

CALCUL DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ POUR LES STRUCTURES EN CHARPENTE MÉTALLIQUE

O. Amellal¹, M. Bensaïbi²

Département de Génie Civil, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie.

¹amellalomar@gmail.com

²bensaibim@yahoo.co.uk

RESUME : L'Algérie dispose d'un important parc industriel constitué essentiellement de structures en charpente métallique. Ces structures comportent des infrastructures importantes allant des ensembles pétrochimiques aux différentes usines d'assemblage et autres. Ces installations représentent un investissement lourd pour le pays ou pour les particuliers; or ces infrastructures sont situées sur des territoires souvent sujets aux actions sismiques. Le comportement sismique de cet ensemble de structures est peu connu. Sa vulnérabilité n'a pas fait l'objet d'études détaillées. Nous nous proposons d'estimer la vulnérabilité sismique de ce type de structure à travers l'utilisation de la méthode de l'indice de vulnérabilité. Nous avons déterminé les paramètres ayant une influence sur la réponse sismique des structures en charpente métallique, puis nous les avons quantifiés. Cette quantification a permis d'explicitier l'indice de vulnérabilité.

Ceci nous a permis, par ailleurs, d'établir, une classification de la vulnérabilité de ces structures. Pour ce faire, une fiche technique a été développée. Cette dernière regroupe les informations nécessaires à l'évaluation des constructions métalliques. Le traitement de cette fiche ainsi que la classification des constructions ont été réalisés par un logiciel élaboré avec « Delphi », appelé « VIP » pour Vulnerability Index Program.

Des exemples de validation et d'application ont été traités. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Mots-clés : Vulnérabilité sismique, Structure charpente métallique, Indice de vulnérabilité, Algérie.

1. Introduction

Les structures industrielles sont souvent réalisées en charpente métallique Ref. [1]. L'engouement pour ce type de construction s'explique d'une part, pour des raisons pratiques à savoir : rapidité d'exécution, délais de constructions et d'autre part pour des considérations techniques Refs. [2 - 4]. L'Algérie dispose d'un important parc industriel constitué essentiellement de structures en charpente métallique Ref. [5].

Lors des séismes, les structures en charpente métallique peuvent subir des dommages importants, pouvant aller jusqu'à la paralysie des activités Refs. [6, 7]. L'arrêt des activités a un impact direct sur la production et le pouvoir d'achat, sans oublier les pertes en vies humaines en cas d'effondrement Refs. [8,9].

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures en charpente métallique a fait l'objet de quelques études. Ces études étaient soit des études à grande échelle soit des études détaillées Refs. [11,12]. Les méthodes à grande échelle traitent sommairement ce type de constructions et donc ne donnent qu'une évaluation globale Refs. [13,14]. Les méthodes détaillées nécessitent des moyens considérables et des personnes qualifiées, ce qui augmente leurs coûts considérablement et ne peuvent donc être utilisées que pour des structures ciblées Ref.[15]. Une méthode intermédiaire fait l'objet de notre travail où un compromis est possible entre ces deux échelles, lequel compromis concernera l'étude d'une dizaine de bâtiments ou d'un quartier. Cette méthode est la méthode de « l'indice de vulnérabilité » Refs. [16, 17,18].

2. Méthode de l'indice de vulnérabilité

Cette approche considère un certain nombre de paramètres de nature structurale et non structurale, relatif aux constructions à ossature métallique. Ces paramètres choisis sont identifiés a priori comme participant à la

vulnérabilité globale de la structure, c'est-à-dire influant sur la réponse sismique.

Ces derniers sont déterminés par des observations post-sismiques et des retours d'expérience des séismes passés. Les paramètres pris en compte sont:

1. Ductilité
2. Capacité sismique
3. Qualité des assemblages
4. Maintenance
5. Type de sol
6. Diaphragme horizontal
7. Régularité en plan
8. Flambement de la structure
9. Modifications
10. Régularité en élévation
11. Entrechoquement
12. Implantation de l'ouvrage
13. Toiture
14. Détail

Parmi ces paramètres nous avons la ductilité, la capacité portante et le flambement qui nécessitent des calculs. Les autres sont liés à l'observation directe. Nous allons expliciter un des paramètres les plus importants à savoir la ductilité.

Sous l'effet d'action sismique de forte intensité, les structures subissent des déformations se situant très largement dans le domaine post-élastique. Ceci est dû à la faculté de l'acier à dissiper l'énergie due à son comportement non linéaire (ductilité).

Pour tenir compte de ces incursions, dans le domaine post-élastique, les codes considèrent un coefficient réducteur. Ce coefficient est appelé facteur de comportement ou coefficient de réduction.

Dans le code parasismique algérien RPA 99 version 2003, le facteur de comportement est défini par un coefficient « R » donné dans le tableau 1.

Tableau 1 : Valeur des facteurs du comportement dans le RPA 99 pour les structures en acier

Description du système de contreventement pour les structures en acier	Valeur de R
1- Portiques auto stables ductiles	6
2- Portiques auto stables ordinaires	4
3- Ossatures contreventée par palées triangulées en X	4
4- Ossatures contreventée par palées triangulées en V	3
5- Mixte portiques/palées triangulées en X	5
6- Mixte portiques/palées triangulées en X	4
7- Portique en console verticale	2
8- Ossature métallique contreventement par diaphragme	2

Selon le facteur de comportement, nous proposons de classer les structures en trois classes définies dans le tableau 2 comme suit :

Tableau 2 : Ductilité suivant le facteur de comportement pour les structures en charpente métallique

Niveau de ductilité	Valeur du facteur de comportement « R »
Bonne ductilité : Classe A	[6-4]
Ductilité moyenne : Classe B	[4-2]
Ductilité faible : Classe C	≤ 2

3. Quantification des paramètres considérés

Une pondération des paramètres identifiés a été proposée (tableau 3) sur la base d'un calcul statistique dans le sens où on dispose d'une base de données contenant 297 constructions en charpente métallique ayant été endommagées lors de différents séismes à travers le monde et en Algérie; ces pondérations expriment la qualité sismique des éléments structuraux et non structuraux et ne peuvent prendre qu'une seule valeur de vulnérabilité. Trois classes sont définies : classe A, B et C.

La classe A : traduit une bonne résistance de ce paramètre à l'action sismique .

La classe C : traduit un mauvais comportement aux effets du tremblement de terre.

La classe B : représente une situation intermédiaire.

Tableau 3 : Les facteurs « Ki » proposés pour chaque paramètre en fonction de la classe

N°	Éléments	Classes / Ki		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Ductilité	0.00	0.08	0.15
2	Capacité sismique	0.02	0.07	0.09
3	Qualité des assemblages	0.02	0.08	0.15
4	Maintenance	0.02	0.06	0.08
5	Type de sols	0.03	0.04	0.05
6	Diaphragme horizontal	0.03	0.04	0.05
7	Flambement de la structure	0.03	0.06	0.08
8	Régularité en plan	0.03	0.04	0.05
9	Modification	0.03	0.04	0.05
10	Régularité en élévation	0.03	0.04	0.05
11	Entrecroisement	0.03	0.04	0.05
12	Implantation de l'ouvrage	0.03	0.04	0.05
13	Toiture	0.03	0.04	0.05
14	Détails	0.03	0.04	0.05

La somme des valeurs numériques nous donne une valeur appelée « indice de vulnérabilité » Eq. (1). Il caractérise la qualité sismique du bâtiment.

$$I_v = \sum_{i=1}^{14} K_i \quad (1)$$

En fonction de la valeur de « I_v » calculée qui caractérise le taux de dommage que pourrait subir le bâtiment pour un séisme donné, la structure étudiée peut appartenir à l'une des trois classes que nous avons définies et données dans le tableau 4.

Tableau 4 : Classification des structures en fonction de leur « I_v »

Classe	Verte	Orange	Rouge
I_v	[0.36 - 0.54]	[0.54 - 0.85]	[0.85 - 1]

Ces classes sont définies comme suit :

Classe verte : $0.36 \leq I_v < 0.54$: la structure présente une bonne résistance au séisme.

Classe orange : $0.54 \leq I_v < 0.85$: le bâtiment présente une résistance moyenne vis-à-vis du séisme.

La structure nécessite un renforcement ou une étude plus approfondie.

Classe rouge : $0.85 \leq I_v < 1$: cette classe, exprime que la construction a une résistance faible au séisme.

La quantification des différents paramètres se fait sur site à travers le remplissage d'une fiche technique développée spécifiquement.

4. Elaboration de la fiche technique

Afin d'estimer la vulnérabilité des structures en charpente métallique, des informations sont nécessaires. La démarche repose sur l'analyse visuelle au préalable des facteurs apparents de la construction. Ceci nécessite des enquêtes menées sur le terrain. Suivant les paramètres choisis, une fiche technique d'enquête a été élaborée, pour identifier et quantifier l'état des paramètres choisis. Cette fiche technique contient :

1. Données générales
2. Eléments structuraux
3. Maintenance
4. Type de sol
5. Caractéristiques géométriques
6. Système structural

5. Programme développé

Un programme de calcul appelé Vulnérability Index Program « VIP » a été développé en DELPHI. Il a pour but de pouvoir calculer l'indice de vulnérabilité des structures en charpente métallique grâce aux informations recueillies dans la fiche technique élaborée lors des visites effectuées sur le terrain. Cette procédure a facilité la tâche et a généré un gain de temps dans le traitement des informations.

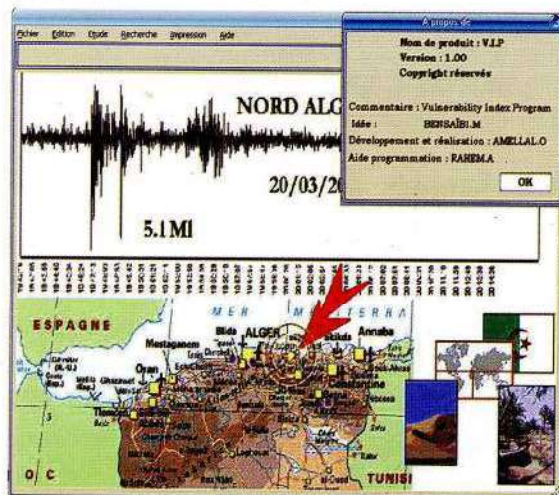


Figure 1 : Page d'accueil.

L'étude d'une structure exige d'abord d'introduire la fiche technique élaborée à cet effet (Fig. 2)

Figure 2 : Pages d'introductions des données.

Une fois les champs remplis, le programme procède à l'évaluation des différents paramètres. Le calcul des paramètres Fig. 3 nous donne la classification et les valeurs de K_i de chaque paramètre, ainsi que l'indice de vulnérabilité et la classification de la structure.

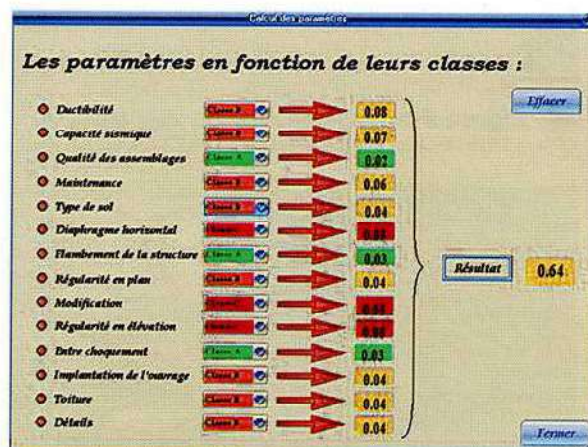


Figure 3: calcul des paramètres et classification de la structure.

6. Application

Plusieurs exemples ont été traités par le programme développé. Nous donnons ici deux exemples étudiés.

6.1. Exemple de l'usine de fabrication de sulfate

Le bâtiment métallique « activation filtration », de l'unité ENOF sise à Maghnia, est un ouvrage en charpente métallique réalisé en trois phases à des dates différentes durant les années 1949-1951 et 1961. Les photos ci-dessous donnent une idée de l'état de l'usine.

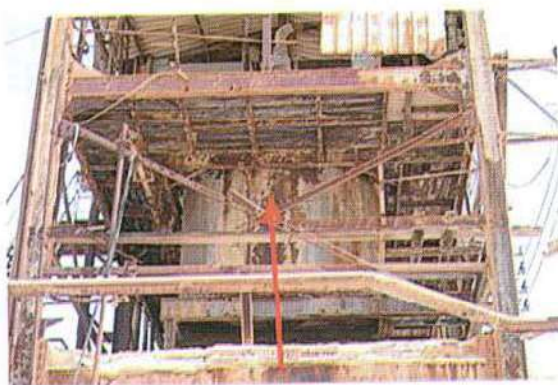


Figure 4 : Dégradations du système de contreventement



Figure 5 : Forte dégradation et corrosion très avancée des pieds de poteaux.



Figure 6 : Manque de boulons et endommagement des assemblages.



Figure 7 : Altération profonde des poutres et des planchers.

Le tableau 5 donne les résultats donnés par notre programme.

Tableau 5 : Résultat de l'application de l'usine de fabrication de sulfate

N°	Eléments	Classe	Coefficient Ki
1	Ductilité	B	0.08
2	Capacité sismique	C	0.09
3	Qualité des assemblages	C	0.15
4	Maintenance	C	0.08
5	Type de sols	C	0.04
6	Diaphragme horizontal	C	0.05
7	Flambement de la structure	C	0.08
8	Régularité en plan	C	0.05
9	Modification	B	0.04
10	Régularité en élévation	C	0.05
11	Entrechoquement	B	0.04
12	Implantation de l'ouvrage	A	0.03
13	Toiture	B	0.04
14	Détails	C	0.05

Ceci donne un indice de vulnérabilité $I_v = 0.87$. Il est compris entre $[0.85 - 1]$. Cette construction est donc classée ROUGE. Dans son rapport d'expertise, le CTC (Contrôle Technique de la Construction) suggère la démolition et la reconstruction de l'usine selon les normes en vigueur.

Les deux conclusions sont en adéquation.

6.2. Exemple de l'usine de fabrication de zinc

Cette usine a été inaugurée en 1975. Elle est composée de quatre parties : fabrication, stockage, maintenance et administration. Il est à signaler que le processus de fabrication de zinc dégage du H_2SO_4 qui est très nocif pour le métal car il accélère le processus de corrosion.

L'usine est construite en bord de mer sur un terrain sablonneux et limitée vers le sud par une grande falaise. Les photos 8 à 11 ont été prises sur site lors de notre passage.

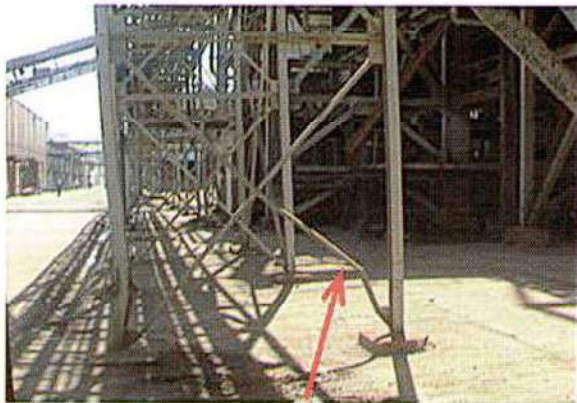


Figure 8 : Déformation des contreventements.



Figure 9 : Flambement des poteaux.



En toiture



A la base

Figure 10 : Joint sismique vu de l'extérieur.

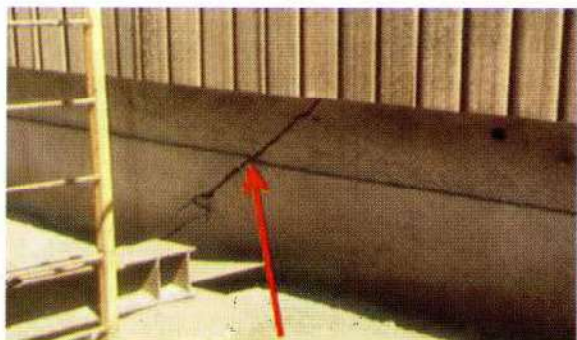


Figure 11 : Fissures à 45 degrés à deux sens de par et d'autre du joint.

Le tableau 6 résume les résultats obtenus:

Tableau 6 : Résultats de l'application à l'usine de fabrication de zinc

N°	Eléments	Classe	Coefficient K _i
1	Ductilité	B	0.08
2	Capacité sismique	B	0.07
3	Qualité des assemblages	B	0.08
4	Maintenance	B	0.06
5	Type de sols	C	0.05
6	Diaphragme horizontal	B	0.04
7	Flambement de la structure	B	0.06
8	Régularité en plan	C	0.05
9	Modification	A	0.03
10	Régularité en élévation	C	0.05
11	Entrechoquement	C	0.05
12	Implantation de l'ouvrage	C	0.05
13	Toiture	B	0.04
14	Détails	C	0.05

Le programme donne un $I_v = 0,76$. Il est compris entre $[0,54 - 0,85]$. Cette construction est donc classée ORANGE, ce qui semble conforme aux observations effectuées lors de notre visite sur site.

7. Conclusion

La méthode de l'indice de vulnérabilité pour les structures en charpente métallique a été développée et présentée dans cette étude. Cette méthode est une approche intermédiaire entre les méthodes de vulnérabilité à grande échelle et les méthodes détaillées.

La classification proposée et les résultats obtenus sont en adéquation avec l'observation in situ. Aussi, cette méthode peut être utilisée par les ingénieurs même débutants pour estimer la qualité sismique de ce type de construction.

8. Références bibliographiques

- [1] Zacek, M., *Construire parasismique*, Edition Parenthèses, Marseille, France, 1996.
- [2] AFPS., *Guide de la Conception Parasismique des Bâtiments*, Edition Eyrolles, Paris, France, 2004.
- [3] Davidovici, V., *Construction en Zone Sismique.*, Publisher the Moniteur. Paris, France, 1999.
- [4] Wolfgang, J., *Règles de construction parasismique PS 92*, Publisher Eyrolles, Paris, France, 2003.
- [5] *Règles de Conception et de Calcul des Structures en acier CCM 97*, Algérie, 1997.
- [6] *Règles parasismiques Algériennes RPA 99 modifiées en 2003*, Algérie, 2003.
- [7] Azouz, H., *Description de l'état post sismique lors du séisme 21 mai 2003*, Revue Technique CTC/Chlef, Algérie, Février 2003.
- [8] AFPS., *Vulnérabilité Sismique du Bâtis Existant. Cahier technique: 25*, France, 2005.
- [9] Bensaïbi, M., Notes de cours vulnérabilité des structures, Université de Blida, Algérie, 2007.
- [10] Nollet, M.J., *Evaluation de la Vulnérabilité Sismique des Bâtiments Existant, cahier technique de l'ETS*, Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, Montréal, Canada, 2004.
- [11] Akkase, M.N., Thoughts on Concepts of Seismic Hazards, Vulnerability and seismic Risk, 9th European confer on Earthequake engineering Vol X. 2006.
- [12] Lang, K., Seismic Vulnerability of Exesting Building, thèse de doctorat, Swiss Federal institute of technology, Zurich, Suisse, 2002.
- [13] RISK-UE., *An advanced approach to earthquake risks scenarios with applications to different European towns*, WP4 : Vulnerability of current building, EVK4-CT-2000- 00014, 2003
- [14] Giuseppe Carlo Marano., Rita Greco., Emiliano Morrone., « Analytical evaluation of essential facilities fragility curves by using a stochastic approach » Original Research Article Engineering Structures, Volume 33, Issue 1, January 2011.
- [15] Adil Emre Özel., Esra Mete Güneyisi., «Effects of eccentric steel bracing systems on seismic fragility curves of mid-rise R/C buildings: A case study» Original Research Article Structural Safety, Volume 33, Issue 1, January 2011.
- [16] Benedetti, D., Petrini, V., «On the Seismic Vulnerability of Masonry Buildings: Proposal of Year Procedure Evaluation» The Industry of Construction, Volume 18, 1984.
- [17] Bensaïbi, M., Djaalali, F., Belheouane, F. I., Amellal, O., Yousfi, N., « Seismic vulnerability index method: Algerian case studies», 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 7-8 March, 2011.
- [18] Amellal, O., Détermination de l'indice de vulnérabilité des constructions en charpente métallique, Thèse de magistère, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2008.