

# CONTRIBUTION À L'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION GLOBALE EN CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

## CONTRIBUTION TO THE OVERALL CONCEPTUAL DESIGN OPTIMISATION OF STEEL STRUCTURES

**M. MEHDI BITAM, M. TAHAR BELARBI**

Laboratoire de recherche LESIA, Université M. Khider de Biskra,  
BP 145 RP 07000 BISKRA,  
mehdibitam@yahoo.fr

### RÉSUMÉ

Outre le dimensionnement des éléments porteurs principaux, la conception des assemblages et des appuis peut influencer d'une façon considérable sur les caractéristiques techniques et économiques des projets de Construction Métallique. Cependant, les contraintes de temps et de ressources obligent les concepteurs à limiter le nombre de configurations à considérer en phase précoce de conception ce qui rend difficile l'optimisation globale des coûts de réalisation des structures. Nous proposons, dans cette première publication, une formulation du problème complexe d'optimisation de la conception globale des structures métalliques. La fonction objectif tient compte des coûts matière et réalisation des différents éléments de la structure. Les contraintes de conception sont formulées à la base de la réglementation Eurocode 3 et des documents techniques réglementaires DTR Algériens. Trois variables de conception sont considérées : les caractéristiques dimensionnelles des différents éléments, le type des assemblages et le type des appuis. Différents types d'assemblages sont considérés. Un modèle simplifié est utilisé pour estimer les caractéristiques des assemblages semi-rigides.

**MOTS CLES :** Construction Métallique, Conception Globale, Optimisation de Structures.

### ABSTRACT

In addition to the cross-sectional size of the structural members, the type of connections and supports plays an important role in the analysis and design of steel structures and affects considerably its whole production cost. However, due to time and resource constraints, structural designers tend to limit the range of alternative configurations considered especially in early design stage. In this first paper, a formulation of the optimization problem is presented for the overall design of steel structures. The objective of the proposed method is to identify the optimum configuration and cross-sections of a building steel structure according to adequate foundations. In the objective function, the material and manufacturing costs are taken into account. The design constraints are formulated according to Eurocode 3 and to Algerian regulation technical documents DTR. Three design variables are considered: members cross-sectional size, the type of beam-to-column connections and the type of supports. A set of standard beam-to-column connections is considered and a simplified model is used to include the moment-rotation relation of semi-rigid joints.

**KEYWORDS:** Steel Structures, Overall Design, Structural Optimization.

## 1 INTRODUCTION

Le bâtiment connaît de nombreuses améliorations, tant au niveau architectural qu'aux niveaux technologique et économique, grâce aux résultats fournis par les travaux de recherche scientifique. Cependant, on ressent toujours le besoin que cette œuvre (ou ce produit) doit être perfectionné encore. Il s'agit donc **d'optimiser les qualités**

**du bâtiment** à plusieurs niveaux. Dans cette perspective, l'équipe «Modélisation» du laboratoire de recherche LESIA de l'Université de Biskra, en collaboration avec l'équipe de recherche en construction métallique (CM) ERCM, effectue des recherches dans le domaine de la conception technique en construction métallique.

### 1.1 La phase précoce du processus de production du bâtiment à structure métallique

En particulier, intéressons-nous à la phase précoce de conception de la structure du bâtiment, c'est-à-dire, celle des choix de partis techniques concernant le système porteur chargé d'assurer la stabilité de la construction, sa sécurité et celle de ses occupants. C'est aussi la phase de génération de la structure où de nombreuses et très importantes décisions doivent être prises quant au choix de la configuration, de l'emplacement et de l'orientation spatiale de la structure. En outre, dans la phase précoce de conception, il est souvent nécessaire de proposer des dimensions préliminaires pour les éléments structuraux. Parmi les principales caractéristiques de cette étape du processus de production du bâtiment, on trouve le nombre élevé et le degré d'importance des décisions à prendre par les concepteurs car elles influencent largement les phases suivantes du processus, notamment l'évaluation du coût global du projet et des délais de sa réalisation.

En effet, on constate qu'une part significative, de plus de 80 % des ressources financières exigées par la production du bâtiment, est commandée par les décisions prises durant le premier dixième du processus de conception (10 %) [10,16]. Ceci a été confirmé par les études du Professeur M.Y. RAFIQ, qui a donné un taux de 70 à 80 % du coût total du projet [21]. Il est donc nécessaire de s'assurer que les décisions prises au cours de cette phase sont cohérentes. Par contre, lorsque l'intégration des contraintes techniques en amont est insuffisante, elle conduit parfois à des incohérences et nécessite la remise en question des solutions proposées en amont; ce qui peut être à l'origine de coûts supplémentaires et de retards dans la réalisation.

Cependant, les contraintes de temps et de ressources obligent les concepteurs à limiter le nombre de configurations à considérer en phase précoce de conception, ce qui rend difficile l'optimisation de la conception des structures. Aussi, la prise de décision en phase précoce de conception est d'autant plus difficile que la connaissance mise en oeuvre à cette étape est floue et fait appel simultanément à beaucoup de domaines.

Pour choisir entre plusieurs solutions, le concepteur doit sélectionner des critères de jugement, et être en mesure d'évaluer et de comparer un ensemble de solutions vis-à-vis de ces critères. D'un autre côté, dans une prise de décision, il faut pouvoir proposer un ensemble de solutions qui doivent être admissibles, c'est-à-dire, respectant les contraintes liées aux variables ou aux paramètres de décision. En construction métallique, ces variables sont les caractéristiques des objets techniques comme la nature, la forme, les dimensions et les composants.

Pour formuler le problème d'aide à la décision lié à la conception globale des structures en CM, il faut tout d'abord étudier les critères d'optimisation : leur nature, leur évaluation, leur prise en compte vis-à-vis du problème de conception globale.

### 1.2 Actuellement, le processus de conception d'une construction métallique n'est pas optimal

Actuellement le déroulement du processus de conception d'une construction métallique est loin d'être optimal et présente des lacunes certaines. L'optimisation globale effective ne peut avoir lieu dans la mesure où la conception ne met pas en présence, toutes les contraintes liées au projet simultanément : contraintes réglementaires, mais aussi, de fonctionnement, de confort, d'esthétique, de durabilité, d'économie, etc. En outre, cette optimisation globale tant espérée ne peut avoir lieu que si toutes les variables rentrant en jeu dans le processus de conception-réalisation-maintenance, sans exception, sont analysées simultanément. Bien sûr, la considération de ces variables et de ces critères doit tenir compte de leurs degrés d'importance, appelés poids par les spécialistes de l'analyse multicritère. Ceci paraît utopique peut être vu les difficultés liées par la résolution d'un tel problème, mais on doit essayer de converger vers cette solution optimale, qui existe certainement. Dans l'état actuel du savoir, une solution de conception n'est qualifiée d'optimale que si elle tient compte du maximum de critères, du maximum de variables, les plus importantes, et elle répond à toutes les contraintes.

Pour la composante structure de bâtiment en construction métallique, le choix judicieux d'une configuration stable et économique, quelle que soit la complexité qu'il présente, n'est pas toujours évident compte tenu de la multitude des paramètres qui entrent en jeu. Ce choix est encore plus complexe si le système de fondation est pris en considération. En effet, on peut concevoir une superstructure optimale associée à une infrastructure coûteuse ce qui donne comme résultat une structure globale non économique, donc non optimale ; les deux sous-ensembles de la structure de l'ouvrage étant fortement liés.

D'autre part l'optimisation de la conception globale des ouvrages nécessite d'apporter une attention particulière à la conception des assemblages. La conception des noeuds doit être faite selon les exigences de réalisation pratique ou d'économie. Dans ce cas, les caractéristiques particulières du noeud doivent être prises en considération dans le calcul de la structure [7]. Malgré un intérêt économique prouvé par différentes recherches, cette attitude n'a pas encore été largement adoptée en pratique [11,14].

Un autre point très important concerne les objectifs à viser dans une opération d'optimisation. L'approche traditionnelle d'optimisation des structures métalliques est basée sur la **minimisation du poids** de la structure. On remarque cela même dans des travaux de recherche récents, tels que ceux du Professeur P. Jayachandran [17], la méthodologie proposée par Dr S. Sellami [23], etc. Cependant, l'évolution des coûts de la profession montre aujourd'hui qu'une optimisation du poids de la structure n'est pas seulement insuffisante mais peut parfois être contre-productive [3,14,25]. Ceci s'explique par le fait que le prix d'une ossature en acier est constitué en majorité du coût de la main d'œuvre, en atelier de fabrication et en chantier de montage final, ce coût dépend principalement de la complexité des assemblages. C'est pourquoi une définition de la structure,

effectuée sur la base du seul critère poids de matière, peut donner lieu à des dispositions constructives loin d'être optimales en termes de coût de réalisation, bien que le critère poids soit d'une importance reconnue.

Mais il reste à signaler pourtant que la prédominance du coût de la main d'oeuvre n'est pas une raison suffisante pour chercher à minimiser «à tout prix» le temps de fabrication de la superstructure, pas plus qu'il n'était judicieux, par le passé, de se concentrer sur une conception à moindre poids. En effet, le programme de montage et le coût des systèmes de fondation influencent considérablement l'économie du projet, ainsi à chaque fois, une optimisation globale doit chercher à intégrer à la fois la partie superstructure et la partie fondations. Une nouvelle logique de conception s'imposait pour la profession de la CM : selon elle, un dimensionnement optimal doit viser la diminution du coût global de production, même si cela conduit à l'obtention d'une structure plus lourde.

### 1.3 Objectifs des travaux de recherche des auteurs

C'est dans ce contexte que s'insèrent nos travaux de recherche concernant l'aide à la conception globale des structures métalliques. La démarche vise la recherche de solutions de conception globale optimales pour aider le concepteur, en phase précoce 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 partis suivants :

- 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 ceci 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 précoce, 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 en phase précoce de conception, pour satisfaire toutes les exigences pratiques de coût et de délais, et les exigences réglementaires.

Notre plan de recherche comprend les actions suivantes :

- i.* 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;
- ii.* proposition d'une méthode d'optimisation de la conception globale en construction métallique, sur la base de l'intégration des coûts superstructure et fondation faisant intervenir tous les postes de production (matériaux, mise en oeuvre, fabrication, montage). Cet impératif soulève la question de la maîtrise des coûts en construction métallique. En effet, il faut disposer des moyens nécessaires pour évaluer, avec une précision satisfaisante, les coûts des différents postes de production de l'ouvrage. Pour cela, on doit appliquer une méthode efficace pour l'évaluation du coût de production des solutions de conception : structure d'acier + fondation en béton armé ;
- iii.* recherche d'une méthode de résolution du problème d'optimisation formulé précédemment, les objectifs étant bien définis;
- iv.* réalisation d'un prototype informatique pour l'implémentation de la méthode proposée;
- v.* 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.

### 1.4 Objectif du présent article

Dans cet article, nous traitons le premier point cité ci-dessus. Il s'agit d'une tentative de formulation du problème d'optimisation de la conception globale des structures métalliques, sur la base du choix d'un critère de performance, et de l'identification des variables et des contraintes à prendre en compte dans ce problème. Cette formulation doit intégrer les coûts de la superstructure et des fondations, en faisant intervenir tous les postes de production (matériaux, mise en oeuvre, fabrication, montage).

Dans nos prochaines publications, nous présentons une méthode pratique et efficace d'évaluation des coûts des solutions de conception, et nous discutons des méthodes dédiées au sujet de l'optimisation, à savoir les méthodes déterministes du gradient et de Gauss-Seidel [6,19] et les méthodes non-déterministes (aléatoires) [2]: méthodes Monte Carlo, méthodes hybrides, le recuit simulé, les Algorithmes Évolutionnaires (Algorithmes Génétiques, stratégies d'Évolution, Programmation Évolutionnaire et Programmation Génétique) [12] et la technique des Systèmes Expert [15]. Nous choisissons une méthode adaptée à notre problème et nous l'appliquerons.

## 2 FORMULATION DU PROBLEME DE CONCEPTION GLOBALE

### 2.1 Formulation mathématique générale

L'optimisation est un terme qui est fréquemment et largement répandu pour la description et la conduite des processus de conception pour le développement des produits. Largement parlant, l'optimisation signifie l'amélioration ou le perfectionnement de la conception en termes d'un ou plusieurs aspects de performance et de qualité.

Cependant, il y a une signification technique très spécifique de l'optimisation d'un point de vue mathématique rigoureux. L'hypothèse de base derrière une telle définition, c'est que le processus de conception est vu comme étant un processus décisionnel, par lequel on choisisse la forme fonctionnelle appropriée parmi beaucoup de solutions alternatives. L'expression de la configuration fonctionnelle donnée est alors développée en choisissant par la suite des valeurs appropriées pour les quantités et attributs de la conception, celles décrivant amplement la configuration actuelle.

Le modèle mathématique formel du problème d'optimisation est une déclaration ayant la forme suivante [20] :

minimiser  $f(x)$  de façon que :

$$h(x) = 0 \quad \text{et} \quad g(x) \leq 0 \quad (1)$$

$$x \in \mathcal{X} \subseteq \mathbb{R}^n$$

où la fonction objectif scalaire  $f(x)$  fournit le critère de comparaison entre les diverses solutions alternatives, les fonctions vecteur-valeurs  $h = (h_1, h_2, \dots, h_{m1})^T$

et  $g = (g_1, g_2, \dots, g_{m2})^T$  sont les contraintes fonctionnelles qui déterminent si une conception est admissible. Tandis que  $x$  représente le vecteur des variables de conception, il a la dimension  $n$ , où  $n$  est un nombre fini. Dans plusieurs problèmes de conception, les variables prennent des valeurs réelles continues dans l'espace réel de dimensions  $n : \mathbb{R}^n$ , tandis que dans d'autres problèmes, les variables ne peuvent prendre que des valeurs discrètes ; tel est le cas des variables : sections transversales des profilés normalisés d'acier. Dans l'équation (1), le type de valeurs utilisées est décrit par l'ensemble des contraintes noté  $\mathcal{X}$ .

### 2.2 Formulation implicite du problème d'optimisation

Le problème de la conception globale des structures métalliques peut, à notre avis, être posé globalement comme un problème d'optimisation consistant à minimiser l'objectif ou le critère du coût global (CG) de la structure en respectant des conditions ou contraintes notées  $Con_i$ . Le CG est une fonction d'un certain nombre de variables telles que les trois variables :  $I$ ,  $X_a$  et  $X_n$  comme on va l'expliquer de façon explicite dans les sections suivantes.

Ainsi, on peut formuler implicitement le problème d'optimisation de la façon suivante :

$$\text{Min CG}(I, X_a, X_n) \quad (2)$$

Sous les contraintes  $Con_i$

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.

$Con_i$  : contrainte ou exigence, avec  $i = 1, \dots, N$  où  $N$  est le nombre d'exigences liées à la structure.

Le coût global ( $CG$ ) d'une construction métallique (superstructure et fondations) peut s'écrire :

$$(CG) = (CS) + (CF) \quad (3)$$

$(CS)$  : Coût Superstructure en acier

$(CF)$  : Coût Fondations en béton armé

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

$$(CS) = (Mat) + (Fab) + (Mon) \quad (4)$$

$(Mat)$  : 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 :

$$(CF) = (Ter) + (PrF) \quad (5)$$

$(Ter)$  : Coût des terrassements,

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

Ci-dessous, dans le paragraphe 4, nous analysons les cinq composantes du coût global ( $CG$ ) c'est-à-dire celles des coûts ( $CS$ ) et ( $CF$ ) d'une structure de bâtiment.

### 2.3 Les Critères d'optimisation

Le critère, que nous retenons pour la résolution du problème de la conception globale des structures métalliques, est unique, il s'agit de minimiser le coût global de la structure. Ce coût est composé des deux entités suivantes :

- le coût de réalisation de la superstructure métallique ;
- le coût de réalisation des massifs de fondations.

Ces deux coûts ne sont pas élémentaires puisqu'ils sont, eux mêmes, composés de plusieurs coûts comme on va l'expliquer plus loin.

## 2.4 Les Variables

Les variables de conception permettant de générer les différentes configurations de la structure sont toutes discrètes, il s'agit de :

### • Des caractéristiques dimensionnelles des éléments :

Soit  $I = (I_1, I_2, \dots, I_N)$  : le vecteur de tous les éléments,  $i = 1, \dots, N$  : nombre d'éléments ;

$I_i$  étant la variable entière représentant le numéro de l'élément  $i$  correspondant à l'un des profilés laminés normalisés des types IPE et HEB [8], il s'agit :

- des poutrelles IPE pour les poutres : 18 éléments avec une hauteur variant de 80 mm à 600 mm,
- des poutrelles HEB pour les poteaux : 19 éléments avec une hauteur variant de 100 mm à 600 mm.

### • Du type de liaisons entre les poteaux et les massifs de fondation :

Soit  $X_a = (a_1, a_2, \dots, a_{N_{ap}})$  : le vecteur de tous les appuis,  $i = 1, \dots, N_{ap}$  : nombre d'appuis ;

Chaque variable ( $a_i$ ) peut prendre 2 valeurs correspondant aux deux possibilités suivantes :

1. pied de poteau articulé (poteau fixé par une platine d'extrémité seule) ;
2. pied de poteau encastré (poteau fixé par une platine d'extrémité raidie).

### • Du type d'assemblages entre les éléments (assemblages poutre-poteau, poutre-poutre, etc.) :

Soit  $X_n = (n_1, n_2, \dots, n_{N_n})$  : le vecteur de tous les noeuds,

$i = 1, \dots, N_n$  : nombre de nœuds ;

Chaque variable ( $n_i$ ) peut prendre différentes valeurs suivant le type d'assemblage aux nœuds et la modélisation utilisée pour décrire son comportement. A cet effet, on va considérer les différents types d'assemblages suivants :

1. assemblage par cornières d'âme (idéalisé articulé) ;
2. assemblage par platine d'extrémité débordante (liaison semi-rigide) ;
3. assemblage par platine d'extrémité non débordante (liaison semi-rigide) ;
4. assemblage par cornières d'âme et de semelles (liaison semi-rigide) ;
5. assemblage par platine d'extrémité débordante avec raidisseurs (liaison rigide).

## 2.5 Les Contraintes

Les contraintes du problème d'optimisation sont constituées par les différentes exigences réglementaires de dimensionnement des structures métalliques, mais aussi, des exigences liées à l'enveloppe budgétaire limitée par le maître d'ouvrage et les contraintes de l'esquisse

architecturale. Il s'agit donc de contraintes liées à la :

- résistance des sections transversales,
- résistance des éléments vis-à-vis du flambement,
- limitation des déformations des éléments fléchis,
- limitation des déformations horizontales de l'ossature,
- limitation des fréquences de vibrations des planchers,
- limitation du coût global de réalisation de la structure,
- l'architecture, telle que par exemple, la limitation des retombées de poutres.

## 3 EXPLICATIONS

### 3.1 Concernant les Critères d'Optimisation «Coût Global Structure/Fondations, Matières/Travaux»

Les critères d'optimisation sont les moyens de mesure qui permettent de juger de la satisfaction des objectifs. Un critère peut être associé à une seule dimension, tel un critère *poïds*, ou à plusieurs dimensions, comme le critère *coût* associé aux quantités des matériaux, au temps d'exécution, etc. Un critère peut être qualitatif traduisant un ordre de préférence du concepteur ou quantitatif traduisant une intensité des préférences de celui-ci [22].

#### 3.1.1 Description générale des critères possibles d'optimisation

En CM, plusieurs critères conditionnent la conception globale d'une structure (figure 1) :

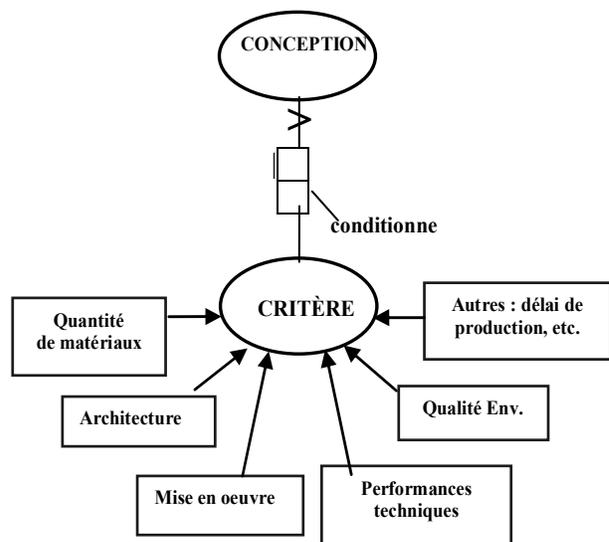


Figure 1 : Critères de conception

### a. Quantité de matériaux

C'est un critère quantitatif et multidimensionnel dans la mesure où plusieurs types de matériaux peuvent être mis en oeuvre 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 oeuvre

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 oeuvre. 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 oeuvre 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

Par définition, 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. [1].

### e. Performances techniques

C'est un critère à plusieurs dimensions qui peut inclure, entre autres, les considérations suivantes :

- **l'adaptation au sol** : l'adaptation au sol de la superstructure se fait par l'intermédiaire des fondations. Pour que cette adaptation soit performante, il faut transmettre les charges venant de la superstructure au sol de manière à respecter les caractéristiques de portance du sol et à réaliser en même temps les fondations les plus économiques;
- **limitation des déformations** : pour des raisons architecturales ou de service, le concepteur peut être amené à respecter des limitations de déformation d'un ou de plusieurs éléments d'une structure. Cette considération ne doit pas être confondue avec les limitations réglementaires des déformations.
- **résistance au feu** : cet aspect est d'autant plus important que le bâtiment est fermé et destiné à recevoir un grand nombre de personnes. Il est vrai qu'il faut toujours penser à réduire le risque de transmission d'incendie d'un étage à un autre ou d'un compartiment de bâtiment à un autre, d'autant plus que l'acier est connu par son mauvais comportement sous l'effet des élévations de température, toutefois cette exigence de résistance au feu n'est à rajouter à la liste des critères de conception de la structure que si l'acier doit résister seul. Ce n'est pas le cas, si d'autres dispositions seront prises telles que l'usage des sprinklers, la ventilation, la protection de la structure exposée, etc.

### f. Autres critères

D'autres critères peuvent être pris en compte dans la prise des décisions relatives à la conception technique en CM. Ces critères peuvent avoir un aspect économique tel que la rapidité d'exécution d'un projet ou un aspect particulier tel que la préférence d'utilisation d'une technique spécifique 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 fait, ces critères seront pris en compte dans la résolution globale comme des contraintes à satisfaire par toute solution de conception, et ne peuvent donc faire l'objet d'une optimisation.

### 3.2 Le critère retenu pour notre étude : «coût de structure au lieu de poids de structure»

Dans la conception globale des structures métalliques, la recherche de solutions rationnelles et optimales doit se faire en tenant compte de tous ou de la majorité des critères listés ci-dessus. Ce choix multicritère présente une difficulté particulière malgré l'existence de méthodes de résolution dédiées à ce type de problème [22]. La difficulté réside dans le fait que les critères n'ont pas la même dimension et sont parfois de nature qualitative, donc difficiles à évaluer, par conséquent, la fonction objectif est difficile à définir. Certains critères, pour qu'ils soient évalués, nécessitent une grande expérience professionnelle ou une enquête auprès des professionnels ; c'est le cas, par exemple, du critère de mise en oeuvre.

L'approche traditionnelle d'optimisation des structures métalliques est basée sur la minimisation du poids de la structure. Cependant, les assemblages dépassent rarement les 5 % du poids total d'une ossature. Ce faible pourcentage cache en réalité un coût élevé pouvant aller jusqu'à 30 % du coût total de fabrication de la structure [14]. Evers et Maatje [11] avancent un chiffre plus élevé, celui de 50 % ! C'est une moyenne entre les pourcentages revenant aux assemblages, de façon directe ou indirecte, dans chacune des étapes du processus de conception-réalisation (33 % en phase de conception préliminaire, 55 % en phase de conception détaillée, 77 % en phase de fabrication à l'atelier, 40 % du coût total des matériaux de structure, etc.). En effet, le prix d'une ossature est constitué majoritairement par le coût de la main d'oeuvre qui dépend essentiellement de la complexité des assemblages. Une définition optimisée de la structure, effectuée sur la base du seul critère poids, peut donc donner lieu à des dispositions constructives loin d'être optimales en terme de coût de réalisation [24]. Par conséquent, même au stade de l'avant projet, un processus d'optimisation sur la base du seul critère poids ne peut plus se justifier et doit être remplacé par la recherche du coût minimum de construction ou encore mieux du coût global (intégrant toutes les composantes du processus conception-réalisation).

Nous proposons dans cette étude de ramener l'étude des différents critères à un critère unique de coût. Ce critère quantitatif peut intégrer un maximum d'informations sur chaque solution de conception. C'est aussi un critère souple qu'on peut ainsi limiter à un objectif précis (minimisation du coût de la superstructure, par exemple) ou à un objectif plus global (coût global de production). Pour être le plus significatif possible, le critère coût global doit tenir compte des coûts des quantités de matériaux, mais aussi des coûts des opérations de production (en atelier et sur le chantier) d'une solution de conception en intégrant ses deux principales composantes : la superstructure métallique et les

fondations.

Le critère d'optimisation étant défini, nous allons nous intéresser dans les paragraphes suivants aux variables d'optimisation et aux contraintes qui régissent l'opération de conception technique pour aboutir finalement à la formulation complète du problème d'optimisation de la conception globale en CM.

### 3.3 Concernant les Variables d'Optimisation

Dans le problème d'optimisation de la conception globale en CM, les variables sont les composants de la structure puisque la variation de leurs caractéristiques influe directement sur le critère coût global de production retenu comme objectif d'optimisation dans cette recherche.

#### 3.3.1 Description générale des variables de conception

Une ossature métallique résulte de l'assemblage de différents composants. Cet assemblage doit être conçu globalement de manière à assurer que la structure réalisée répond à l'usage prévu par l'ouvrage. La conception en phase précoce, préalable à tout calcul détaillé, implique concrètement :

- de prédéterminer avec précision un cheminement à travers la structure de tous les efforts qui lui sont appliqués, en prévoyant tous les éléments structurels et les assemblages nécessaires à ce cheminement;
- de choisir avec soin les hypothèses de liaisons entre les éléments de structure et avec les fondations en s'assurant de la faisabilité technique des dispositions qui en découlent et en recherchant par ces choix la meilleure économie globale pour le projet;
- de veiller à la cohérence des déformations relatives des systèmes structurels et à la compatibilité de ces mêmes déformations avec les conditions d'utilisation de l'ouvrage.

A travers cette définition de la conception globale, nous pouvons identifier les variables suivantes :

#### • La géométrie et la forme extérieure de la structure

Le choix de la géométrie et la forme de la construction sont, dans la plupart des cas, une conséquence directe du programme et des intentions exprimés par le maître d'ouvrage (surface habitable, dimensions en plan de la construction, etc.) et dépendent essentiellement des exigences architecturales. On peut donc considérer ces caractéristiques comme des données fixes si on se place dans une phase de conception technique. Toutefois, si le programme architectural le permet, le concepteur (bureau d'études CM, par exemple) peut rechercher une solution de conception optimale en explorant des solutions de différentes formes et de dimensions variables.

### • Profilés des sections

Afin d'optimiser l'utilisation du matériau, le choix des profilés doit s'orienter vers des sections dont les caractéristiques répondent le mieux possible à leur rôle structural. Cela revient à choisir des sections qui minimisent les dimensions géométriques et maximisent les capacités de stabilité, de résistance et de rigidité, liées à la fonction de l'élément dans la structure d'ensemble.

Dans un souci économique de standardisation, 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. D'autres solutions sont bien sûr envisageables mais sont beaucoup moins répandues: fermes en treillis sur poteaux en profils I, poteaux et traverses en treillis, poutres en U, poutres alvéolaires, poteaux et traverses en caissons reconstitués soudés, etc. [13]. L'emploi de profils à inertie variable est aussi une pratique avantageuse pour les structures de type «halle industrielle». Outre 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

C'est à travers les liaisons que les charges appliquées à la structure s'acheminent vers le sol de fondation. Les liaisons des différentes barres formant la structure, entre elles ou avec les fondations peuvent être, en première approximation, de deux types: rigides ou articulées. Cependant, le comportement réel des assemblages qui constituent les liaisons est toujours semi-rigide, c'est-à-dire qui se situe quelque part entre ces deux cas extrêmes.

Nous désignons par le terme *appuis* les liaisons externes liant la superstructure aux fondations, et par le terme *liaisons* les liaisons internes ou les nœuds (entre les barres de la structure). La nature des liaisons internes et externes peut avoir une grande influence sur la répartition des efforts dans la structure et une influence certaine sur les efforts à transmettre aux fondations. En effet, le choix des articulations en pied de poteau élimine les moments de flexion, ce qui a un effet positif sur les dimensions et le coût des fondations, mais évidemment ceci s'accompagne d'un effet négatif sur la superstructure métallique car il y a davantage report de sollicitations sur cette partie de structure. C'est pourquoi, la nature des liaisons est une variable à considérer avec beaucoup de soin.

### • Type d'assemblages

En CM, l'élaboration d'un assemblage doit correspondre au type de la liaison voulue (encastrement, articulation) ou à des caractéristiques de résistance et de rigidité bien définies (liaison semi-rigide). De plus, le choix d'un type d'assemblage doit être en accord avec les sections des profilés composant la structure. La conception des assemblages doit être intégrée dans les phases préliminaires de l'élaboration du projet. On doit garder à l'esprit le fait que le prix d'une ossature est constitué majoritairement par

le coût de la main d'œuvre et que le temps nécessaire à la fabrication des différents composants dépend essentiellement de la complexité des assemblages [14].

### • Type de fondations

Les fondations d'une construction se divisent en deux grandes familles: les fondations superficielles telles que les semelles isolées, semelles filantes ou radier, et les fondations profondes constituées par des pieux avec une multitude de dispositions pratiques. Généralement le choix du type d'une fondation s'établit sur la base des données du sol et des sollicitations venant de 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 modifier ces caractéristiques en optant pour des travaux de renforcement ou de substitution de certaines couches du sol afin d'améliorer leurs qualités de portance. 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 (figure 2).

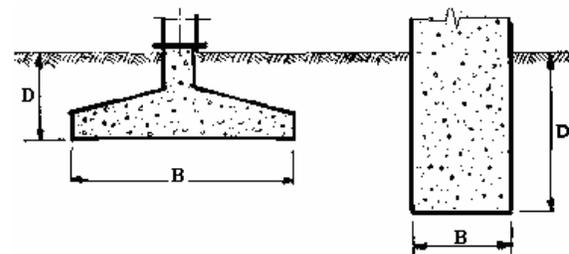


Figure 2 : La profondeur  $D$  de fondation

Qu'il s'agisse d'un sol de fondation homogène ou un sol à multicouches où les couches basses sont plus résistantes, en général, le choix d'une profondeur  $D$  plus grande engendre une augmentation de la capacité portance du sol, ce qui est positif pour l'objectif de réduction des dimensions de fondations, et par conséquent la diminution des coûts du matériau béton armé, cependant les travaux de terrassements seront eux aussi plus coûteux. C'est pourquoi, il est utile de considérer  $D$  comme variable d'optimisation.

• Répartition des éléments de stabilité

Les éléments de stabilité (portiques, palées de contreventement, voiles, etc.) peuvent être faiblement, moyennement ou fortement espacés. Le fait d'espacer les porteurs verticaux, si le programme architectural le permet, entraîne une diminution du nombre d'éléments à fabriquer et à monter, mais peut augmenter la quantité des matériaux mis en œuvre pour réaliser la structure, réduire la performance de la stabilité (augmenter le degré de risque) et augmente les charges à transmettre dans les fondations.

• Autres variables

D'autres variables de conception peuvent aussi être considérées, mais avec un plus faible impact sur la conception globale comme le type de couvertures et des parois. Par contre, des variables telles que l'orientation en plan des éléments verticaux de stabilité ou encore le type de planchers, doivent faire l'objet de recherches pour évaluer leurs degrés d'influence sur le coût global de réalisation de la structure.

• Note sur la prise en compte des actions

Il est à noter que les charges et déplacements imposés agissant sur la structure, dues à son exploitation et à son environnement (vent, neige, température, séismes, etc.), ne constituent pas des variables au problème de conception mais des données, directement déductibles à partir de la description initiale du projet et à partir de l'esquisse architecturale, ou indirectement évaluées à partir des normes et règlements en vigueur tels que les Eurocodes 1 et 8, et les documents réglementaires Algériens DTR.

3.3.2 Variables retenues

En se plaçant en phase précoce de conception, nous constatons que les variables de conception sont très diverses. Certaines influencent faiblement le coût global de l'ossature principale d'un ouvrage. D'autres correspondent, du point de vue de la conception technique, à des données fixes. C'est le cas, par exemple, de l'esquisse architecturale définissant la géométrie et la forme de la construction ou encore des données du sol de fondation résultant, le plus souvent, d'une campagne de reconnaissance géotechnique du sol.

Ainsi, les variables auxquelles nous allons attribuer le plus d'importance dans la mesure où elles sont susceptibles d'influencer fortement le coût global de production d'une structure sont de trois catégories :

- les caractéristiques dimensionnelles des éléments;
- le type des assemblages au niveau des liaisons internes de la structure;
- le type des liaisons externes (superstructure/fondations) au niveau des appuis de la structure.

a. Les caractéristiques dimensionnelles des éléments

Les éléments de la structure seront choisis dans des listes de profilés normalisés. Les poutres seront choisies dans une liste de 18 éléments de poutrelles IPE avec une hauteur variant de 80 à 600 mm. Pour les poteaux, on va considérer des poutrelles de type HEB avec une hauteur variant de 100 à 600 mm [8].

Ce choix est délibérément limité à ces deux types de profilés pour faciliter la détermination des caractéristiques principales des assemblages dans le cas où on adopte une modélisation semi-rigide de ces derniers. Le catalogue du projet «SPRINT» [5], qui nous sert de base de données pour les caractéristiques des liaisons est lui même limité à ces deux types de profilés.

b. Le type des assemblages

Pour les assemblages on va considérer les liaisons poutre-poteau et poutre-poutre. Le cas des liaisons poteau-poteau est limité aux dispositions d'assemblages fortement rigidifiés assurant la continuité des poteaux d'une structure.

• Les assemblages poutre-poteau : On va considérer les cinq types d'assemblages de la figure 3.

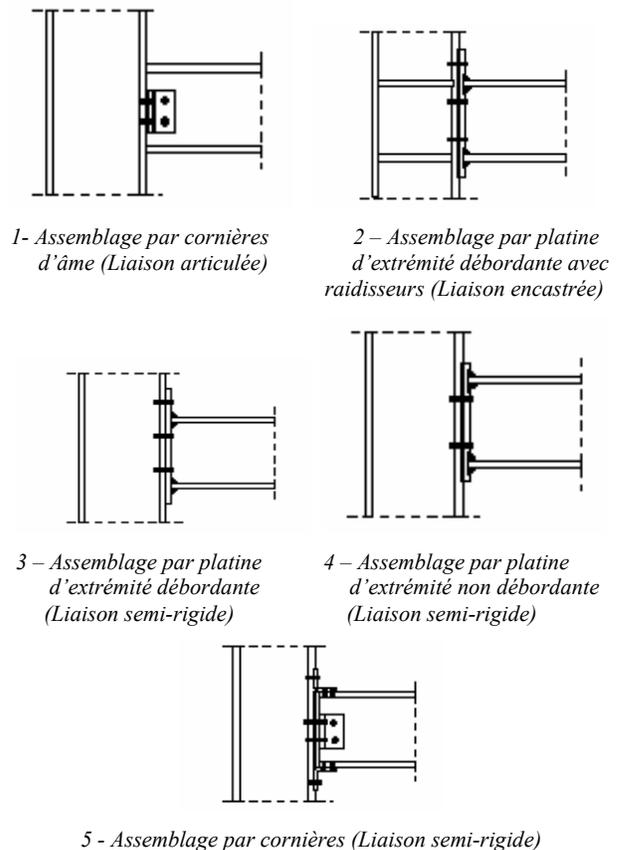


Figure 3 : Différents types d'assemblages poutre-poteau

Les assemblages 1 et 2 sont couramment utilisés en CM pour réaliser respectivement une liaison articulée ou une liaison encastrée. Les assemblages 3 et 4 sont parmi les types les plus courants en Europe : assemblages boulonnés par platine d'extrémité, avec ou sans boulons extérieurs. L'assemblage 5 est un assemblage poutre-poteau par cornières de liaisons entre les semelles. Bien que ce type ne soit pas très courant en Europe, il a été choisi dans le cadre du projet « SPRINT » certainement parce que c'est un assemblage qui présente des avantages en termes de facilité de fabrication et de montage qui devraient conduire à une diminution du coût global de la structure [7].

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 «SPRINT».

Dans le cas des halles à grandes portées sans étages (industrielles, hangars, etc.) construites sur la base de portiques à nefs, une disposition constructive courante consiste à renforcer l'assemblage traverse-poteau par un jarret (figure 4). Généralement le jarret double l'inertie de la traverse au niveau de la liaison. La longueur du jarret peut être prise égale forfaitairement au dixième de la portée de la traverse. Ce type d'assemblage sera ajouté à la liste des assemblages précédents, pour les bâtiments de ce genre.

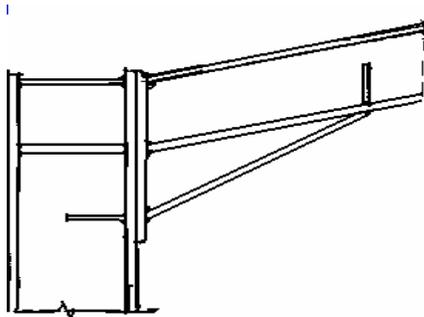
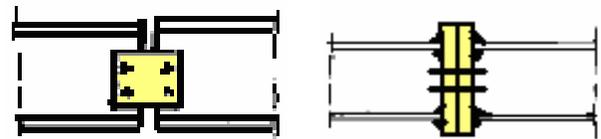


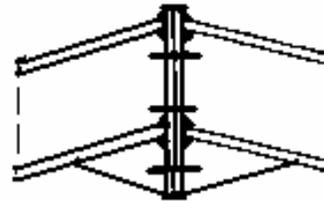
Figure 4 : Assemblage poutre-poteau avec renfort par jarret

• **Les assemblages poutre-poutre** : On va considérer les trois configurations d'assemblages de la figure 5 :

Dans le cas où l'on souhaite réaliser une liaison de type articulation entre deux poutres mises bout à bout, une solution pratique consiste à disposer un couvre-joint boulonné aux âmes de part et d'autre des deux éléments assemblés (Figure 5, assemblage 1). Par contre, la rigidité d'un assemblage par platine d'extrémité boulonnée peut être renforcée par des jarrets pour aboutir à une liaison encastrée. Cette solution est une disposition courante dans les assemblages des traverses des portiques à nefs multiples des structures de type halle à grandes portées (Figure 5, assemblage 3). L'assemblage 2 de la figure 5 constitue une solution technique intermédiaire pouvant être modélisée comme liaison semi-rigide. Il a été étudié dans le cadre du projet « SPRINT », ce qui nous permet de disposer de ses caractéristiques de rigidité.



1- Assemblage par couvre-joints d'âme (Liaison articulée) 2- Assemblage par platine d'extrémité (Liaison semi-rigide)



3- Assemblage par platine d'extrémité et renfort par jarret (Liaison encastrée)

Figure 5 : Différents types d'assemblages poutre-poutre

### c. Le type d'appuis

Pour les appuis de la structure, nous allons considérer les deux configurations suivantes :

1. pied de poteau articulé (Figure 6 (a));
2. pied de poteau encastré (Figure 6 (b)).

La figure 6 (a) présente une disposition courante d'un pied de poteau considéré comme articulé. L'assemblage est constitué par une plaque d'assise, soudée à l'extrémité du poteau, et deux tiges d'ancrage. Dans la figure 6 (b), la plaque d'assise est fixée par écrous à au moins 4 tiges d'ancrage filetées, noyées dans le béton. Ces tiges sont situées entre les semelles et le bord de la platine. Pour minimiser l'épaisseur de la platine et renforcer la rigidité de la liaison, on ajoute souvent des raidisseurs. Plusieurs dispositions de raidisseurs sont possibles: raidisseurs simples dans le prolongement de l'âme du poteau, raidisseurs doubles joignant les extrémités des semelles ou carrément des raidisseurs dans les deux directions pour les poteaux soumis à la flexion biaxiale.

On se limite dans cette étude à la première disposition : raidisseurs simples dans le prolongement de l'âme du poteau, solution courante et économique permettant aussi un serrage facile des écrous.

Les appuis de la superstructure sur les fondations peuvent aussi avoir un comportement semi-rigide. Des recherches ont été entreprises dans le but de modéliser le comportement de ces éléments afin d'aboutir à des modèles simplifiés de caractérisation [16]. Mais, dans l'état actuel des connaissances qui ne permettent pas une évaluation précise de caractéristiques de rigidité et de résistance de ses liaisons, on se limite aux deux modèles idéalisés : parfaitement articulé et parfaitement rigide.

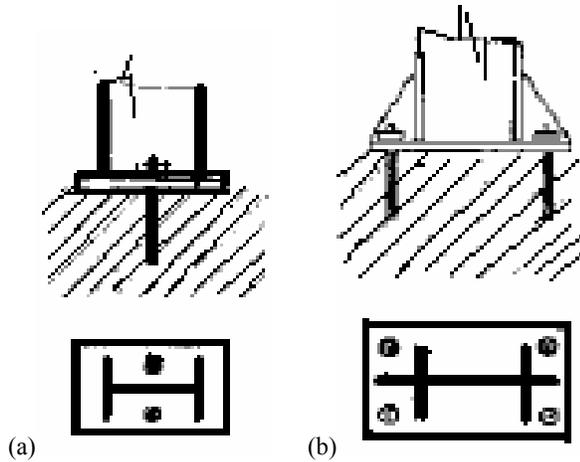


Figure 6 : Dispositions des attaches en pieds de poteaux

### 3.4 Concernant les Contraintes

#### 3.4.1 Les contraintes réglementaires de sécurité d'ouvrage

On se réfère aux textes en vigueur, tels que les règles Eurocode 3 [9] applicables dans les pays de l'union Européenne et applicables partiellement aussi en Algérie. Pour les bâtiments, on doit se référer aux parties 1.1 et 1.2 de ce règlement. Dans les zones sujettes aux séismes, le document de référence est le RPA 99 [4], alors qu'en Europe, c'est l'Eurocode 8 qui est en vigueur.

Le concepteur est tenu de respecter les prescriptions de sécurité assurant :

- la protection du bâtiment (sa structure et ses composants non structuraux),
- la protection des utilisateurs,
- le bonne exploitation de l'ouvrage,
- le confort des utilisateurs,
- la durabilité de la construction.

On parle de justifications aux états limites ultimes et aux états limites de service, pour désigner les contraintes d'une conception réussie. On résume ainsi, les exigences de l'Eurocode 3 comme suit :

#### • Résistance des sections transversales :

Dans une vérification pratique, les efforts sollicitant les différents éléments de la structure considérés séparément, doivent être inférieurs aux efforts de résistance. De façon générale, il est possible de retenir les critères approximatifs de non-ruine. Ainsi, pour des éléments sollicités en flexion et/ou un effort axial de traction ou de compression, cette contrainte peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{N_{sdi}}{N_{Ri}} + \frac{M_{sdi}}{M_{Ri}} \leq \gamma_M \quad (6)$$

$i = 1, \dots, N$  avec  $N$  : nombre d'éléments sollicités en flexion et/ou en compression.

Pour un élément qui travaille au cisaillement, la contrainte peut s'écrire :

$$V_{sd} \leq V_R \quad (7)$$

$N_{sd}$  : effort normal de calcul ;  $N_R$  : effort normal résistant ;

$M_{sd}$  : moment fléchissant de calcul ;

$M_R$  : moment fléchissant résistant ;

$\gamma_M$  : facteur partiel de sécurité ;

$V_{sd}$  : effort tranchant de calcul ;

$V_R$  : effort tranchant résistant.

Si l'élément travaille à la flexion seule :  $N_{sd} = 0$ ,  $\gamma_M = 1$ .

Si l'élément travaille en compression ou traction seule :  $M_{sd} = 0$ ,  $\gamma_M = 1$ .

Les efforts de calcul ( $N_{sd}$ ,  $M_{sd}$ ,  $V_{sd}$ ) et de résistance ( $N_R$ ,  $M_R$ ,  $V_R$ ) sont déterminés en fonction des variables de conception de la structure. On a donc :

$$N_{sd} = N_{sd}(I, X_a, X_n), M_{sd} = M_{sd}(I, X_a, X_n), V_{sd} = V_{sd}(I, X_a, X_n)$$

$$N_R = N_R(I, X_a, X_n), M_R = M_R(I, X_a, X_n), V_R = V_R(I, X_a, X_n).$$

#### • Résistance des éléments vis-à-vis du flambement :

La vérification de la résistance des éléments aux phénomènes d'instabilité locale tels que le flambement ou le déversement se fait en s'assurant que les efforts sollicitant ces derniers ( $N_{sd}$ ,  $M_{sd}$ ) sont inférieurs aux efforts critiques capables de causer l'apparition des instabilités élastiques.

$$\frac{N_{sdi}}{\chi_i N_{Ri}} + \frac{k_i \cdot M_{sdi}}{M_{Ri}} \leq 1 \quad (8)$$

avec :  $i = 1, \dots, N$  où  $N$  : nombre de poteaux ;

$\chi_i$  : coefficient de flambement de l'élément  $i$  ;

$k_i$  : coefficient de moment de l'élément  $i$ .

#### • Limitation des déformations des éléments fléchis :

Pour cette vérification, la déformation  $v_i$  de chaque élément par rapport à la ligne de ses appuis doit être inférieure à une limite  $v_{lim,i}$  exprimée généralement en fraction de la portée de l'élément concerné. Les valeurs de cette limite sont fixées par les règles pour les flèches verticales des toitures et des couvertures.

$$v_i(I, X_a, X_n) \leq v_{lim,i} \quad (9)$$

$i = 1, \dots, N_b$  avec  $N_b$  : nombre de poutres ;

#### • Limitation des déformations horizontales d'ossature :

Le contrôle de la flexibilité des ossatures s'exprime par une

limitation des déplacements horizontaux en tête des poteaux  $u_i$ . Les valeurs limites des déformations  $u_{lim,i}$  sont données par la réglementation et sont modulées en fonction de la catégorie de structure à étudier.

$$u_i(I, X_a, X_n) \leq u_{lim,i} \quad (10)$$

$i = 1, \dots, N_t$

avec  $N_t$  : nombre de niveaux (ou étages) de la structure;

• **Limitation des fréquences de vibrations des planchers**

$$\omega_i(I, X_a, X_n) \geq \omega_{lim,i} \quad (11)$$

$i = 1, \dots, N_d$  avec  $N_d$  : nombre de planchers distincts. Il est égal à  $N_t$  si les planchers sont continus.  $N_d$  vaut 1 si tous les planchers sont identiques.

**3.4.2 La contrainte du coût maximum de la structure**

Si l'enveloppe budgétaire, réservée aux travaux de réalisation du lot structure, est fixée par le maître d'ouvrage, elle représente un seuil qu'on note  $CG_{lim}$  à ne pas dépasser. Dans ce cas, la solution optimale caractérisée par son coût global  $CG$  sera comparée à  $CG_{lim}$ .

On écrit qu'il faut que :

$$CG \leq CG_{lim} \quad (12)$$

Il s'agit d'une contrainte évidente qui peut, le cas échéant, refuser la solution optimale. Dans ce cas, et s'il n'y a aucune erreur dans le procédé de détermination de la solution de conception optimale, il faudra revenir en arrière pour effectuer une ou plusieurs modifications des données fixes du problème. L'ingénieur concepteur de structure discute cette remise en cause avec ses partenaires, notamment avec l'architecte pour modifier les données de son esquisse, ou avec le propriétaire pour augmenter le budget alloué au lot structure (superstructure et fondations), c'est-à-dire augmenter  $CG_{lim}$  et par conséquent satisfaire à la contrainte (12). C'est une autre voie de recherche très intéressante qui fait partie du domaine de l'ingénierie concurrente ou simultanée.

**3.4.3 Autres contraintes**

Les contraintes architecturales quantifiables peuvent aussi être introduites dans le processus d'optimisation. On cite le cas fréquent de limitation des retombées de poutres à une valeur limite qu'on note  $hp_{lim}$ , dans ce cas on doit ajouter une contrainte de la forme :

$$hp \leq hp_{lim} \quad (13)$$

où  $hp$  : valeur de la retombée de poutre. Elle est égale à la hauteur du profil de poutre si elle est placée sous la dalle, elle a une valeur inférieure si la poutre est incorporée dans la dalle.

On peut aussi rencontrer des contraintes engendrées par les équipements électriques et mécaniques. Un exemple est celui d'assurer une dimension minimale pour le passage des

gaines de ventilation à travers les âmes de poutres ou à travers les ouvertures formées par les triangulations des poutres à treillis. On écrit dans ce cas une autre condition de la forme :

$$D \geq D_{min} \quad (14)$$

où  $D$  : la valeur de la dimension de l'ouverture (diamètre des alvéoles par exemple);

$D_{min}$  : la valeur minimale à respecter (diamètre de la gaine de ventilation par exemple).

On signale que la contrainte de délai limite de réalisation (fabrication/montage), généralement fixée par le maître d'ouvrage, est introduite implicitement dans la considération du critère coût global de réalisation.

**4 ÉVALUATION DU COÛT GLOBAL (CG) DE PRODUCTION D'UNE STRUCTURE COMPLÈTE**

**4.1 Principes**

Le coût global de toute la structure en acier et des fondations peut se subdiviser en trois catégories :

- Coût des matériaux (ou matières premières),
- Main-d'œuvre,
- Frais généraux.

**a) Coût des matériaux**

L'estimation des coûts des matériaux consiste à quantifier les volumes requis pour la construction et à obtenir les prix des fournisseurs. Pour la superstructure métallique, les coûts matière intègrent les prix des profils et des assemblages. Dans les coûts matière des assemblages, on intègre les connecteurs (boulons, cordons de soudure, etc.) et les pièces accessoires de liaison (plats, cornières, équerre d'attaches, etc.). L'évaluation des connecteurs tient compte, dans le cas des boulons, des prix unitaires des produits, et dans celui des cordons de soudure, des coûts du métal d'apport, de l'énergie et, éventuellement de celui du gaz utilisé. Pour les fondations, une pratique courante consiste à considérer des prix bruts par  $m^3$  de béton armé y compris son coffrage, ces prix dépendent du type de ciment utilisé (ordinaire, spécial) et du dosage en ciment (325 Kg/ $m^3$ , 350, 400,...).

Mais, il arrive qu'un concepteur estime que le taux des aciers sera probablement très supérieur, ou au contraire très inférieur, au taux habituel moyen, en s'appuyant sur des études antérieures de projets similaires, dans ce cas il évalue séparément les coûts du béton et du ferrailage.

La tâche d'estimation du coût des matériaux, a priori simple, est cependant liée à quelques incertitudes dont on doit tenir compte, telles que l'existence certaine des rebuts (parties de pièces après découpage et de béton non utilisables).

## b) Coût de la main-d'œuvre

Il représente une part importante des coûts de fabrication et de montage. La solution alternative aux formulations empiriques de ce coût est l'évaluation analytique de la charge de travail obtenue par la multiplication des temps opératoires par le prix horaire d'exécution (en atelier, sur site pour le montage ou pour l'exécution des fondations). Une telle approche nécessite donc la connaissance de la durée de travail requise pour la tâche standard associée à chaque poste de travail, et avant cela, subdiviser le procédé de construction (toutes opérations comprises) en un ensemble de postes de travail.

Alors, les clefs d'une évaluation correcte du coût de la main-d'œuvre sont les suivantes :

- Décomposer la construction en étapes élémentaires de fabrication et quantifier le travail à effectuer pour chacune d'entre elles. Chaque étape élémentaire représente une tâche standard indivisible ou une tâche que le concepteur ne veut plus scinder, telle que la mise à longueur d'une barre, le forage des trous, la manutention d'un composant, etc. Il est à noter la nécessité de distinguer en classes différentes les longueurs de découpes en fonction des épaisseurs de parois, et les longueurs de cordons de soudure en fonction du mode de soudage utilisé : manuel, semi-automatique, automatique, etc.). Il faut pour cela que l'estimateur connaisse parfaitement les habitudes et potentialités de l'entreprise des travaux,
- Disposer pour chaque poste de travail d'une méthode d'évaluation de la charge de travail à effectuer.

Cette charge sera quantifiée en «heures-hommes». Pour l'entreprise des travaux, cette évaluation de la charge de travail par poste est une activité courante car elle est requise pour les besoins de la planification de la production, cependant, il semble que les concepteurs trouvent des difficultés à avoir des estimations assez précises reflétant la réalité du terrain, au stade d'avant-projet, à cause des imprécisions importantes qui apparaissent à ce niveau.

De manière analogue à celle adoptée par Hamchaoui qui a travaillé sur les assemblages métalliques, et a abouti à la construction d'une base de données, il nous paraît possible d'établir d'autres bases de données spécifiques aux autres sous-ensembles de la structure tels que la poutraison de plancher, les poteaux, les poutres, les palées de stabilité, et pour les fondations (semelles, radiers, pieux, etc.).

Ayant à sa disposition ces bases de données, le concepteur doit régulièrement les mettre à jour (chaque année par exemple) car les coûts horaires et les prix des matériaux peuvent changer rapidement.

## c) Les frais généraux

Les frais généraux sont les frais qui ne peuvent pas être attachés aux opérations du processus de construction bien qu'ils sont liés à cette construction. Il faut distinguer les frais variables et les frais fixes :

- Les frais fixes sont les charges qui incombent au chantier mais qui sont indépendantes du niveau de production. Ils comprennent l'entretien du site de production, les loyers, le personnel de direction (comptabilité, secrétariat,...), etc.
- Les frais variables sont ceux qui varient avec la production, comme par exemple, les assurances, les fluides (eau, électricité, gaz, chauffage), les frais d'exploitation des machines...

Il faut rappeler que l'objectif de cette étude est essentiellement de permettre une comparaison objective des différentes solutions de conception résultant du processus d'optimisation, sur la base du critère du coût global, alors quoique les frais généraux sont non négligeables, ils peuvent ne pas être considérés par le modèle d'évaluation analytique du coût. Il en résulte que le coût considéré dans cette étude comprend les coûts de matériaux et de main-d'œuvre seulement.

### 4.2 Formulation analytique du coût de production global d'une structure : superstructure-fondations

On arrive à l'écriture analytique des principes énoncés ci-dessus. Le coût global d'une construction métallique ( $CG$ ) peut s'écrire :  $(CG) = (CS) + (CF)$

C'est l'Eq. 3 précédente où  $(CS)$  et  $(CF)$  sont respectivement le coût de la superstructure et le coût des fondations.

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

$$(CS) = (Mat) + (Fab) + (Mon)$$

C'est l'Eq. 4 précédente où :

$(Mat)$  : 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 subdivisé en deux entités parties :

$$(CF) = (Ter) + (PrF)$$

C'est l'Eq. 5 précédente où :

$(Ter)$  : Coût des terrassements (fouilles en rigole, puits...).

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

Les composantes du coût global  $(CG)$  c'est-à-dire celles des coûts  $(CS)$  et  $(CF)$  se déterminent de la façon suivante :

#### 4.2.1 Coût des matériaux métalliques

Suite au paragraphe (a) précédent, le coût matière  $(Mat)$  de la superstructure va intégrer les prix des profilés  $(M_p)$  et des assemblages  $(M_A)$ , alors on peut écrire :

$$(\text{Mat}) = (M_p) + (M_A) \quad (15)$$

Le coût matière des profils ( $M_p$ ) sera évalué sur la base de l'expression suivante :

$$MP = Pa \cdot \rho_a \cdot \sum_i^{li} (A_i(l) dl) \quad (16)$$

avec:  $P_a$  : prix unitaire d'une tonne d'acier ; il est obtenu sur consultation du marché des matériaux de construction (environ 1150 Euros au début de l'année 2006);

$\rho_a$  : densité de l'acier ;

$A_i(l)$  : section transversale de l'élément métallique  $i$  ;

$l_i$  : longueur d'un élément métallique  $i$  ;

Dans le cas où on a recours aux profilés standards de sections constantes, cette expression peut être remplacée par :

$$MP = Pa \cdot \sum_i \text{Poi} \cdot l_i \quad (17)$$

$P_{oi}$  : poids par mètre linéaire de profilé, donné par les tableaux des normes [8].

Le coût matière des assemblages ( $M_A$ ) est la somme des coûts élémentaires des différents composants de toutes les attaches, que ce soit entre barres métalliques, entre éléments d'une pièce reconstituée soudée PRS, ou les attaches en pieds de poteaux (platines, boulons, cornières, raidisseurs, goujons, etc...). Leur nombre est noté :  $na$

$$M_A = \sum_{i=1}^{na} \left[ \sum_{j=1}^{nc} P_j \cdot N_j \right] \quad (18)$$

$j$  : matériau donné (1 boulon, 1 tonne de tôle, 1m de cornière 70 x 70 x 7 par exemple, etc.);

$na$  : nombre d'assemblages (poutre-poteau, poutre-poutre, nœud de pièce en treillis, nœud de système de contreventement, ou pied de poteau);

$nc$  : nombre de composants élémentaires d'un assemblage,  $j = 1, \dots, nc$ ;

$N_j$  : quantité requise du matériau  $j$  ;

$P_j$  : prix unitaire du matériau ou composant d'assemblage  $j$  (Euros/unité); il est obtenu sur consultation du marché des matériaux de construction.

#### 4.2.2 Coût de fabrication en atelier

Le coût de fabrication en atelier ( $Fab$ ) est obtenu par décomposition en prix de revient élémentaires d'opérations d'exécution. Le chiffrage des coûts unitaires s'effectue à travers l'estimation des temps d'opérations, puis par l'application d'un coût horaire par opération.

$$Fab = \sum_{i=1}^{ne} \left[ \sum_{j=1}^{no} T_j \cdot C_{h,j} \right] \quad (19)$$

$i$  : indice d'un élément de la structure,  $i = 1, \dots, ne$  ;

$ne$  : nombre des éléments de la structure ;

$j$  : indice d'une opération d'exécution,  $j = 1, \dots, no$  ;

$no$  : nombre d'opérations d'exécution différentes ;

$T_j$  : charge de travail nécessaire pour effectuer l'opération d'exécution  $j$  (heures);

$C_{h,j}$  : coût horaire d'exécution de la tâche  $j$  (Euros/heure). Il doit être actualisé selon les données du marché des entreprises de construction.

Le temps d'exécution d'une opération  $T_j$  est la somme des temps unitaires d'exécution intégrant la préparation, la fabrication et la manutention. Le coût horaire  $C_{h,j}$  comprend le coût de main d'œuvre, mais aussi le coût d'exploitation des machines pour chacune des opérations de fabrication dans l'atelier, et les frais généraux.

Bien que cette équation représente fidèlement le coût total de fabrication, elle masque la diversité et la multitude des opérations élémentaires qui sont incluses dans le processus de fabrication. La difficulté ne réside pas dans le calcul des équations, mais dans le travail de subdivision du processus de fabrication en sous-opérations élémentaires d'exécution.

Alors, pour déterminer les temps  $T_j$  relatifs aux opérations d'exécution des profils (poteaux, poutres, éléments de contreventement...), le concepteur doit développer une base de données en effectuant une enquête auprès de l'entreprise(s) choisie(s) ou candidate(s) à réaliser le projet. Il note les séquences des opérations élémentaires constituantes de chaque opération  $j$  et les chronométrages de temps opératoires  $t_{ij}$ , ensuite il calcule :

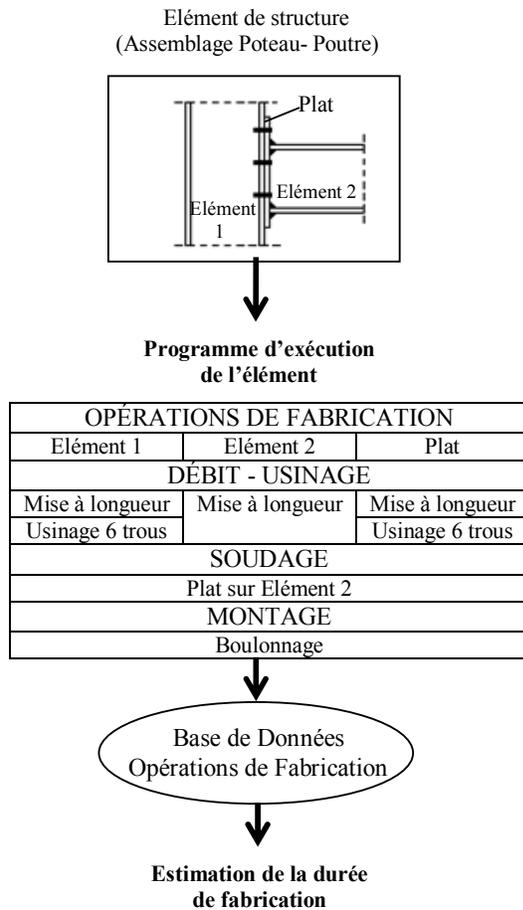
$$T_j = \sum_{i=1}^k t_{ij} \quad (20)$$

où :  $k$  : nombre d'opérations élémentaires  $i$  constituant la tâche  $j$ .

Les principales opérations pour les profils sont les mises à longueur de barres exécutées par sciage en atelier, la manutention avant assemblage et les travaux de peinture anticorrosion ou décorative. On note que le nombre ( $k$ ) et les temps ( $t$ ) sont très dépendants des pratiques de l'entreprise et des machines utilisées, ce qui rend la tâche de généralisation, de la base de données à toutes les entreprises de travaux, quasi impossible.

Les autres opérations de fabrication en atelier concernent essentiellement l'exécution des assemblages. Pour ces derniers, on peut soit utiliser la base de données de Hamchaoui représentée sous forme de programmes d'exécution, où chaque programme est dédié à un type particulier d'assemblage, et permet l'identification des différentes opérations élémentaires nécessaires à la réalisation de l'assemblage [14], soit qu'on élabore une autre base de données en effectuant une enquête de terrain analogue.

En consultant ces bases de données pour profils et assemblages, le concepteur estime les durées élémentaires des différentes opérations d'exécution, ensuite il transforme ces temps en coûts d'opérations élémentaires par l'application des coûts horaires d'atelier selon le schéma de la figure 7. Le coût de fabrication en atelier est alors calculé en additionnant les coûts élémentaires des différentes opérations d'exécution pour l'ensemble des éléments de la structure.



**Figure 7 :** Estimation du temps de fabrication d'un élément de structure

#### 4.2.3 Coût de montage sur site

Pour l'estimation des coûts de montage sur site (Mon), nous avons opté pour un modèle simplifié permettant d'obtenir un coût approximatif par unité de poids de la structure à monter. Le coût (Mon) est très influencé par la complexité des opérations de montage, qui elle dépend essentiellement de la forme des éléments, de leurs dimensions et leurs poids. En outre, la complexité du montage dépend de l'altitude à monter, donc du niveau d'étage dans lequel un élément doit être placé, et dépend de la situation du site, c'est-à-dire s'il s'agit d'une zone à accès facile ou difficile pour les engins et la main-d'oeuvre. Donc, on ajoute deux facteurs :

- hauteur de l'ouvrage, ou comme facteur équivalent : le nombre d'étages,
- situation du site vis-à-vis de la facilité des travaux de Montage (normal, accidenté, urbain, rural...).

Cependant, puisque notre objectif est de comparer des variantes de conception, on juge que si une structure est bien définie des points de vue de sa forme, de sa géométrie et de ses dimensions en plan et en élévation, alors les changements qui concernent la conception de ses liaisons internes (nœuds) et externes (appuis) n'influencent que légèrement la complexité et la durée des opérations de montage. Cette constatation est d'autant plus confirmée si on sait qu'à l'exception des opérations de transport, de manutention et de levage, le plus souvent le montage sur site se limite à des opérations d'assemblage par boulonnage, parce que les opérations de soudage, plus fastidieuses, sont couramment effectuées en atelier.

En conséquence, le coût de montage peut être calculé suivant l'expression simplifiée suivante :

$$Mon = \psi_m \cdot C_m \cdot M \quad (21)$$

$M$  : masse totale de la superstructure métallique ;

$C_m$  : coût de montage par Kg d'acier de superstructure. *Il doit être actualiser constamment en fonction des prix du marché des travaux ou les prix exigés par l'entreprise (actuellement, il vaut en moyenne : 0.65 Euro/Kg).*

$\psi_m$  : coefficient de majoration relatif à la difficulté de l'opération de montage de l'élément considéré. Pour un but de comparaison entre diverses variantes, il peut être pris égal à l'unité.

#### 4.2.4 Coût des terrassement

Le coût des terrassements ( $Ter$ ) peut être calculé par le produit du coût horaire d'exécution d'un m<sup>3</sup> de fouille par le volume d'excavation à réaliser.

Les valeurs de coût moyen, par unité de longueur, de surface ou de volume (cas courant) d'exécution d'une fouille, dépend du type du sol et de la nature des fouilles : rigoles, tranchées, puits, larges excavations. Elles peuvent être obtenues au près des bureaux d'études et entreprises du bâtiment. Ce coût moyen comprend les coûts de la main-d'oeuvre, du carburant (cas où le procédé est mécanique) et de la mise en dépôt des terres déblayées.

$$(Ter) = C_{EM} \cdot \sum_{i=1}^{nf} V_E \quad (22)$$

$C_{EM}$  : coût moyen d'exécution par m<sup>3</sup> des fouilles toutes charges comprises,

$V_E$  : volume d'excavation calculé par majoration du volume de la fondation à réaliser.

$nf$  : nombre de fouilles.

Le volume d'excavation d'une fouille est déterminé en fonction des dimensions de la fondation à réaliser. Il importe de tenir compte d'une majoration de ce volume pour tenir compte des surlargeurs nécessaires à la réalisation des semelles notamment pour des besoins de coffrage, et pour tenir compte aussi de la pente des parois des fouilles dans le cas où ces dernières ne sont pas étayées. On prend en compte pour les dimensions de la zone d'excavation en fond de fouille une surlargeur de 10 %.

Il est aussi judicieux de considérer dans les calculs que les parois de fouilles sont taillées avec une inclinaison moyenne de 30 degrés par rapport à la verticale (figure 8).

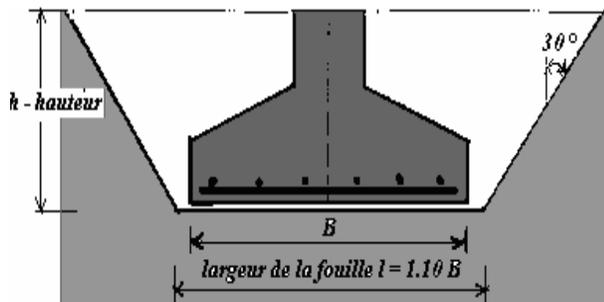


Figure 8 : Calcul du volume d'excavation

#### 4.2.5 Coût de production des fondations

Ce coût que nous désignons par  $(PrF)$  peut être subdivisé selon les opérations d'exécution suivantes :

- le bétonnage : lié au matériau béton,
- le ferrailage : lié au matériau acier pour béton,
- le coffrage : lié à un matériau convenable (bois ou autre).

Les coûts élémentaires incluent les prix de fourniture et des travaux de fabrication traduisant les dépenses en main-d'œuvre et en matériel (achat, location, amortissement).

Alors, on écrit :

$$(PrF) = \sum_{i=1}^{ns} [C_B \cdot V_B + C_C \cdot S_C + C_F \cdot M_F] \quad (23)$$

$C_B$  : coût par  $m^3$  de béton seul d'une fondation  $i$ , toutes charges comprises (matériaux et travaux),  $i=1, \dots, ns$

$ns$  : le nombre d'éléments de fondation : semelles, pieux, ...

$V_B$  : volume de béton de fondation;

$C_C$  : coût par  $m^2$  de coffrage comprenant, toutes charges comprises (matériaux et travaux);

$S_C$  : surface de coffrage;

$C_F$  : coût par Kg d'acier de ferrailage, toutes charges comprises (matériaux et travaux);

$M_F$  : poids total des armatures pour fondations.

Dans le cas où le concepteur préfère une évaluation sur la base d'un coût brut  $C_B'$  par  $m^3$  de béton armé avec toutes charges comprises, y compris les aciers, le coffrage et le coût des travaux (main-d'œuvre et matériel), on écrit :

$$(PrF) = C_B' \cdot V_B \quad (24)$$

Cette pratique est adoptée par plusieurs maîtres d'œuvre malgré ses imprécisions évidentes (telle que la mauvaise considération du taux d'acier de ferrailage par  $m^3$  de béton.

## 5 CONCLUSION

La formulation proposée pour le présent problème d'optimisation laisse apparaître les caractéristiques suivantes :

- Au niveau de la formulation analytique du problème, on peut remarquer que la fonction objectif ainsi que les contraintes ne peuvent pas être exprimées explicitement en fonction des variables d'optimisation. On peut seulement avoir une mesure du coût ou de la valeur d'une contrainte donnée en fonction des valeurs fixées des différentes variables.

- D'autre part, les trois types de variables d'optimisation sont discrètes : les barres sont à choisir dans une liste de profils 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.

- Il est facile de constater aussi que le problème est fortement contraint. Les professionnels de la construction le confirment : il n'est pas facile, au vue des contraintes réglementaires, de construire une solution de conception avec un espace de recherche très élargi par la considération de trois types de variables de conception.

La recherche d'une méthode efficace pour résoudre le problème d'optimisation de la conception globale en construction métallique doit tenir compte des différentes constatations citées ci-dessus.

## RÉFÉRENCES

- [1] Association HQE, Définition des cibles de la qualité environnementale des bâtiments, Paris, France, 1997.
- [2] D. Beasley, D.R. Bull et R.R. Martin (1993), *An overview of Genetic Algorithms: Part1, Fundamentals*, University Computing Journal, Vol.15, N°2, p58-59.
- [3] N. Bel hadj ali, J-C. Mangin, A-F. Cutting Decelle (2002), *Optimisation of steel structures design with genetic algorithms*, Proc. of 3<sup>rd</sup> international conference in decision making in urban and civil engineering, London, U.K., 825-831.
- [4] Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique CGS (2004), *Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 version 2003*, publication du

- CGS, Alger, Algérie.
- [5] Centre Technique Ind. de la Construction Métallique CTICM (1996), *Assemblages flexionnels en acier selon l'Eurocode 3*, édition du CTICM, St Rémy les Chevreuse, France.
- [6] P.G. Ciarlet (1990), *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation*, édition Masson, Paris.
- [7] A. Colson, J.M. Hottier, A. Moricet (1996), *Modèles simplifiés d'assemblages semi-rigides – Analyse comparative*, Revue Construction Métallique N° 4-1996, p55-67, édition du CTICM, St Rémy les Chevreuse, France.
- [8] Comité Européen de Normalisation CEN (2005), *Profilés Européens laminés*, Bruxelles, Belgique, <http://www.cenorm.be>
- [9] Comité Européen de Normalisation CEN (1992), *Design of steel structures, Eurocode 3 part 1.1, European Pre-Standard ENV 1993-1-1*, Bruxelles, Belgique.
- [10] E.P. Deiman, H.T. Platt (1993), *Cost Information in Succeeding Stages of the Design Process*, proc. 4<sup>th</sup> EuroPIA International Conference on the Application of AI, Robotics and Image Processing (Advanced Technologies), Elsevier Science Publisher, 402-412.
- [11] H.G.A. Evers, IR.F. Maatje (2000), *Cost based engineering and production of steel constructions*, proc. 4<sup>th</sup> international workshop on connections in steel structures, Roanoke, VA, USA, 14-23.
- [12] D.B. Fogel (1997), *Evolutionary Computation: A New Transactions*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, n°1, p. 1.
- [13] Guide de conception et de réalisation (1993), *Construire en acier*, publications du *Moniteur*, Paris, France.
- [14] M. Hamchaoui (1997), *Conception économique des assemblages en Construction Métallique*. Thèse de doctorat en génie civil, Université de Savoie, France.
- [15] F. Hayes-Roth, D. Waterman, D.Lenat (1983), *Building Expert Systems*, édition Addison-Wesley.
- [16] J.P. Jaspard, D. Vandegans (1997), *Application de la méthode des composantes aux pieds de poteaux*, Revue Construction Métallique N° 2-1997, p3-17 et N° 3-1997 p3-13, éditions du CTICM, St Rémy les Chevreuse, France.
- [17] P. Jayachandran (2003), *Design of tall buildings: Preliminary Design and Optimisation*, International Conference on Tall Buildings and Industrial Structures, Coimbatore, India, Keynote Lecture (Conférence Invitée).
- [18] S. Khajehpour (2001), *Optimal Conceptual Design of High-Rise Office Buildings*, PhD thesis in civil engineering, Waterloo University, Ontario, Canada.
- [19] J.P. Nougier (1987), *Méthodes de calcul numérique*, édition Masson, Paris.
- [20] P.Y. Papalambros (2002), *The optimization paradigm in engineering design*. Journal Computer-Aided Design, N°34-2002, p939-951, Elsevier Science Publisher.
- [21] M.Y. Rafiq (2000), *A design support tool for optimum building concept generation using a structured genetic algorithm*. International Journal of Computer Integrated Design and Construction, Volume 2-2000, N°2, 92-102.
- [22] B. Roy (1985), *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, édition Economica, Paris France.
- [23] S. Sellami, J-C. Mangin, A-F. Cutting Decelle (2000), *Recherche de règles de conception globale des fondations et de la superstructure en Construction Métallique*, Revue Construction Métallique N° 1-2000, p5-12, édition du CTICM, St Rémy les Chevreuse, France.
- [24] M. Steenhuis, K. Weynand, M. Gresnigt (1998), *Strategies for economic design of unbraced steel frames*. Journal of Construction Steel Researches, 46(1): 88-89, AISC, USA.
- [25] W.M.K. Tizani, D.A. Nethercot, G. Davies, N.J. Smith, T.J. Macarthy (1996), *Object-oriented fabrication cost model for the economic appraisal of tubular truss design*, Advances in Engineering Software Journal, N° 27, 11-20.