuis, ou peut-être faut-il encastrés les uns et articulés les autres ?
- Faut-il opter pour des nœuds rigides, articulés, semi-rigides, ou des combinaisons entre ces trois types ?
- Quelles dimensions préliminaires faut-il donner aux éléments structuraux suivants : poteaux et poutres, éventuellement : les éléments de palées de stabilité et/ou voiles (en béton ou en acier) et/ou noyau en béton, etc. - planchers et toiture, - fondations ?
- Quel type d'acier doit-on utiliser : S 235, S 275, S 355, acier de haute résistance HR, acier inoxydable, etc. ?

Tout ça, est dans le but d'apporter une aide, à priori, pour la minimisation du coût global de l'ouvrage, en ayant toujours à l'esprit qu'il s'agit d'un travail préliminaire en phase initiale, et que les décisions finales seront prises par le concepteur durant les prochaines phases.

Ainsi, notre but final est d'optimiser les structures métalliques des bâtiments à l'amont de la phase de conception, pour satisfaire toutes les exigences pratiques de coût et de délais, et les exigences réglementaires.

Notre plan d'étude inclut les mesures suivantes :

- 1) Formulation du problème de conception globale des structures métalliques. Il faut dans ce cas, identifier les variables et les contraintes à prendre en compte dans ce problème.
- 2) Proposition d'une méthode d'optimisation de la conception globale en construction métallique, sur la base de l'intégration des coûts de la superstructure et des fondations faisant intervenir tous les postes de production (matériaux, mise en œuvre, fabrication, montage). Cet impératif soulève la question de la maîtrise des coûts en construction métallique.
- 3) Recherche d'une méthode de résolution du problème d'optimisation formulé précédemment, les objectifs étant bien définis.
- 4) Réalisation d'un prototype informatique pour l'implémentation de la méthode proposée.
- 5) Exploitation de cette méthode pour la formulation de connaissances expertes : le prototype sera utilisé sous la forme d'un « simulateur », associé à une méthodologie d'acquisition de nouvelles connaissances concernant la recherche de nouvelles solutions de conception globale superstructure/fondations.

## III.5 Formulation du problème général lié à la conception

### III.5.1 Formulation implicite du problème d'optimisation

On peut dire que, l'aspect global de la conception des structures métalliques, peut être scindé globalement comme un problème d'optimisation qui consiste à minimiser l'objectif ou le critère du coût global ( $C_G$ ) de la structure en respectant des conditions ou appelées aussi contraintes (Nizar 2003).



Le coût global ( $C_G$ ) est une fonction de certain nombre de variables telles que :  $I$ ,  $X_a$  et  $X_n$  dont on va présenter explicitement dans les sections suivantes. Ainsi, on peut formuler le problème d'optimisation de la manière simple suivante :

$$\text{Min } C_G (I, X_a, X_n) \quad (\text{III -1})$$

où

$C_G$  : le coût global de production de la structure.

$I$  : vecteur des caractéristiques dimensionnelles des barres.

$X_a$  : vecteur nature des appuis.

$X_n$  : vecteur nature des nœuds.

Le coût global ( $C_G$ ) d'une construction métallique (superstructure plus fondations) est écrit :

$$(C_G) = (C_S) + (C_F) \quad (\text{III -2})$$

$(C_S)$  : Coût Superstructure en acier.

$(C_F)$  : Coût Fondations en béton armé.

Le coût ( $C_S$ ) est lui-même composé des coûts suivants :

$$(C_S) = (C_{Mat}) + (C_{Fab}) + (C_{Mon}) \quad (\text{III -3})$$

$(C_{Mat})$  : Coût des matériaux des profils et assemblages,

$(C_{Fab})$  : Coût de la fabrication en atelier,

$(C_{Mon})$  : Coût de montage des différents éléments sur site.

Le coût ( $C_F$ ) est composé des deux entités élémentaires suivantes :

$$(C_F) = (C_{Ter}) + (C_{PrF}) \quad (\text{III -4})$$

$(C_{Ter})$  : Coût des terrassements.

$(C_{PrF})$  : Coût de production des fondations. Il intègre les coûts des matériaux et les coûts d'exécution.

### III.5.2 Critères d'optimisation

Les critères d'optimisation sont des indicateurs utilisés pour évaluer la satisfaction des objectifs. Un critère peut être lié à une seule dimension, tel que le critère du poids, ou à plusieurs dimensions, tel que le critère du coût qui prend en compte les quantités de matériaux, le temps d'exécution, etc.

### III.5.3 Description générale des éventuels critères d'optimisation (Terki Hassaine M et al, 2022)

**a) Quantité de matériaux** : C'est un critère quantitatif et multidimensionnel dans la mesure où plusieurs types de matériaux peuvent être mis en œuvre dans un projet de

construction. Si on se limite au cas d'une structure métallique simple, ces matériaux sont principalement l'acier de la superstructure (profils, couverture, boulons, cordons de soudures, etc.) et le béton armé des fondations. En évaluant le coût de chacune des quantités précédentes, nous pouvons établir un coût global des matériaux permettant l'agrégation des différentes dimensions de quantités et servant de moyen de mesure du critère quantité de matériaux.

**b) Critère architectural :** C'est un critère qualitatif qui traduit l'aspect architectural de la construction. Selon l'importance qu'on attribue à ce critère, certaines solutions de conception peuvent être écartées. Par exemple, pour certaines constructions, l'utilisation de treillis ou de pièces à sections variables peut être considérée comme inadmissible d'un point de vue purement esthétique

**c) Critère temps et coût de mise en œuvre :** C'est un critère à plusieurs dimensions qualitatives et quantitatives. Il concerne les phases du processus de production de la structure : la fabrication dans un atelier spécialisé, et le montage sur chantier. La prise en compte de ce critère est conditionnée par les paramètres suivants :

- le nombre des éléments à assembler : plus le nombre d'éléments est grand, plus le temps nécessaire pour les phases de fabrication en atelier et de montage est grand.
- le type des assemblages : il existe des types d'assemblages plus difficiles à réaliser que d'autres, notamment ceux dont la conception inclut des raidisseurs.
- le type des fondations : certaines fondations ne présentent pas de difficultés majeures lors de leur mise en œuvre. Ces fondations ne demandent pas de grands moyens pour être réalisées ; c'est le cas des fondations superficielles. Les fondations profondes, par contre, sont plus difficiles à réaliser.
- le type du sol : la qualité du sol de fondation a une influence directe sur le degré de difficulté des opérations d'excavation. D'autre part, la présence d'une nappe phréatique à faible profondeur peut gêner considérablement la mise en œuvre des fondations ce qui exige des travaux supplémentaires pour son rabattement. Le coût d'exécution sera donc majoré.
- l'aspect industrialisation ou préfabrication : les éléments de la structure peuvent être conçus de façon à simplifier leur préfabrication. Aussi, le choix de ces éléments peut être fait de telle sorte que l'on favorise l'utilisation des produits standards et préfabriqués existant sur le marché. La préfabrication évite beaucoup de problèmes de montage sur le chantier et réduit la durée de réalisation de la structure.

**d) Qualité environnementale :** La qualité environnementale d'un bâtiment concerne les caractéristiques de l'ouvrage qui lui confèrent l'aptitude de satisfaire aux besoins de protection de l'environnement extérieur et de création d'un environnement intérieur confortable et sain. Ces objectifs sont atteints par élimination ou réduction admissible des agents agressifs.

Cette notion englobe, entre autres, les conditions de confort d'ambiance, notamment les qualités thermiques et acoustiques d'un bâtiment. Tandis que pour l'environnement extérieur, il s'agit de réduire les nuisances et les déchets, et de rationaliser l'utilisation des ressources naturelles en énergie et en matériaux recyclables, etc.

**e) Performances techniques :** La qualité environnementale d'un bâtiment se réfère aux caractéristiques qui lui permettent de répondre aux exigences de protection de l'environnement extérieur et de créer un environnement intérieur confortable et sain.

En ce qui concerne l'environnement extérieur, l'objectif est de réduire les nuisances, les déchets et de rationaliser l'utilisation des ressources naturelles en énergie et en matériaux recyclables.

En ce qui concerne les performances techniques, il s'agit d'un critère multidimensionnel qui peut inclure les considérations suivantes :

- **Adaptation au sol :** L'adaptation de la superstructure au sol se fait par le biais des fondations. Une bonne adaptation avec des fondations économiques.
- **Limitation des déformations :** Pour des raisons architecturales ou fonctionnelles, le concepteur peut être amené à respecter des limites de déformation pour un ou plusieurs éléments de la structure. Il convient de ne pas confondre cette considération avec les limites réglementaires de déformation.
- **Résistance au feu :** Cet aspect revêt une importance particulière pour les bâtiments fermés destinés à accueillir un grand nombre de personnes. Il convient de noter que l'acier présente un comportement défavorable face aux températures élevées. Toutefois, l'exigence de résistance au feu ne doit être ajoutée aux critères de conception de la structure que si l'acier doit résister seul. Dans le cas contraire, d'autres mesures peuvent être prises, telles que l'utilisation de sprinklers, la ventilation, la protection de la structure exposée, etc.

**f) Autres critères :** Ces derniers peuvent être pris en considération lors des décisions relatives à la conception technique en construction métallique, tels que la rapidité d'exécution d'un projet, ou un aspect spécifique, comme la préférence pour l'utilisation d'une technique adaptée à la région.

Dans la liste des critères, nous n'avons pas évoqué les critères de vérification de l'équilibre statique, de stabilité et rigidité de la structure globale (renversement, tassement des fondations, etc.), et les critères de résistance, de stabilité et de rigidité des éléments (rupture, flambement, déplacement excessif). En réalité, ces critères sont pris en compte dans la résolution globale en tant que contraintes devant être satisfaites par toute solution de conception, et ne peuvent donc faire l'objet d'une optimisation.

En CM, plusieurs critères conditionnent la conception globale d'une structure, on peut résumer les critères cités ci-dessus par la Figure III .1 (Anon 1985) :

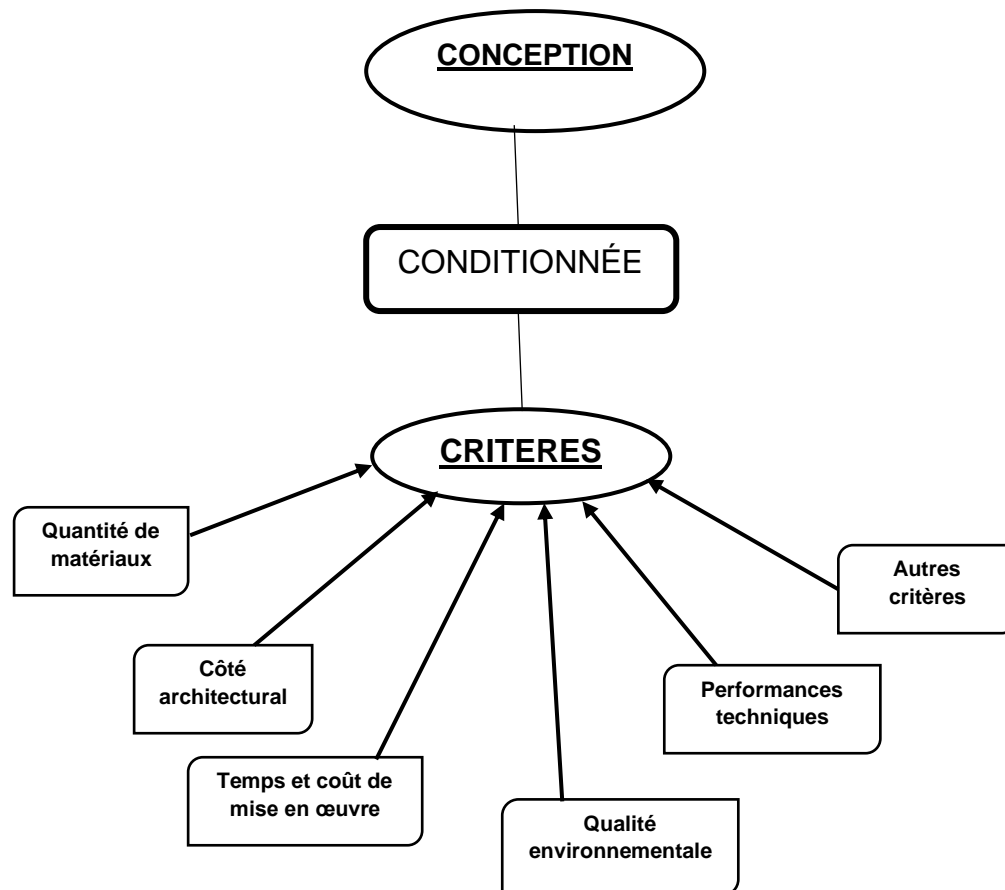


Figure III. 1: Critères de conception.

### III.6 Les changements dans l'optimisation

Dans le cadre de l'optimisation de la conception globale en construction métallique, les variables sont représentées par les composants de la structure. En effet, les caractéristiques diversifiées de ces composants ont un impact direct sur le critère de coût global de production, qui est l'objectif d'optimisation visé dans cette étude.

### III.7 Description globale des variables conceptuelle

Une ossature métallique est composée de plusieurs éléments assemblés. L'assemblage doit être conçu de manière globale afin de garantir que la structure répond aux exigences prévues pour l'ouvrage. La conception préliminaire, réalisée avant tout calcul détaillé, implique les étapes suivantes :

- Prédéterminer avec précision le cheminement des charges à travers la structure en prévoyant tous les éléments structuraux et les assemblages nécessaires.
- Sélectionner soigneusement les hypothèses de liaison entre les éléments de structure et les fondations, en veillant à leur faisabilité technique et en recherchant la meilleure économie globale pour le projet.

- Assurer la cohérence des déformations relatives des systèmes structurels et leur compatibilité avec les conditions d'utilisation de l'ouvrage.

Dans cette approche de conception globale, les variables suivantes peuvent être identifiées :

- **La géométrie et la forme extérieure de la structure**

Géométrie et forme extérieure de la structure : Ces caractéristiques sont généralement déterminées par le programme et les intentions exprimés par le maître d'ouvrage (tel que surface habitable, dimensions en plan de la construction, etc.). Cependant, si le programme le permet, des solutions optimales peuvent être recherchées en explorant différentes formes et dimensions. Le bureau d'études en CM, par exemple peut rechercher une solution de conception optimale en explorant des solutions de différentes formes et de dimensions variables.

- **Profilés des sections**

Pour optimiser l'utilisation du matériau, le choix des profilés doit se baser sur des sections dont les caractéristiques répondent au mieux à leur rôle structurel. Les sections sélectionnées minimisent les dimensions géométriques tout en maximisant les capacités de stabilité, de résistance et de rigidité.

Dans la perspective de la normalisation économique, les structures métalliques sont souvent réalisées à partir de profils laminés ou reconstitués soudés, en I à ailes courtes, et en H à ailes larges.

L'emploi de profilés à inertie variable est aussi une pratique favorable pour les structures de type « halle industrielle ». Par ailleurs, leur côté esthétique, le choix de tels éléments permet un gain d'acier grâce à l'optimisation qu'il autorise en répartissant l'acier selon les efforts sollicitant la structure.

- **Nature des liaisons**

Les liaisons permettent le transfert des charges de la structure vers les fondations. Elles peuvent être rigides ou articulées, bien que dans la réalité, leur comportement soit généralement semi-rigide. Les liaisons internes et externes influencent la répartition des efforts dans la structure et les charges transmises aux fondations. Le choix des liaisons peut avoir un impact significatif sur les dimensions et le coût des fondations, ainsi que sur la performance globale de la structure.

C'est pour cela que la nature des liaisons est une variable à considérer avec beaucoup de soin.

- **Type d'assemblages**

Les assemblages en construction métallique doivent correspondre aux types de liaisons souhaitées (encastrement, articulation) ou aux caractéristiques de résistance et de rigidité spécifiques (liaison semi-rigide). Le choix des types d'assemblages doit être cohérent avec les sections des profilés utilisés. La conception des assemblages doit être intégrée dès les phases préliminaires du projet, car elle influence directement le temps de fabrication des composants et le coût de la main-d'œuvre. (Hamchaoui 1997).

**• Type de fondations**

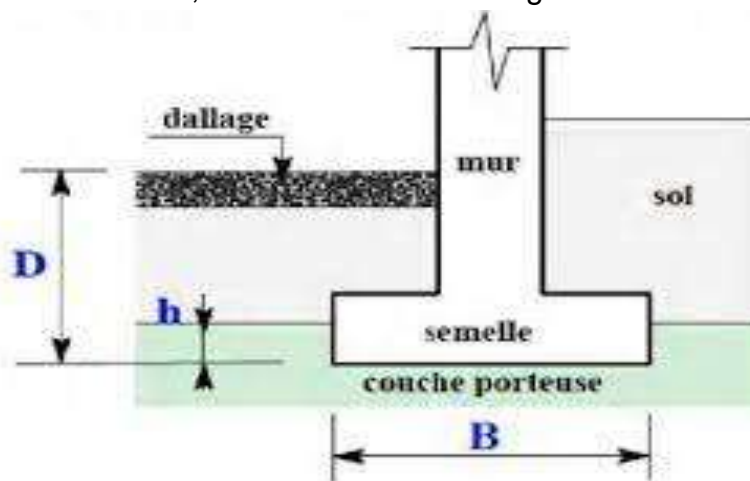
Les fondations dans un projet peuvent être superficielles (telles que les semelles isolées, les semelles filantes ou les radier) ou peuvent être profondes (comme les pieux). Le choix du type de fondations dépend des caractéristiques du sol et des charges appliquées par la superstructure : leurs natures et leurs intensités. Cependant, si plusieurs variantes de fondations sont possibles, le choix s'oriente généralement vers la solution la plus économique.

**• Nature du sol de fondation**

Souvent la nature du sol de fondation est une donnée fixe relative aux caractéristiques du site de construction, mais il arrive que le concepteur veuille à améliorer la portance du sol d'assise en modifiant ces caractéristiques ou en optant pour des travaux de renforcement ou de substitution de certaines couches du sol. C'est souvent une alternative très intéressante à la réalisation de fondations qui paraissent coûteuses ; par exemple, des fondations profondes sur un sol de mauvaise qualité.

**Profondeur de fondation**

Un autre cas fréquent de prise de décision est celui du choix de la profondeur  $D$  à donner aux fondations, comme la montre la Figure III .2 :



**Figure III. 2:** Schéma de principe d'une semelle avec la profondeur  $D$ .

Lors du choix de la profondeur des fondations, qu'il s'agisse d'un sol homogène ou d'un sol à multicouches avec des couches plus résistantes plus bas, une profondeur plus grande augmente généralement la capacité portante du sol. Cela peut permettre de réduire les dimensions des fondations et les coûts associés au matériau en béton armé.

Cependant, il faut prendre en compte que des travaux de terrassement plus importants peuvent également engendrer des coûts supplémentaires. Ainsi, la profondeur ( $D$ ) peut être considérée comme une variable à optimiser.

**• Répartition des éléments de stabilité**

La répartition des éléments de stabilité tels que les portiques, les palées de contreventement ou les voiles etc..., peut également être prise en compte. L'espacement des porteurs verticaux, si le programme architectural le permet, peut réduire le nombre d'éléments à fabriquer et à installer. Par conséquent, cela peut augmenter la quantité de matériaux nécessaires, réduire la stabilité de la structure et entraîner des charges supplémentaires transmises aux fondations.

**• Autres variables**

D'autres variables de conception peuvent également être prises en compte, mais elles ont généralement un impact plus faible sur la conception globale. Par exemple, le choix du type de couverture et de parois peut avoir un impact limité. En revanche, des variables telles que l'orientation des éléments verticaux de stabilité dans le plan ou le type de planchers peuvent nécessiter des recherches approfondies pour évaluer leur influence sur le coût global de la structure.

**• Remarque sur la prise en considération des actions**

Il est important de noter que les charges et les déplacements imposés à la structure en raison de son utilisation et de son environnement (vent, neige, température, séismes, etc.) ne sont pas considérés comme des variables dans le problème de conception, mais plutôt comme des données déduites à partir de la description initiale du projet et de l'esquisse architecturale, ou évaluées indirectement à partir des normes et des réglementations en vigueur, telles que les Eurocodes 1 et 8, ainsi que les documents réglementaires spécifiques à l'Algérie, tels que les DTR.

## III.8 A propos des contraintes

### III.8.1 Développement du règlement en construction métallique

La progression des règles de construction métallique fait apparaître les étapes suivantes (Nizar 2003) :

- En 1956 (règles CM 56), les calculs sont fondés sur une analyse élastique des structures, on ajoute simplement les actions extérieures, les unes aux autres de la manière la plus défavorable possible et la vérification consistait à s'assurer que la contrainte maximale produite par ces actions ne dépasse pas les 2/3 de la limite d'élasticité  $f_y$  de l'acier ;
- En 1966, (règles CM66) les calculs est toujours faites en élasticité, même si un début de plastification est toléré dans les fibres extrêmes des poutres fléchies. La notion de vérification de la stabilité dans l'état déformé apparaît (c'est une analyse au second ordre), mais ce règlement vise plutôt à limiter les déformations afin que la structure puisse être calculée au premier ordre. La probabilité d'occurrence des actions extérieures est prise en compte de manière forfaitaire à travers des coefficients majorateurs d'actions dépendant du nombre

de charges ou surcharges prises en compte simultanément (surcharge de service, vent et/ou neige) ;

- En 1980, la démarche de pondération est semblable à celle de 1966, mais les calculs peuvent être menés en plasticité (ils s'appuient donc toujours sur la limite d'élasticité  $f_y$ ). Les différents éléments constitutifs sont ainsi amenés à supporter des actions de plus grande intensité (ou des sollicitations plus importantes); l'analyse au second ordre est un passage obligé pour les structures déformables.
- Le règlement l'Eurocode 3 est bien basé sur une analyse plastique quand les caractéristiques mécaniques des sections l'autorisent et la semi-rigidité des assemblages est prise en compte. L'analyse au second ordre est fortement conseillée sinon obligatoire. Des coefficients partiels de sécurité, basés sur des analyses fiables, sont appliqués aux actions et aux matériaux. Le calcul se rapproche donc de plus en plus du comportement réel des ouvrages. Ceci oblige une maîtrise correcte de l'ensemble des données du problème, mais aussi de pouvoir calculer les sollicitations d'une manière la plus précise possible.

Cette progression nous montre les nouvelles possibilités offertes aux concepteurs. La réglementation permet maintenant de baser les calculs sur une analyse en plasticité et de prendre en compte le comportement des assemblages. Il importe donc d'orienter la conception vers une utilisation rationnelle des matériaux pour permettre l'optimisation globale des coûts de production des ouvrages.

### III.8.2 Les contraintes réglementaires à l'égard de la sécurité d'ouvrage

L'ingénierie possède l'art de concevoir les différentes parties d'un ouvrage et par spécialité, tout en utilisant les connaissances techniques souhaitées et les règlements en vigueur, tels que les règles Eurocode 3 qui sont applicables dans les pays de l'union Européenne et partiellement aussi en Algérie de telle manière que l'ouvrage soit complet, cohérent et fonctionnel. D'une façon générale, un projet de construction est souvent élaboré comme suit :

1. Le maître d'ouvrage exprime un besoin par un programme ;
2. L'architecte, ou maître d'œuvre, matérialise le programme par une conception architecturale représentée par des plans et un cahier de charges ;
3. Les corps d'état intervenant conçoivent ou finalisent techniquement le contenu de leur lot en accord avec le maître d'œuvre.

En ce qui concerne les bâtiments, on doit consulter les paragraphes 1.1 et 1.2 du règlement. Pour les zones soumises aux séismes, le document de référence utilisé, est le RPA 99. Donc, le concepteur est tenu de respecter les prescriptions de sécurité pour garantir :

- Une protection structurelle et les composants du bâtiment ;
- Une protection des exploitants ou utilisateurs ;
- Une bonne occupation de l'ouvrage ;
- Avec un confort des utilisateurs ;



- Enfin, une durabilité de la construction.

### III.8.3 Conception des structures en CM

Les ouvrages métalliques sont édifiés, soit à partir de produits métallurgiques industriels, soit fabriqués à la demande et assemblés entre eux selon différents procédés. L'ensemble obtenu, constitue alors une ossature porteuse de la structure. A cet effet, Il faut signaler, que les structures mixtes (tel que « acier-béton ») n'entrent pas dans le cadre de cette étude, puisqu'on ne s'intéresse qu'aux seules structures métalliques.

Dans le secteur du bâtiment, on cite deux groupes principaux d'ouvrages métalliques :

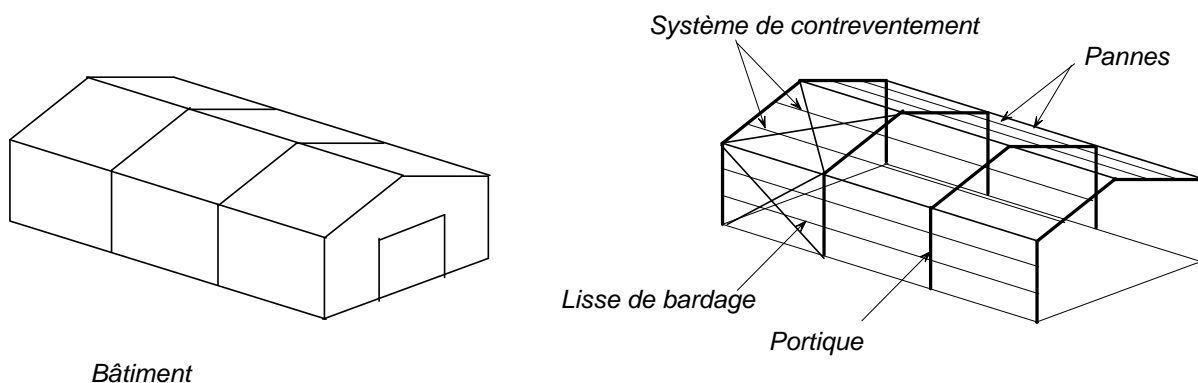
- des halles industrielles constituées, le plus souvent, par des portiques à nefs simples ou multiples,
- des bâtiments à étages constitués par des portiques à étages multiples.

Dans un premier temps, nous allons définir le concept de modélisation d'une ossature métallique puis, on va procéder à l'analyse de la conception de certaines structures types en construction métallique.

### III.8.4 Quelques notions générales sur la modélisation d'une structure

La modélisation d'un ouvrage va nous permettre d'élaborer une description d'un modèle, de façon plus ou moins approchée, et décrire, le fonctionnement de l'ouvrage sous différentes conditions.

Une ossature est généralement tridimensionnelle et souvent complexe en raison de la multitude et de la diversité des éléments qui la composent tels que : poteaux, poutres, planchers, contreventements, murs, etc. (figure III.3).

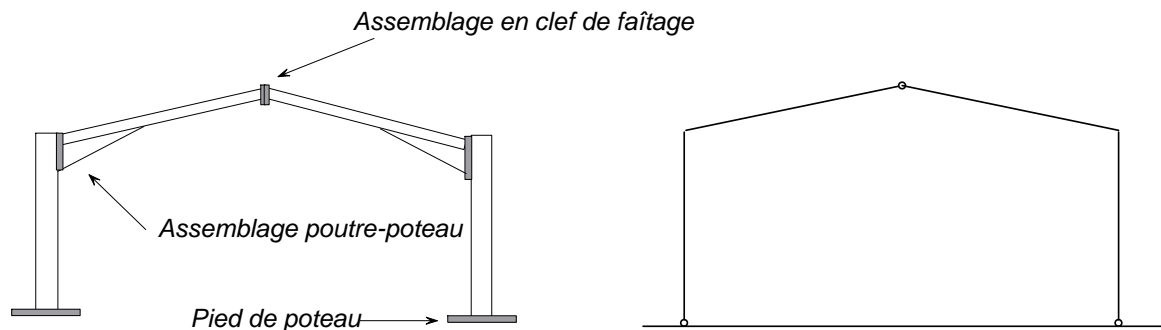


**Figure III. 3:** Vue de l'ensemble d'une structure de type halle industrielle

La représentation exacte du comportement réel tridimensionnel de l'ossature nécessite une modélisation souvent très complexe (Eléments Finis, etc.), ce qui a une incidence sur les moyens humains à mettre en œuvre, la durée des calculs, et le coût (Hamchaoui 1997).

On envisage des approximations pour alléger les conditions de calcul. Ces approximations conduisent à des modélisations simplifiées. Pour cela, il suffit

d'utiliser des éléments « barres », pour modéliser les bâtiments et les ossatures constituées de profilés ou d'éléments linéaires, à laquelle on associe des conditions particulières de liaisons (figure III.4).



**Figure III. 4:** Représentation unifilaire d'un portique

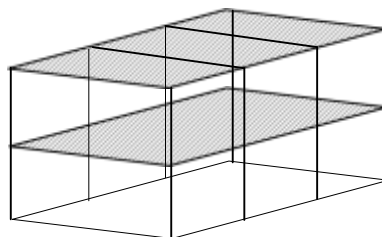
En effet, on considère couramment la structure principale qui est constituée d'un ensemble d'éléments porteurs principaux (tels que portiques, poutres, poteaux, éléments de contreventement, etc.), pour le calcul statique de tels ouvrages.

D'autre part, une modélisation bidimensionnelle est souvent suffisante pour les structures industrielles constituées de portiques supportant des actions dans leur plan et dont les déplacements sont situés dans le même plan.

### III.8.5 Systèmes supportant les structures de bâtiments

Dans une vision simpliste, on peut dire qu'un bâtiment à étages est composé de planchers superposés et de poteaux (figure 3.4).

Les charges verticales sont transmises aux fondations par l'ossature ainsi constituée en sollicitant les planchers. Mais, il ne faut oublier que le bâtiment est aussi soumis à des actions horizontales dues au vent ou aux séismes. Donc on doit compléter l'ossature par des contreventements horizontaux et verticaux pour faire transmettre ces efforts aux fondations.



**Figure III. 5:** Ossature d'un bâtiment à étages

Nous allons citer ci-après quelques types de systèmes porteurs usuels des bâtiments et mettre l'accent sur la conception globale des ossatures.

### III.8.5.1 Ossatures articulées

Dans ce type d'ossature, tous les assemblages entre éléments porteurs (poutres, poteaux) sont considérés comme des articulations (figure 3.5). Les forces verticales qui agissent sur la toiture et les planchers engendrent une flexion des poutres et une compression des poteaux qui sont transmises aux fondations. De la même manière, les forces horizontales dues au vent et au séisme sont transmises aux fondations par les planchers (poutres et dalles) et par les contreventements constitués par des treillis métalliques, situés à l'intérieur ou à l'extérieur de l'ossature.

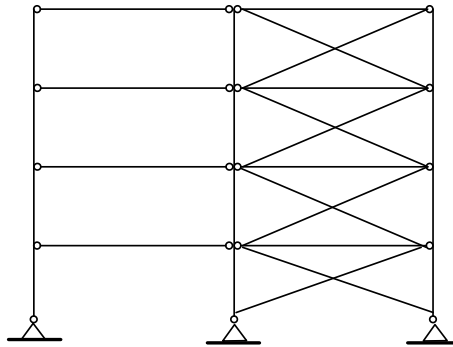


Figure III. 6: Ossature articulée et contreventée

Les avantages des systèmes articulés contreventés sont :

- Des nœuds de conception et d'exécution simple ;
- Un montage rapide de l'ossature ;
- Un réglage facile non sensible aux tolérances de fabrication ;
- Des poteaux essentiellement comprimés.

Les inconvénients sont :

- Des poutres de grande dimension ;
- La présence des contreventements qui peuvent être éventuellement gênants.

### III.8.5.2 Ossatures en cadres rigides

On peut réaliser des cadres rigides, afin d'éviter de disposer des contreventements gênants entre les poteaux de la structure porteuse, (figure 3.6). Mais ce type de stabilisation par les cadres peut être plus coûteux que les contreventements, ce qui nous ramène, en général à des systèmes combinés. On peut citer par exemple, des cadres plans rigides dans un sens et stabiliser l'ossature par des contreventements dans l'autre sens.

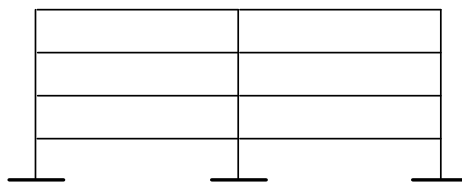


Figure III. 7: Ossature avec cadres rigides

Les avantages des cadres rigides dans un plan par rapport aux ossatures articulées sont les suivantes :

- une grande hyperstaticité du système, qui permet une redistribution statique des efforts intérieurs avec un gain sur les dimensions des poutres et une grande marge de sécurité en cas d'accident ou d'incendie ;
- une structure porteuse économique en cas de calcul plastique qui permet de tenir compte de la redistribution des moments.

Les inconvénients sont les suivants :

- exécution coûteuse et compliquée, de nœuds rigides chargés de transmettre les moments d'encastrement des poutres dans les poteaux, pour le montage ;
- les possibilités d'avoir des tolérances de fabrication acceptables lors du montage des assemblages soudés ;
- en absence de contreventement, les sollicitations des poteaux sont encore augmentées par le déplacement latéral des étages de la structure (effets de second ordre).

### III.8.5.3 Ossatures semi-rigides

Bien que la notion de semi-rigidité des assemblages soit connue depuis longtemps, c'est seulement avec l'Eurocode 3 qu'elle a trouvé sa place au sein de la réglementation de la construction métallique, le prix de revient pour la réalisation de ces assemblages représente une part importante dans le coût total de la structure en raison de la contribution prépondérante de la main d'œuvre (Hamchaoui 1997).

Dès lors, réduire le coût de fabrication des assemblages nous amène à éviter, autant que possible, les raidisseurs et les renforts de tous types. Mais cette démarche va engendrer une réduction de la rigidité des assemblages et si cette réduction est importante, on obtient des assemblages dit « semi-rigide ».

De ce fait, tous les nœuds sont semi-rigides parce que leur comportement ne s'identifie pas rigoureusement à l'une des deux bornes représentées par les liaisons parfaites.

L'analyse globale des ossatures semi-rigides est dans son principe assez simple. Il suffit en effet, pour modéliser complètement la structure, d'introduire les courbes de comportement idéalisées des nœuds concernés dans un programme de calcul des structures formées de barres (Nizar 2003). Certains logiciels nous permettent d'intégrer ces courbes et par la suite facilitent la mission du concepteur. La modélisation bilinéaire du comportement des nœuds est la plus courante.

#### Interprétation du point de vue de la conception :

Deux attitudes sont envisageables :

Si on désire réaliser un nœud rigide ou articulé, on doit alors le concevoir pour répondre aux exigences de rigidité et de résistance assignées. Ou alors, on conçoit un nœud selon des exigences de réalisation pratique ou d'économie. Dans ce cas, les caractéristiques particulières du nœud doivent être prises en considération dans le calcul statique de la structure. On signale que cette attitude n'a pas encore été largement adoptée en pratique.

Tenir compte du comportement des nœuds pendant l'analyse globale est un volet innovateur et prometteur. Sa mise en œuvre est largement facilitée par les logiciels d'analyse appropriés déjà disponibles sur le marché (Elghazouli and Castro 2016). Diverses aides au calcul, permettant de caractériser très rapidement les nœuds, sont déjà à disposition des concepteurs.

Du point de vue économie, un assemblage semi-rigide doit être analysé en termes de quantité de matière, coût de fabrication des assemblages et coût du montage sur chantier.

### III.8.6 Le règlement EUROCODE 3 et ses caractéristiques

On remarque que l'Eurocode 3 a apporté de nombreuses et profondes modifications dans les habitudes de calcul des structures métalliques, après avoir survolé brièvement l'historique de la réglementation. Ces modifications ont été rendues possibles grâce à l'évolution des connaissances, mais aussi grâce à l'outil informatique en majeure partie.

On cite quelques modifications plus importantes :

- la possibilité d'une analyse plastique des structures à condition de s'assurer que les éléments plastifiés possèdent une capacité de rotation suffisante pour permettre une redistribution plastique des efforts ;
- la considération des effets du second ordre, ces derniers produisant des effets d'autant plus sensibles que la structure est plus souple (d'où la nécessité d'une classification des structures en fonction de la souplesse) ;
- la considération des imperfections structurelles qui jouent un rôle important sur l'intensité des effets du second ordre ;
- la modélisation du comportement des assemblages prenant en compte la loi moment rotation de la liaison, c'est-à-dire leur comportement semi-rigide éventuel.

La considération de la semi-rigidité des assemblages est certes l'une des innovations les plus importantes apportées par l'Eurocode 3. Même du point de l'économie, elle est particulièrement importante.

Dans ce qui va suivre, nous présentons les différentes phases de l'analyse d'une structure métallique suivant l'Eurocode 3, en abordant respectivement : le choix d'une méthode d'analyse, le dimensionnement des éléments structuraux soumis à des sollicitations élémentaires (résistance des sections transversales), et aussi les phénomènes d'instabilité élastique.

### III.9 Choix des méthodologies analytiques - classification

La méthodologie habituelle d'analyse d'une structure métallique s'effectue en utilisant des hypothèses classiques du calcul élastique linéaire dit au premier ordre. L'Eurocode 3 traite de façon beaucoup plus approfondie la question de l'analyse des

structures. C'est un rapprochement le plus possible du comportement réel des structures

Nous allons voir, ci-après, les principaux changements introduits dans l'Eurocode 3 en ce qui concerne le choix des méthodes d'analyse et les différentes classifications.

### III.9.1 Analyse plastique

L'analyse globale plastique repose sur le fait que, lorsque la limite de résistance plastique des sections est atteinte, des déformations plastiques irréversibles se développent dans les sections concernées pour des valeurs des sollicitations limitées à leur résistance plastique. Les charges appliquées s'accroissent et ne pouvant plus être équilibré par les sections plastifiées, une « *redistribution plastique* » apparaît dans les parties de la structure qui sont encore dans le domaine élastique. La résistance de la structure est conduite par l'apparition d'un mécanisme plastique ou d'une instabilité élastoplastique (Hamchaoui 1997).

Par exemple, les gains en résistance obtenus en pourcentage, pour une section fléchie de certains profilés standards sans risque d'instabilité, pour un calcul plastique par rapport à un calcul élastique ( $W_{pl}/W_{el}$ ) sont donnés dans le tableau suivant ;

**Tableau III. 1:** Comparaison du gain en résistance obtenu

Axe de flexion	IPE 330	IPE-A360	HEM 120	HEB 180	HEA 220
Axe fort - yy	12,7 %	11,7 %	21,6 %	6,3 %	10,3 %
Axe faible - zz	56,0 %	54,7 %	53,9 %	40,7 %	52,3 %

Différentes conditions doivent être respectées pour pouvoir envisager une analyse plastique :

- la ductilité du matériau : les nuances d'acier des normes EN10025 et EN10113 reconnues par l'Eurocode 3 remplissent cette condition de ductilité ;
- les sections transversales doivent être de classe 1 et un maintien au déversement doit être assuré au droit des sections dans lesquelles se développent des rotules plastiques ;
- le caractère statique ou quasi-statique du chargement. L'action du vent sur les bâtiments courants étant considérée comme quasi-statique.

Par ailleurs, sans tenir compte de ces conditions, l'analyse plastique ne présente de véritable intérêt pratique que dans la mesure où la structure concernée présente un degré d'hyperstaticité important, où les éléments ayant subi la plastification sont mieux conservés contre le déversement et où les critères d'état limite de service et de stabilité des éléments ne sont pas majoritaires par rapport aux critères de résistance des sections.

On peut constater que peu d'ossatures courantes réunissent ces différentes caractéristiques, de ce fait, le calcul en élasticité reste le plus souvent suffisant pour les optimiser, notamment quand elles sont constituées d'éléments en I qui, par configuration de leur section transversale, offrent déjà en élasticité un très bon rendement en flexion (Nizar 2003).

### III.9.2 Classification des sections transversales

Sous l'influence de contraintes de compression, les sections transversales peuvent se déformer localement, ce qui limite leur capacité de résistance. Lorsqu'une section est conçue pour travailler dans le domaine plastique, si cette déformation instable se produit, la déformation plastique ne se développera pas complètement, limitant ainsi la redistribution des charges. Par conséquent, le calcul d'une structure dans le domaine plastique n'est possible que si les sections présentant une déformation plastique ont une capacité de rotation plastique adéquate.

L'Eurocode 3 propose une classification des sections en fonction de l'effilement des parois comprimées des sections transversales. Cette classification permet de déterminer si :

- la section peut être vérifiée en fonction de sa résistance plastique,
- la section peut être vérifiée en fonction de sa résistance élastique,
- ou même pour une valeur inférieure à sa résistance élastique (dans le cas où les parois sont si minces que la déformation locale ne permet pas à la section d'atteindre la valeur de sa résistance élastique).

Ainsi, quatre classes de sections sont définies :

- **Classe 1** : Les sections transversales de cette classe peuvent atteindre leur résistance plastique sans risque de voilement local. Elles ont également une capacité de rotation importante pour former une rotule plastique ;
- **Classe 2** : Les sections transversales de cette classe peuvent atteindre leur résistance plastique sans risque de voilement local, mais leur capacité de rotation est limitée. Par conséquent, il est nécessaire de contrôler la rotation si l'analyse plastique est utilisée ;
- **Classe 3** : Les sections transversales de cette classe peuvent atteindre leur résistance élastique en fibre extrême, mais pas leur résistance plastique en raison du risque de voilement local. Leur résistance ultime est donc basée sur la résistance élastique ;
- **Classe 4** : Les sections transversales de cette classe ne peuvent pas atteindre leur résistance élastique en raison du risque de voilement local. Leur résistance ultime est calculée en limitant la section résistante à une section efficace qui prend explicitement en compte les effets d'instabilité locale.

Le classement d'une section transversale dépend donc des dimensions de chaque paroi comprimée. L'Eurocode 3 présente des valeurs limites du rapport largeur/épaisseur ( $b/t$ ) des parois qui permettent de classer une section de 1 à 4. De ce fait, ces valeurs limites sont déterminées en fonction des conditions d'appui des

parois, de leur mode de sollicitation (flexion et/ou compression) et de la limite d'élasticité du matériau. Enfin, la classe d'une section est généralement déterminée par la classe la plus défavorable de ses parois comprimées.

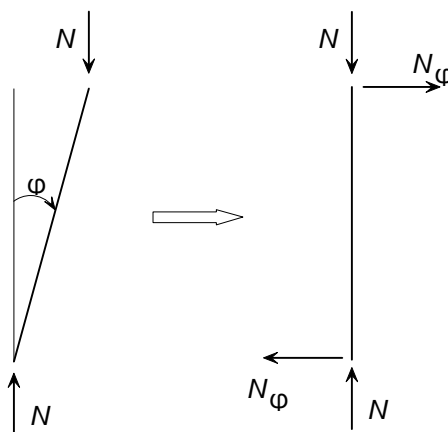
### III.9.3 Classification des structures – Effets du second ordre

Les effets du second ordre sont des effets supplémentaires qui se produisent en raison de l'application successive de charges (efforts normaux dans les barres) et du changement de forme de la structure provoqué par cette charge. Un exemple courant de ces effets est la déformation des éléments en compression, connue sous le nom "effet P- $\Delta$ " en présence d'une déclivité non négligeable (voir figure III.8).

Les conséquences des effets du second ordre sur les structures courantes sont généralement les suivantes :

- Une augmentation des déplacements aux nœuds de la structure.
- Une augmentation des moments de flexion dans les poteaux.
- Une apparition plus précoce de certaines déformations plastiques.
- Une réduction du seuil d'instabilité ou une défaillance élasto-plastique de la structure.

De plus, les effets du second ordre sont directement liés au flambement des barres en compression.



**Figure III. 8:** Forces équivalentes aux effets du second ordre

L'Eurocode 3 établit une classification des structures en tant que "ossatures rigides" ou "ossatures souples" tout en se basant sur le critère d'écartement de l'instabilité élastique. Cette classification détermine si on doit prendre en compte les effets du second ordre, car ces effets sont plus significatifs lorsque la structure est flexible (d'où la nécessité d'une classification basée sur la flexibilité). Une autre classification existe entre les structures contreventées et les structures non contreventées.



Cette classification remplace celle qui était utilisée précédemment, qui distinguait les structures à nœuds mobiles ou des structures à nœuds fixes (selon les recommandations du CM 66).

#### ❖ **Structures contreventées et structures non contreventées**

Une ossature est considérée comme contreventée lorsque sa résistance latérale dans son plan est assurée par un système de contreventement ayant une rigidité satisfaisante pour supporter les charges horizontales. Dans ce cas, on peut considérer avec une précision appropriée pour que ces charges horizontales soient entièrement reprises par ce système de contreventement.

Selon l'Eurocode 3, les ossatures en construction métallique qui possèdent un système de contreventement doivent être classées dans la catégorie des structures contreventées si leur déplacement horizontal reste inférieur à 1/5 du déplacement qui aurait été observé sans le système de contreventement. Cette classification influence le choix de la méthode d'analyse :

- Sous l'effet des charges verticales, l'ossature principale d'une structure contreventée peut être analysée comme une structure à nœuds fixes. Dans ce cas, une analyse au premier ordre est suffisante. Il est cependant important de s'assurer que le système de contreventement résiste aux charges qui lui sont appliquées, en tenant compte des éventuels effets du second ordre.
- Pour les structures non contreventées, une analyse au second ordre est nécessaire et suffisante dans ce cas.

#### ❖ **Structures rigides et structures souples**

On classe une structure comme *rigide*, si sa réponse aux charges horizontales dans le plan est telle que les contraintes supplémentaires causées par le déplacement horizontal des nœuds peuvent être négligés. En d'autres termes, si la structure est sensible aux effets de second ordre, elle est classée comme *flexible* ; sinon, elle est classée comme *rigide*.

Le classement est basé sur la valeur d'un *paramètre d'amplification critique*  $\alpha_{cr}$ .

- Pour une charge donnée, si le chargement vertical total appliqué à la structure est  $V$ ,  $\alpha_{cr}$  est, par définition, le coefficient par lequel il faut multiplier cette charge pour atteindre l'instabilité élastique de la structure :

$$\alpha_{cr} = V_{cr} / V$$

- Selon l'Eurocode 3, pour une charge donnée, si  $\alpha_{cr} < 10$ , la structure est considérée comme flexible et nécessite une analyse du second ordre. Dans le cas contraire, la structure est classée comme rigide.

Diverses méthodes simples ont été proposées pour calculer le paramètre d'amplification critique. Cependant, il convient de noter que ces méthodes spécifiques

s'appliquent uniquement aux structures présentant une configuration régulière, telles que les portiques ou les structures à plusieurs étages.

### III.9.3.1 Prise en compte des imperfections structurelles

Afin de prendre en compte le comportement mécanique réel des structures, il est nécessaire de considérer les imperfections structurelles dans l'analyse. Ces imperfections incluent les défauts de réalisation, les contraintes résiduelles et les imperfections géométriques telles que les variations de verticalité, de linéarité et d'alignement, ainsi que les excentricités inévitables dans les assemblages réels. L'Eurocode 3 distingue entre les imperfections globales de la structure, qui sont souvent exprimées par une déformation initiale non plane, et les imperfections au niveau des éléments, qui sont exprimées par une courbure initiale de l'élément.

La considération explicite des imperfections est un concept relativement récent. Avant la publication de l'Eurocode, les imperfections d'une structure (telles que le désalignement, les contraintes résiduelles, etc.) étaient généralement implicitement couvertes, soit par l'utilisation de facteurs de sécurité, soit par des formules mathématiques, ou encore par des modèles appropriés (comme les courbes de flambement européennes, par exemple) (Stephen James Hicks, Robert Mark Lawson, Brozzetti 2014).

La prise en compte "explicite" des imperfections signifie qu'une structure donnée est analysée dans son état déformé et imparfait, plus proche de sa forme réelle. D'autre part, les imperfections spécifiques des éléments structurels ne doivent pas être considérées lors de l'analyse globale de la structure.

#### ❖ *Faux-aplomb global de structure*

Les défauts géométriques équivalents sont utilisés pour englober à la fois les défauts d'ajustement lors de l'assemblage, les excentricités inévitables des liaisons et d'autres imperfections. Selon les recommandations de l'Eurocode 3, l'analyse des structures doit toujours prendre en compte l'imperfection globale de la structure, sauf dans le cas des structures contreventées. Dans ce dernier cas, les effets des imperfections globales de la structure doivent être pris en compte lors du calcul du système de contreventement lui-même.

Dans la majorité des cas, l'effet de la déviation horizontale due à cette imperfection est négligeable, ce qui permet, selon le Document d'Application Nationale français (Règles Eurocode3), (EL MASKAOUI, BOUSSHINE, et al, 2017), de ne pas tenir compte de l'imperfection globale dans les combinaisons d'actions où la charge horizontale est significative (par exemple, les charges de vent). L'effet de telles imperfections est important pour les combinaisons sans charges horizontales, où la charge verticale est généralement maximale.

L'amplitude de l'imperfection globale, exprimée par le faux-aplomb global, varie entre 1/200 et 1/600 en fonction du nombre de travées et du nombre d'étages (figure III.9).

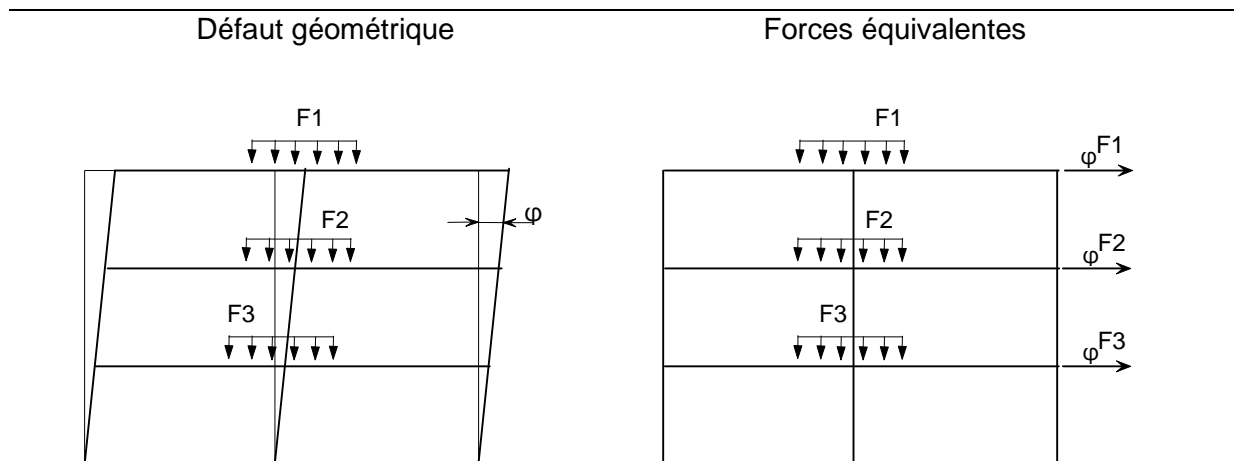


Figure III. 9: Imperfections globales des ossatures

$n_c$  = nombre de poteaux sur toute la hauteur et supportant au moins 50 % de la compression moyenne par poteau.

$n_s$  = nombre d'étages intéressant tous les poteaux inclus dans  $n_c$ .

#### • **Imperfection locale d'élément**

Les imperfections particulières des éléments de la structure ne doivent pas être prises en compte lors de l'analyse globale. Cependant, dans le cas des structures flexibles ou dites souples, il peut y avoir une exception pour les éléments qui sont considérablement élancés et dont la rigidité affecte le comportement global grâce à des encastremets aux extrémités.

Si un élément dépasse le seuil spécifié, une analyse globale doit être effectuée au second ordre et la modélisation de la structure doit inclure les défauts de rectitude de ces éléments. Ces imperfections sont généralement considérées comme justifiant la stabilité au flambage des éléments de compression et sont définis dans les clauses relatives à ce sujet.

#### III.9.3.2 Choix de la méthode d'analyse

L'organigramme de la figure 3.15 décrit brièvement la démarche à suivre pour élaborer l'analyse globale de structures de bâtiments courants.

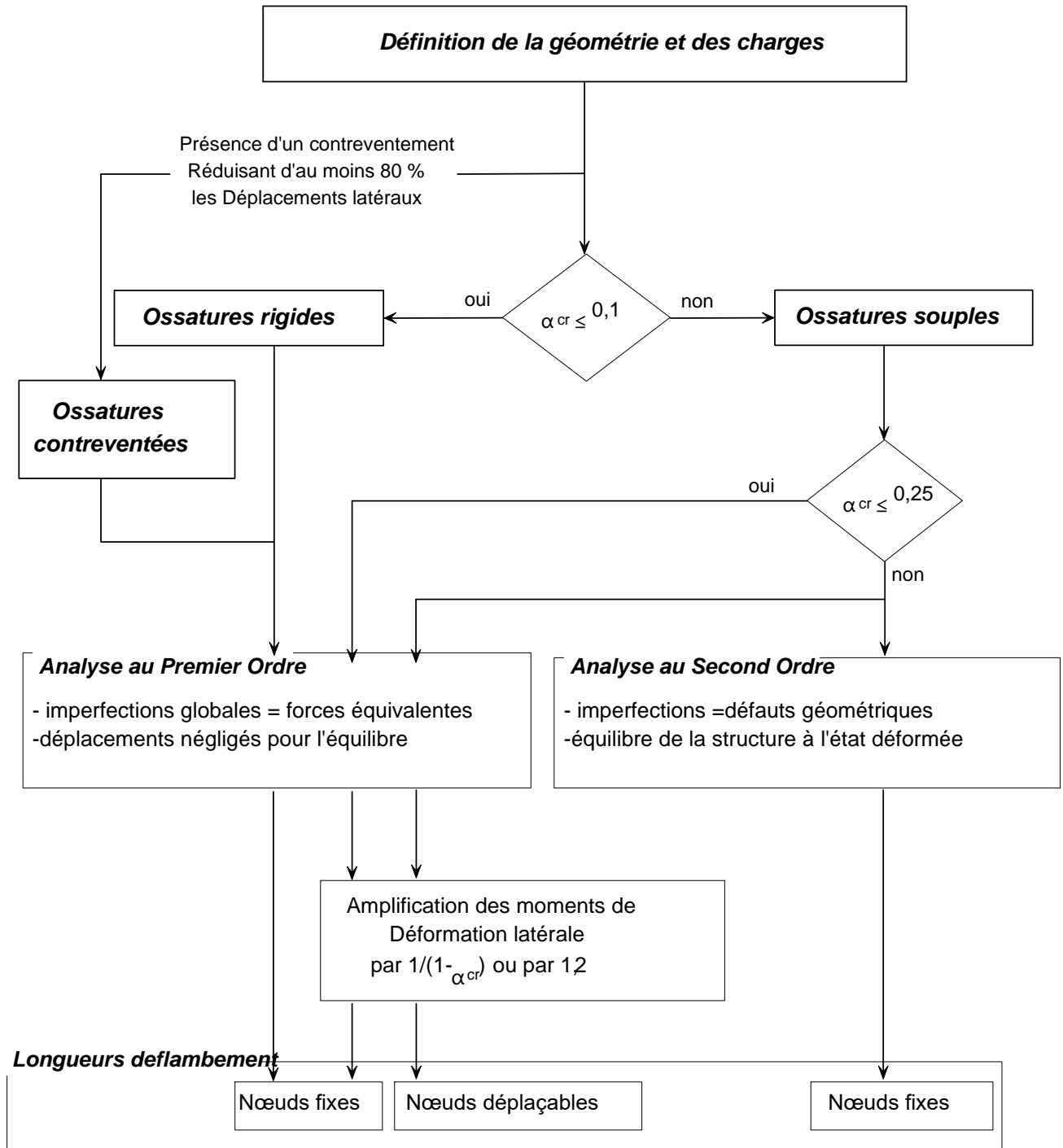


Figure III. 10: Organigramme de calcul élastique des sollicitations avec vérification des poteaux pour des bâtiments courants (Nizar 2003)

### III.9.4. Combinaisons d'actions selon l'EUROCODE 3

Les hypothèses de base simples dans un calcul sont définies conformément à la norme applicable, et il est nécessaire de vérifier l'ensemble des conditions. Tous les états telles que l'équilibre, la contrainte, la rupture, la fissure et la déformation doivent être vérifiées. Tout cela est récapitulé à des calculs aux états limites, qui dépendent également du matériau utilisé. Chaque état limite génère un ensemble de combinaisons, avec leurs coefficients de pondération correspondants, qui sont

automatiquement générés par le programme et sélectionnés pour le calcul. Ainsi, les états suivants sont vérifiés :

1. État limite ultime de rupture du béton : dimensionnement des sections.
2. État limite ultime de rupture du béton de fondation : dimensionnement des sections.

Vérification des contraintes sur le terrain pour obtenir les déplacements maximaux de la structure.

3. État limite ultime de rupture de l'acier laminé et armé : dimensionnement des sections.
4. État limite ultime de rupture de l'acier préformé : dimensionnement des sections.
5. État limite ultime de rupture du bois : dimensionnement des sections.

Conformément aux recommandations de l'Eurocode 3, les actions sont combinées et leurs valeurs sont affectées de différents facteurs :

Les facteurs spécifiés pour chaque matériau et norme applicable sont utilisés pour chaque situation de calcul et conditions aux limites.

- Coefficients partiels de sécurité  $\gamma$  liés aux charges permanentes et variables.
- Coefficients de combinaison  $\psi$ . Ils sont associés uniquement aux actions variables et ne représentent pas des coefficients de sécurité. Ce sont des facteurs qui concernent la probabilité d'occurrence de plusieurs combinaisons d'actions variables, et leur valeur ne peut pas être maximisée simultanément.

#### III.9.4.1 Combinaisons aux Etats Limites Ultimes (ELU)

Ces combinaisons sont établies pour la vérification et le dimensionnement des sections, et elles spécifient généralement des groupes de combinaisons prédéfinis pour le béton, l'acier et le bois. Dans les normes qui utilisent des contraintes admissibles, cela n'est pas pris en compte

- **Combinaison fondamentale :**

Pour les différentes situations de projet, les combinaisons des actions sont définies en accord avec les critères suivants :

Situations non sismiques

- Avec coefficients de combinaison

$$\sum_{j \geq 1} \gamma G_j G_{kj} + \gamma_{Q,1} \psi_{p,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,j} \psi_{a,j} Q_{kj}$$

- Sans coefficients de combinaison

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} Q_{k,i}$$

• Situations sismiques

- Avec coefficients de combinaison

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_A A_E + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \psi_{a,i} Q_{k,i}$$

- Sans coefficients de combinaison

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_A A_E + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} Q_{k,i}$$

Avec

$G_K$  : action permanente

$Q_K$  : action variable

$A_E$  : action sismique

$\gamma_G$  : coefficient partiel de sécurité des actions permanentes

$\gamma_{Q,1}$  : coefficient partiel de sécurité de l' action variable principale

$\gamma_{Q,i}$  : coefficient partiel de sécurité des actions variables d' accompagnement

( $i > 1$ ) pour les situations non sismiques

( $i \geq 1$ ) pour les situations sismiques

$\gamma_A$  : coefficient partiel de sécurité de l'action sismique

$\psi_{p,1}$  : coefficient de combinaison de l'action variable principale

$\psi_{a,i}$  : coefficient de combinaison des actions variables d'accompagnement

( $i > 1$ ) pour les situations non sismiques

( $i \geq 1$ ) pour les situations sismiques

• **Combinaison simplifiée :**

Dans les structures de bâtiment, il est possible de simplifier les combinaisons fondamentales par deux combinaisons simplifiées :

$$\text{avec une seule action variable : } \sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$$

$$\text{avec plusieurs actions variables : } \sum \gamma_G \cdot G + 0,9 \cdot \sum \gamma_Q \cdot Q$$

#### III.9.4.2 Combinaisons aux Etats Limites de Service

Les critères d'états limites de service (ELS) doivent être satisfaits pour des combinaisons dont les coefficients partiels de sécurité sur les actions sont réduits à l'unité. Selon la nature de ces critères, trois combinaisons possibles sont envisageables (Tableau III.2).

Tableau III. 2 : Combinaisons d'actions aux ELS

Combinaison	Forme	Critère
Rare	$\sum G + Q_1 + \sum \psi_0 \cdot Q$	Valeurs limites de flèches
Fréquente	$\sum G + \psi_1 \cdot Q_1 + \sum \psi_2 \cdot Q$	Amplification dynamique des déformations
Quasi-permanente	$\sum G + \sum \psi_2 \cdot Q$	Sans usage codifié pour la construction métallique

De la même manière, pour les structures de bâtiment, les combinaisons rares d'états limites de service sont remplacées par deux combinaisons simplifiées :

avec une seule action variable :  $G + Q_1$

avec plusieurs actions variables :  $G + 0,9 \cdot \sum Q_i$

#### III.9.4.3 Coefficients de sécurité

Pour les combinaisons d'actions on a deux types de coefficients :

- coefficients partiels de sécurité, qui amplifient les actions :
  - $\gamma_G = 1,35$  appliqué aux charges permanentes G ;
  - $\gamma_Q = 1,50$  appliqué aux actions variables Q ;
- coefficients  $\psi$ , qui permettent de moduler la valeur caractéristique de chaque action variable :
  - $\psi_0$  : donne accès à la valeur de combinaison ;
  - $\psi_1$  : donne accès à la valeur fréquente ;
  - $\psi_2$  : donne accès à la valeur quasi-permanente.

Les valeurs des coefficients  $\psi$  figurent dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 : Coefficients de combinaison

Action variable	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Charge d'exploitation	0,67	0,75	0,75
Neige altitude < 500 m	0,67	0,15	0
altitude > 500m	0,67	0,30	0,10
Vent	0,67	0,20	0
Température	0,53	0,50	0

### III.9.5. Critères de justification des structures aux états limites ultimes

Les critères d'état limite de service revêtent une importance particulière dans la construction métallique, car ils sont très souvent essentiels par rapport à la résistance aux états limites ultimes et déterminent alors directement le dimensionnement des structures.

L'objectif de la vérification des conditions aux limites de service est de garantir que l'état de la structure respecte les limites spécifiées par les critères de service lorsqu'elle est soumise à certaines combinaisons d'actions. Ces critères visent à limiter les déformations et les flèches.

#### III.9.5.1 Limitation des déformations des éléments fléchis

Pour cette vérification, il est essentiel de garantir que la déformation de chaque élément par rapport à la ligne de support demeure en deçà d'une limite généralement exprimée en fraction de la portée de cet élément. Le tableau III.4 résume les valeurs fixées par les normes pour les flèches verticales des toitures et des couvertures.

**Tableau III. 4:** Valeurs de flèches limites

Élément d'ouvrage	$\delta_{\max}$
Toiture en général (accessible uniquement pour l'entretien)	$L/200$
Toitures normalement accessibles	$L/250$
Plancher en général (sans équipement particulier)	$L/250$

#### III.9.5.2 Limitation des déformations horizontales d'ossatures

La vérification et la maîtrise de la flexibilité des ossatures est justifiée par la nécessité de limiter les déplacements horizontaux au sommet des poteaux. Les valeurs limites pour ces déformations sont fixées par la réglementation et ajustées en fonction des trois catégories de structures de bâtiments (tableau III.5).

Une action variable peut être caractérisée par plusieurs valeurs "distinctives" qui varient en fonction de sa période d'exécution et de sa fréquence. Ces valeurs sont les suivantes :

- Structures en portiques à un seul niveau pour les bâtiments sans pont roulant et ne nécessitant pas de contraintes particulières en termes de limitation des déformations horizontales, telles que l'absence de fragilité ou d'équipements sensibles.
- Structures en portiques à un seul niveau pour les bâtiments soumis à des contraintes caractéristiques.
- Structures de bâtiments à plusieurs étages, pour lesquelles des limites globales et locales sont définies pour chaque étage.

**Tableau III. 5:** Valeurs limites des déformations horizontales d'ossatures

types de structures	flèches principalement dues au vent	autres combinaisons d'actions
structures simples à un seul niveau	$h/125$	$h/150$
autres structures à un seul niveau	$h/250$	$h/300$
structures des bâtiments à étages : flèches différentielles entre étages flèches pour l'ensemble de la structure	$h/250$ $h/420$	$h/300$ $h/500$



### III.9.6. Vérification des sections transversales aux E.L.U

Dans une situation générale de cette vérification de la résistance des sections transversales, les résistances déterminées doivent être ajustées en fonction d'un coefficient de sécurité  $\gamma_M$ . Le tableau III.6 présente les différents coefficients utilisés conformément à l'Eurocode 3.

**Tableau III. 6:** Valeurs des facteurs de sécurité

Type de justification	Coefficients
Calcul des sections transversales : Sections de classes 1, 2 ou 3 ; Sections de classe 4 ; Sections nettes au droit des trous	$\gamma_M = 1$ $\gamma_M = 1.1$ $\gamma_M = 1.25$
Calcul des pièces à l'instabilité élastique : flambement / déversement / voilement	$\gamma_M = 1.1$

On présente ici un sommaire général pour vérifier la résistance des sections transversales des éléments soumis à la flexion et/ou à la compression. En outre, on justifie la préoccupation particulière concernant le flambement. La vérification relative au déversement n'est pas abordée dans ce contexte, car, dans le cas des bâtiments étudiés, le risque de déversement des éléments est jugé faible pour plusieurs raisons:

- Les poutres sont stabilisées par les éléments de plancher ou de toiture qui les supportent.
- Les charges ascendantes dues au vent sont généralement peu importantes, voire absentes.
- Cette étude se concentre sur des structures de petite taille qui ne nécessitent pas d'éléments de grande hauteur.

Pour chaque section transversale, la valeur de calcul d'une sollicitation ne doit pas excéder la résistance de calcul correspondante. Lorsque plusieurs sollicitations agissent simultanément, il est essentiel que leurs effets combinés n'outrepassent pas la résistance pour cette configuration particulière.

En général, les impacts du traînage de cisaillement et du voilement local sont pris en compte en utilisant des largeurs efficaces conformément aux directives de la norme EN 1993-1-5. De plus, il est nécessaire de tenir compte des effets du voilement par cisaillement conformément aux dispositions de la norme EN 1993-1-5.

Les valeurs de calcul des résistances dépendent de la classe de la section transversale. Les coefficients partiels  $\gamma_{M1}$  pour les bâtiments en CM peuvent être spécifiés dans l'Annexe du DAN. Pour les bâtiments, les valeurs numériques recommandées sont les suivantes :

$\gamma_{M0} = 1,00$	Plastification, instabilité locale
$\gamma_{M1} = 1,10$	Instabilité d'élément
$\gamma_{M2} = 1,25$	Ruine de section nette tendue

Toutes les classes de sections peuvent être soumises à une vérification de leur résistance élastique, à condition que, pour la Classe 4, les propriétés de la section transversale efficace ou effective soient utilisées. Pour une vérification en élasticité, le critère limite suivant peut être appliqué au point critique de la section transversale, sauf si d'autres formules d'interaction sont applicables.

### III.10 Conception des systèmes de fondations des structures métalliques

Les fondations d'un édifice sont formées par les éléments de l'ouvrage qui entrent en contact avec le sol et qui transfèrent les charges de la superstructure. Leur conception et leur mise en œuvre correctes sont cruciales pour assurer la stabilité globale de l'ouvrage. La descente de charge permet de déterminer les actions exercées par la structure sur les fondations, tandis que la mécanique des sols permet de comprendre l'interaction entre le sol et les fondations.

D'un point de vue sol, les fondations remplissent leur fonction tant que les conditions suivantes sont satisfaites :

- Elles sont en équilibre statique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de glissement, de basculement ou d'enfoncement des fondations.
- Les tassements ne causent pas de problèmes pour la structure. Des tassements uniformes sont acceptables dans certaines limites, mais des tassements différentiels engendrent fréquemment des désordres dans la stabilité de l'ouvrage.

Il est donc essentiel d'adapter le type et la structure des fondations en fonction des caractéristiques du sol qui supportera la construction.

Dans le cas des structures métalliques, les pieds de poteaux constituent la zone de liaison entre l'ossature métallique et les fondations (ou l'infrastructure) en béton armé. Ils font donc l'objet de différentes dispositions constructives visant à établir les conditions de liaison nécessaires entre la structure et ses appuis, qu'il s'agisse des fondations directement ou d'une sous-structure en béton.

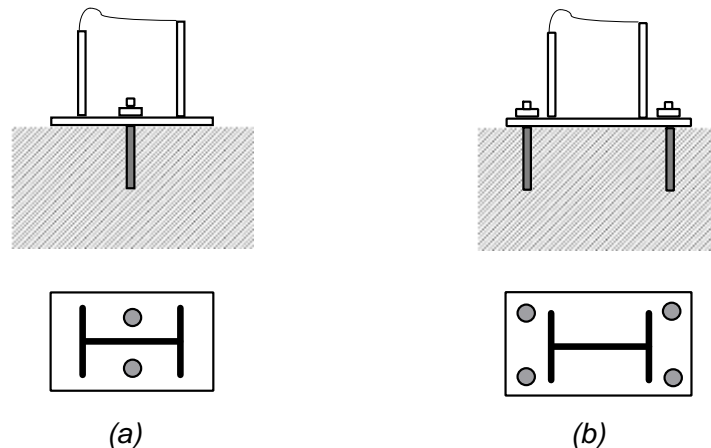
En pratique, ces conditions de liaison impliquent au minimum la transmission d'une force verticale, qui peut être descendante ou ascendante selon les combinaisons de charges, ainsi que d'une force horizontale. En plus de ces deux composantes, des moments de flexion et de torsion à l'encastrement, sont également pris en compte.

La figure III.11 illustre deux exemples types de pieds de poteaux :

- Le premier cas correspond à un pied de poteau considéré comme articulé (figure III.11a), composé d'une plaque de base et de deux boulons de fixation, capable de supporter une force verticale et une force horizontale.
- Le deuxième cas, représenté dans la figure III.11b, correspond à un pied de poteau considéré comme encasturé. Il est constitué d'une plaque de base épaisse et de grande dimension, ainsi que de quatre tiges d'ancrage, permettant de

supporter un moment de flexion important en plus des forces verticales et horizontales.

Les pieds de poteaux sont conçus pour assurer soit une liaison articulée, soit une liaison parfaitement encadrée. En pratique, on ne considère pas de solution intermédiaire entre ces deux hypothèses extrêmes au niveau des dispositions spécifiques aux éléments métalliques.



**Figure III. 11:** Conception des pieds de poteaux articulés et encadré (Nizar 2003)

### III.10.1 Dimensionnement des attaches en pied de poteau

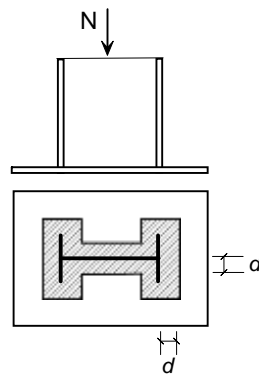
En règle générale, les éléments constituant un pied de poteau sont les suivants :

- Une platine soudée en bout du poteau, joue un rôle essentiel en assurant la répartition, sur une surface suffisante, de la pression sur le béton engendrée par une compression du poteau ;
- Des tiges d'ancrage sont scellées dans le béton afin d'empêcher tout arrachement de la platine de la surface de son support en cas d'effort de soulèvement dans le poteau ou de moments d'encastrement de la charpente sur ses appuis ;
- D'autres éléments, comme par exemple les raidisseurs de platine utilisés au niveau des encastresments, et des bèches d'ancrage, soudées sous la platine, pour assurer, par épaulement, la transmission au béton des efforts tranchants et, le cas échéant, celle du moment d'encastrement en torsion.

#### III.10.1.1. Dimensionnement de la platine

Nous présenterons dans cette section, un modèle simple issu de l'Eurocode 3 qui nous permet d'évaluer une surface portante efficace d'une plaque reposant directement sur le béton. La vérification de la sécurité structurelle consiste à s'assurer que les résultantes de compression et de traction sont respectivement inférieures à la résistance ultime à la compression dans le béton et à la résistance ultime à la traction dans les tiges d'ancrage.

Nous considérons que les contraintes sur le béton sont uniformément réparties sur une surface restreinte, qui est la surface portante. La figure III.12 illustre la surface portante à adopter dans le cas d'un poteau en profil à double T soumis à un effort de compression centré. Elle est composée de la surface du profil et d'un débordement d situé sur son pourtour.



**Figure III. 12:** Schéma de surface en compression sous la plaque d'assise (Nizar 2003)

Avec

$d$  : débord

$t$  : épaisseur de la plaque d'assise en acier,

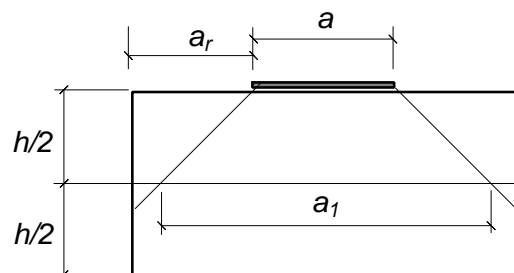
$f_y$  : limite d'élasticité de l'acier de la plaque d'assise,

$f_c$  : résistance caractéristique du béton,

Le facteur de concentration  $k_c$  est une relation entre la surface de la plaque de base et les dimensions d'une surface portante effective, comme le montre la figure III.13.

$a_1$  : longueur de la surface fictive ( $a_1 = \min(a + 2a_r; 5a; a + h; 5b_1 \geq a)$ )

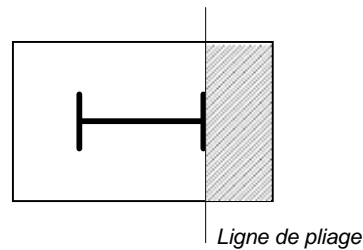
$b_1$  : largeur de la surface fictive ( $b_1 = \min(b + 2b_r; 5b; b + h; 5a_1 \geq b)$ )



**Figure III. 13:** Schéma de surface portante effective

Lorsque les poteaux sont soumis à une flexion composée, il est généralement admis, que seule la partie rectangulaire  $A_{ef,c}$  située sous l'aile comprimée participe à la résistance. On suppose également que la répartition des contraintes sur le béton est uniforme sur cette surface.

L'épaisseur de la plaque est déterminée en fonction de la contrainte de flexion calculée au droit de chaque ligne de pliage (figure III.14).



**Figure III. 14:** Exemple d'une ligne de pliage d'une plaque d'assise

### III.10.1.2. Dimensionnement des tiges d'ancrage

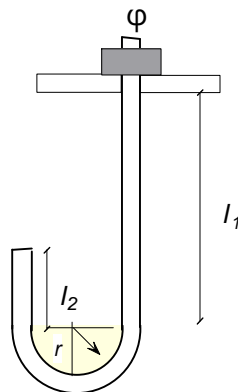
Les tiges d'ancrage sont responsables de la reprise des forces de soulèvement apporté par le poteau qui dans le cas échéant, elles constituent la partie tendue pour l'équilibre des moments d'encastrement.

Lorsqu'il y a une force de traction, la dimension des sections de ces tiges est calculée de la même manière que pour un boulon en traction. Par conséquent, le scellement dans le béton doit être vérifié selon les règles habituelles de calcul de l'adhérence entre l'acier et le béton en B.A. La valeur de calcul de la contrainte limite d'adhérence, en fonction de la résistance en compression à 28 jours du béton, est fournie dans le tableau III.7 :

**Tableau III. 7:** Contrainte limite d'adhérence

$f_{c28}$	20	25	30
$T_s$	1.1	1.2	1.3

Selon l'importance des efforts de traction à équilibrer et les dimensions offertes par le support en béton, on peut utiliser des barres à scellement droit ou courbe ainsi que des tiges munies d'une plaque d'ancrage d'extrémité.



**Figure III. 15:** Schéma d'une Tige d'ancrage

La formule de calcul qui est énoncée dans les règles CM66, pour l'effort ultime de traction ancré par scellement pour une barre courbe classique.

où les notations sont celles définies à la figure III.15

et

$d_1$  est la plus petite distance de l'axe de la tige à une autre tige de scellement ou à une paroi du massif de fondation.

### III.11 Conclusion

La formulation du problème d'optimisation proposé dans cette étude présente les caractéristiques suivantes :

- En primo la formulation analytique du problème, il convient de noter que la fonction objectif et les contraintes ne peuvent pas être exprimées concrètement en fonction des variables d'optimisation. Il est seulement possible d'obtenir une mesure du coût ou une mesure d'une contrainte donnée en fonction des valeurs fixées des différentes variables.
- Secundo, les trois types de variables d'optimisation sont discrètes : les barres à choisir sont dans une liste de profilés standards, la nature des appuis et des liaisons internes sont des variables qualitatives et sont aussi à choisir dans un ensemble prédéfini de dispositions conceptuelles.
- Tertio, Il est également aisé de constater que le problème est très contraignant. Ceci a été confirmé par les professionnels de la construction. Compte tenu des contraintes réglementaires, il n'est pas facile de construire une solution de conception avec un espace d'étude très large en considérant trois variables de conception.

Ceci nous fait remarquer que, la recherche d'une méthode efficace pour résoudre le problème d'optimisation de la conception globale en construction métallique doit tenir compte des différents résultats décrits ci-dessus.

Le chapitre suivant présente donc l'application des AGs à des problèmes qui dépendent de variables discrètes, tels que les structures de génie civil.

Il examine la conception technique des structures métalliques et abordé la conception globale d'un point de vue à la fois pratique et réglementaire tout en intégrant les éléments de la superstructure et les fondations. Aussi, nous avons étudié la modélisation des assemblages qui a une importance particulière compte tenu de son incidence sur la conception de l'ensemble des éléments d'une structure. Ces éléments peuvent donner une idée des possibilités d'optimisation offertes par le processus de conception des structures en construction métallique.

Enfin, cette étude identifie les variables de la tâche de conception globale ainsi que les contraintes pratiques et réglementaires qui la régissent. A cet égard, elle constitue, une étape essentielle à la formulation du problème d'optimisation de la conception globale des structures métalliques.

***Chapitre IV***  
***Application des***  
***algorithmes génétiques aux***  
***structures métalliques***

## IV.1 Introduction

Les informations présentées dans les chapitres précédents nous donnent les moyens et les indications nécessaires pour comprendre comment intégrer l'algorithme génétique dans les phases initiales de conception des structures en charpente métallique dans le domaine du génie civil. Nous mettrons en œuvre les critères sélectionnés dans notre étude, les variables choisies et les opérations effectuées, conformément à leur fonctionnement.

## IV.2 Les critères d'optimisation

La plupart des problèmes d'optimisation rencontrés dans le monde réel comportent plusieurs objectifs ou critères, qui sont souvent en contradiction les uns avec les autres et doivent être optimisés simultanément. Contrairement aux problèmes avec un seul objectif ou critère, où l'optimum recherché est clairement défini, les problèmes d'optimisation multi-objectifs impliquent la prise en compte de plusieurs critères (Terki Hassaine Mohammed Issam Edine, Bourdim Sidi Mohamed El Amine, Varum Humberto, Benanane Abdelkader 2022):

- a) La quantité de matériaux ;
- b) Les critères architecturaux ;
- c) Les critères de temps et de coût ;
- d) La qualité environnementale ;
- e) Performance technique ;
- f) Autres critères comme l'aspect économique etc....

Il s'agit d'un critère multidimensionnel qui peut inclure, entre autres, les considérations suivantes :

- i) l'adaptation au sol ;
- ii) la limitation des déformations ;
- iii) la résistance au feu ;

Dans la liste des critères énumérés, nous n'avons pas inclus les critères liés à la vérification de l'équilibre statique, de la stabilité et de la rigidité de la structure globale (renversement, tassement des fondations, etc.), ni ceux relatifs à la résistance, à la stabilité et à la rigidité des éléments constitutifs (tel que : défaillance, flambage, déplacement excessif). En réalité, ces critères seront considérés comme des contraintes devant être satisfaites par toute solution de conception dans le processus global, et ne pourront donc pas être directement optimisés.

La définition de la fonction objectif est difficile en raison des différences de dimensions et de nature qualitative des critères. Ainsi, le choix multicritère présente des difficultés particulières, même s'il existe des méthodes de résolution pour ce type de problème.

Par conséquent, l'évaluation de certains critères nécessite une expérience professionnelle approfondie ou une consultation auprès d'experts. Par exemple, le critère de mise en œuvre est un domaine où une expertise pratique est indispensable.



L'approche classique d'optimisation des structures métalliques se concentre principalement sur la minimisation du poids de la structure. Cependant, le poids des assemblages représente rarement plus de 5 % du poids total de la structure. Ce faible pourcentage correspond en réalité à près de 30 % du coût total de fabrication de la structure. Certains experts, comme Evers et Maatje, avancent même un chiffre encore plus élevé, autour de 50 %. Cela représente une moyenne des pourcentages attribués aux assemblages, directement ou indirectement, à chaque étape du processus de conception et de réalisation à savoir :

- 33 % en phase de conception préliminaire,
- 55 % en phase de conception détaillée,
- 77 % en phase de fabrication en atelier,
- 40 % du coût total des matériaux de structure, etc.

En réalité, le coût d'une ossature est principalement déterminé par le coût de la main d'œuvre, qui dépend en grande partie de la complexité des assemblages.

Une approche optimisée de la structure basée uniquement sur le critère du poids peut donc conduire à des solutions de construction qui ne sont pas optimales en termes de coût. Ainsi, même à un stade préliminaire de conception, l'optimisation basée uniquement sur le critère du poids ne peut plus être justifiée et doit être remplacée par la recherche du coût minimum de construction, voire mieux, du coût global qui intègre toutes les composantes du processus de conception-réalisation.

Dans cette étude, nous limitons notre analyse des différents critères à un critère unique de coût. Ce critère quantitatif peut incorporer un maximum d'informations sur chaque solution de conception. Il s'agit également d'un critère flexible qui peut être limité à un objectif spécifique (comme la minimisation du coût de la superstructure) ou à un objectif plus global (comme le coût global du projet). Pour être le plus pertinent possible, le critère de coût global doit prendre en compte les coûts des matériaux, ainsi que les coûts des opérations de production (en atelier et sur le chantier) d'une solution de conception, en incluant ses deux principales composantes :

- Le coût de construction de la superstructure métallique.
- Le coût de construction des fondations.

Une fois le critère d'optimisation défini, nous aborderons dans les paragraphes suivants les variables d'optimisation et les contraintes qui régissent le processus de conception technique, afin de formuler complètement le problème d'optimisation de la conception globale en construction métallique.

### IV.3 Les variables retenues

En se concentrant sur la phase précoce de conception, il est évident que les variables de conception sont très diverses. Certaines de ces variables ont une influence minimale sur le coût global de la structure principale d'un projet, tandis que d'autres sont considérées comme des données fixes du point de vue de la conception technique. Par exemple, l'esquisse architecturale qui définit la géométrie et la forme de la construction, ainsi que les données géotechniques du sol obtenues généralement à partir d'une étude géotechnique.

Ainsi, nous accordons une importance particulière à trois catégories de variables, car elles ont le potentiel d'influencer considérablement le coût global de production d'une structure :

- Les caractéristiques dimensionnelles des éléments.
- Le type d'assemblages utilisés pour les liaisons internes de la structure.
- Le type de liaisons externes (entre la superstructure et les fondations) au niveau des points d'appui de la structure.

### IV.4 Les caractéristiques dimensionnelles des éléments et codage

#### IV.4.1 Les caractéristiques dimensionnelles des éléments

Les éléments constitutifs de la structure seront sélectionnés à partir de listes de profilés normalisés (comme indiqué dans le Tableau IV.1 de la base de données). Pour les poutres, nous utiliserons une liste comprenant 18 types de poutrelles IPE, avec des hauteurs variant de 80 à 600mm. Quant aux poteaux, nous considérerons des poutrelles de type HEA et HEB, avec des hauteurs allant de 100 à 600mm.

Ce choix est délibérément restreint à ces deux types de profilés afin de faciliter la détermination des caractéristiques principales des assemblages, notamment lorsque l'on adopte une modélisation semi-rigide pour ces derniers. Les informations sur les caractéristiques des assemblages sont également stockées dans une base de données.

**Tableau IV. 1:** Codage des profilés standards

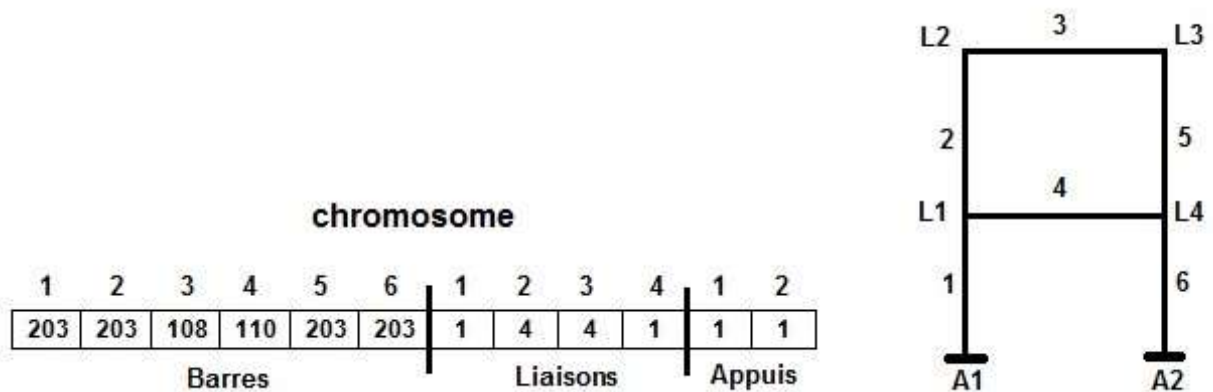
Profils	Code	Profils	Code	Profils	Code
IPE 80	100	HEA 100	200	HEB 100	219
IPE 100	101	HEA120	201	HEB 120	220
IPE 120	102	HEA 140	202	HEB 140	221
IPE 140	103	HEA 160	203	HEB 160	222
IPE 160	104	HEA 180	204	HEB 180	223
IPE 180	105	HEA 200	205	HEB 200	224
IPE 200	106	HEA 220	206	HEB 220	225
IPE 220	107	HEA 240	207	HEB 240	226
IPE 240	108	HEA 260	208	HEB 260	227
IPE 270	109	HEA 280	209	HEB 280	228

IPE 300	110	HEA 300	210	HEB 300	229
IPE 330	111	HEA 320	211	HEB 320	230
IPE 360	112	HEA 340	212	HEB 340	231
IPE 400	113	HEA 360	213	HEB 360	232
IPE 450	114	HEA 400	214	HEB 400	233
IPE 500	115	HEA 450	215	HEB 450	234
IPE 550	116	HEA 500	216	HEB 500	235
IPE 600	117	HEA 550	217	HEB 550	236
-	-	HEA 600	218	HEB 600	237

**IV.4.2 Codage des solutions de conception**

Chaque configuration de conception envisageable est représentée dans l'algorithme génétique par un chromosome composé de trois parties correspondant aux trois types de variables d'optimisation.

Chacune de ces trois parties est composée d'un nombre de gènes équivalent au nombre de variables de conception dans une structure donnée. La Figure IV .1 illustre la structure d'un chromosome utilisé pour encoder un portique à deux étages.



**Figure IV. 1:** Structure d'un chromosome.

Afin d'être utilisées dans l'algorithme génétique (AG), les dimensions caractéristiques de différents profils standard sont enregistrées dans une base de données, où ils sont codés (Tableau IV .1). Pour ce faire, nous proposons un codage entier qui permet à la fois d'identifier le type de profilé (IPE, HE A, HEB, etc.) et son numéro (hauteur).

Les informations concernant le type de liaisons et d'appuis d'une solution de conception sont également codées dans l'AG à travers une séquence d'entiers. Les codes spécifiques aux différents types d'assemblages utilisés ainsi qu'aux appuis sont présentés dans les Tableau IV .2 et Tableau IV .3.

De ce fait, pour une conception donnée (individu selon la terminologie de l'AG), la séquence de profilés constituant les différents éléments de la structure,

ainsi que le type de liaisons les reliant et le type d'attaches en pied de poteau, est représentée par une séquence de codes (gènes) correspondant à ces informations, formant donc le chromosome typique de la conception.

La prise en compte de contraintes telles que la symétrie ou la continuité conduit à la décomposition de la structure en groupes d'éléments comprenant un ou plusieurs éléments de même nature avec des caractéristiques dimensionnelles identiques. L'utilisation d'un ensemble de groupes d'éléments plutôt que d'éléments individuels dans l'AG permet de réduire le nombre de variables de conception, ce qui se traduit par une réduction de la taille du chromosome représentant une certaine conception.

Les individus de la première génération sont générés de manière aléatoire. Pour chaque gène, une valeur correspondante des variables est choisie de manière aléatoire.

## IV.5 Le type des assemblages et appuis

### IV.5.1 Les assemblages

En ce qui concerne les assemblages, nous prendrons en compte les liaisons poutre-poteau et poutre-poutre. Les liaisons poteau-poteau seront limitées aux configurations d'assemblages fortement rigidifiés permettant la continuité des poteaux d'une structure.

- **Pour les assemblages poutre-poteau** : Nous considérerons les cinq types d'assemblages illustrés dans la Figure IV.2, qui seront stockés dans une base de données (Tableau IV.2).

1 : Assemblage utilisant des cornières d'âme (traité comme une liaison articulée).

2 : Assemblage utilisant une platine d'extrémité débordante avec raidisseurs (traité comme une liaison rigide).

3 : Assemblage utilisant une platine d'extrémité débordante (liaison semi-rigide).

4 : Assemblage utilisant une platine d'extrémité non débordante (liaison semi-rigide).

5 : Assemblage utilisant des cornières d'âme et de semelles (liaison semi-rigide).

Les assemblages 1 et 2 sont couramment utilisés en construction métallique pour réaliser respectivement une liaison articulée ou une liaison encastree.

Les assemblages 3 et 4 font partie des types d'assemblages les plus répandus en Europe : des assemblages boulonnés utilisant une platine d'extrémité, avec ou sans boulons extérieurs.

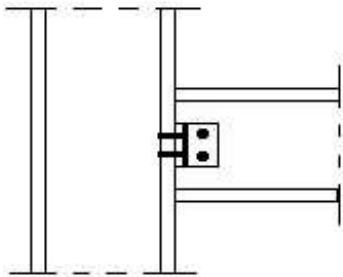
L'assemblage 5 est un assemblage poutre-poteau utilisant des cornières de liaison entre les semelles. Bien que ce type d'assemblage ne soit pas très courant en Europe, il a été choisi en raison des avantages qu'il présente en

termes de facilité de fabrication et de montage, ce qui devrait contribuer à réduire le coût global de la structure.

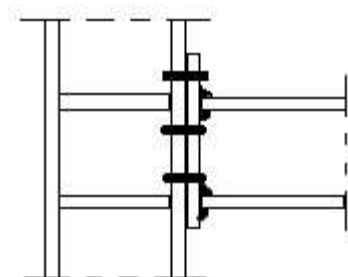
Les assemblages 3, 4 et 5 sont considérés comme semi-rigides. Leurs caractéristiques de rigidité et de résistance sont déterminées dans la base de données.

**Tableau IV. 2 : Codage des différents types d'assemblages**

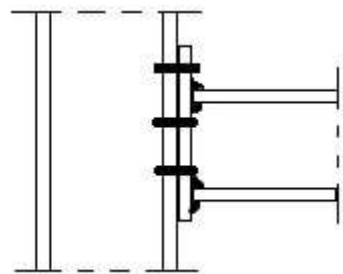
Type d'assemblage	Code
Assemblage par cornières d'âme	0
Assemblage par platine d'extrémité débordante	1
Assemblage par platine d'extrémité non débordante	2
Assemblage par cornières d'âme et de semelles	3
Assemblage par platine d'extrémité débordante avec raidisseurs	4



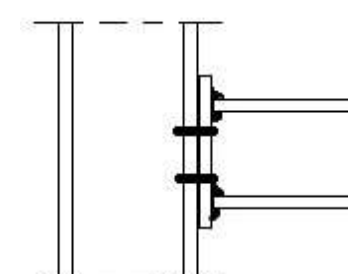
**1-** Assemblage par cornières d'âme (liaison articulée)



**2-** Assemblage par platine d'extrémité débordante avec raidisseurs (liaison encastrée)



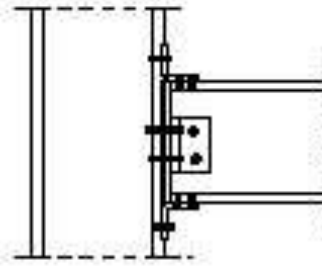
**3-** Assemblage par platine d'extrémité débordante



**4-** Assemblage par platine d'extrémité non débordante

(liaison semi-rigide)

(liaison semi-rigide)



5- Assemblage par cornières (liaison semi-rigide)

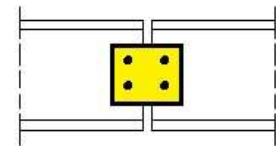
Figure IV. 2: Différents types d'assemblages poutre-poteau (Nizar 2003)

- **Pour le cas des assemblages poutre-poutre** : on va considérer les trois configurations d'assemblages de la Figure IV .3 :

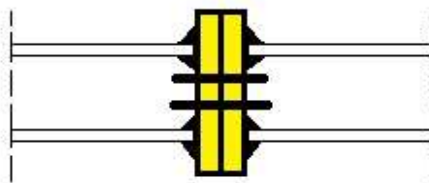
1 : Assemblage par platine d'extrémité (Liaison semi-rigide).

2 : Assemblage par couvre- joints d'âme (idéalisé comme liaison articulée).

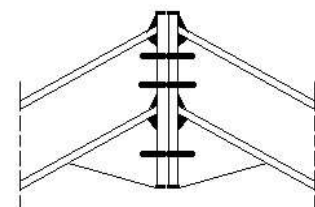
3 : Assemblage par platine d'extrémité renforcée par des jarrets (idéalisé comme liaison encastree).



1- Assemblage par platine d'âme d'extrémité (Liaison semi-rigide)



2- Assemblage par couvre- joints (liaison articulée)



3- Assemblage par platine d'extrémité renforcée par des jarrets (liaison encastree)

Figure IV. 3: Différents types d'assemblages poutre-poutre (Nizar 2003)

Si l'on souhaite réaliser une liaison de type articulation entre deux poutres adjacentes, une solution pratique consiste à utiliser un couvre-joint boulonné fixé aux âmes des deux éléments assemblés de part et d'autre (comme illustré dans la Figure IV.3, assemblage 2).

En revanche, la rigidité d'un assemblage par platine d'extrémité boulonnée peut être renforcée en utilisant des jarrets, ce qui permet d'obtenir une liaison encastrée. Cette disposition est couramment utilisée dans les assemblages des traverses des portiques à nefs multiples des structures de type halle industrielle (Figure IV.3, assemblage 3).

L'assemblage 1 de la Figure IV.3 représente une solution technique intermédiaire qui peut être modélisée comme une liaison semi-rigide. Une étude spécifique a été menée dans le cadre du projet, ce qui nous permet de disposer des caractéristiques de rigidité associées à cet assemblage.

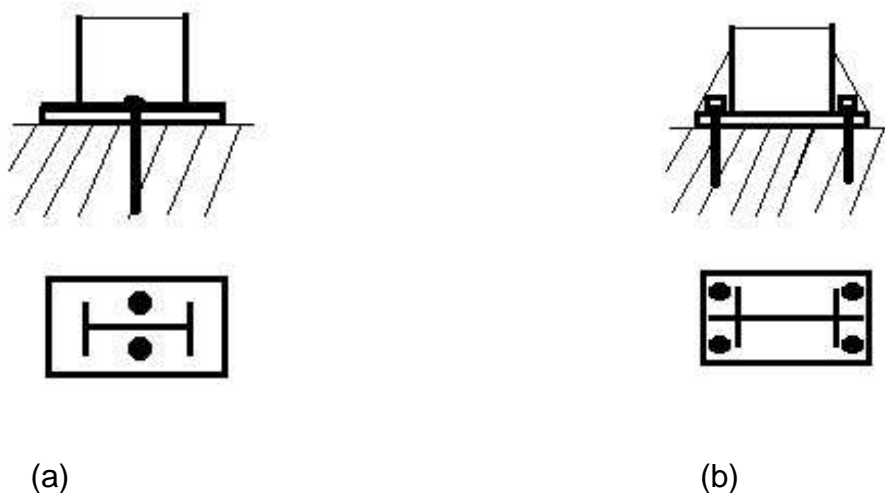
#### IV.5.2 Le type des appuis

Pour les appuis de la structure, on peut observer les deux aspects suivants :

- Pied de poteau articulé (poteau fixé par une platine d'extrémité seule).
- Pied de poteau encastré (poteau fixé par une platine d'extrémité raidie).

**Tableau IV. 3** : Codage des différents types d'appuis en pieds de poteau

Type d'appuis	Code
Pied de poteau articulé (poteau fixé par une platine d'extrémité seule)	0
Pied de poteau encastré (poteau fixé par une platine d'extrémité raidie)	1



**Figure IV. 4:** Dispositions des attaches en pieds de poteaux.

La Figure IV .4 (a) illustre une disposition courante d'un pied de poteau considéré comme articulé. Cet assemblage est composé d'une plaque d'assise soudée à l'extrémité du poteau et de deux tiges d'ancrage.

Dans la Figure IV .4 (b), la plaque d'assise est fixée à l'aide d'écrous sur au moins 4 tiges d'ancrage filetées, qui sont encastrées dans le béton. Ces tiges sont positionnées entre les semelles et le bord de la platine. Pour réduire l'épaisseur de la platine et renforcer la rigidité de la liaison, des raidisseurs sont souvent ajoutés. Plusieurs configurations de raidisseurs sont possibles : des raidisseurs simples alignés avec l'âme du poteau, des raidisseurs doubles reliant les extrémités des semelles, ou même des raidisseurs dans les deux directions pour les poteaux soumis à une flexion biaxiale. Dans cette étude, nous nous limitons à la première configuration : des raidisseurs simples alignés avec l'âme du poteau. C'est une solution courante et économique qui facilite également le serrage des écrous.

## IV.6 L'optimisation en construction métallique avec les AGs

Nous avons décrit l'AG de base, mais il existe de nombreuses variantes. En réalité, nous avons constaté que chaque utilisateur conçoit généralement son propre algorithme génétique en fonction de son application spécifique. Il n'y a rien de critique à cela : les algorithmes génétiques de base, sur lesquels une grande partie de la théorie a été établie, ont des limitations pratiques et sont parfois trop génériques car on a cherché à les rendre indépendants des problèmes spécifiques. Il est donc normal que chaque utilisateur y ajoute des heuristiques qui améliorent leur efficacité, tout en conservant les principes de base identiques

Dans notre problème d'optimisation, l'objectif est de minimiser le coût global d'une structure tout en respectant les différentes contraintes de conception représentées par les contraintes technologiques et réglementaires de résistance et de service de la structure.

Le processus d'optimisation comprend les différentes étapes présentées ci-dessous.

### IV.6.1 Evaluation des chromosomes

Le chromosome obtenu à l'étape précédente est décrypté afin de révéler les informations concernant les caractéristiques dimensionnelles des différents éléments de la structure, ainsi que celles relatives aux liaisons et aux appuis. En combinant ces informations avec les données de base de la structure telles que sa géométrie et les charges de calcul, nous sommes en mesure d'évaluer la solution de conception.

### IV.6.2 Vérification des contraintes

Pour évaluer la validité de l'individu/conception, nous effectuons les vérifications réglementaires requises par l'Eurocode 3. Chaque élément de la structure est examiné séparément afin de s'assurer de sa conformité aux critères de résistance des sections transversales, ainsi qu'aux phénomènes d'instabilité élastique tels que le flambement simple et la flexion. Nous vérifions également les limitations des déformations verticales des éléments soumis à la flexion, ainsi que la limite de déformation latérale de la structure au niveau de la tête du poteau.



Toutes les informations relatives à ces vérifications sont enregistrées afin d'être prises en compte lors de l'évaluation des chromosomes.

## IV.7 Opérateurs des AGs

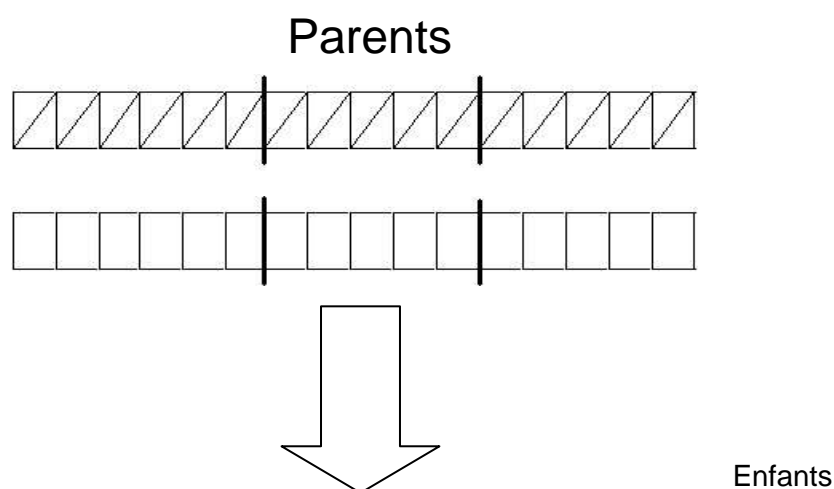
### IV.7.1 Sélection

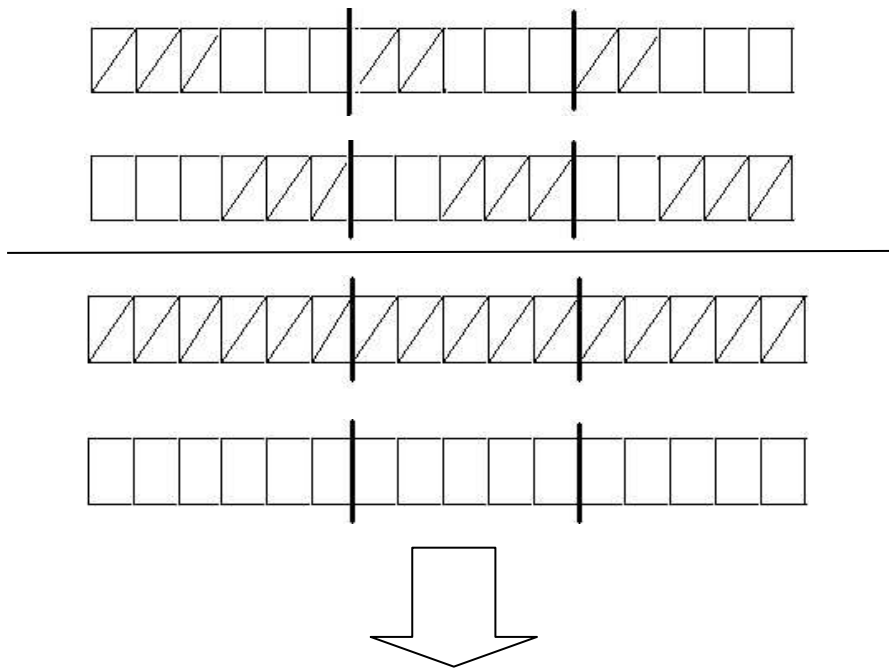
Nous avons choisi d'utiliser un schéma d'élitisme N/2 afin d'éviter les problèmes de convergence prématurée associés au schéma de sélection basé sur la roulette de casino. Ce dernier présente un aspect probabiliste qui peut entraîner la sélection répétée d'un même individu. Par conséquent, si un individu se distingue nettement des autres individus, en termes de performance, il risque de dominer la nouvelle population. En adoptant le schéma N/2 élitisme, nous atténuons ces problèmes potentiels.

### IV.7.2 Croisement

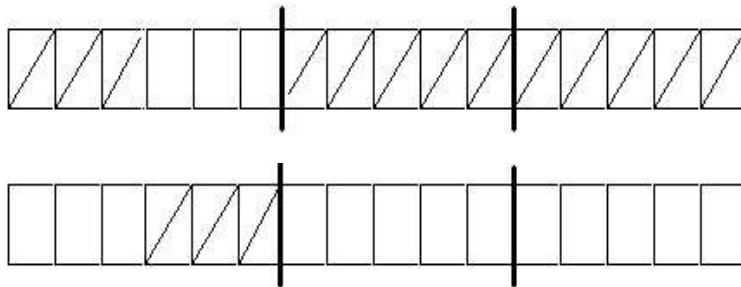
Nous allons utiliser une méthode de croisement qui consiste à sélectionner au hasard deux chromosomes dans la population actuelle après la sélection, puis à les croiser en un point sur les trois parties du chromosome. Trois emplacements de croisement sont choisis au hasard sur les deux chromosomes. Chaque emplacement de croisement correspond à une variable de conception. Pour chaque partie, les segments des chromosomes parents de part et d'autre du point de croisement sont échangés pour former deux nouveaux individus. Les enfants remplacent ensuite les parents dans la nouvelle génération.

Le croisement n'est pas appliqué de manière systématique ; généralement, il existe une probabilité de croisement  $p_c$  comprise entre 0.6 et 1. Ces valeurs sont souvent recommandées dans de nombreuses études (Fatiha et al. 2015). Si le croisement n'est pas appliqué, les deux individus sélectionnés pour la reproduction, sont simplement copiés dans la nouvelle population.

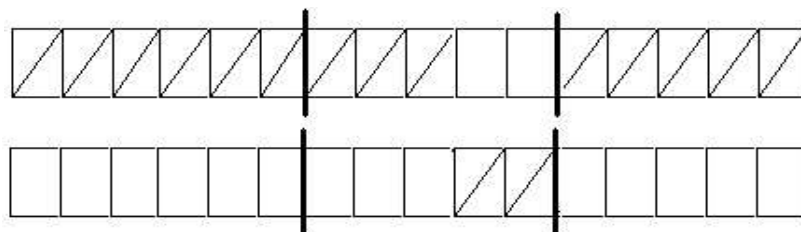




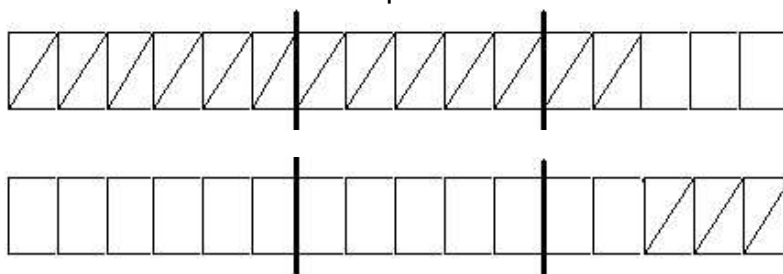
- Le croisement dans la première partie :



- Le croisement dans la deuxième partie :



- Le croisement dans la troisième partie :



**Figure IV. 5:** Exemple de procédure de croisement entre deux chromosomes.

Ces problèmes de convergence peuvent s'expliquer par le fait qu'une perturbation trop importante des solutions de conception, à chaque application de l'opérateur de croisement, conduit souvent à une dispersion des individus dans l'espace de recherche, alors même que certains d'entre eux pourraient être très proches des zones de solutions optimales. Cela contribue à l'investigation de l'espace de recherche à l'encontre d'une exploitation efficace des solutions découvertes. Il est important de rappeler que le mécanisme de convergence des AGs repose sur un compromis entre l'**exploration** de l'espace de recherche, via l'opérateur de mutation, et l'**exploitation** des solutions pour créer de nouveaux individus performants, grâce à l'opérateur de croisement.

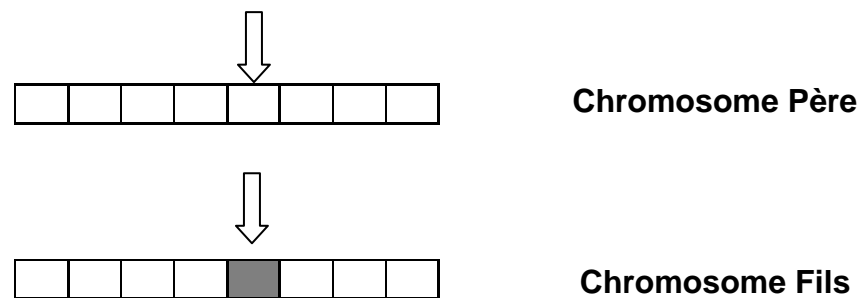
Pour remédier à ces difficultés, nous avons procédé à une méthode de croisement basée sur des croisements locaux des différentes parties du chromosome. Cette méthode consiste à partir des deux chromosomes parents, de donner deux enfants ou  $n$  enfants avec  $n$ -point crossover ( $n > 2$ ) en faisant s'échanger leur propriété relative aux barres, aux liaisons et aux appuis. Ces chromosomes sont évalués et enregistrés dans une population intermédiaire. À la fin de la phase de croisement, les individus de la population intermédiaire sont classés en fonction de leurs performances, et les  $T$  (taille d'une population) meilleurs individus sont sélectionnés pour former la nouvelle population.

Cette procédure a rapidement donné des résultats nettement meilleurs en termes de convergence, comme démontré par des exemples de tests.

### IV.7.3 Mutation

L'opérateur de mutation a fréquemment pour effet de changer localement la solution représentée par un individu. Généralement, la mutation est considérée comme un opérateur secondaire dans les algorithmes génétiques, bien qu'elle confère à ces derniers la propriété d'ergodicité, c'est-à-dire la capacité d'atteindre tous les points de l'espace de recherche. Cet opérateur revêt donc une grande importance du point de vue théorique.

Cet opérateur de mutation classique pour les chaînes de bits consiste à choisir aléatoirement un locus et à le remplacer par son complément pour former l'individu mutant, comme illustré dans la Figure IV.8. On peut généraliser cette mutation à des chaînes de gènes de taille discrète en modifiant la valeur du gène sélectionné par une autre valeur de son domaine, proche de la valeur initiale si bien sûr la notion de voisinage est définie.

**Site de mutation**

**Figure IV. 6:** Exemple d'une représentation de mutation dans un chromosome

La mutation joue donc un rôle de perturbation et évite que l'évolution ne stagne en introduisant constamment de nouveaux gènes dans la population. Cet opérateur permet d'assurer à la fois une exploration globale et une recherche locale, en fonction du poids et du nombre de gènes mutés. Tout comme pour le croisement, l'opérateur de mutation est appliqué avec une probabilité initialement fixée, notée  $P_m$ . Pour chaque chromosome de la population, on génère aléatoirement un nombre compris entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à la probabilité de mutation  $P_m$ , le chromosome subit une mutation. Sinon, il est simplement copié dans la nouvelle population sans subir de modification.

### **IV.8 Application de quelques approches spécifiques en optimisation (structures métalliques bidimensionnelles)**

La construction de structures a toujours revêtu une importance primordiale dans la vie humaine. Un proverbe arabe souligne que "la crise donne naissance à l'inspiration". En effet, depuis les temps anciens, la solidité des structures était étroitement liée à la durée de vie des habitants. Aujourd'hui, grâce aux avancées technologiques et aux matériaux disponibles, le coût est devenu un critère déterminant dans le choix d'une conception. Ainsi, notre priorité est de concevoir un bâtiment répondant à toutes les normes de qualité, tout en minimisant les coûts de production.

L'objectif principal de ce projet était de concevoir une structure de bâtiment en charpente métallique (CM). Toutefois, la réalisation de cet objectif s'est déroulée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, il était nécessaire de :

- Déterminer les charges appliquées à la structure ;
- Identifier les différentes options de structures envisageables ;
- Réaliser la conception, puis sélectionner la conception la plus avantageuse en fonction des besoins du client.

Pour démontrer l'utilité de la méthodologie proposée, nous avons adopté une stratégie consistant à évaluer une même structure en utilisant ROBOT Millenium et SAP2000, ces logiciels sont utilisés pour effectuer les analyses structurales plus détaillées, comme l'analyse push-over pour évaluer la vulnérabilité de la charpente métallique. Ensuite, on peut exporter les résultats des analyses structurales à partir de ROBOT Millenium et SAP2000 sous forme de données de sortie, puis les utiliser dans notre programme MATLAB (Messac 2015) pour évaluer les critères de performance et effectuer l'optimisation ou l'analyse probabiliste à l'aide de trois méthodes différentes :

- La première méthode repose sur l'approche d'optimisation de Monte-Carlo ;
- La deuxième méthode de Pareto, également connue sous le nom de front de Pareto ou optimisation de Pareto, elle est nommée d'après l'économiste Vilfredo Pareto qui l'a introduite pour la première fois.
- La troisième méthode utilise l'outil que nous avons développé, basé sur l'optimisation par les algorithmes génétiques.

Ces approches nous permettent de surmonter les deux principaux défis auxquels les programmeurs sont souvent confrontés lors de la résolution de problèmes physiques ou réels : la validation des résultats numériques obtenus et les performances de la méthode de résolution choisie. La structure métallique suivante est prise en considération dans notre étude (voir Figure IV.9).

#### IV.8.1 Hypothèses et données communes aux trois approches

Le projet est situé dans la ville d'Oran et présente les caractéristiques suivantes :

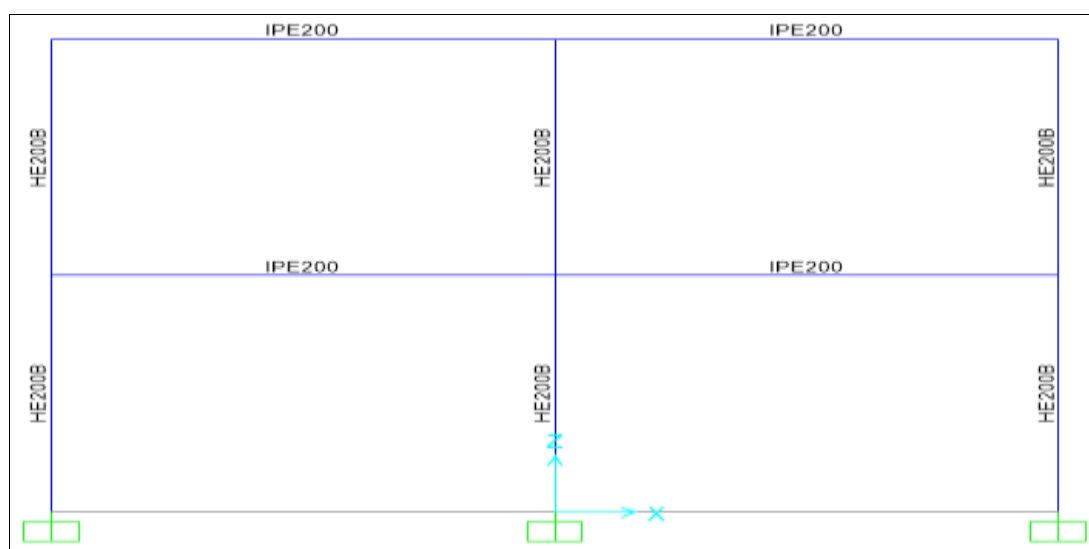


Figure IV. 7: Modélisation de la structure en 2D avec sections de profilés

**Données du projet :**

- Zone de sismicité : II-a (moyenne)
- Zone de neige : B selon la carte des zones de neige,
- Zone de vent : I selon la carte des zones des vents,

**Géométrie du projet :**

- Longueur totale : 30,64 m
- Largeur totale : 13,4 m
- Hauteur du rez-de-chaussée : 2,80 m
- Hauteur du rez-de-chaussée : 3,80 m
- Hauteur des étages : 3,80 m
- Hauteur totale du bâtiment : 57 m
- Distance entre deux pannes : 1,3 m
- Hauteur des murs extérieurs en maçonnerie : 6 m
- Type de toiture : tôle nervurée industrialisée TN 40
- Profilés utilisés : poutre et pannes en IPE, poteaux en HEA

**Contrainte admissible du sol :** 2,5 bars

**Coordonnées du centre géométrique de la structure :**

X = 6,000 (m)      Y = 0,000 (m)      Z = 4,000 (m)

Coordonnées du centre de gravité de la structure :

X = 6,000 (m)      Y = 0,000 (m)      Z = 4,654 (m)

**Moments centraux d'inertie de la structure :**

I<sub>x</sub> = 3437,143 (kg\*m<sup>2</sup>)      I<sub>y</sub> = 15377,059 (kg\*m<sup>2</sup>)      I<sub>z</sub> = 11940,625 (kg\*m<sup>2</sup>)

Portique plan avec une Masse = 594,792 (kg)

Le coût de l'acier est autour de 15 000 Dinars Algérien le Quintal

**a) Caractéristiques du béton armé**

- Dosage du béton 350 KG/m<sup>3</sup>
- Valeur de la résistance caractéristique du béton  $f_{c28} = 25$  Mpa
- Module d'élasticité du béton  $E_c = 32164$  Mpa
- Contrainte admissible du béton  $\sigma_{bc} = 0.85$ ,  $f_{c28} = 14,2$  Mpa
- Facteur de sécurité du béton  $c = 1.5$  Sans unité
- Contrainte de l'acier au rendement  $F_e E400 = 400$  Mpa
- Facteur de sécurité de l'acier  $s = 1.15$  Sans unité

**b) Caractéristiques de l'acier de construction**

- Nuance d'acier S235 = 235 Mpa
- Module d'élasticité de l'acier  $E_s = 210000$  Mpa

**c) Acier de construction**

- Tous les éléments en acier de construction sont en acier S235 avec  $f_y = 2350$  daN/cm<sup>2</sup>.

- Module d'élasticité de l'acier  $E = 2100000 \text{ daN/cm}^2$ .
- Les assemblages sont réalisés au moyen de soudures et de boulons ordinaires et à haute résistance ; calculés avec le logiciel ROBOT Millenium :
- Définir une structure composée de portiques (colonnes + treillis) conformément aux données du projet. Calculer les actions du vent
- Créer les combinaisons de charges
- Analyser la structure et dimensionner les différents éléments de la structure (pannes, rails de bardage, éléments de fermettes, colonnes, poteaux).
- Calculer les connexions (éléments de ferme, poteau de ferme, pied de poteau).

Par la suite, le portique est analysé à l'aide du logiciel SAP2000 pour appliquer la méthode du push-over et voir la vulnérabilité du portique avec les trois variantes :

**Tableau IV. 4:** Choix des profilés pour les trois variantes

N° Variante	Profilé de poteau	Profilé de poutre
1	HEB 180	HEA 240
2	HEB 180	IPE 200
3	HEB 140	HEA 180

Pour l'estimation du projet, nous avons utilisé des barèmes de prix moyens des profilés disponibles et qui sont couramment utilisés sur le marché du bâtiment Algérien.

#### **IV.8.2 Calcul structural et détaillé des trois variantes avec analyse des résultats**

Les logiciels ROBOT Millennium et SAP2000 sont des outils d'analyse et de conception de structures utilisés dans l'industrie de l'ingénierie civile.

##### **IV.8.2.1 ROBOT Millenium :**

ROBOT Millenium est un logiciel d'analyse de structure utilisé pour la conception et l'analyse de structures en acier. On peut l'utiliser pour dimensionner les éléments du portique, vérifier les contraintes de résistance, effectuer des analyses de charge et des combinaisons de charges, ainsi que pour concevoir les connexions.

L'utilisation de ROBOT Millenium pour l'exemple qui va suivre impliquera les étapes suivantes :

1. **Modélisation de la structure** : Créer un modèle 3D de la structure du portique en spécifiant les propriétés des matériaux, les sections des poutres et des poteaux, les appuis, les connexions, etc.
2. **Charges et combinaisons de charges** : Appliquer les charges permanentes, les charges d'exploitation, la charge de neige et la charge de vent sur le modèle.

3. **Analyse** : Effectuer une analyse de charge pour obtenir les réactions aux appuis, les efforts internes (moments, forces, etc.) dans les éléments du portique et vérifier les contraintes de résistance.
4. **Dimensionnement des éléments** : Utiliser les résultats de l'analyse pour dimensionner les poutres, les poteaux et les connexions.
5. **Résultats** : ROBOT Millenium fournira des rapports détaillés contenant les résultats de l'analyse et du dimensionnement pour chaque variante du portique.

#### IV.8.2.2 SAP2000 avec Pushover Analysis :

SAP2000 est un logiciel de modélisation et d'analyse de structures générales. La méthode de Pushover est une analyse statique non linéaire utilisée pour évaluer la capacité de la structure à résister à des charges sismiques ou autres charges latérales importantes.

L'utilisation de SAP2000 avec la méthode Pushover pour le même exemple impliquera les étapes suivantes :

1. **Modélisation de la structure** : Créer un modèle 3D de la structure du portique en spécifiant les propriétés des matériaux, les sections des poutres et des poteaux, les appuis, les connexions, etc.
2. **Charges et combinaisons de charges** : Appliquer les charges permanentes, les charges d'exploitation, la charge de neige et la charge de vent sur le modèle.
3. **Pushover Analysis** : Effectuer une analyse Pushover pour évaluer la réponse globale de la structure aux charges latérales en appliquant progressivement des forces horizontales jusqu'à ce que la structure atteigne sa capacité de charge maximale.
4. **Interprétation des résultats** : Analyser les résultats de l'analyse Pushover pour évaluer la capacité de résistance de la structure, identifier les zones de faiblesse et vérifier si les contraintes sont satisfaites.
5. **Comparaison des variantes** : Répéter l'analyse Pushover pour chaque variante du portique (par exemple, avec différentes sections de poutres et de poteaux) pour comparer leur performance et choisir la meilleure conception.

Il est essentiel de noter que l'interprétation des résultats nécessite une expertise en génie civil et une connaissance approfondie des codes et des normes de conception des structures. Les logiciels de modélisation et d'analyse tels que ROBOT Millenium et SAP2000 sont des outils puissants, mais leur utilisation doit être effectuée par des ingénieurs qualifiés pour garantir la sécurité et la fiabilité de la conception de la structure.

Les résultats obtenus à partir de ces analyses peuvent inclure les déformations, les contraintes, les facteurs de sécurité, les capacités de résistance, les



déplacements, les modes de défaillance, etc. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés pour évaluer la performance structurale, identifier les zones critiques et les composants nécessitant une attention particulière, et optimiser les dimensions des éléments de charpente pour répondre aux critères de conception (Terki Hassaine Mohammed Issam Ediine, Bourdim Sidi Mohamed El Amine, Varum Humberto, Benanane Abdelkader 2022).



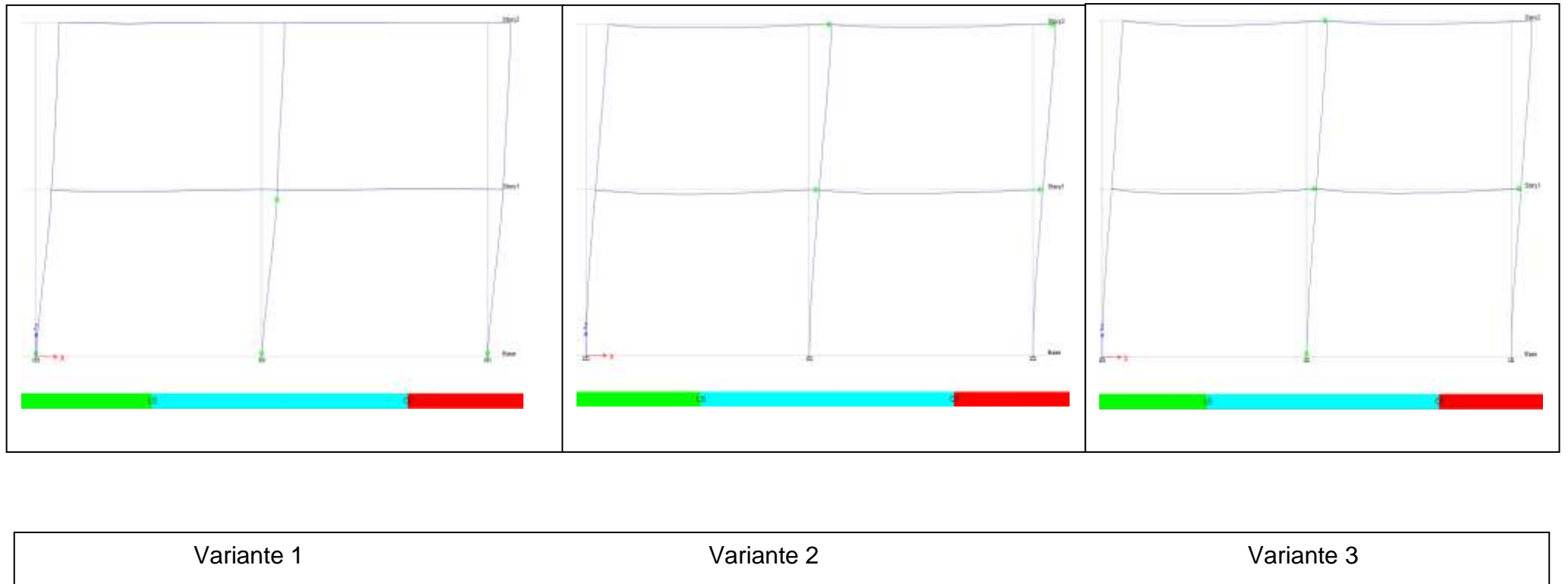


Figure IV. 9: Rotules plastiques pour les trois variantes

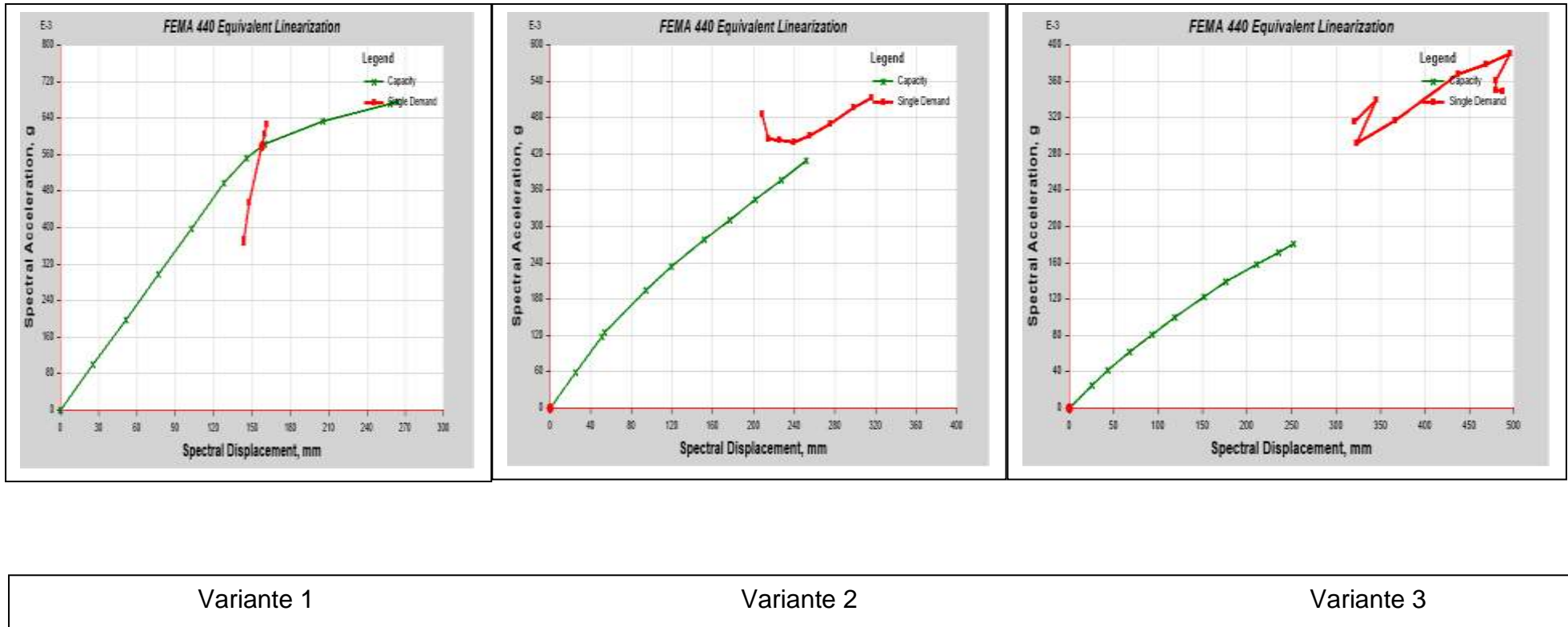


Figure IV. 10: Paramètres de performance pour les trois variantes

## 1/ Variante 1 : (poteau en HEB 180 et poutre en HEA 240)

**Tableau IV. 5 : Distribution des rotules plastiques**

Step	Monitored Displ (mm)	Base Force (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0.1	0	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
1	30.5	58.3742	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
2	60.9	116.7487	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
3	91.3	175.1229	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
4	121.7	233.4971	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
5	152.1	291.8713	19	1	0	0	0	20	0	0	0	20
6	172.9	324.7593	18	2	0	0	0	19	1	0	0	20
7	189	344.9236	17	3	0	0	0	19	1	0	0	20
8	240.7	380.5168	16	4	0	0	0	17	3	0	0	20
9	298.1	409.2249	15	5	0	0	0	16	4	0	0	20
10	304.1	411.7186	15	5	0	0	0	16	4	0	0	20

La représentation graphique de la capacité de la structure, illustrée par la Figure IV.10, est caractérisée par les éléments suivants :

- Dans l'état élastique, l'effort tranchant élastique ( $V_y$ ) est de 58,37 kN, associé à un déplacement élastique ( $d_y$ ) de 0,0305 m, et la rigidité initiale ( $K_0$ ) est de 1913,91 KN.m, qui est le produit de l'effort tranchant élastique et du déplacement élastique.
- Dans l'état limite ultime, l'effort tranchant ( $V_u$ ) atteint 92,70 KN.
- Concernant la distribution des rotules plastiques, comme le montre la Figure IV.11 et le Tableau IV.4, on peut observer que 80% des rotules plastiques se situent dans le premier segment (A-IO), 20% dans le deuxième segment (IO-LS), aucun dans le troisième segment (LS-CP), et aucun dans le dernier segment, ce qui correspond à la rupture ou à l'effondrement.

**Tableau IV. 6: Paramètres de performance**

Point Found	Yes	T secant	1.047 sec
Shear	342.3022 kN	T effective	1.025 sec
Displacement	186.9 mm	Ductility Ratio	1.190152
Sa	0.579199	Effective Damping	0.0517
Sd	157.8 mm	Modification Factor	0.95854

En examinant la Figure IV.12 et le Tableau IV.5, nous pouvons conclure que le point de performance, qui correspond à l'intersection entre la courbe du spectre de

réponse et la courbe de capacité, est situé au niveau de l'effort tranchant de 342,30 kN et du déplacement de 0,0187 m.

**2/ Variante 2 (poteau en HEB 180 et poutre en IPE 200)**

**Tableau IV. 7:** Distribution des rotules plastiques

Step	Monitored Displ (mm)	Base Force (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0.3	0	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
1	30.7	32.5045	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
2	61.1	65.0094	20	0	0	0	0	20	0	0	0	20
3	64.6	68.7142	19	1	0	0	0	20	0	0	0	20
4	113.6	107.0559	17	3	0	0	0	20	0	0	0	20
5	144	128.0556	17	3	0	0	0	20	0	0	0	20
6	183.5	151.6544	16	4	0	0	0	20	0	0	0	20
7	213.9	168.9638	16	4	0	0	0	18	2	0	0	20
8	244.3	186.2733	16	4	0	0	0	18	2	0	0	20
9	274.7	203.5827	16	4	0	0	0	17	3	0	0	20
10	304.3	219.8831	15	5	0	0	0	16	4	0	0	20

La caractéristique de la courbe de capacité dans la Figure IV.10 est déterminée de cette manière :

- En état élastique, l'effort tranchant élastique  $V_y$  est de 32,50 kN, avec un déplacement élastique  $d_y$  de 0,0307 m et une rigidité initiale  $K_0$  de 1058,63 kNm, qui représente le produit de l'effort tranchant élastique et du déplacement élastique.
- En état limite ultime, l'effort tranchant  $V_u$  est de 219,88 kN.
- En ce qui concerne la distribution des rotules plastiques, en se basant toujours sur la Figure IV.11 et le Tableau IV.6, il est observé que 80 % des rotules plastiques se trouvent dans le premier segment (A-IO), 20 % dans le deuxième segment (IO-LS), aucun dans le troisième segment (LS-CP) et aucun dans le dernier segment, ce qui correspond à la ruine ou à l'effondrement.

**Tableau IV. 8:** Paramètres de performance

Point Found	No	T secant	0 sec
Shear	0 kN	T effective	0 sec
Displacement	0 mm	Ductility Ratio	0
Sa	0	Effective Damping	0
Sd	0 mm	Modification Factor	0

À partir de l'analyse de la Figure IV.12 et du Tableau IV.7, nous pouvons conclure que le point de performance, qui représente l'intersection entre la courbe du spectre de réponse et la courbe de capacité, n'est pas présent.

**3/ Variante 3 (poteau en HEB 140 et poutre en IPE 180)**

**Tableau IV. 9:** Distribution des rotules plastiques

Step	Monitored Displ (mm)	Base Force (kN)	A-B	B-C	C-D	D-E	>E	A-IO	IO-LS	LS-CP	>CP	Total
0	0.4	0	16	4	0	0	0	20	0	0	0	20
1	30.8	13.7429	16	4	0	0	0	20	0	0	0	20
2	51.9	23.3129	15	5	0	0	0	20	0	0	0	20
3	82.3	33.8519	15	5	0	0	0	20	0	0	0	20
4	112.7	44.391	15	5	0	0	0	20	0	0	0	20
5	143.1	54.93	15	5	0	0	0	20	0	0	0	20
6	182.6	66.9465	14	6	0	0	0	19	1	0	0	20
7	213	75.8088	14	6	0	0	0	17	3	0	0	20
8	254	86.3713	13	7	0	0	0	17	3	0	0	20
9	284.4	93.8538	13	7	0	0	0	16	4	0	0	20
10	304.4	98.7694	12	8	0	0	0	16	4	0	0	20

La courbe de capacité de la variante 3 dans la Figure IV.10 est déterminée par les caractéristiques suivantes :

- L'état élastique correspond à un effort tranchant élastique de  $V_y = 13,74$  kN pour un déplacement élastique de  $d_y = 0,0308$  m et une rigidité initiale de  $K_0 = 446,10$  kNm, qui est le produit de l'effort tranchant élastique et du déplacement élastique.
- L'état limite ultime correspond à un effort tranchant de  $V_u = 98,77$  kN.
- La distribution des rotules plastiques est présentée dans la Figure IV.11 et le Tableau IV.8. On peut observer que 80 % des rotules plastiques se trouvent dans le premier segment (A-IO), 20 % dans le deuxième segment (IO-LS), aucun dans le troisième segment (LS-CP) et aucun dans le dernier segment, ce qui indique une situation de ruine ou d'effondrement.

**Tableau IV. 10:** Paramètres de performance

Point Found	No	T secant	0 sec
Shear	0 kN	T effective	0 sec
Displacement	0 mm	Ductility Ratio	0
Sa	0	Effective Damping	0
Sd	0 mm	Modification Factor	0

En examinant la Figure IV.12 et le Tableau IV.9, on peut conclure que le point de performance, représentant l'intersection de la courbe du spectre de réponse avec la courbe de capacité, n'est pas présent.

#### IV.8.2.3. Comparaison des résultats des variantes traitées

En ce qui concerne la comparaison des résultats des différentes variantes traitées, après avoir analysé chaque modèle individuellement, nous allons maintenant tenter de les comparer en fonction de la courbe de capacité ainsi que des critères suivants : l'effort tranchant élastique, le déplacement, la rigidité initiale et l'effort tranchant ultime, comme détaillé au tableau ci-dessous.

**Tableau IV. 11:** Comparaison des résultats des variantes traitées

Variante	Variante 1 (poteau HEB 180 et poutre HEA 240)	Variante 1 (poteau HEB 180 et poutre IPE 200)	Variante 1 (poteau HEB 140 et poutre HEA 180)
Effort tranchant élastique ( $V_y$ ) en kN	58.37	32.50	13.74
Déplacement élastique ( $d_y$ ) en m	0.0305	0.0307	0.0308
Rigidité initiale ( $K_0$ ) en kN/m	1913.91	1058.63	446.10
Effort tranchant ultime ( $V_u$ ) en kN	92.70	219.88	98.77

À la lumière des résultats énumérés dans le Tableau IV.10, on peut commenter les valeurs de la manière suivante :

En ce qui concerne l'effort tranchant élastique, il est facile de constater que la première variante présente la valeur la plus élevée par rapport aux deux autres, principalement en raison des caractéristiques géométriques des profilés utilisés dans cette variante. De même, il est évident que cette première variante présente le déplacement élastique le plus faible par rapport aux autres. Elle affiche également la rigidité initiale la plus élevée, de même que l'effort tranchant ultime.

Il est important de noter que les poteaux de cette variante démontrent une bonne résistance face aux charges appliquées, et un sous-dimensionnement de ces éléments peut conduire à une faible résistance. Toutefois, il est à souligner que cette première variante est également la plus lourde par rapport aux deux autres, ce qui a un impact considérable sur le coût global de la construction de la structure.

Il est essentiel de trouver un équilibre entre la réponse sismique, le coût de réalisation et le poids total de la structure.

#### IV.8.2.4. Vérification

Comme expliqué précédemment, la validation de la méthode proposée est réalisée à l'aide d'une analyse statique non linéaire "pushover". Cette analyse consiste à



soumettre la structure à la gravité et à des charges latérales croissantes jusqu'à atteindre un niveau de charge ultime. Ce processus est similaire à l'analyse plastique des cadres utilisant la méthode des mécanismes élémentaires combinés.

Dans l'analyse pushover, les charges augmentent jusqu'à ce qu'une charnière plastique différente se forme, entraînant l'effondrement de la structure. Néanmoins, la méthode d'analyse plastique observe le concept inverse en identifiant plusieurs modes de défaillance avec des formations de charnières différentes, puis en évaluant si ces modes de défaillance satisfont ou non aux conditions ultimes.

Cette condition est liée au facteur de charge critique de la structure, qui doit être minimisé.

#### IV.8.2.5. Méthode de Monte Carlo

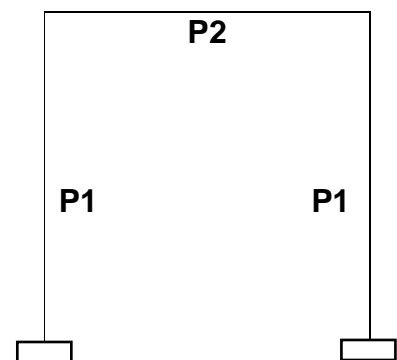
##### 1) Définition de la méthode :

C'est est une approche basée sur des échantillons aléatoires pour résoudre des problèmes d'optimisation. Nous allons générer un grand nombre de solutions potentielles (portiques) en choisissant aléatoirement les valeurs des paramètres (longueurs des poutres et types de connexions) dans des plages spécifiées. Nous évaluerons ensuite la performance de chaque portique en utilisant une fonction objectif (charge maximale et poids) et retiendrons les solutions les plus performantes.

**Schéma :** Supposons que nous ayons un portique simple avec deux poteaux (P1) et une poutre (P2), et deux options de connexion : soudée (S) et boulonnée (B). Voici un schéma pour illustrer le processus de Monte Carlo avec quelques exemples de solutions potentielles :

Exemple de solutions générées par Monte Carlo :

1. P1 = 3.2 m, P2 = 4.5 m, Connexion = S
2. P1 = 2.8 m, P2 = 3.9 m, Connexion = B
3. P1 = 3.0 m, P2 = 3.8 m, Connexion = S
4. P1 = 3.5 m, P2 = 4.2 m, Connexion = B
- ...



**Figure IV. 11:** Schéma d'un portique simple

**Évaluation de la performance :** Pour chaque solution (portique), nous calculons la charge maximale que le portique peut supporter tout en respectant les contraintes de déformation et de résistance. Nous évaluons également le poids total du portique.

**Sélection :** Nous sélectionnons les solutions les plus performantes qui peuvent supporter une charge maximale élevée avec un poids moindre.

**Résultats numériques :** Supposons que nous ayons généré un grand nombre de solutions potentielles à l'aide de la méthode de Monte Carlo et que nous ayons sélectionné les meilleures solutions en fonction de leur performance :

Meilleures solutions :

1. P1 = 3.2 m, P2 = 4.5 m, Connexion = S  
Charge maximale supportée : 160 kN  
Poids total du portique : 2200 kg
2. P1 = 3.0 m, P2 = 3.8 m, Connexion = S  
Charge maximale supportée : 155 kN  
Poids total du portique : 2100 kg
3. P1 = 3.5 m, P2 = 4.2 m, Connexion = B  
Charge maximale supportée : 170 kN  
Poids total du portique : 2300 kg

Ces solutions représentent différentes configurations de portiques qui ont été évaluées par la méthode de Monte Carlo. Les valeurs de charge maximale et de poids total du portique varient en fonction des échantillons aléatoires générés et des contraintes spécifiées.

La méthode de Monte Carlo permet d'explorer efficacement l'espace des solutions possibles, mais les résultats peuvent varier d'une exécution à l'autre en raison de la nature aléatoire de l'approche. Pour obtenir une solution plus précise et robuste, il est souvent nécessaire de répéter le processus plusieurs fois et d'augmenter le nombre d'échantillons aléatoires générés.

## 2) Organigramme de la méthode

Voici un organigramme simplifié décrivant la méthode de Monte Carlo pour l'analyse de la charpente métallique pour les trois variantes (1 ;2 ; 3) :

1. Génération de la population Monte Carlo :
  - Définir les distributions de probabilité pour les dimensions et les paramètres de la charpente pour chaque variante (longueurs des poutres et poteaux, sections des profilés, etc.).
  - Générer une population aléatoire de solutions pour chaque variante en tirant des échantillons aléatoires à partir des distributions de probabilité spécifiées.
2. Calcul des critères de performance pour chaque échantillon :
  - Pour chaque individu de la population Monte Carlo, effectuer une analyse de la charpente métallique avec les logiciels ROBOT Millenium et SAP2000 pour obtenir les résultats d'effort tranchant élastique ( $V_y$ ), de déplacement élastique ( $d_y$ ), de rigidité initiale ( $K_0$ ) et d'effort tranchant ultime ( $V_u$ ).
3. Évaluation de la performance :
  - Calculer les statistiques des critères de performance pour chaque variante en utilisant les résultats obtenus à partir de l'ensemble des

échantillons (par exemple, moyenne, écart-type, valeur maximale, valeur minimale, etc.).

4. Analyse comparative des résultats :

- Comparer les statistiques des critères de performance entre les trois variantes pour évaluer leurs performances respectives en termes d'effort tranchant élastique, de déplacement élastique, de rigidité initiale et d'effort tranchant ultime.

5. Choix de la meilleure solution :

- Sélectionner la variante qui présente les meilleures performances globales en fonction des critères de conception et des contraintes du projet.

6. Affichage des résultats :

- Afficher les statistiques des critères de performance pour chaque variante pour faciliter la comparaison et la prise de décision.

7. Analyse des résultats :

- Analyser les résultats pour chaque variante et choisir la solution optimale qui répond le mieux aux critères de performance et de conception.

Cet organigramme représente le processus général de l'utilisation de la méthode de Monte Carlo pour analyser les performances des différentes variantes de poteaux et poutres de la charpente métallique. On peut ajuster les distributions de probabilité, le nombre d'échantillons et les critères de performance selon nos besoins spécifiques et les contraintes du projet. La méthode de Monte Carlo permet d'obtenir une vision probabiliste des performances des différentes variantes, ce qui est utile lorsque les paramètres et les charges sont soumis à une certaine incertitude.

**Remarque :** La méthode de Monte Carlo est une approche de simulation stochastique. Elle peut être utilisée pour prendre en compte les incertitudes dans les paramètres du modèle, mais elle ne garantit pas nécessairement une solution optimale ou exacte. La précision des résultats dépend du nombre d'itérations et de la représentativité des distributions utilisées pour générer les valeurs aléatoires. Par conséquent, une analyse détaillée des résultats et de la qualité des données d'entrée est essentielle pour obtenir des conclusions significatives.

## 3) Quelques étapes de programmation de la méthode avec MATLAB

```

1 % Données spécifiques du projet
2 - Ht=57; % Hauteur totale du bâtiment en mètres
3 - cout_acier_par_quintal = 15000; % Coût de l'acier en Dinars Algérien/Quintal
4 - contrainte_admissible_sol = 2.5; % Contrainte admissible du sol en bars
5
6 % Caractéristiques du béton armé
7 - dosage_beton = 350; % Dosage du béton en KG/m3
8 - resistance_beton_fc28 = 25; % Résistance caractéristique du béton en Mpa
9 - module_elasticite_beton_Ec = 32164; % Module d'élasticité du béton en Mpa
10 - contrainte_admissible_beton_sigma_bc = 0.85 * 14.2; % Contrainte admissible du béton en Mpa
11 - facteur_securite_beton_c = 1.5; % Facteur de sécurité du béton sans unité
12
13 % Caractéristiques de l'acier de construction
14 - resistance_acier_S235 = 235; % Résistance de l'acier en Mpa
15 - module_elasticite_acier_Es = 210000; % Module d'élasticité de l'acier en Mpa
16 - facteur_securite_acier_s = 1.15; % Facteur de sécurité de l'acier sans unité
17
18 % Dimensions des poteaux et des poutres pour chaque variante
19 % poteau HEB 180 et poutre HEA 240
20 - poteau1 = 'HEB180';
21 - poutre1 = 'HEA240';
22
23 % poteau HEB 180 et poutre IPE 200
24 - poteau2 = 'HEB180';
25 - poutre2 = 'IPE200';
26
27 % poteau HEB 140 et poutre HEA 180
28 - poteau3 = 'HEB140';
29 - poutre3 = 'HEA180';
30
31
32
33
34
35 - for i = 1:nombre_echantillons
36 % Générer un échantillon aléatoire de paramètres (par exemple, les dimensions des poteaux et des poutres)
37 % Vous devez définir ici une fonction qui génère les dimensions aléatoires des éléments de charpente
38 - x_poteau1 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
39 - x_poutre1 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
40 - x_poteau2 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
41 - x_poutre2 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
42 - x_poteau3 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
43 - x_poutre3 = generer_dimension_aléatoire(); % À remplacer par votre fonction de génération aléatoire
44 % Calcul du coût total pour chaque variante avec les dimensions aléatoires
45 - couts_monte_carlo_var1(i) = fonction_objectif([x_poteau1, x_poutre1]);
46 - couts_monte_carlo_var2(i) = fonction_objectif([x_poteau2, x_poutre2]);
47 - couts_monte_carlo_var3(i) = fonction_objectif([x_poteau3, x_poutre3]);
48 - end
49
50 % Calcul de la moyenne et de l'écart-type des coûts pour chaque variante
51 - moyenne_cout_var1 = mean(couts_monte_carlo_var1);
52 - ecart_type_cout_var1 = std(couts_monte_carlo_var1);
53 - moyenne_cout_var2 = mean(couts_monte_carlo_var2);
54 - ecart_type_cout_var2 = std(couts_monte_carlo_var2);
55 - moyenne_cout_var3 = mean(couts_monte_carlo_var3);
56 - ecart_type_cout_var3 = std(couts_monte_carlo_var3);
57
58 % Affichage des résultats
59 - fprintf('Résultats de l'optimisation pour la variante 1 (poteau HEB 180 et poutre HEA 240):\n');
60 - fprintf('Coût moyen : %f Dinars Algérien\n', moyenne_cout_var1);
61 - fprintf('Écart-type du coût : %f Dinars Algérien\n\n', ecart_type_cout_var1);
62 - fprintf('Résultats de l'optimisation pour la variante 2 (poteau HEB 180 et poutre IPE 200):\n');
63 - fprintf('Coût moyen : %f Dinars Algérien\n', moyenne_cout_var2);
64 - fprintf('Écart-type du coût : %f Dinars Algérien\n\n', ecart_type_cout_var2);
65 - fprintf('Résultats de l'optimisation pour la variante 3 (poteau HEB 140 et poutre HEA 180):\n');
66 - fprintf('Coût moyen : %f Dinars Algérien\n', moyenne_cout_var3);
67 - fprintf('Écart-type du coût : %f Dinars Algérien\n\n', ecart_type_cout_var3);
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87

```

Figure IV. 12: Fenêtres de programmation (Monte Carlo) avec l'éditeur MATLAB

#### 4) Avantages et limitation de la méthode de Monte Carlo

##### Avantages :

1. C'est une méthode qui convient pour une exploration aléatoire de l'espace des solutions : La méthode de Monte Carlo est utile pour explorer l'espace des solutions de manière aléatoire. Elle génère des configurations aléatoires de dimensions des poutres et des poteaux, ce qui permet de couvrir une large gamme de possibilités.
2. Elle peut être utilisée lorsque les fonctions objectifs sont inconnues : Si les fonctions objectifs sont difficiles à définir analytiquement, la méthode de Monte Carlo peut être utilisée pour évaluer les performances de différentes configurations en utilisant des simulations aléatoires.

##### Limitations :

1. On risque de ne pas couvrir complètement l'espace des solutions : La méthode de Monte Carlo génère des configurations de manière aléatoire, ce qui signifie qu'elle peut ne pas couvrir complètement l'espace des solutions. Certaines régions de l'espace peuvent être sous-représentées, ce qui pourrait entraîner des résultats suboptimaux.
2. Elle ne fournit pas directement le front de Pareto : Contrairement à la méthode de Pareto, la méthode de Monte Carlo ne fournit pas directement le front de solutions optimales non dominées. Elle peut identifier des solutions individuelles, mais pas l'ensemble complet des solutions optimales.

**Remarque :** La méthode de Monte Carlo est appliquée ici en générant des échantillons aléatoires des dimensions des poutres et des poteaux dans les plages spécifiées, puis en calculant le coût pour chaque échantillon. La solution optimale est trouvée en sélectionnant les dimensions qui donnent le coût le plus bas parmi tous les échantillons générés. Le nombre d'échantillons « **nombre\_echantillons** » peut être ajusté pour obtenir un bon compromis entre précision et temps de calcul.

##### IV.8.2.6. Méthode des Pareto

###### 1) Définition de la méthode :

Elle est également connue sous le nom de front de Pareto ou optimisation de Pareto, est une approche utilisée en analyse multicritère et en optimisation pour trouver les meilleures solutions dans un ensemble de solutions non dominées, où chaque solution peut être évaluée selon plusieurs critères ou objectifs. Elle est nommée d'après l'économiste Vilfredo Pareto qui l'a introduite pour la première fois.

La méthode de Pareto vise à identifier les solutions optimales ou les configurations non dominées dans un espace multidimensionnel où chaque dimension correspond à un critère ou un objectif à optimiser. Une solution est considérée comme non

dominée si aucune autre solution n'est meilleure sur tous les critères et qu'il est impossible de l'améliorer sur un critère sans dégrader au moins un autre critère.

Le front de Pareto est généralement représenté graphiquement dans un espace bidimensionnel ou tridimensionnel, en fonction du nombre de critères considérés. Chaque point sur le front de Pareto représente une solution non dominée, et les points à l'intérieur du front de Pareto sont considérés comme des compromis entre les différents critères.

La méthode de Pareto est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie, en économie, en finance, en gestion de projet et dans tout contexte où il y a des compromis à faire entre plusieurs objectifs concurrents. Elle permet d'obtenir des solutions optimales efficaces et de fournir des informations précieuses pour la prise de décision éclairée.

## 2) Comment utiliser cette méthode dans notre exemple précédent de la construction métallique ?

Pour utiliser la méthode de Pareto dans notre exemple précédent de la construction métallique, nous devons d'abord formuler le problème en tant que problème multiobjectif. Nous cherchons à minimiser le coût global du portique tout en satisfaisant les contraintes de résistance et de déformation. Les objectifs à optimiser sont donc le coût de l'acier utilisé et la masse totale de la structure.

Supposons que nous ayons deux fonctions objectifs :

**Objectif 1** : Coût total de l'acier utilisé dans la structure.

**Objectif 2** : Masse totale de la structure du portique.

Nous souhaitons trouver le front de Pareto pour ces deux fonctions. Cela signifie que nous cherchons les solutions optimales pour lesquelles on ne peut pas améliorer un objectif sans dégrader l'autre. Dans notre cas, cela signifie trouver les configurations de dimensions des poutres et des poteaux qui minimisent le coût total de l'acier utilisé tout en minimisant la masse totale de la structure.

Voici comment nous pourrions utiliser la méthode de Pareto dans un exemple en charpente métallique :

1. **Formulation du problème multiobjectif** : Définir les fonctions objectifs pour le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure en fonction des dimensions des poutres et des poteaux.
2. **Plages de valeurs pour les dimensions** : Définir les plages appropriées pour les différentes dimensions (longueurs des poutres, hauteurs des poteaux, etc.) en fonction des contraintes et des spécifications du projet.
3. **Trouver le front de Pareto** : Utiliser l'algorithme de Pareto pour explorer l'espace des solutions en générant des configurations aléatoires de dimensions des poutres et des poteaux dans les plages spécifiées. Pour chaque configuration, calculer le coût total de l'acier et la masse totale de la structure.
4. **Analyser les résultats** : Identifier les solutions qui se trouvent sur le front de Pareto, c'est-à-dire les solutions optimales non dominées pour lesquelles il n'est pas possible d'améliorer un objectif sans dégrader l'autre.

5. **Comparer les solutions** : Examiner les configurations trouvées sur le front de Pareto pour choisir la solution optimale en fonction des préférences et des contraintes du projet. Par exemple, on peut privilégier une solution qui minimise davantage le coût de l'acier ou une solution qui minimise davantage la masse totale de la structure, en fonction des priorités du projet.

### 3) Organigramme de la méthode

L'organigramme de la méthode de Pareto pour le même exemple, consiste à générer des configurations aléatoires de dimensions des poutres et des poteaux dans les plages spécifiées, puis à évaluer chaque configuration en calculant le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure. Ensuite, nous sélectionnons les solutions qui ne sont pas dominées par d'autres solutions, formant ainsi le front de Pareto.

Voici l'algorithme en pseudo-code :

1. Définir les plages de valeurs pour les dimensions des poutres et des poteaux.
2. Définir le nombre d'échantillons (configurations) à générer.
3. Initialiser une liste vide pour stocker les configurations du front de Pareto.
4. Répéter pour chaque échantillon :
  - a. Générer une configuration aléatoire de dimensions des poutres et des poteaux dans les plages spécifiées.
  - b. Calculer le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure pour cette configuration.
  - c. Vérifier si cette configuration est non dominée par d'autres configurations déjà dans le front de Pareto :
    - Si oui, ajouter cette configuration au front de Pareto.
    - Si non, ignorer cette configuration.
2. Afficher le front de Pareto pour visualiser les compromis entre le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure.

**Remarque :** le pseudo-code ci-dessus suppose que nous avons déjà défini les fonctions pour calculer le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure en fonction des dimensions des poutres et des poteaux. Nous pouvons utiliser des approches d'optimisation multicritère, telles que la dominance de Pareto, pour déterminer quelles solutions sont non dominées par d'autres. Ces approches nous permettent de sélectionner les configurations optimales qui se trouvent sur le front de Pareto, représentant ainsi les meilleures solutions selon les critères de coût de l'acier et de masse totale.

## 4) Programmation de la méthode avec MATLAB

```

Editor - C:\MATLAB701\work\pareto.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 % Paramètres géométriques
2 longueur_totale = 30.84; % m
3 largeur_totale = 13.4; % m
4 hauteur_BDC = 2.8; % m
5 hauteur_ecage = 3.8; % m
6 hauteur_totale = 57; % m
7 distance_pannes = 1.3; % m
8 hauteur_murs_exterieurs = 4; % m
9
10 % Charges
11 charges_permanentes = 4; % kN/m²
12 charge_exploitation_q1 = 1.5; % kN/m²
13 charge_exploitation_q2 = 2.5; % kN/m²
14 charge_neige_s = 0.62; % kN/m²
15 charge_neige_sa = 1.18; % kN/m²
16 charge_vent_w = 60.4; % daN/m²
17
18 % Coefficients d'actions selon l'EC3
19 coeff_a_ELU = 1.35;
20 coeff_b_ELU = 0.9;
21 coeff_a_ELS = 1;
22 coeff_b_ELS = 0.9;
23
24 % Contrainte admissible du sol
25 contrainte_admissible_sol = 2.5; % bars
26
27 % Coordonnées du centre géométrique de la structure
28 x_center_geom = 6; % m
29 y_center_geom = 0; % m
30 z_center_geom = 4; % m
31
32 % Moments centraux d'inertie de la structure
33 Ix = 3437.143; % kgm⁴
34 Iy = 15377.059; % kgm⁴
35 Iz = 11940.625; % kgm⁴

```

```

Editor - C:\MATLAB701\work\pareto.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
37 % Portique plan avec une haune
38 masse_portique = 594.792; % kg
39
40 % Coût de l'acier
41 cout_acier = 150000; % Dinars Algérien par tonne
42
43 % Caractéristiques du béton armé
44 dosage_beton = 350; % kg/m³
45 resistance_caracteristique_beton_fc28 = 25; % Mpa
46 module_elasticite_beton_Ec = 32184; % Mpa
47 contrainte_admissible_beton_sigma_bc = 0.85 * 14.2; % Mpa (en daN/cm²)
48
49 % Caractéristiques de l'acier de construction
50 nuance_acier_S235 = 235; % Mpa
51 module_elasticite_acier_Es = 210000; % Mpa
52
53 % Plage de valeurs pour les dimensions des poutres et des poteaux
54 plages_inf = [140, 180, 200];
55 plages_sup = [180, 240, 180];
56
57 % Nombre d'échantillons pour l'algorithme de Pareto
58 nombre_echantillons = 1000;
59
60 % Initialiser le front de Pareto
61 pareto_front = [];
62
63 % Boucle d'exploration
64 for i = 1:nombre_echantillons
65     % Générer une configuration aléatoire de dimensions des poutres et des poteaux dans les plages spécifiées
66     dimensions_aléatoires = unifrnd(plages_inf, plages_sup);
67
68     % Calculer le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure pour la configuration générée
69     cout = costFunctionSteel(dimensions_aléatoires);
70     masse = massFunction(dimensions_aléatoires);
71

```

Figure IV. 13: Fenêtres de programmation (Pareto) avec l'éditeur MATLAB



Dans ce programme, nous avons défini les paramètres géométriques, les charges appliquées, les caractéristiques du béton et de l'acier, ainsi que les plages de valeurs pour les dimensions des poutres et des poteaux. Nous avons également défini deux fonctions objectifs « *costFunctionSteel* » et « *massFunction* » pour calculer le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure, respectivement, en fonction des dimensions des éléments structuraux.

Le programme utilise ensuite une boucle pour générer des configurations aléatoires de dimensions des poutres et des poteaux et calcule le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure pour chaque configuration. Les configurations satisfaisant toutes les contraintes sont ajoutées au front de Pareto.

Enfin, le front de Pareto est affiché pour visualiser les compromis entre le coût total de l'acier utilisé et la masse totale de la structure. Cette visualisation permet de comparer les solutions optimales non dominées et d'aider à la prise de décision pour choisir la meilleure configuration du portique.

### 5) Avantages et limitation de la méthode de Pareto

#### Avantages :

1. Identifie les solutions optimales non dominées : La méthode de Pareto permet de trouver les solutions optimales qui ne peuvent pas être améliorées sur un objectif sans dégrader un autre. Cela aide à explorer le compromis entre les objectifs et à obtenir une vue complète des solutions optimales possibles.
2. Efficace pour les problèmes multi objectifs : c'est une méthode particulièrement adaptée aux problèmes multi objectifs, où plusieurs critères de performance doivent être pris en compte. Elle permet d'évaluer les trade-offs entre les différentes métriques.
3. Le résultat de la méthode de Pareto génère un front de solutions optimales, ce qui facilite le processus de sélection de la meilleure solution en fonction des priorités du projet.

#### Limitations :

1. Requiert une fonction objectif bien définie : Pour appliquer la méthode de Pareto, nous devons définir des fonctions objectifs claires et mesurables pour évaluer les performances de chaque solution.
2. Cette méthode nécessite une exploration de l'espace des solutions : La qualité du front de Pareto dépend du nombre d'échantillons générés et de la manière dont les plages de valeurs sont choisies pour les dimensions des poutres et des poteaux. Une exploration exhaustive de l'espace des solutions peut être coûteuse en temps de calcul.

#### IV.8.2.7. Méthode des AGs

##### 1) Définition de la méthode :

Cette méthode des AGs est une technique d'optimisation inspirée de la théorie de l'évolution. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles et

peut être appliquée à la conception et à l'optimisation de structures telles que les portiques en charpente métallique.

Nous allons créer une population initiale de solutions (portiques) sous forme de chromosomes (séquences de gènes représentant les longueurs des poutres et poteaux ainsi que les types de connexions). Ensuite, nous allons évaluer la performance de chaque portique en utilisant une fonction objectif (charge maximale et poids) et appliquer des opérations de sélection, croisement et mutation pour créer une nouvelle génération de solutions améliorées. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée.

**Schéma** : Supposons que nous ayons un même portique simple avec deux poteaux (P1) et une poutre (P2). Nous avons deux options de connexion : soudée (S) et boulonnée (B). Voici un schéma pour illustrer les différentes solutions possibles dans une population hypothétique :

Population initiale (génération 0) :

1. P1 = 3 m, P2 = 4 m, Connexion = S
2. P1 = 2.5 m, P2 = 3 m, Connexion = B
3. P1 = 3.2 m, P2 = 3.5 m, Connexion = B
4. P1 = 2.8 m, P2 = 4.2 m, Connexion = S
- ...

**Évaluation de la performance** : Pour chaque solution (chromosome), nous calculons la charge maximale que le portique peut supporter tout en respectant les contraintes de déformation et de résistance. Nous évaluons également le poids total du portique.

**Sélection** : Nous sélectionnons les meilleurs portiques en fonction de leur performance, en favorisant ceux qui peuvent supporter une charge maximale élevée avec un poids moindre.

**Croisement** : Nous combinons les caractéristiques de deux portiques parents sélectionnés pour créer de nouveaux portiques (enfants) avec des caractéristiques héritées de leurs parents.

**Mutation** : Nous apportons des modifications aléatoires à certains portiques de la population pour introduire de la diversité.

**Génération suivante** : La nouvelle génération de portiques est formée par le processus de sélection, croisement et mutation.

Ce processus est répété pendant plusieurs générations jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit atteinte, c'est-à-dire un portique qui peut supporter une charge maximale tout en ayant un poids minimal, tout en respectant les contraintes de déformation et de résistance.

**Résultats numériques** : Supposons que, après plusieurs générations d'évolution, nous obtenons le portique suivant comme solution optimale :

Meilleure solution (génération X) :  
P1 = 3.8 m, P2 = 5 m, Connexion = B  
Charge maximale supportée : 150 kN  
Poids total du portique : 2000 kg

Ce portique particulier peut supporter une charge de 150 kN tout en pesant 2000 kg. Notez que ces valeurs sont hypothétiques et dépendent des paramètres initiaux et des contraintes spécifiées.

Cet exemple illustre comment les algorithmes génétiques peuvent être utilisés pour optimiser la conception d'un portique en acier, en trouvant une solution qui maximise sa capacité de charge tout en minimisant son poids, et tout en respectant les contraintes de déformation et de résistance. Dans des cas réels, la complexité des portiques et des contraintes nécessiterait une mise en œuvre plus sophistiquée, mais le concept de base reste le même.

## 2) Organigramme de la méthode

Voici un modèle d'organigramme des Algorithmes Génétiques pour optimiser un portique en charpente métallique à deux travées et deux niveaux :

### 1. Initialisation :

- Définir la taille de la population initiale de solutions candidates.
- Générer une population initiale de solutions candidates aléatoires (génomés), représentant différentes configurations possibles du portique.
- Évaluer chaque solution candidate en utilisant une fonction d'évaluation pour déterminer sa qualité (critère d'optimisation). La fonction d'évaluation peut être basée sur des critères tels que les déformations, les moments, les contraintes, les coûts, etc.

### 2. Sélection :

- Sélectionner des solutions candidates (parents) pour la reproduction en fonction de leur qualité d'adaptation (évaluée par la fonction d'évaluation). Les solutions de meilleure qualité ont une plus grande probabilité d'être sélectionnées.

### 3. Reproduction :

- Appliquer des opérateurs de reproduction (crossover) sur les parents sélectionnés pour créer de nouvelles solutions (enfants). Le crossover combine des parties des génomes des parents pour créer de nouvelles configurations du portique.

### 4. Mutation :

- Appliquer des opérateurs de mutation sur les enfants nouvellement créés. La mutation modifie aléatoirement certaines parties des génomes pour introduire une diversité supplémentaire dans la population.

### 5. Évaluation :

- Évaluer chaque enfant nouvellement créé en utilisant la fonction d'évaluation pour déterminer leur qualité.

#### 6. Remplacement :

- Remplacer la population actuelle par une nouvelle génération de solutions, qui comprend les enfants créés par le crossover et la mutation, ainsi que certains membres de la génération précédente. Cette étape garantit la survie des solutions de haute qualité.

#### 7. Critère d'arrêt :

- Vérifier si un critère d'arrêt est atteint (par exemple, nombre maximal d'itérations, atteinte d'un niveau de convergence, etc.). Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, retourner à l'étape 2. Sinon, terminer l'algorithme.

#### 8. Sélection du meilleur individu :

- Sélectionner la meilleure solution trouvée dans la dernière génération comme solution optimale pour le portique en charpente métallique.

L'organigramme adopté dans notre démarche pourrait être, en phase finale, le suivant :

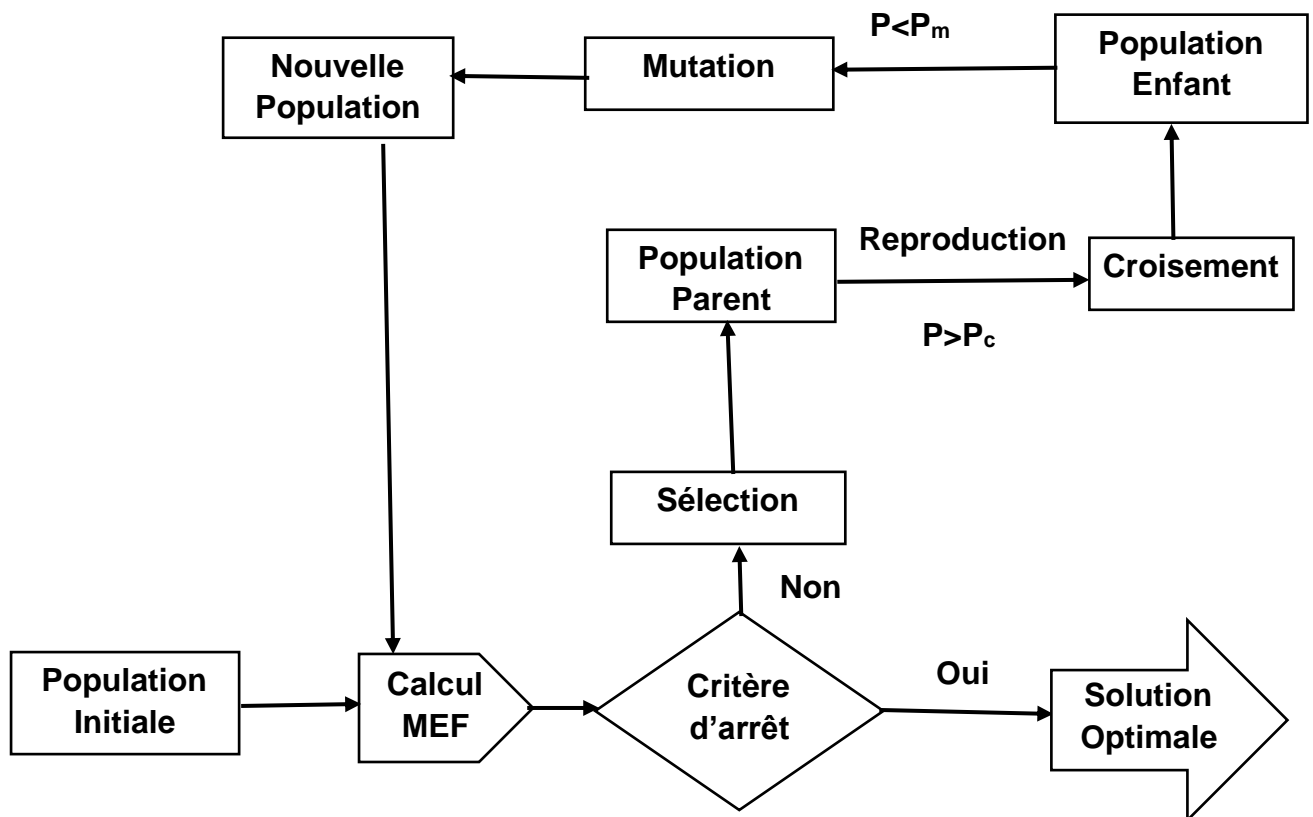
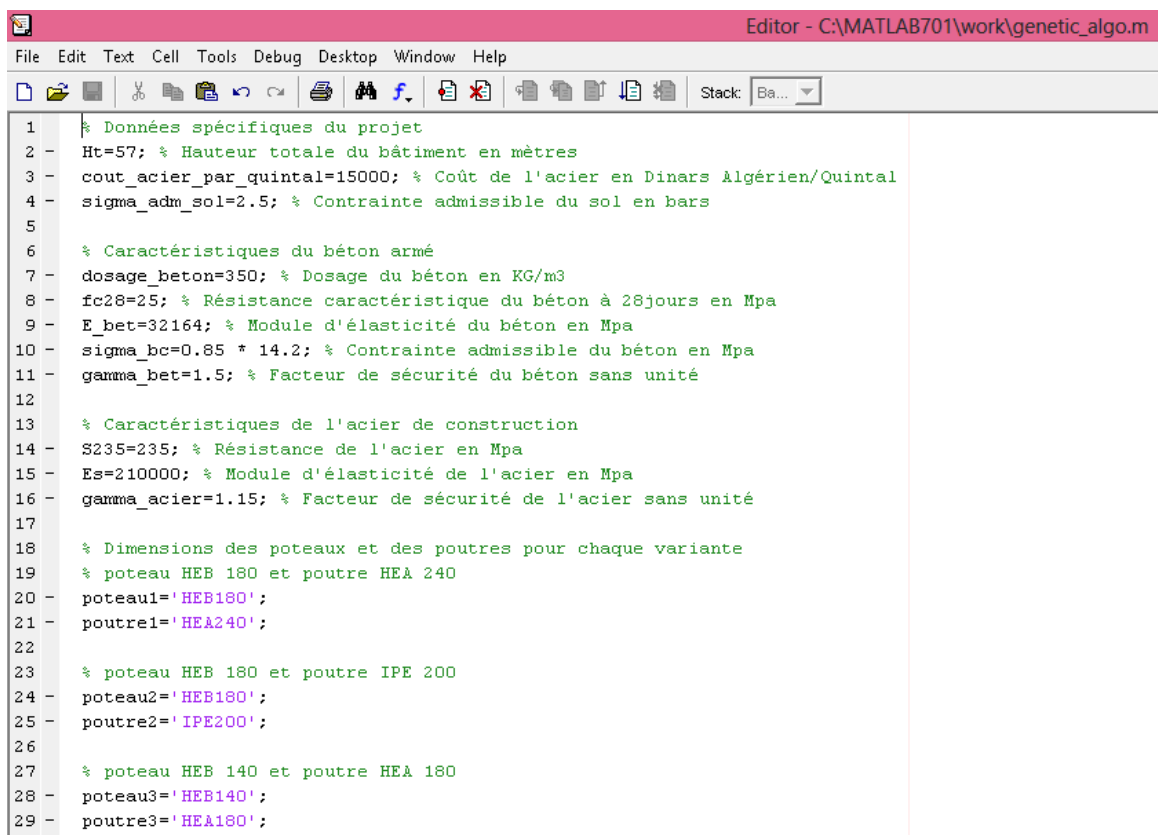


Figure IV. 14: Organigramme de la méthode des AGs

Ce processus des AGs sera répété sur plusieurs générations, améliorant progressivement les solutions en fonction de la qualité d'adaptation. Au fur et à mesure que les itérations avancent, l'algorithme converge vers des solutions de plus en plus optimales pour le problème d'optimisation spécifié.

**Remarque :** L'efficacité et la performance des AGs dépendent de la configuration des paramètres, de la taille de la population, des opérateurs de reproduction et de mutation, ainsi que de la fonction d'évaluation utilisée pour évaluer la qualité des solutions. Il est souvent nécessaire d'expérimenter et d'ajuster ces paramètres pour obtenir de bons résultats d'optimisation pour le portique en charpente métallique.

### 3) Programmation de la méthode avec MATLAB



```
Editor - C:\MATLAB701\work\genetic_algo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Ba...
1 | % Données spécifiques du projet
2 | - Ht=57; % Hauteur totale du bâtiment en mètres
3 | - cout_acier_par_quintal=15000; % Coût de l'acier en Dinars Algérien/Quintal
4 | - sigma_adm_sol=2.5; % Contrainte admissible du sol en bars
5 |
6 | % Caractéristiques du béton armé
7 | - dosage_beton=350; % Dosage du béton en KG/m3
8 | - fc28=25; % Résistance caractéristique du béton à 28jours en Mpa
9 | - E_bet=32164; % Module d'élasticité du béton en Mpa
10 | - sigma_bc=0.85 * 14.2; % Contrainte admissible du béton en Mpa
11 | - gamma_bet=1.5; % Facteur de sécurité du béton sans unité
12 |
13 | % Caractéristiques de l'acier de construction
14 | - S235=235; % Résistance de l'acier en Mpa
15 | - Es=210000; % Module d'élasticité de l'acier en Mpa
16 | - gamma_acier=1.15; % Facteur de sécurité de l'acier sans unité
17 |
18 | % Dimensions des poteaux et des poutres pour chaque variante
19 | % poteau HEB 180 et poutre HEA 240
20 | - poteau1='HEB180';
21 | - poutre1='HEA240';
22 |
23 | % poteau HEB 180 et poutre IPE 200
24 | - poteau2='HEB180';
25 | - poutre2='IPE200';
26 |
27 | % poteau HEB 140 et poutre HEA 180
28 | - poteau3='HEB140';
29 | - poutre3='HEA180';
```

```

44 % Assurez-vous d'inclure les contraintes liées à la résistance, à la déformation, etc.
45 end
46
47 % Configuration des Algorithmes Génétiques
48 taille_population=50;
49 nombre_iteractions=100;
50 taux_mutation=0.1;
51 taux_crossover=0.8;
52
53 % Optimisation avec la méthode des algorithmes Génétiques pour chaque variante
54 [x_poteau1, cout_poteau1] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poteau1, @contraintes, options);
55 [x_poutre1, cout_poutre1] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poutre1, @contraintes, options);
56
57 [x_poteau2, cout_poteau2] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poteau2, @contraintes, options);
58 [x_poutre2, cout_poutre2] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poutre2, @contraintes, options);
59
60 [x_poteau3, cout_poteau3] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poteau3, @contraintes, options);
61 [x_poutre3, cout_poutre3] = ga(@fonction_objectif, 2, [], [], [], [], bornes_poutre3, @contraintes, options);
62
63 % Affichage des résultats
64 fprintf('Résultats de l\'optimisation pour la variante 1 (poteau HEB 180 et poutre HEA 240):\n');
65 fprintf('Dimensions optimales pour le poteau HEB 180 : %f cm\n', x_poteau1(1));
66 fprintf('Dimensions optimales pour la poutre HEA 240 : %f cm\n', x_poutre1(1));
67 fprintf('Coût total : %f Dinars Algérien\n', cout_poteau1 + cout_poutre1);
68
69 fprintf('Résultats de l\'optimisation pour la variante 2 (poteau HEB 180 et poutre IPE 200):\n');
70 fprintf('Dimensions optimales pour le poteau HEB 180 : %f cm\n', x_poteau2(1));
71 fprintf('Dimensions optimales pour la poutre IPE 200 : %f cm\n', x_poutre2(1));
72 fprintf('Coût total : %f Dinars Algérien\n', cout_poteau2 + cout_poutre2);
73
74 fprintf('Résultats de l\'optimisation pour la variante 3 (poteau HEB 140 et poutre HEA 180):\n');
75 fprintf('Dimensions optimales pour le poteau HEB 140 : %f cm\n', x_poteau3(1));
76 fprintf('Dimensions optimales pour la poutre HEA 180 : %f cm\n', x_poutre3(1));
77 fprintf('Coût total : %f Dinars Algérien\n', cout_poteau3 + cout_poutre3);
78

```

Figure IV. 15: Fenêtres de programmation (AGs) avec l'éditeur MATLAB

#### 4) Avantages et limitation de la méthode des AGs

Les AGs sont une approche puissante et flexible pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes dans le contexte de la construction métallique. Cependant, leur efficacité dépend de la sélection appropriée des paramètres et de la manière dont le problème est formulé. Il peut être utile d'expérimenter avec différentes configurations et méthodes pour obtenir les meilleurs résultats.

##### Avantages des AGs :

1. Exploration de l'espace des solutions : Les algorithmes génétiques sont très efficaces pour explorer de vastes espaces de solutions. Ils peuvent trouver des solutions dans des domaines de recherche complexes et étendus, ce qui est souvent le cas dans l'optimisation de la construction métallique avec de nombreuses variables de conception possibles.
2. Recherche globale : Ce sont des méthodes d'optimisation globale qui cherchent à obtenir la meilleure solution possible, plutôt que de rester bloqués dans un optimum local. Cela permet de trouver des solutions plus robustes et plus performantes.
3. Adaptabilité : Elles sont flexibles et peuvent être adaptées pour traiter des problèmes d'optimisation avec différents types de contraintes et objectifs. Ils peuvent également être utilisés pour traiter des problèmes multi-objectifs, tels que la minimisation du coût de l'acier tout en maximisant la stabilité de la structure.

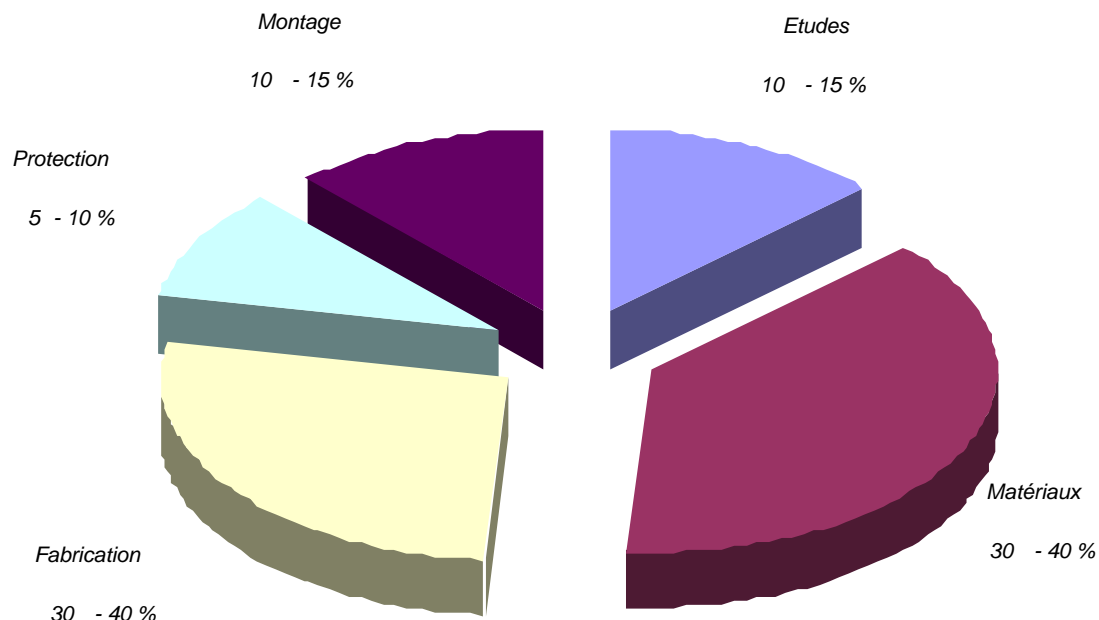
4. Parallélisme : Les AGs sont bien adaptés pour être exécutés en parallèle sur des systèmes informatiques distribués, ce qui peut accélérer considérablement la recherche des solutions optimales.

#### Limites des AGs :

1. Requiert des connaissances préalables : Pour utiliser efficacement les AGs, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du problème et de choisir soigneusement les paramètres tels que la taille de la population, la probabilité de croisement, la probabilité de mutation, etc.
2. Temps de calcul : Les AGs peuvent être gourmands en temps de calcul, en particulier pour des problèmes complexes avec de nombreuses variables et contraintes. L'exécution de nombreux cycles d'évolution pour atteindre la convergence peut être coûteuse en temps.
3. Risque de convergence prématurée : Ces derniers peuvent converger prématurément vers une solution sub-optimale si les paramètres ne sont pas bien réglés ou si l'espace de recherche est mal exploré.
4. Pas toujours optimal : Bien que les AGs puissent trouver de bonnes solutions, ils ne garantissent pas toujours de trouver la solution optimale absolue, en particulier pour les problèmes hautement complexes et non-linéaires.

#### IV.8.2.6. Etude comparative et interprétations des résultats entre les trois méthodes

Le problème de la conception globale des structures en acier peut, à notre avis, être globalement posé comme un problème d'optimisation pour minimiser la fonction objectif ou le critère du coût global (CG) de la structure conformément à la condition ou contraintes de l'Eurocode.



**Figure IV. 16:** Répartition des coûts d'une construction en C.M (Nizar Bel Hadj Ali , Jean-Claude Mangin 2017)

Le (CG) est une fonction d'un certain nombre de variables telles que :  $I$ ,  $X_a$  et  $X_n$   
Ainsi, nous pouvons formuler implicitement le problème d'optimisation comme suit:

$$\text{Min CG} (I, X_a, X_n) \quad (\text{IV-1})$$

où

CG : le coût global de production de la structure.

$I$  : vecteur des caractéristiques dimensionnelles des barres.

$X_a$  : vecteur nature des appuis.

$X_n$  : vecteur nature des nœuds.

Le coût global (CG) d'une construction métallique (superstructure et fondations) peut s'écrire :

$$(\text{CG}) = (\text{CS}) + (\text{CF}) \quad (\text{IV-2})$$

(CS) : Coût Superstructure en acier.

(CF) : Coût Fondations en béton armé.

Le coût (CS) est lui-même composé des coûts suivants :

$$(\text{CS}) = (\text{Mat}) + (\text{Fab}) + (\text{Mon}) \quad (\text{IV-3})$$

(Mat) : Coût des matériaux des profils et assemblages,

(Fab) : Coût de la fabrication en atelier,

(Mon) : Coût de montage des différents éléments sur site.

Le coût (CF) est composé des deux entités élémentaires suivantes :

$$(\text{CF}) = (\text{Ter}) + (\text{PrF}) \quad (\text{IV-4})$$

(Ter) : Coût des terrassements.

(PrF) : Coût de production des fondations. Il intègre les coûts des matériaux et les coûts d'exécution.

### 1. Analyse comparative :

- Comparer les résultats des trois méthodes en termes de coût total, de qualité des solutions, et de temps de calcul.
- Analyser la distribution des coûts obtenus par la méthode de Monte Carlo pour évaluer la fiabilité des résultats.
- Identifier les avantages et les inconvénients de chaque méthode en fonction des performances et des contraintes spécifiques du problème.



Il est important de noter que la méthode des AGs est une approche d'optimisation déterministe qui tente de trouver la meilleure solution dans l'espace de recherche. En revanche, la méthode de Monte Carlo est une approche stochastique qui fournit une estimation statistique des résultats en prenant en compte l'incertitude des paramètres.

Par contre, la méthode de Pareto semble plus judicieuse car elle permet d'identifier les solutions optimales non dominées et de prendre en compte efficacement les trade-offs (compromis) entre les objectifs.

L'analyse comparative permettra de déterminer quelle méthode est la plus appropriée pour le problème spécifique du portique en charpente métallique à deux travées et deux niveaux, en fonction de la qualité des solutions, de la fiabilité des résultats et du temps de calcul.

Cependant, il est important de noter que l'efficacité de la méthode de Pareto dépend du nombre d'échantillons générés et de la définition appropriée des fonctions objectifs. Si l'exploration exhaustive de l'espace des solutions est trop coûteuse en termes de temps de calcul, la méthode de Monte Carlo peut être utilisée pour effectuer une exploration aléatoire, mais elle ne fournira pas directement le front de Pareto complet. Dans ce cas, des techniques d'optimisation multi objectif plus avancées, telles que les algorithmes génétiques, peuvent être envisagées pour résoudre efficacement ce type de problème complexe.

#### IV.8.2.7. Exploitation des résultats

A/ La méthode de Pareto est spécialement conçue pour les problèmes multi objectifs et peut fournir une vue complète des solutions optimales possibles. Dans le contexte où l'objectif est de minimiser le coût global (y compris le coût de l'acier) tout en satisfaisant les contraintes du problème, la méthode la plus appropriée serait la méthode de Monte Carlo. Cela est dû à plusieurs raisons :

1. **Exploration aléatoire** : La méthode de Monte Carlo explore l'espace des solutions de manière aléatoire, ce qui permet de considérer une grande variété de configurations possibles pour le portique. Ainsi, elle offre de meilleures chances de trouver des solutions économiquement plus avantageuses.
2. **Coût en considération** : La méthode de Monte Carlo peut être adaptée pour inclure le coût de l'acier dans la fonction d'objectif. En générant des solutions potentielles aléatoirement, elle permet de prendre en compte différents choix de longueurs de poutres et de types de connexions qui affecteront directement le coût global.
3. **Temps de calcul** : Bien que les AGs puissent également être utilisés pour minimiser le coût global, ils peuvent nécessiter plus de temps de calcul en raison de leur nature itérative et de leur utilisation de populations. La méthode de Monte Carlo, en revanche, peut-être plus rapide à exécuter.
4. **Variabilité du coût de l'acier** : Si le coût de l'acier fluctue ou si plusieurs fournisseurs proposent des prix différents, la méthode de Monte Carlo est plus adaptée pour prendre en compte ces variations en effectuant une analyse probabiliste des coûts.

Cependant, il est essentiel de noter que l'optimisation du coût du portique dépend également de la définition des plages de valeurs possibles pour les paramètres (longueurs des poutres et types de connexions) et des contraintes associées (résistance, déformation maximale, etc.). Ainsi, il est important de bien définir ces paramètres et contraintes pour obtenir des résultats pertinents.

B/ L'utilisation de la méthode des AGs est judicieuse dans les cas suivants :

1. **Problèmes d'optimisation complexe** : Les AGs sont adaptés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexe où l'espace des solutions est vaste et les contraintes sont nombreuses. Ils peuvent traiter des problèmes multi-objectifs (plusieurs critères d'optimisation) et des fonctions d'objectif non linéaires.
2. **Recherche d'une solution globale** : Ce sont des métaheuristiques qui cherchent à explorer de manière globale l'espace des solutions, ce qui signifie qu'ils ont de bonnes chances de trouver une solution proche de l'optimum global plutôt que de rester coincés dans un optimum local.
3. **Pas de fonction de dérivée** : Ils peuvent être utilisés lorsque la fonction d'objectif n'est pas dérivable ou lorsque l'obtention des dérivées est difficile ou coûteuse.
4. **Problèmes avec des contraintes discrètes** : Ces derniers sont efficaces pour traiter des problèmes avec des contraintes discrètes, c'est-à-dire lorsque les solutions possibles sont restreintes à un ensemble fini de choix.
5. **Problèmes avec des solutions non linéaires et discontinues** : Les AGs peuvent gérer des fonctions d'objectif et des contraintes non linéaires et discontinues.
6. **Sélection de variables et conception de systèmes** : Ils peuvent être utilisés pour sélectionner les meilleures variables ou caractéristiques dans des problèmes de sélection de caractéristiques, ainsi que pour optimiser la conception de systèmes complexes.
7. **Parallélisme** : ces méthodes peuvent être parallélisées, ce qui signifie qu'ils peuvent être exécutés sur plusieurs processeurs ou machines, accélérant ainsi la recherche de solutions dans des problèmes de grande taille.
8. **Prise en compte de la diversité** : Les AGs maintiennent la diversité dans la population de solutions, ce qui permet d'éviter de converger trop rapidement vers une seule région de l'espace des solutions et d'explorer davantage l'espace des possibilités.

## IV.9 Conclusion :

Les résultats de l'analyse ont démontré que les modèles sélectionnés et l'interprétation des résultats obtenus, nous permettent de conclure que le choix des profilés est approprié, que ce soit pour les colonnes ou les traverses, assurant ainsi une résistance adéquate tout en réduisant le poids de la structure. La minimisation du poids de la structure est l'un des critères principaux de l'optimisation.

Il est important de souligner que de nombreuses questions restent ouvertes dans le domaine du comportement non linéaire des cadres en acier, en particulier en ce qui concerne la réponse dans la plage non linéaire.

Dans cette étude, des analyses non linéaires ont été réalisées sur un portique 2D et comparées pour trois configurations optimisées différentes. Malgré les limites de l'étude actuelle, les résultats obtenus indiquent que pour concevoir un portique métallique répondant aux exigences réglementaires avec un poids réduit et un coût minimal, il est nécessaire d'introduire plusieurs paramètres dans un algorithme permettant de sélectionner les profils les plus appropriés de manière efficace.

Aussi, les AGs sont adaptés pour les problèmes d'optimisation complexes et difficiles, où il est essentiel d'explorer un grand espace de réponses pour trouver des solutions de qualité et où les approches classiques telles que la recherche linéaire ou la recherche aléatoire ne sont pas appropriées.

En conclusion, si le principal objectif est de minimiser le coût global du portique, la méthode de Monte Carlo serait préférable dans cette situation spécifique. Cependant, il est toujours judicieux de comparer les résultats de différentes méthodes d'optimisation pour valider la solution obtenue et garantir qu'elle répond aux exigences spécifiques du projet.

# ***Conclusion Générale***

Trouver des solutions optimales pour les problèmes de génie structurel reste toujours une tâche ardue. En raison des nombreuses conditions et limitations, les ingénieurs en structure doivent souvent procéder par tâtonnements et erreurs afin de rechercher les meilleures solutions de conception qui améliorent les performances structurelles tout en réduisant les coûts.

À l'avenir, il convient de se concentrer sur l'analyse de modèles tridimensionnels afin d'étudier de manière précise les structures en acier de ce type.

De plus, les ingénieurs en structure doivent collaborer étroitement avec les architectes, qui jouent un rôle essentiel dans l'impact global de la structure, car la conception architecturale est souvent réalisée avant celle de la structure. Dans de nombreux cas, il peut y avoir des objectifs contradictoires entre les aspects architecturaux et structurels. Par conséquent, il est crucial d'adopter une approche intégrée dès le processus de conception. L'optimisation des formes géométriques, une approche mathématique qui permet d'optimiser les formes structurelles en fonction d'un espace de conception donné, peut être appliquée aux problèmes de génie structurel afin d'atteindre un équilibre entre les performances structurelles et les autres objectifs de conception lors de la phase de préconception.

Ces recherches mettent en évidence le potentiel de l'optimisation dans le domaine de l'ingénierie, notamment lorsque la collaboration et le transfert efficace d'informations entre les chercheurs et les ingénieurs sont établis.

Nous avons consacré cette section à l'étude de la conception technique des structures métalliques, en abordant les aspects pratiques et réglementaires de la conception globale en construction métallique. Nous avons également examiné la modélisation des assemblages, qui revêt une importance particulière en raison de son impact sur la conception de l'ensemble des éléments d'une structure.

Cette étude nous a permis d'identifier les variables clés de la tâche de conception globale, ainsi que les contraintes pratiques et réglementaires qui la gouvernent. En d'autres termes, nous avons appliqué trois méthodes différentes l'une de l'autre et on a essayé de dresser un détail comparatif qui a convergé vers la méthode des algorithmes génétiques liée aux problèmes de conception des structures dans le domaine du génie civil, en détaillant le fonctionnement des différents opérateurs et l'influence des paramètres.

Dans sa forme finale, un vaste programme de simulations numériques portant sur différentes conceptions peut contribuer à l'élaboration de "règles de conception" qui guident les concepteurs vers des solutions globales optimisées.

L'objectif principal de cette thèse était de contribuer au domaine vaste de la méta optimisation et du réglage/contrôle des paramètres de l'algorithme en fonction du problème traité.

Pour les problèmes considérés comme difficiles ou nécessitant un temps de calcul important avec une approche algorithmique traditionnelle, les AGs offrent une meilleure solution. Il est également facile de démontrer comment ces derniers améliorent la vitesse de résolution des problèmes ou permettent même de les résoudre lorsque cela aurait été autrement impossible en raison de la complexité des données du problème.

En conclusion, l'objectif ultime de cette recherche est de développer un outil informatique basé sur l'approche des AGs qui pourrait aider les ingénieurs des bureaux d'études à prendre des décisions appropriées dès les premières phases de conception, afin de minimiser au maximum les coûts des projets.

# Perspectives

Certes, les méthodes présentées dans cette thèse ont donné des résultats remarquables et pertinents mais la recherche continue !

En ce qui concerne les perspectives, il existe d'autres méthodes d'optimisation multicritère qui pourraient convenir à utiliser dans notre exemple précédent de la construction métallique. Voici quelques-unes de ces méthodes :

1. Méthode d'utilité : Cette méthode consiste à définir une fonction d'utilité qui combine les différents critères en un seul critère agrégé. L'objectif est de maximiser ou minimiser cette fonction d'utilité pour trouver la meilleure solution globale. Cela peut simplifier le processus d'optimisation en transformant un problème multicritère en un problème à critère unique.
2. Méthode epsilon-constraint : Dans cette méthode, on fixe un critère comme objectif principal (constraint) et on optimise les autres critères sous certaines contraintes, représentées par un écart epsilon. On itère ensuite sur différents critères pour obtenir différentes solutions optimales.
3. Méthode Weighted Sum : Cette méthode consiste à pondérer les différents critères et à les sommer pour obtenir une fonction objectif unique. En ajustant les poids, on peut explorer différentes solutions optimales.
4. Méthode Lexicographique : Cette méthode consiste à établir un ordre de priorité entre les différents critères. On optimise d'abord le critère le plus important, puis on considère le critère suivant en cas d'égalité. Cela permet de simplifier le problème d'optimisation en le décomposant en plusieurs sous-problèmes plus simples.
5. Méthode de Programmation Quadratique Multi-objectif (MQP) : Cette méthode consiste à formuler le problème d'optimisation sous forme de programme quadratique et à considérer plusieurs fonctions objectifs quadratiques à optimiser simultanément.
6. Méthode des Contraintes Hiérarchiques : Cette méthode consiste à définir des contraintes hiérarchiques entre les différents critères, où certains critères sont considérés comme plus importants que d'autres. On optimise ensuite les critères dans l'ordre hiérarchique.

Chaque méthode a ses avantages et ses limites, et le choix de la méthode dépend du contexte spécifique du problème et des préférences des décideurs. Dans certains cas, le choix d'une méthode peut être suffisant pour explorer les solutions optimales non dominées et faciliter la prise de décision, mais dans d'autres cas, l'utilisation de

méthodes d'optimisation multicritère plus spécifiques peut être nécessaire pour répondre aux exigences du problème.

Il nous semble qu'il reste encore de nombreuses possibilités d'exploration, notamment, pour permettre la mise en place de critères de convergence réellement utilisables. Cette notion de critère de convergence nous semble primordiale, c'est sans doute l'aspect le plus limitant actuellement pour la diffusion des AG.

En effet, il n'est généralement pas envisageable d'avoir une information précise a priori concernant les données. Cependant, au fur et à mesure des générations, on peut certainement se servir de ce qui se passe dans les populations pour apprendre des informations sur la fitness. Cela nous permettrait de réaliser une modélisation plus précise qui s'adapterait à chaque problème.

Nous pouvons penser, par exemple, à construire des sous-populations qui évolueraient indépendamment avant de se rejoindre. Cela permettrait sans doute d'augmenter la probabilité d'atteindre l'optimum global.

Nous proposons de voir ces méthodes par exemple dans le futur proche et envisager d'autres principales directions, portant sur l'étude des propriétés des paramètres avec leurs rapports aux algorithmes d'optimisation, et sur la conception de nouvelles techniques d'ajustement automatique de ces paramètres.

# Bibliographie

- Amina, BEDBOUDI. 2019. "Utilisation Des Algorithmes Evolutionnaires Dans La Conception Des Logiciels." BADJI MOKHTAR - ANNABA.
- Anon. 1985. "Advanced Composites." *Manufacturing Engineering* 95 (1): 39–43. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(90\)90035-d](https://doi.org/10.1016/0263-8223(90)90035-d).
- BENANANE Sofiane. 2019. "APPLICATION DES ALGORITHMES GENETIQUES A L'OPTIMISATION GLOBALE DES STRUCTURES DU GENIE CIVIL." Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- Bercachi, Maroun. 2010. "Pour l'Optimisation Algorithme Évolutionnaire à États Pour l'Optimisation Difficile."
- Buontempo, Frances. 2019. *Genetic Algorithms and Machine Learning for Programmers. The Pragmatic Bookshelf*. Vol. 52.
- Burke, E. K., G. Kendall, and E. Soubeiga. 2003. "A Tabu-Search Hyperheuristic for Timetabling and Rostering." *Journal of Heuristics* 9 (6): 451–70. <https://doi.org/10.1023/B:HEUR.0000012446.94732.b6>.
- Christelle REYNES. 2007. "Etude Des Algorithmes Génétiques et Applications Aux Données de Protéomique." UNIVERSITE MONTPELLIER I.
- Cosmin Porumbel, Daniel. 1979. "Algorithmes Heuristiques et Techniques d'Apprentissage-Applications Au Probleme de Coloration de Graphe." <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00481253>.
- Durand, Nicolas. 2004. "Algorithmes Génétiques et Autres Outils d'Optimisation Appliqués à La Gestion de Trafic Aérien Résumé : Abstract : Keywords :." *Evolution*.
- Dureisseix, David. 2003. "Methodes Numeriques Appliques a La Conception Par Elements Finis."
- Ede, A. N., O. O. Oshokoya, J. O. Oluwafemi, S. O. Oyebisi, and O. M. Olofinnade. 2018. "Structural Analysis of a Genetic Algorithm Optimized Steel Truss Structure According to BS 5950." *International Journal of Civil Engineering and Technology* 9 (8): 358–64.
- Eiben, Ágoston Endre, Robert Hinterding, and Zbigniew Michalewicz. 1999. "Parameter Control in Evolutionary Algorithms." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3 (2): 124–41. <https://doi.org/10.1109/4235.771166>.
- Elghazouli, Ahmed Y., and José Miguel Castro. 2016. *Design of Steel Structures. Seismic Design of Buildings to Eurocode 8, Second Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781315368221-13>.
- Fatiha, Belkheir, S Hiadi A Boutaous, Belkaid Laghouati, Grade Professeur, Professeur Professeur, M B Usto, M B Usto, and M B Usto. 2015. "Etude Par Algorithme Génétique de l'Optimisation d'Un Matériau Composite Stratifié."



- Fuyuan, Shen, and Chen Qimei. 2007. "Contextual Priming and Applicability: Implications for Ad Attitude and Brand Evaluations." *Journal of Advertising* 36 (1): 69–80. <https://doi.org/10.2753/JOA0091-3367360105>.
- Ghojogh, Benyamin, Saeed Sharifian, and Hoda Mohammadzade. 2018. "Tree-Based Optimization: A Meta-Algorithm for Metaheuristic Optimization," no. November. <http://arxiv.org/abs/1809.09284>.
- Gournay, Frédéric De. 2005. "Optimisation de Formes Par La Méthode Des Lignes de Niveaux.," 174. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001437>.
- HACHIMI, Hanaâ. 2013. "HYBRIDATIONS D'ALGORITHMES MÉTAHEURISTIQUES EN OPTIMISATION GLOBALE ET LEURS APPLICATIONS." Université Mohammed V - Agdal, Rabat.
- Hamchaoui. 1997. "Steel Structures with Semi-Rigid Joints View Project Tensegrity Structures : Design, Dynamics and Control View Project." <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3712.6800>.
- Jahanshahi, M., and M. Pouraghajan. 2013. "Enhanced ACS Algorithms for Plastic Analysis of Planar Frames." *University of Guilan* 4 (1): 65–82. [http://cmce.guilan.ac.ir/?\\_action=articleInfo&article=918](http://cmce.guilan.ac.ir/?_action=articleInfo&article=918).
- Maskaoui, Z. El. 2017. "Genetic Algorithm Parameters Effect on the Optimal Structural Design Search." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 14 (3): 124–30. <https://doi.org/10.9790/1684-140305124130>.
- MASKAOUI, Z. EL, L. BOUSSHINE, and G. GUERLEMENT. 2017. "Dimensionnement Optimal Des Structures Métalliques à Poutres Par Les Algorithmes Génétiques." *13ème Congrès de Mécanique, Meknès, MAROC, 11-14 Avril*, no. May.
- Messac, Achille. 2015. *Optimization in Practice with MATLAB®*. Optimization in Practice with MATLAB®. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781316271391>.
- Mrabet, Elyes. 2017. "Optimisation de La Fiabilité Des Structures Contrôlées To Cite This Version : HAL Id: Tel-01474068 Optimisation de La Fiabilité Des Structures Contrôlées."
- Naima ZERARI. 2006. "Les Algorithmes Genetiques En Maintenance." UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA Faculté des Sciences de l'Ingénieur.
- Nareyek, Alexander, Eugene C. Freuder, Robert Fourer, Enrico Giunchiglia, Robert P. Goldman, Henry Kautz, Jussi Rintanen, and Austin Tate. 2005. "Constraints and AI Planning." *IEEE Intelligent Systems* 20 (2): 62–72. <https://doi.org/10.1109/MIS.2005.25>.
- Nguyen, Anh Tuan, Sigrid Reiter, and Philippe Rigo. 2014. "A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis." *Applied Energy* 113: 1043–58. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.
- Nizar, Bel Hadj Ali. 2003. "Une Approche Globale D'optimisation Des Structures Métalliques Avec Les Algorithmes Génétiques" PRIX « REN: 8.

- Nizar Bel Hadj Ali , Jean-Claude Mangin, Anne-Françoise Cutting-Decelle. 2017. “Optimization of the Steel Structures Design with Genetic Algorithms,” no. August.
- Palizi, Soheil, and Amir Saedi Daryan. 2020. “Plastic Analysis of Braced Frames by Application of Metaheuristic Optimization Algorithms.” *International Journal of Steel Structures* 20 (4): 1135–50. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00347-z>.
- Portillo Juan, Nerea, and Vicente Negro Valdecantos. 2022. “Review of the Application of Artificial Neural Networks in Ocean Engineering.” *Ocean Engineering* 259 (June): 111947. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111947>.
- Salehan, Alireza, and Arash Deldari. 2022. *Corona Virus Optimization (CVO): A Novel Optimization Algorithm Inspired from the Corona Virus Pandemic*. *Journal of Supercomputing*. Vol. 78. Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-04100-z>.
- Skaržauskas, Valentinas, Valentinas Jankovski, and Juozas Atkočiūnas. 2009. “Optimisation Des Structures Métalliques Élastoplastiques Sous Conditions de Rigidité et de Plasticité Données.” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Vol. 13. <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693186>.
- Smith, A.E. 2005. “Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms [Book Review].” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/tevc.2002.804322>.
- Souquet Amédée, Radet François Gérard. 2004. “Algorithmes Genétiques.”
- Stephen James Hicks, Robert Mark Lawson, Brozzetti, B Rémy. 2014. “DIMENSIONNEMENT DES PLANCHERS MIXTES ACIER BETON VIS-A-VIS DES VIBRATIONS” *Constructi* (May): 30.
- Terki Hassaine Mohammed Issam Ediine, Bourdim Sidi Mohamed El Amine, Varum Humberto, Benanane Abdelkader, Nour Abdelkader. 2022. “Push-over Analysis of Optimized Steel Frames.” *Engineering, Technology and Applied Science Research* 12 (6): 9720–25. <https://doi.org/10.48084/etasr.5326>.
- Vallée, Thomas, and M Yildizoglu. 2001. “Présentation Des Algorithmes Génétiques et de Leurs Applications En Économie.” *Revue d'économie Politique*, no. 1995: 1–23. [http://www.researchgate.net/publication/5085159\\_Presentation\\_des\\_algorithmes\\_gntiques\\_et\\_de\\_leurs\\_applications\\_en\\_conomie/file/d912f505ca0731d7a5.pdf](http://www.researchgate.net/publication/5085159_Presentation_des_algorithmes_gntiques_et_de_leurs_applications_en_conomie/file/d912f505ca0731d7a5.pdf).
- Wikipedia. 2022. “Genetic Algorithm.” 2022.
- X.L.Fàbrega, J.M.Genifer. 2006. “UNE APPROCHE BASÉE ALGORITHME GÉNÉTIQUE POUR L ’ APPRENTISSAGE CHEZ UN AGENT À La Mémoire de Ceux Que Mon Cœur Aime ....”