

Dimensionnement optimal des structures métalliques à poutres par les algorithmes génétiques

Z. EL MASKAOUI¹, L. BOUSSHINE¹ & G. GUERLEMENT²

1. ENSEM, Université Hassan II CASABLANCA, Equipe de Mécanique des Structures et des Matériaux, Maroc
elmaskaoui@ensem.ac.ma

2. Faculté Polytechnique, Université de Mon, Belgique,

Résumé

Dans cet article, nous proposons une méthode d'optimisation du poids des structures métalliques formées de poutres en respectant les contraintes de dimensionnement définies par la réglementation Eurocode 3. Cette méthode d'optimisation, basée sur l'application des Algorithmes Génétiques, consiste à minimiser une fonction objective représentant le poids de la structure et dont les variables de conception sont les sections des poutres. Ces sections sont choisies à partir d'un catalogue de profilés. Les contraintes de dimensionnement englobent la résistance mécanique des sections et des éléments, la limitation des déplacements aux nœuds et la limitation de la première fréquence propre de la structure.

Mots clefs : *Optimisation, Algorithmes génétiques, construction métallique, Eurocode 3.*

1. Introduction

Durant ces dernières années, plusieurs heuristiques ont prouvé leur efficacité pour la résolution des problèmes d'optimisation des structures métalliques. Parmi ces méthodes, on trouve les algorithmes génétiques (AG) qui ont été utilisés récemment pour la résolution de certains problèmes d'optimisation de structures où ils ont montré de nombreux avantages par rapport aux méthodes classiques d'optimisation. Ainsi, nous présentons, dans cet article, une étude d'optimisation basée sur l'utilisation des AG pour minimiser le poids des structures métalliques formées de poutres. Les variables de conception sont les sections des poutres. Les contraintes d'optimisation sont issues des exigences du code de construction métallique Eurocode3 (EC3). L'analyse statique et l'analyse modale sont obtenues par un code éléments finis réalisé dans ce but [1].

2. Les algorithmes génétiques

Les AG sont des algorithmes d'optimisation stochastique qui s'inspirent fortement des mécanismes biologiques liés aux principes de sélection et d'évolution naturelle [2]. Un AG fera évoluer un ensemble de solutions, appelé population, aléatoirement initialisé, dans le but de guider efficacement la recherche vers de bonnes solutions dans l'espace de recherche. La recherche est

réglée par trois opérateurs [2]. qui sont appliquées successivement pendant deux phases. La phase de coopération qui fait appel aux opérateurs de sélection et de croisement et la phase d'adaptation individuelle qui fait appel à l'opérateur de mutation pour générer de nouveaux gènes. Les AG utilisent un codage des éléments de l'espace de recherche et non pas les éléments eux-mêmes. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données, appelée chromosome, qui synthétise toute l'information liée à ces derniers. L'efficacité de l'AG va donc dépendre du choix du codage des chromosomes. Dans notre algorithme nous utilisons un codage binaire pour coder l'ensemble des sections de l'espace de recherche.

3. Formulation du problème d'optimisation

Le problème d'optimisation consiste à minimiser le poids de la structure défini par la formule :

$$W = \rho \sum_{j=1}^{n_e} A_j L_j \quad (1)$$

avec A_j est la section de la barre j , L_j est la longueur de la barre j , ρ est la masse volumique du matériau et n_e est le nombre des barres,

Les contraintes de dimensionnement sont celles définies par la réglementation EC3 et qui sont :

– La résistance des sections transversales (EC3, 5.36) :

$$\frac{N_{Edi}}{N_{Rdi}} + \frac{M_{y,Edi}}{M_{y,Rdi}} + \frac{M_{z,Edi}}{M_{z,Rdi}} \leq 1.0 \quad i = 1, \dots, n_e \quad (2)$$

où N_{Rd} est la valeur de la résistance à l'effort normal, N_{Ed} est la valeur de calcul de l'effort normal dans la barre, $M_{y,Rd}$ est la valeur de la résistance aux moments de flexion par rapport à l'axe y , $M_{y,Ed}$ est la valeur de la résistance aux moments de flexion par rapport à l'axe y , $M_{z,Ed}$ et $M_{z,Rd}$ sont les valeurs de calcul des moments maximaux dans la barre.

– La résistance des poteaux au flambement (EC3, 5.51) :

$$\frac{N_{Edi}}{\chi_{y_i} N_{Rdi}} + k_{y_i} \frac{M_{y,Edi}}{M_{y,Rdi}} + k_{z_i} \frac{M_{z,Edi}}{M_{z,Rdi}} \leq 1 \quad i = 1, \dots, n_p \quad (3)$$

où χ_y est le facteur de réduction dû au de flambement, k_y et k_z sont les facteurs d'interaction et n_p est le nombre des poteaux.

– La limitation des flèches horizontales aux sommets des poteaux :

$$u_i \leq u_{i \max} \quad i = 1, \dots, n_p \quad (3)$$

– La limitation des flèches verticales aux centres des poutres :

$$v_i \leq v_{i \max} \quad i = 1, \dots, n_p \quad (4)$$

– La limitation de la première fréquence propre f_p de la structure :

$$f_p \geq f_{\min} \quad (5)$$

Pour tenir compte des contraintes d'optimisation dans les AG plusieurs techniques ont été utilisées dans la littérature. Dans ce papier on intègre à la fonction objective des pénalités pour les individus qui ne respectent pas ces contraintes. Cette méthode de pénalisation permet de minimiser sans contraintes la fonction suivante :

$$\Phi = W \left(1 + C \sum_{i=1}^{n_c} P_i \right) \quad (6)$$

avec C est une constante à choisir selon le problème, n_c est le nombre de contraintes et P_i est la valeur de la pénalisation évaluée pendant chaque génération de la façon suivante :

$$P_i = \begin{cases} g_i & \text{si } g_i > 0 \\ 0 & \text{si } g_i \leq 0 \end{cases} \quad i=1, \dots, n_c. \quad (7)$$

g_i est la valeur de la contraintes (Eq. 2 à 6) normalisée.

La fonction d'adaptation de l'individu i utilisée dans ce travail est [3] :

$$F_i = [\Phi_{\max} + \Phi_{\min}] - \Phi_i \quad (8)$$

avec Φ_{\max} et Φ_{\min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale de la fonction Φ calculées pendant la génération actuelle.

4. Dimensionnement optimal d'un portique plan

Dans cet exemple, nous présentons, les résultats d'optimisation par les AG du poids d'un portique plan de la figure 1. Les sections des poteaux sont de type HEB et celles des traverses sont de type IPE. Les poutres qui devront avoir la même section font partie du même groupe qui sera par la suite une variable de conception. Ainsi, on aura quatre variables de conception (tableau 1). Le matériau utilisé est l'acier S235. Les contraintes d'optimisation sont données par les équations 2 à 6. Les déplacements maximaux sont $u_{x \max} = 1.8 \text{ cm}$ et $u_{y \max} = 2.4 \text{ cm}$. La première fréquence propre dans la structure doit être supérieure à 6 Hz. A ces contraintes nous ajoutons des contraintes technologiques dues aux assemblages (fig. 3). Elles sont exprimées par :

$$b_j \leq b_i \quad (9)$$

où b_i et b_j sont les largeurs des barres i et j .

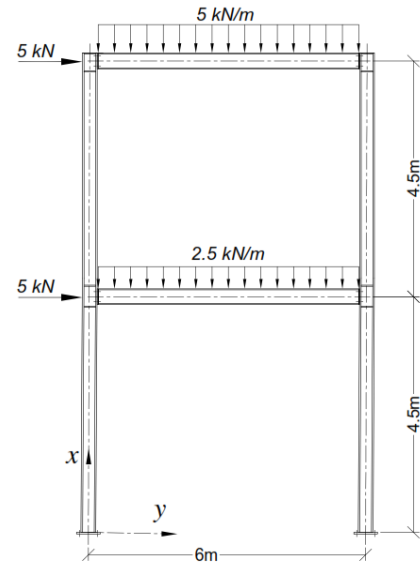


Fig. 1: Portique à 2 étages

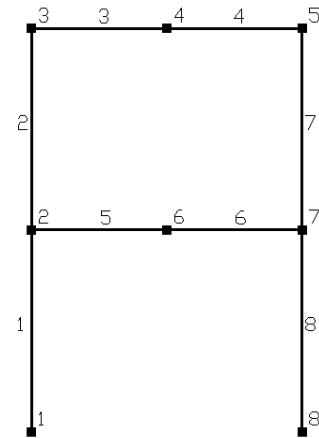


Fig. 2: Maillage du portique

Tableau 1 : Variables de conception

Groupe	Eléments	Type de section
1	1 8	HEB
2	2 7	HEB
3	3 4	IPE
4	5 6	IPE

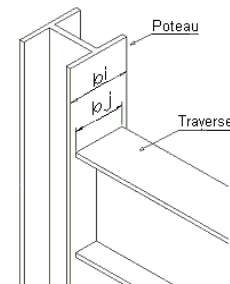


Fig. 3 : Contraintes technologiques

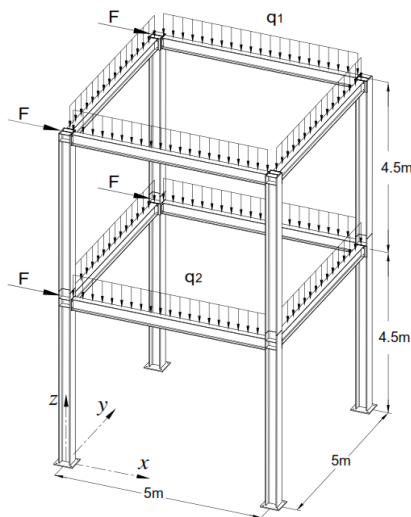
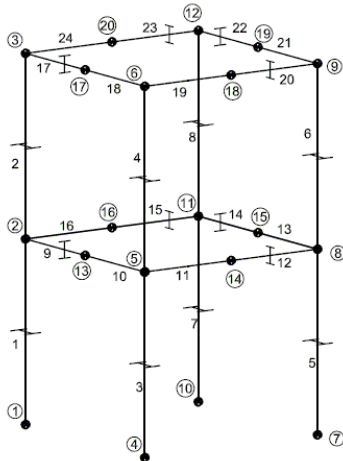
La solution obtenue après 10 lancements est donnée au tableau 2. Cette solution correspond à un poids minimal de la structure de 1300.56 kg et à une première fréquence propre dans la structure de 6.12 Hz. Le déplacement horizontal maximal est 1.68 cm et la flèche maximale est 1.64 cm.

Tableau 2 : Solution d'optimisation du portique plan

Variables de conception	Eléments	Solution optimale
1	1 8	HE200B
2	2 7	HE140B
3	3 4	IPE160
4	5 6	IPE360
1ère fréquence propre		6.12 Hz
Poids		1300.56 kg
Taille de la population : 80 - Génération maximale : 60		
Probabilités de croisement $p_c = 0.80$		
Probabilités de mutation $p_m = 0.002$		

5. Dimensionnement optimal d'un portique tridimensionnel

Dans ce deuxième exemple nous traitons un portique tridimensionnel à deux étages (fig. 4). Le portique est sujet à son poids propres et à des charges nodales ($F = 6.25\text{kN}$) et réparties ($q_1 = 1.5\text{kN/m}$ et $q_2 = 6\text{kN/m}$). Le matériau utilisé est l'acier S235. Les variables et les paramètres de conceptions sont donnés aux tableaux 3 et 4.

**Fig. 4: Portique spatial****Fig. 5: Maillage du portique****Tableau 3 : Variables design**

Variable de conception	Eléments
1	1-3-5-7
2	2-4-6-8
3	9 à 16
4	17 à 24

Tableau 4 : Paramètres de conception

Grandeur	valeur
Flèche horizontale maximale	1.2 cm
Flèche verticale maximale	2.0 cm
Fréquence propre minimale	4 Hz

La solution optimale est donnée au tableau 5. Cette solution correspond à un poids minimal de la structure de 3456.28 kg et à une première fréquence propre dans la structure de 4.035Hz.

Tableau 5 : Résultats de l'optimisation

Variable de conception	Solution optimale
1	HE280B
2	HE160B
3	IPE220
4	IPE180
Masse =	3456.28 kg
Fréquence =	4.035 Hz
	$U_{x\max} = +1.35 \text{ cm}$
	$U_{z\max} = -0.98 \text{ cm}$

6. Conclusion

A travers ce papier nous avons essayé de montrer que l'utilisation des algorithmes génétiques, comme outil d'aide à la conception pour guider l'ingénieur vers des solutions optimales, est une approche prometteuse. En effet, ils n'exigent aucune condition sur la fonction objective (linéarité, dérivabilité, etc.) et peuvent prendre en compte certains contraintes, portant par exemple sur la faisabilité et l'esthétique. Ils sont peu coûteux en temps machine et permettent de trouver des solutions potentielles proches de l'optimum. Ce qui justifie leur utilisation à la place des méthodes déterministes de type gradient ou de programmation linéaire. Cependant, les nombreux paramètres qui les contrôlent sont délicats à régler notamment les probabilités de croisement et de mutation peuvent faire varier radicalement la vitesse de convergence est la qualité des résultats.

Références

- [1] El Maskaoui Z., Bousshine L., Guerlement G., (2007) Programmation orientée objet- Application à la conception d'un logiciel de calcul des structures métalliques par éléments finis sous AutoCAD. Congrès de Mécanique, Maroc, El Jadida.
- [2] Goldberg D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., New York, N.Y.
- [3] Erbatur F., Hasancebi O., Tutuncu I., Kılıç H., (2000) Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. Computer and Structures; 75, 209–224.