EFFETS DE LA DISTRIBUTION NON-UNIFORME DE MASSE SUR LA RÉPONSE SISMIQUE DES BÂTIMENTS À OSSATURE EN BÉTON ARMÉ UTILISANT LA MÉTHODE DE POUSSÉE ADAPTATIVE

EFFECTS OF NON-UNIFORM MASS DISTRIBUTION ON SEISMIC RESPONSE OF RC FRAME BUILDING USING ADAPTIVE PUSHOVER

Réception : 17/05/2025 **Acceptation : 22/05/2025** **Publication : 10/06/2025**

HEMSAS Miloud[1], HENTRI Mohammed[2], MEKKI Mohammed[3]
[1]LSTE Laboratory, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, University Mustapha Stambouli, Mascara, Algeria- email: m.hemsas@univ-mascara.dz
[2]LSTE Laboratory, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, University Mustapha Stambouli, Mascara, Algeria- email: m.hentri@univ-mascara.dz
[3]LM2SC Laboratory, Department of Civil Engineering, Faculty of Architecture and Civil Engineering, University of Sciences and Technology, Oran, Algeria-email: mohammed.mekki@univ-usto.dz

Résumé - L'un des facteurs influant la performance sismique d'un bâtiment à plusieurs étages est la répartition des masses sur toute la hauteur. Dans cet article, cette problématique a été abordée pour les bâtiments en béton armé, présentant une irrégularité de masse, qui entraîne, lors de séismes majeurs, de graves dommages sur toute la hauteur du bâtiment. La plupart des règlements internationaux autorisent l'utilisation de techniques d'analyse simples, telle que la méthode statique équivalente uniquement pour les structures qui exhibent certaines limites de régularité. La présente étude décrit une méthode simple et efficace pour quantifier les limites d'irrégularité, au moyen d'une analyse en poussée progressive adaptative basée sur les déplacements et non pas sur les efforts. A cette fin, une structure à ossature régulière de dix étages a été sélectionnée et modifiée en intégrant l'irrégularité verticale des masses sur différents endroits afin d'évaluer la réponse de quelques paramètres essentiels tels que les efforts de cisaillement à la base, le déplacement du toit et la répartition des déplacements inter-étages. Les résultats ont montré que l'effet des irrégularités de masse est relativement faible sur les demandes en déplacements inter-étages maximales par rapport à la structure de référence. Lorsque l'augmentation de la masse est présente à mi-hauteur, les structures ont généralement tendance à produire des demandes inférieures à celles de la structure de référence. Il a été constaté que l'irrégularité de masse est quasiment risquée et conservatrice et que la structure irrégulière doit être conçue de manière à répondre aux exigences de la conception parasismique.

Mots - clés : Structure irrégulière, Performance, Poussée adaptative, Irrégularité de masse, Demandes sismiques.

Abstract: The mass distribution throughout the building's height is one of the elements affecting a multi-story building's seismic performance. This paper addresses the problem of reinforced concrete buildings with mass irregularities that cause severe damage throughout the building's height during large earthquakes. The majority of international regulations restrict the application of basic analysis methods, like the Equivalent Static Method, to structures that meet specific regularity thresholds. In lieu of using a force-based design approach, the current study presents a straightforward and efficient way to quantify these irregularity limits using an adaptive pushover analysis based on displacements. To achieve this, a ten-story regular frame structure was chosen, and its vertical irregularity at various locations was integrated to modify the structure and estimate the response of some important parameters, including base shear forces, roof displacement, and inter-story displacement distribution. In comparison to the reference structure, the results demonstrated that the impact of mass irregularities on the maximum inter-story displacement is negligible. When the increased mass was present at the top, the structures generally tended to produce lower demands than the reference structure. It was found that mass irregularity is almost risky and conservative, and the irregular structure should be designed to meet the requirements of seismic design.

Keywords: Irregular structure, Performance, Adaptive Pushover, Mass irregularity, Seismic demands.

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

1-Introduction

La conception de bâtiments courants, surtout en Algérie, se fonde d'une part sur certaines exigences réglementaires, liées à la mécanique et d'autre part, sur diverses demandes architecturales et opérationnelles, qui induisent souvent une forme commune d'irrégularité structurelle en plan et en élévation. Le nombre croissant de statistiques sur les dommages causés par les actions sismiques a clairement confirmé que les bâtiments à répartition non uniforme des masses, de magnitudes et de configurations variables, sur la hauteur des structures présentent un comportement inadéquat, bien qu'ils aient été conçus conformément aux normes sismiques en vigueur. En pratique, de nombreuses publications ont abordé ce sujet [1, 2].

La procédure simplifiée actuellement privilégiée pour l'analyse non-linéaire est l'analyse en poussée progressive (Pushover), qui combine l'avantage du comportement explicite des déformations élastiques et inélastiques avec la simplicité des formes de chargement statique [3, 4, 5, 6]. Un large éventail d'hypothèses est nécessaire à toutes les étapes du processus, de la sélection du mouvement du sol à la modélisation. Cependant, les méthodes statiques non-linéaires reposent sur l'hypothèse que la réponse d'une structure est contrôlée uniquement par le mode fondamental. Cette hypothèse, cependant, n'est pas appropriée pour les structures irrégulières de grande hauteur en raison de la contribution des modes supérieurs aux réponses sismiques. Par conséquent, d'importants efforts de recherche ont été consacrés ces dernières années au développement de techniques de poussée progressive améliorées, plus ou moins adaptées selon le type d'ouvrages. Cette dernière prend en compte les effets des modes supérieurs et l'influence des irrégularités dans la réponse structurelle des bâtiments de grande hauteur. Parmi ces méthodes, on peut citer l'analyse en poussée progressive adaptative basée sur les déplacements, dans laquelle la charge latérale appliquée est constamment mise à jour, en fonction des caractéristiques dynamiques instantanées de la structure [7].

L'objectif principal de la présente étude est donc d'investiguer l'influence de la magnitude et la localisation des irrégularités de masse en élévation sur la réponse structurelle maximale, telle que la capacité adaptative et les demandes inter-étages pour ce type de structures soumises à l'action sismique. Pour se faire, une structure à ossature régulière de 10 étages a été analysée à l'aide du logiciel OpenSees en appliquant la méthode pushover adaptative [8].

2- Description des modèles

Dans cette recherche, des systèmes structuraux en béton armé irrégulièrement générés avec une irrégularité de masse distribuée sur la hauteur de la structure (référence), ont été analysés. La conception de chaque bâtiment est bi-symétrique dans le plan, avec dix étages et trois travées égales. La largeur de la travée est de 5 m et la hauteur typique de l'étage est de 3,06 m. L'ossature du bâtiment (de référence) considérée est située dans la zone sismique IIa (sismicité modérée) avec des conditions de sol meuble classe «1» selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA-2003) [9]. La résistance caractéristique du béton f_{cu} est de 25 MPa et la limite d'élasticité de l'acier de haute qualité f_y est de 400 MPa. Le poids spécifique du béton est de 25 kN/m^3 et le module d'élasticité du béton est de 30 000 MPa. Le module d'élasticité de l'acier est de 200 GPa. La modélisation numérique de la structure est réalisée dans le logiciel OpenSees [9, 10]. De plus, la base de la structure (fondation) est considérée comme fixe, comme illustré à la Figure 1 et la réponse de la structure dans la direction x seulement est prise en compte. Par conséquent, la période fondamentale du modèle de référence est T_1^*=1,32 s et représente environ 80 % de la masse totale effective ; il s'agit essentiellement d'une structure dominée par le premier mode qui présente néanmoins une sensibilité significative aux modes supérieurs. Cette conception deviendra le cadre de référence et servira de base de comparaison pour tous les systèmes irréguliers simulés.

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

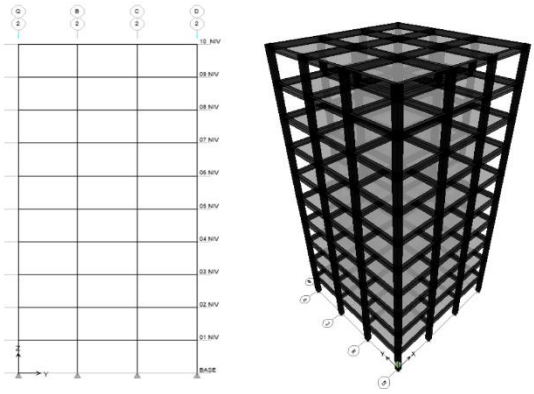

Figure 1: Vue en élévation et 3D du modèle de bâtiment de référence

Figure 1: Elevation and 3D View of the reference building model

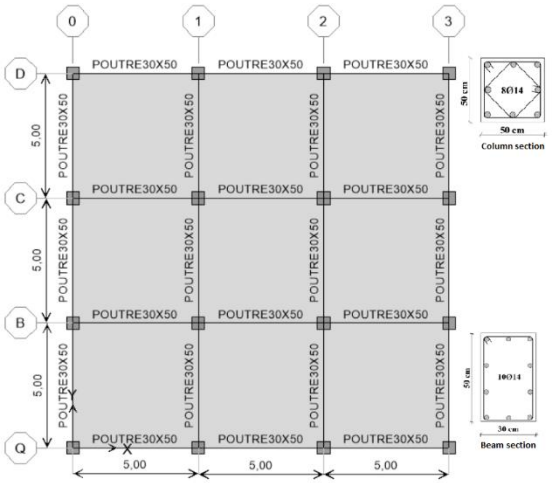

Figure 2 : Vue en plan du modèle de bâtiment de référence

Figure 2: Plan view of the reference building model

3- Modèles constitutifs des matériaux

Il existe différentes formes de modèles constitutifs de béton confiné et non confiné dans la littérature. Dans cette étude, le modèle uniaxial de Kent-Scott-Park modifié nommé "*Concrete01*" [11] a été utilisé pour simuler le comportement non-linéaire du matériau béton. La section transversale du béton a été modélisée avec trois types de fibres différents pour représenter le béton non confiné, le béton confiné et les barres d'armature. La méthode d'intégration de section de Gauss-Lobatto est utilisée dans ce cas. Les propriétés matérielles du modèle sont décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés du béton non-confiné.

Table 1: Unconfined concrete properties

Matériau	Paramètres	Béton non-confiné
Concrete01	Résistance à la compression f'_c	45 [MPa]
	Déformation à la résistance maximale, ε_{c0}	0.0020
	Résistance à l'écrasement, f'_{cu}	9 [MPa]
	Déformation à la résistance l'écrasement, ε_{cu}	0.0076

Tableau 2: Propriétés du béton confiné

Table 2: Confined concrete properties

Matériau	Paramètres	Béton confiné
Concrete01	Résistance à la compression f'_c	54 [MPa]
	Déformation à la résistance maximale, ε_{c0}	0.0024
	Résistance à l'écrasement, f'_{cu}	10.8 [MPa]
	Déformation à la résistance l'écrasement, ε_{cu}	0.0073

Le comportement non-linéaire cyclique de l'acier a été modélisé à l'aide du modèle "*Steel02*" disponible dans la base de données OpenSEES [9] en tenant en compte l'écrouissage cinématique bilinéaire. Le Tableau 3 résume les principales caractéristiques du modèle de matériau dans lequel f_y est la limite élastique, E_s est la rigidité élastique initiale, b est le rapport d'écrouissage, R_0 est une constante comprise entre 10 et 20, et CR_1 et CR_2 sont des coefficients.

Tableau 3. Caractéristiques du modèle de l'acier.

Table 3. Characteristics of steel material model.

Matériau	Paramètres	Valeur
Steel02	Limite élastique, fy	450 [MPa]
	Module d'Young, Es	210000 [MPa]
	Constante, R0	20
	Constante, CR1	0.925
	Constante, CR2	0.15

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

Une technique de contrôle en déplacement avec un algorithme de résolution adaptative est développée pour exécuter l'analyse non-linéaire.

4- Modèle de poutre multifibre

Tous les modèles générés ont été développés à l'aide du logiciel éléments finis orienté-objet sur OpenSees [9, 10], en intégrant le modèle de poutres multifibres. Les éléments du modèle sont discrétisés en un certain nombre de fibres à chaque point d'intégration et des courbes contrainte-déformation uniaxiales cycliques appropriées sont attribuées aux fibres de béton et d'acier (Figure 3).

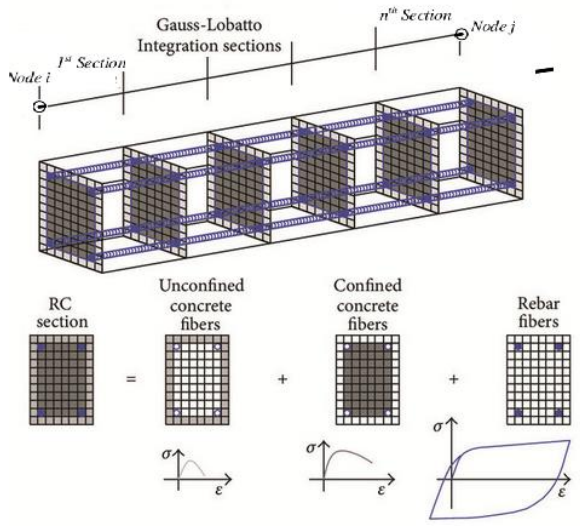

Figure 3 : Coupe transversale de la section en béton armé fibré

Figure 3 : Fiber-reinforced concrete cross-section

5- Description des modèles irréguliers

Un seul type d'irrégularités verticales est adopté : l'irrégularité de masse avec un facteur de modification (MF), adapté à un ou plusieurs étages, sur toute la hauteur du bâtiment. L'irrégularité de masse est une caractéristique importante qui affecte la réponse de la structure aux séismes. En effet, on considère qu'il y a irrégularité de masse lorsque la masse effective d'un étage est supérieure à 150 % de celle de l'étage adjacent.

Cette dernière est introduite en augmentant et ou diminuant le poids de certains étages par rapport aux autres. L'effet de cette irrégularité dépend du modèle structurel utilisé, de la position de l'irrégularité et de la méthode d'analyse. Un excès de masse peut entraîner une amplification des forces d'inertie latérales et diminuer la ductilité des éléments structurels, conduisant ainsi à effets dynamiques complexes et à une réponse conservatrice. Dans cet article, un bâtiment régulier de masse uniforme est considéré avec trois modèles de bâtiment irrégulier en modifiant les masses pour étudier l'effet des exigences de déplacement du toit (courbes de capacité adaptative) et de déplacement inter-étage, paramètre qui contrôle l'évolution des réponses inélastiques de la structure. La description des irrégularités de masse pour les modèles étudiés est présentée au Tableau 4.

Tableau 4 : Description des irrégularités de masse pour les modèles sélectionnés.

Tableau 4 : Description of mass irregularities for the selected models.

Modèle	Position de l'Irrégularité	Facteur de Modification (MF)
Modèle (a)	1–10	0.25 and 2.0
Modèle (b)	1–5	0.25 and 2.0

La Figure 4 montre les cas avec une distribution de masse irrégulière sur la hauteur : (a) masse particulière (MP) et (b) masse inférieure MI(1–5) par rapport à la distribution de masse d'origine du cas de référence.

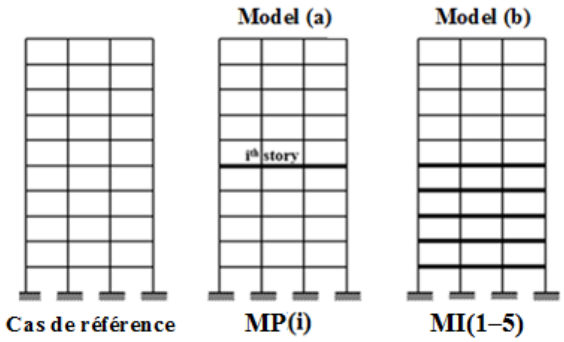

Figure 4: Modélisation structurale avec irrégularité de masse : (a) Masse Particulière (MP) et (b) Masse Inférieure (MI).

Figure 4: Building models with mass irregularity: (a) Particular Mass (MP) and (b) Lower Mass (MI).

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

6- Résultats numériques et interprétations

Cette section clarifie les effets de la position de l'irrégularité de masse sur la réponse sismique de divers modèles structuraux irréguliers. Les modèles illustrés dans le Tableau 4 ont été simulés et les réponses inélastiques des cas présentant des irrégularités de masse sont étudiées ici par rapport au cas de référence.

6.1- Demandes inter-étages du modèle (a)

Pour le premier modèle (a), l'irrégularité n'apparaît qu'à un seul niveau, mais sa position varie du niveau inférieur au niveau supérieur (cas MF (1–n)). Les résultats suivants peuvent être représentés graphiquement. La variation de la masse à un seul étage d'un facteur de modification de (0,25) n'a généralement pas d'effet significatif sur les réponses non linéaires, mais reste peu sensible pour un facteur de modification de (2,0), ce qui signifie qu'elle ne diminuera pas sensiblement la résistance à l'effondrement des modèles de portique, à condition que le système latéral soit dimensionné pour répondre aux exigences sismiques (qui augmentent fréquemment en raison de la présence de l'irrégularité).

La Figure 5 illustre d'abord les courbes de capacité adaptative de la structure de référence, incluant les effets des irrégularités verticales aux emplacements cités ci-dessus. Dans tous les cas irréguliers, le cisaillement à la base est maximal lorsque l'étage supérieur présente une masse légère (MF = 0,25, par exemple), puis en fluctuation pour les autres étages, quel que soit l'emplacement de l'irrégularité. En revanche, la tendance inverse est observée dans les cas de masse importante (MF = 2) et la réponse présente un comportement conservateur.

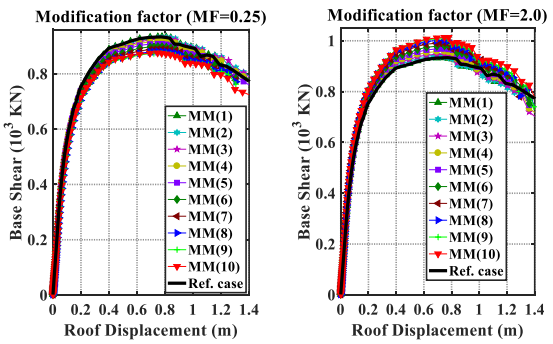

Figure 5 : Courbes de capacité adaptative pour le cas de référence et les différents cas d'irrégularité liés au modèle (a)

Figure 5 : Adaptive capacity curves for the reference case and all irregularity cases related to Model (a)

Afin de mieux évaluer ce type de structure irrégulière, le ratio déplacements inter-étages doit être évalué étage par étage plutôt que de considérer le maximum. La Figure 6 illustre l'influence des cas de faible masse MF(0,25) sur la demande de déplacements inter-étages en fonction de l'emplacement de l'irrégularité de l'étage.

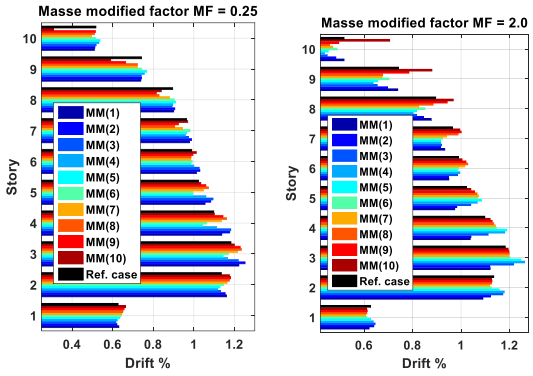

Figure 6: Déplacements inter-étages pour le cas de référence et tous les cas d'irrégularité liés au modèle (a).

Figure : Inter-story drift for the reference case and all irregularity cases related to Model (a).

6.2- Demandes inter-étages du modèle (b)

Dans le deuxième modèle (b), une fois que l'irrégularité se produit dans la moitié inférieure de la structure avec des facteurs de modification de masse MF(1–5) de 0,25 à 4,0, les mêmes arguments peuvent être avancés mais avec un effet opposé et la réponse fournit des déplacements inter-étages plus importantes dans les étages inférieurs (Figure 7).

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr

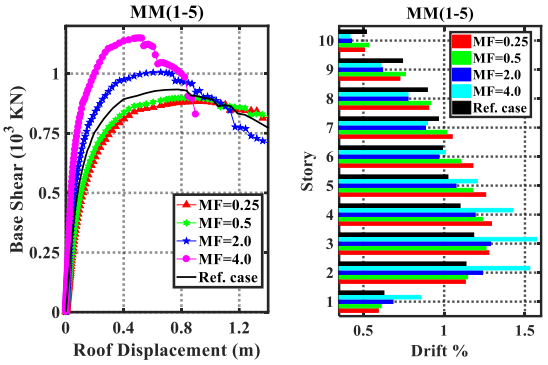

Figure 7 : Courbes de capacité adaptative et déplacements inter-étages pour le cas de référence et les différents cas d'irrégularité liés au modèle (b).

Figure 7 : Adaptive capacity curves and Inter-story drift for reference case and all irregularity cases of model (b).

7 Conclusion

En conclusion, cet article explore les conséquences des variations de masse sur la réponse sismique des structures de bâtiments. Il s'agit d'améliorer la compréhension du comportement de ces structures présentant des irrégularités de masse verticales et d'évaluer leurs effets sous sollicitations sismiques. L'évaluation des demandes de déformation des bâtiments en béton armé irréguliers (effort tranchant à la base - déplacement au sommet et distribution des déplacements inter-étages), est réalisée en utilisant une analyse adaptative par poussée progressive. Le principal résultat est que les irrégularités de masse ont des effets relativement faibles sur le cisaillement à la base et les déplacements relatifs inter-étages, l'un des indicateurs de dommages les plus simples et les plus couramment utilisés en pratique parasismique.

Références bibliographiques

[1] Das S., Nau J.M., *Seismic design aspects of vertically irregular reinforced concrete buildings*. Earthquake Spectra, Vol. 19, n° 3, pp 455–477, 2003.

[2] Michalis F., Dimitrios V. & Manolis P. *Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of nine-storey steel frame*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, n° 12, pp 1489-1509, 2006.

[3] Aksoylu C., Mobark, A., Arslan M.H., Erkan, İ.-H., *A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings*, Journal of Revista de la Construcción Vol.19 n° 2, pp 282-305, 2020.

[4] FEMA 440, *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Federal Emergency Management Agency. Redwood City, California, 2005.

[5] Hemsas M., Elachachi S.M and Breysse D., *Seismic response and damage development analyses of an RC structural wall building using macro-element*. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 51, n°3, pp 447-470, 2014.

[6] Hentri M., Hemsas M. and Nedjar D., *Vulnerability of asymmetric multi-storey buildings in the context of performance-based seismic design. European* Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.25, n° 5, pp 813-834, 2018.

[7] Antoniou S. and Pinho R., *Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures*. Journal of Earthquake Engineering, Vol.8, n° 4, pp 497-522, 2004.

[8] OpenSees, *The Open System for Earthquake Engineering Simulation*. PEER, University of California, Berkeley, 2011.

[9] RPA99,. *Règles Parasismiques Algériennes*. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger, 2010.

[10] McKenna F, Fenves GL, *The OpenSees Command Language Manual—Version 1.2*. Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, 2001.

[11] Scott, B. D., Park, R., & Priestley, M. J. N., *Stress–strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates*. ACI Journal, Vol.79, n° 1, pp 13–27, 1982.

Editée sous licence CC BY-NC-ND http://creativecommons.fr