

APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP POUR LE DÉVELOPPEMENT D'UN INDICE DE PERFORMANCE SISMIQUE POUR LES BÂTIMENTS D'HABITATION EN ALGÉRIE

APPLICATION OF THE AHP METHOD FOR THE DEVELOPMENT OF A SEISMIC PERFORMANCE INDEX FOR RESIDENTIAL BUILDINGS IN ALGERIA

Réception : 01/05/2021

Acceptation : 13/06/2021

Publication : 18/06/2021

MOUSSAOUI Fahem¹, CHERRARED Marzouk²

¹Laboratoire de Génie de la Construction et d'Architecture (LGCA), Faculté de Technologie, Université de Béjaïa, 06000 Béjaïa, Algérie ; fahmoussaoui@gmail.com

²Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), BP 32 El Alia, Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie ; mcherrared@gmail.com

Résumé—Dans cette étude, nous avons défini une note de performance sismique appelée « Indice de Performance Sismique » (IPS) afin d'apprécier la qualité sismique des bâtiments résidentiels en Algérie, en particulier celle des bâtiments existants. L'appréciation de cet indice repose sur deux approches complémentaires. La première est une approche descendante (Top-down) qui consiste en un diagnostic approfondi de la performance sismique des bâtiments existants. Ce diagnostic passe par l'identification et la définition de différents critères de performance, des plus globaux ("objectifs de performance") aux plus détaillés ("indicateurs de performance (IPS)"). La deuxième est une approche ascendante (Bottom-up) dont le principe est d'agréger les valeurs de performance des IPS et des critères retenus. Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'agrégation complète "Méthode de la somme pondérée" dont les coefficients de pondération ont été calculés par la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process). La méthodologie proposée a été testée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans le contexte algérien (ville de Béjaïa). Les résultats obtenus, basés sur des mesures locales, sont très intéressants et soulignent l'intérêt d'une telle approche.

Mots - clés : Bâtiments d'habitation, Performance sismique, Indicateurs de performance, Agrégation multicritère, Méthode AHP.

Abstract - In this study, we have defined a seismic performance score called "Seismic Performance Index (SPI)", in order to assess the seismic quality of residential buildings in Algeria, especially that of existing buildings. The assessment of this index is based on two complementary approaches. The first is a top-down approach, which consists of a thorough diagnosis of the seismic performance of existing buildings. This diagnosis involves the identification and definition of various performance criteria, from the most global ("performance objectives") to the most detailed ("performance indicators (PIS)"). The second is a bottom-up approach, the principle of which is to aggregate the performance values of the PIs and the selected criteria. For this purpose, we used the full aggregation method "Weighted sum method" whose weights were calculated by the AHP (Analytical hierarchy process) method. The proposed methodology was tested on real cases of residential buildings in the Algerian context (city of Béjaïa). The results obtained, based on local measurements, are very interesting and underline the interest of such an approach.

Keywords: Residential buildings, Seismic performance, Performance indicators, Multi-criteria aggregation, AHP method.

1-Introduction

L'état Algérien s'est attelé, depuis l'année 1975 à nos jours, à développer à travers toutes les villes un important programme de logements publics de type grands ensembles collectifs, représentant aujourd'hui plus de 8 millions d'unités [1]. Mais, l'approche politique classique centralisée dans la définition des programmes de logements et leur mise en place n'était non seulement pas en mesure de venir à bout de la crise, mais elle a aussi occasionné des détériorations dans le système « Bâtiment-Usager-Environnement urbain ». On peut citer comme exemple les dégradations structurelles et environnementales, les problèmes d'accès, de non adaptation et d'insuffisance des espaces, des problèmes de comportement social, des déperditions énergétiques importantes, etc.

Au cours des dernières années, les risques de catastrophes ont augmenté en raison du surpeuplement, de l'utilisation défectueuse de l'aménagement du territoire, de la construction d'infrastructures et de services inadéquats et de la dégradation de l'environnement [2 & 3]. L'ancien parc immobilier, qui constitue une grande partie du parc immobilier en Algérie, est le plus vulnérable et présente le plus grand risque d'effondrement lors d'un séisme [3]. Toutes ces raisons font de l'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation une nécessité.

Ce qui intéresse les spécialistes en matière de prévention sismique ce sont les comportements structuraux et les dégâts dans les bâtiments que peuvent causer les séismes. Il faut donc pouvoir évaluer, pour chaque bâtiment, les dégâts structuraux et humains pouvant être causés par un séisme [3]. En effet, Sangiorgio et al. (2020) ont expliqué que : « Après des événements d'urgence tels que de graves tremblements de terre, les objectifs de performance structurelle et les dispositions de protection civile exigent que les bâtiments existants soient pleinement opérationnels et doivent éviter l'effondrement tout en assurant une évacuation correcte » [4].

Avec les progrès de la conception et/ou de l'évaluation durable des structures de bâtiments en béton basée sur les méthodes et/ou les outils multicritères d'aide à la décision qui

utilisent des prévisions avancées fondées sur l'évaluation des alternatives, l'application de ces approches est de plus en plus reconnue dans tous les domaines de la recherche intégrée au bâtiment. Ainsi, l'évaluation de la performance sismique des bâtiments par ces approches multicritères n'a pas fait exception à cette règle et a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs à l'échelle planétaire.

Sangiorgio et al. (2020) ont proposé une procédure multicritères basée sur la méthode AHP pour la définition d'algorithmes offrant une évaluation rapide du risque sismique des bâtiments en béton armé existants [4]. Asadi et al. (2019) ont proposé un cadre décisionnel basé sur le processus de hiérarchie analytique, de la théorie de l'utilité multi-attributs et de la technique de préférence d'ordre par similarité à la solution idéale (TOPSIS) pour la conception et la réhabilitation sismiques des structures de bâtiments en béton armé [5]. Gallo et al. (2021) ont présenté une étude dans laquelle ils ont examiné diverses méthodologies d'évaluation multicritère pour l'identification des stratégies optimales de réhabilitation sismique des bâtiments en béton armé existants [6]. Cremen et Galasso (2021) ont développé une approche pour la prise de décision liée à la gestion du risque sismique à très court terme. La méthodologie proposée unifie les procédures d'évaluation des performances liées au génie sismique (pour une estimation des dommages et des conséquences) avec des outils de prise de décision multicritère (pour prendre en compte les préférences envers différents types de risques) [7]. Jena et al. (2020) ont développé une étude visant à évaluer la vulnérabilité aux tremblements de terre à Banda Aceh (ville en Indonésie) en utilisant l'approche de prise de décision multicritère à travers un processus de hiérarchie analytique (AHP) [8].

C'est dans cette perspective que nous essayons, dans cet article, de définir une note de performance sismique (IPS) qui reflètera la qualité sismique des bâtiments d'habitation en Algérie en se basant sur les approches performantielles. La méthodologie adoptée consiste principalement en deux approches : l'approche descendante (top-down approach) et l'approche ascendante (bottom-up approach). La première est basée sur un diagnostic des paramètres affectant la bonne qualité sismique d'un bâtiment d'habitation. Cette première analyse nous permet la mise au point des critères

prioritaires et les indicateurs de performance pertinents choisis et définis dans les contextes algériens. La deuxième est une approche ascendante basée sur une agrégation multicritère, en utilisant la méthode de la somme pondérée (MSP) avec la méthode AHP, pour évaluer la performance sismique des bâtiments d'habitation algériens. Cette méthodologie a été testée sur des cas réel de bâtiments d'habitation dans la ville de Béjaïa.

2- Sismicité de l'Algérie

La sismicité de l'Algérie est concentrée dans la partie nord du pays [9]. Cette partie de l'Algérie appartient à la ceinture périméditerranéenne où les plaques lithosphériques africaines et eurasiennes convergent dans le sens NW-SE [10]. Les deux plaques en question sont en permanent mouvement de rapprochement qui varie de 4 à 6 mm/an [11]. La déformation régionale induite par ce mouvement de confrontation engendre des séismes d'intensités moyennes à fortes [12].

Au cours de son Histoire, l'Algérie a connu plusieurs séismes de fortes magnitudes qui ont généré parfois des pertes humaines et matérielles importantes [3] (Tableau 1). Le plus ancien séisme recensé par les études historiques remonte au 2 janvier 1365, date à laquelle s'est produit le séisme d'Alger [13]. Antérieurement à cette date, quelques événements ont pu être répertoriés durant la période romaine et au-delà (séismes de l'an 700 dans la région d'AïnTémouchent et de l'an 800 dans la région de Timgad) [14]. Mais ces séismes restent mal documentés en raison de l'absence de documents ou d'archives relatifs aux époques médiévale et antique de l'Algérie.

Au cours des dernières décennies, dans le nord de l'Algérie, deux séismes destructeurs se sont produits, à savoir les tremblements de terre d'El-Asnam, $M_s = 7.3$ (1980) et de Zemmouri, $M_w = 6.8$ (2003) [15]. L'historique de la sismicité en Algérie est incomplète et se caractérise par une couverture discontinue, en particulier pour les séismes de petite et moyenne intensités. Pour ces raisons, nous n'avons rapporté que les événements bien documentés qui ont été révisés et confirmés par différentes études (Tableau 1).

3- Méthodologie d'évaluation proposée

Comme précédemment introduit, la méthodologie proposée est combinée grâce à deux approches complémentaires : une approche descendante « Top-down » de description des objectifs et une approche ascendante « Bottom-up » d'agrégation multicritère.

3.1- Approche diagnostique Top-down – Identification des IPS

L'indice de performance sismique (IPS) pour les bâtiments, en particulier les bâtiments anciens, est un outil de décision fiable pour les ingénieurs du bâtiment en Algérie. L'élaboration d'un tel indice nécessite un diagnostic des différents paramètres qui peuvent nous renseigner sur la qualité sismique d'un bâtiment résidentiel. Le diagnostic de la performance sismique (DSP) permet l'élaboration d'un tableau de bord comprenant les différents objectifs, critères et indicateurs de performance liés à la qualité sismique d'un bâtiment résidentiel (Tableau 2). Ces différents paramètres seront, par la suite, évalués avec la méthode AHP.

3.2- Approche Bottom-up – Agrégation multicritère

Nous devons tout d'abord convertir les valeurs des IPS calculées en valeurs de performance en utilisant une échelle de performance puis nous utiliserons la méthode d'agrégation complète : la méthode de la somme pondérée par la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour évaluer la performance globale.

3.2.1- Echelle de performance

Nous avons choisi une échelle de zéro à un (0 à 1). La valeur un (1) correspond à la meilleure performance ($P = 1$) et zéro (0) à la pire ($P = 0$). Afin de transformer la mesure initiale des indicateurs en scores, entre 0 et 1, des fonctions de performance doivent d'abord être construites en utilisant des bases scientifiques existantes (normes, etc.) et, lorsque celles-ci ne sont pas disponibles, des recommandations des experts du bâtiment.

La Figure 1 montre un exemple d'une échelle de performance qualitative basée sur une transformation de l'échelle floue du critère V_I , [26] à une échelle de performance binaire qualitative.

Tableau 1 : Historique des principaux séismes en Algérie et émergence des codes sismiques
Table 1 : History of the main earthquakes in Algeria and emergence of seismic codes

Date	Localité	Intensité	Magnitude	Victimes	Apparition de	Référence
03/01/1365	Alger	X	-	Plusieurs	/	[16]
03/02/1716	Mitidja	X	-	20 000	Mesures sismiques (Dey-Chaouch)	[14]
09/10/1790	Oran	X	-	2 000	/	[17]
02/03/1825	Blida	X	-	7 000	/	[16]
22/08/1856	Djijeli	X	-	-	/	[18]
02/01/1867	Mouza	X-XI	-	100	/	[19]
16/11/1869	Aurès	IX	-	30	/	[16]
29/11/1887	Mascara	IX-X	-	80	/	[19]
15/01/1891	Gouraya	X	-	38	/	[16]
01/01/1901	Sidi-Aïch	IX	-	-	/	[20]
16/09/1907	Constantine	VIII	-	-	/	
24/06/1910	Sour El Ghoulane	X	-	81	/	[19]
12/02/1946	Béjaïa	IX	-	264		
09/09/1954	Orléans-Ville	X	6.7	1243	AS55	[16]
13/11/1957	Sétif	VIII	-	-		[21]
10/10/1980	El Asnam	X	7.3	2633	RPA 81 et 83	[16]
27/10/1985	Constantine	VIII	5.9	10	/	
29/10/1989	Tipaza	VIII	6.0	22	RPA 88	[22]
18/08/1994	Mascara	VII	5.7	175	/	[23]
04/09/1994	Alger	VII	5.7	-	/	[16]
22/12/1999	Ain Timouchent	VII	5.7	25	RPA 99	[24]
10/11/2000	Béni-Ourlilane	VII	5.4	04	/	[25]
21/05/2003	Boumerdès	X	6.8	2300	RPA 99/2003	[16]
20/03/2006	Lâalam	VII	5.2	04	/	
14/05/2010	Béni Ilmane	VII	5.2	04	/	[19]

Tableau 2 : Tableau de bord de l'objectif "Performance sismique"
Table 2 : Dashboard of the "Seismic Performance" objective

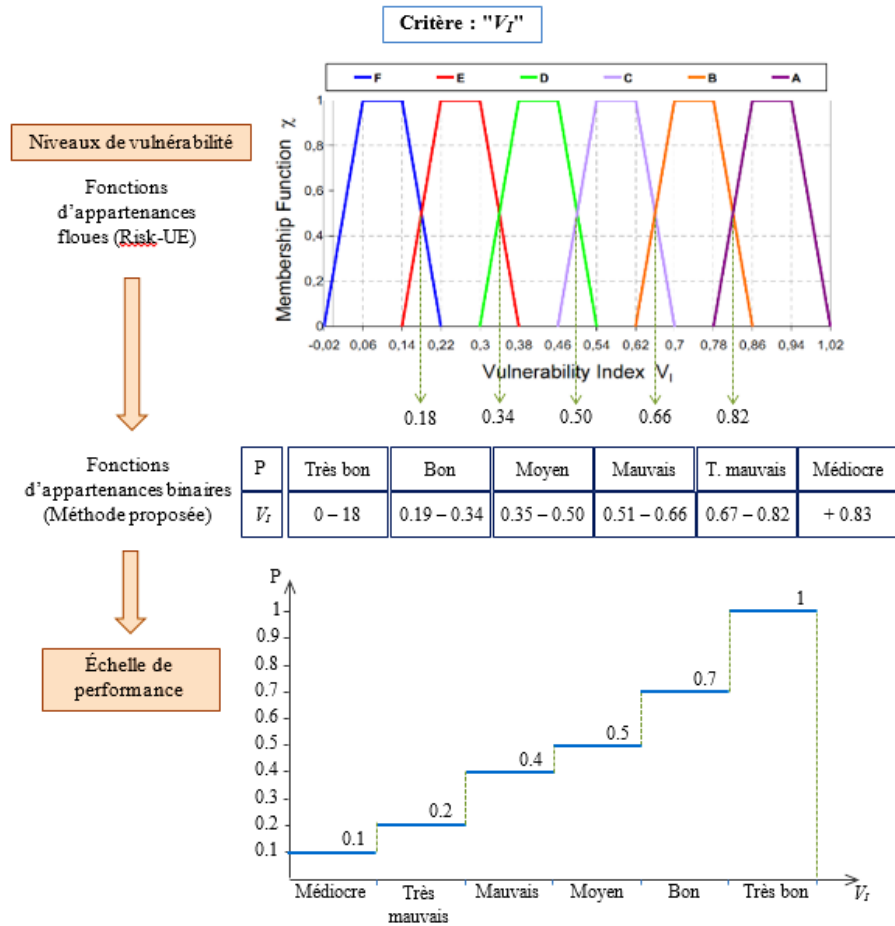
Critère	IPs	Méthodes de calculs	Unité	Référence
Vulnérabilité structurelle (V_I)	Les IPS sont énumérés dans le catalogue de la méthode choisie (Risk-UE) et dans la suite de l'étude	$V_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m$	/	[26]
Niveau de préparation (N_p)	Distance par rapport aux hôpitaux, casernes de pompiers (D)	$D = (D_h + D_c)/2$	km	[27]
	Accessibilité des zones vertes et arides (A)	Oui/non	/	
	Âge du bâtiment (année de construction) (A_g)	/	Année	[28]
	Code de construction utilisé (C)	Nouveau ou ancien	/	[29]
Historique (H)	Nombre de séismes supérieurs à 5 sur l'échelle de Richter ayant touché le bâtiment sans interventions particulières (S_{ei})	/	U	[3]

Définition des symboles utilisés :

- V_I^* : Valeur la plus probable de l'indice de vulnérabilité V_I , [26];
- ΔV_R : Facteur de vulnérabilité régional ;
Ce facteur permet de prendre en compte les propriétés de typologies spécifiques à un niveau régional. Son évaluation se fait sur la base d'un jugement d'expert ou sur l'interprétation de données de vulnérabilité existantes (retour post-sismique par exemple) ;
- ΔV_m : Modificateur de comportement ;
Le facteur ΔV_m représente l'influence des paramètres autres que la typologie sur la réponse de la structure aux sollicitations sismiques. Le facteur ΔV_m est calculé comme la somme des facteurs de vulnérabilité V_m correspondant aux différents paramètres identifiés dans les catalogues de la méthode, [26] ;
- D_h : Distance séparant le bâtiment et l'hôpital ;
- D_c : Distance séparant le bâtiment et la caserne des pompiers.

Tableau 3 : Comparaison par paires des préférences dans la méthode AHP [30]
Table 3 : Pair wise comparison for preferences in AHP method [30]

Intensité de l'importance	1	3	5	7	9	2, 4, 6, 8
Définition	Importance égale	Faible importance	Importance forte	Importance démontrée	Importance absolue	Valeurs intermédiaires

**Figure 1 :** Exemple d'échelle de performance (critère " V_I ")**Figure 1:** Example of a performance scale (criterion " V_I ")

3.2.2- Méthode d'agrégation des indicateurs – Méthode de la somme pondérée (MSP)

L'agrégation des indicateurs nécessite une grande clarté et une simplicité de réalisation, c'est pourquoi nous avons opté pour une agrégation complète. C'est à dire, l'inclusion de l'ensemble des performances des indicateurs dans une formule mathématique en vue de l'obtention d'une valeur unique de performance pour chaque critère [30]. L'agrégation complète est aussi la méthode la plus appropriée pour agréger tous les indicateurs correspondant à un critère commun. Cela correspond au contexte de notre étude et au classement des critères et IPS développés.

Malgré le débat intense dans la communauté internationale sur la meilleure méthode, le choix de la méthode n'est pas un problème pour les utilisateurs des méthodes multicritères de décision [3]. En effet, une analyse multicritère de décision attribue un poids

à chaque critère pour obtenir ensuite une somme pondérée [31]. L'un des enjeux critiques de l'élaboration d'un système d'évaluation de la durabilité est la répartition des poids et des pondérations entre les différents domaines et critères du système de notation [32].

Pour notre processus d'agrégation, nous avons choisi la MSP. En effet, parmi les techniques d'agrégation complète, c'est la méthode la plus utilisée [33]. Janssen (2001) affirme que "la somme pondérée est la méthode d'agrégation la plus utilisée dans les études de décision". La méthode de la somme pondérée est utilisée pour sa clarté et sa simplicité. En effet, cette approche est relativement simple : la note globale est calculée comme la pondération moyenne des scores standardisés [34] (Equation 1) :

$$PC_j = \sum_{i=1}^n PI_{ji} \times w_i \quad (1)$$

Avec :

- PC_j : valeur de performance pour le critère C_j ;
- PI_{ji} : valeur de performance pour l'indicateur I_i du critère C_j ;
- w_i : valeur du coefficient de pondération pour l'indicateur I_i du critère C_j .

3.2.3- Méthode de pondération des indicateurs – AHP

Dans cette étude, les coefficients de pondération (poids) sont calculés à l'aide de la méthode AHP [35]. Les matrices de décision sont composées d'éléments a_{ij} qui représentent l'ordre de préférence entre indicateur/critère i et indicateur/critère j . Les valeurs a_{ij} sont évaluées par paires en utilisant l'échelle du Tableau 3.

A titre d'exemple, si l'indicateur I_i possède une importance essentielle par rapport à l'indicateur I_j , le rapport w_i/w_j sera égal à 5. La comparaison entre tous les indicateurs donne la matrice suivante :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (2)$$

Notons que : a_{ij} est l'intensité de l'importance de I_i sur I_j et w_i le coefficient de pondération associé à I_i .

Une fois la matrice de décision construite, nous calculons le vecteur des coefficients de pondération $W = \{w_1 \dots w_2 \dots w_n\}$. Pour ce faire, nous divisons chaque a_{ij} par la somme des valeurs de la colonne correspondante et ensuite nous effectuons une moyenne par ligne, soit l'opération mathématique suivante :

$$w_i = \frac{\left(\sum_{l=1}^n \left(\frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right) \right)}{n} \quad (3)$$

Initialement, Saaty avait proposé une méthode basée sur les valeurs propres λ de la matrice des jugements. Ainsi, il avait montré que la valeur propre maximale λ_{max} du problème de recherche des valeurs propres ($\det(A - \lambda I_d) = 0$) était réelle et supérieure à la taille de la matrice. Puis, en résolvant le système $AV = \lambda_{max} I_d V$ (V

étant un vecteur propre de A) et en ajoutant la condition que la somme des poids doit être égale à 1, il en a tiré les mêmes valeurs des poids que celles obtenues par la technique précédente [35].

Un grand avantage de la méthode est qu'elle calcule un indice dit "ratio de consistance" (CR) qui permet d'évaluer la qualité des calculs effectués. On calcule d'abord la valeur propre (λ_{max}) et l'indice de consistance (n : taille de la matrice) (Equation 4) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{w_i}}{n} \quad (5)$$

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i} \quad \text{et} \quad \lambda'_i = \sum_{k=1}^n (w_k \times a_{ik}) \quad (6)$$

Finalement le ratio de consistance CR est calculé en utilisant l'équation 7 [35], avec : RI donné par le Tableau 4.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

L'attribution des poids est jugée acceptable si CR est inférieur à 0,1. Dans le cas contraire, la procédure doit être de nouveau appliquée [30 & 35].

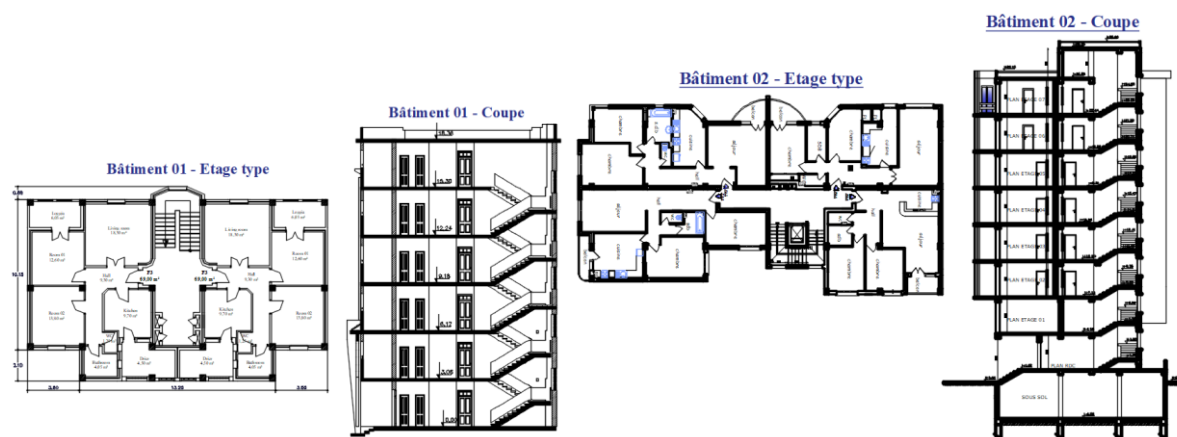
Tableau 4 : Valeurs de RI [35]

Table 4 : RI values [35]

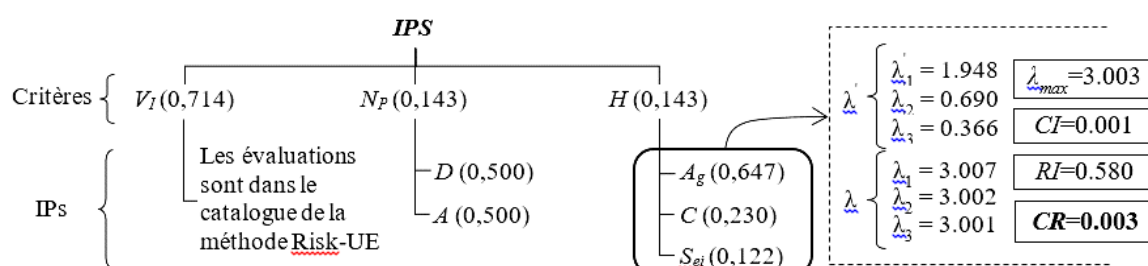
n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

4- Application de la méthodologie – Cas d'étude

Nous avons appliqué la méthodologie présentée sur des cas réels de bâtiments résidentiels dans la ville de Béjaïa. La Figure 2 montre la vue en plan et en élévation des deux bâtiments étudiés et le Tableau 5 résume certaines informations utiles.

**Figure 2 :** Vue en plan et en élévation des bâtiments étudiés, source OPGI- Béjaïa**Figure 2 :** Plan and elevation of the studied buildings, source OPGI- Béjaïa**Tableau 5 :** Données générales sur les bâtiments étudiés**Table 5 :** General data on the studied buildings

Localisation géographique	Région	Bâtiment 1	Bâtiment 2
	Latitude (N)	Sidi-Aïch 36 36 32	Béjaïa 36 44 25
	Longitude (E)	4 41 29	5 3 48
Renseignements	Année d'achèvement	2005	2013

**Figure 3 :** Coefficients de pondération calculés par la méthode AHP**Figure 3 :** Weighting coefficients calculated by the AHP method

5- Résultats et discussion

La méthodologie proposée pour l'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation en Algérie est basée sur les méthodes multicritères d'aide à la décision et prend en compte l'aspect de vulnérabilité ainsi que les critères "Niveau de préparation" et "Historique". Nous commençons l'application de notre méthodologie par l'analyse des jugements (attribution des poids de pondération) en utilisant la méthode AHP.

5.1- Pondération des paramètres de performance

Dans la présente approche, la vulnérabilité V_I est classée comme critère et est évaluée à partir de la méthode Risk-UE. Le critère "Niveau de préparation (N_P)" est évalué à partir de deux IPS. "Historique (H)" est aussi un critère qui est évalué à partir de trois IPS. Nous avons privilégié, automatiquement, la vulnérabilité ($w = 0.70$). Les autres pondérations sont représentées dans la Figure 3. Nous présentons aussi dans cette même Figure 3 un exemple de vérification de la consistance des

résultats pour la pondération des IPs du critère H .

Les calculs des poids de chaque paramètre de durabilité relatifs à PS avec la méthode AHP ont été faits de manière à se rapprocher au maximum des conditions spécifiques locales. Nous nous sommes, cependant, référés aux résultats des travaux de Martins et al. (2012) [36] et Moussaoui & Cherrared (2015)[3] pour orienter de la manière la plus objective possible nos prises de décisions. Ce qui explique, en gros, les très bons résultats dans les vérifications des consistances des matrices de décisions développées.

Comme énoncé ci-dessous, le critère V_I est privilégié par rapport au deux autres en lui attribuant le poids ($w = 0.714$). Le critère N_P est aussi très important car il mesure la probabilité de sauver le maximum de vies humaines en cas d'effondrement après un séisme. Ceci nous a amené à l'impliquer à un niveau de 14.3% dans la solution finale. Le dernier critère donne une vision historique du bâtiment (niveau d'exposition aux séismes, âge du bâtiment, etc.). Vue son importance nous l'avons égalé avec le précédent ($w = 0.143$).

Le critère NP est évalué par l'agrégation de deux IPS (D et A). Le premier est la distance qui sépare le bâtiment de la caserne des pompiers et de l'hôpital les plus proches. Dans le calcul, nous prenons la distance moyenne. Le deuxième IPS vérifie la disponibilité d'espaces dégagés dans lesquels la population pourrait se réfugier après un séisme. Ces deux IPS ont un objectif commun, celui de secourir et prendre soin de la population touchée par le séisme. On leur attribue alors le même apport à la solution finale avec un taux de 50% chacun.

Finalement, le sous-objectif H est apprécié par l'agrégation de trois IPS dont l'âge du bâtiment est le plus dominant ($w = 0.647$). La réglementation utilisée pour les études de réalisation du bâtiment est aussi très importante ($w = 0.230$). La vérification de celle-ci nous permet de savoir si le bâtiment est conforme aux normes actuelles ou pas. Finalement, nous avons enrichi ce critère par un dernier IP qui reflète le degré d'exposition du bâtiment aux séismes et les actions entreprises par les personnes

concernées (habitants et responsables) pour vérifier son bon état.

5.2- Valeurs de calculs obtenues et niveaux de performance des IPS sélectionnés

5.2.1- Evaluation du critère V_I

L'évaluation de la vulnérabilité structurelle V_I d'un bâtiment commence par une analyse et un relevé détaillé de ses caractéristiques. Chaque méthode d'évaluation dresse des catalogues présentant les paramètres influant sur la vulnérabilité. Cependant, toutes les méthodes vérifient les mêmes catégories de paramètres (le sol, la structure, etc.). Dans la méthode Risk-UE, que nous avons choisie, l'indice de vulnérabilité d'un bâtiment, d'habitation dans notre cas, est exprimé par la sommation de trois indices : V_I^* , ΔV_R et ΔV_m .

On détermine l'indice V_I^* , fonction de la typologie du bâtiment, selon la méthode, [26]. Les bâtiments étudiés sont en béton armé contreventés par un système mixte (portique et voiles). Ce qui nous donne un indice $V_I^* = 0.386$ pour les deux bâtiments.

ΔV_R est le facteur de vulnérabilité régional. Il est estimé par l'expert en interprétant des données de vulnérabilité existantes. En d'autres termes, l'indice ΔV_R est basé sur une analyse de diagnostic des études de vulnérabilité ayant été effectuées dans une région donnée afin d'estimer son degré de vulnérabilité (exemple : région non vulnérable $\Delta V_R=0$, pas de bâtiment effondré dans la région depuis son histoire, etc.).

Dans notre cas, ce type de données n'est pas disponible. Nous proposons, alors, d'évaluer cet indice ΔV_R par la vulnérabilité environnementale utilisée par plusieurs auteurs [37]. Dans notre réflexion, la vulnérabilité environnementale est reflétée par les zones sismiques de l'Algérie. Nous présentons dans le Tableau 6 les valeurs de ΔV_R .

Tableau 6 : Valeurs de ΔV_R proposées
Table 6 : Proposed ΔV_R values

Zone sismique	III	II(a)	II(b)	I	0
ΔV_R	0.20	0.15	0.10	0.05	0

La ville de Béjaïa appartient à la zone II(a), alors $\Delta V_R = 0.15$.

L'indice ΔV_m est calculé comme la somme des facteurs de vulnérabilité V_m correspondant aux différents paramètres identifiés dans le catalogue de la méthode, [26]. Nous classons la réglementation sismique algérienne (RPA99 v.2003) dans la catégorie "niveau moyen de protection" $\Delta V_m(\text{Bât1}) = +0.02$ et $\Delta V_m(\text{Bât2}) = +0.10$.

La note de vulnérabilité structurelle des bâtiments appartient à la classe "mauvais", ce qui les classe comme étant des structures à vulnérabilité sensiblement élevée. En effet, les bâtiments en question ont été pénalisés par différents paramètres. Le premier est l'indice V_I^* . Le fait que les bâtiments soient des structures en béton armé les classe dans la catégorie "vulnérabilité moyenne" ($V_I^* = 0.386$). Aussi, le fait que les bâtiments soient à Béjaïa, affecte négativement leur vulnérabilité de (+15%). Enfin, les caractéristiques générales de la physique des bâtiments les pénalisent encore de (+2% et +10%).

Finalement, les indices de vulnérabilité structurelle des bâtiments étudiés sont donnés par le Tableau 7. Dans le même tableau, nous présentons aussi, en utilisant les échelles de performance de la Figure 1, les valeurs de performances correspondantes.

Tableau 7 : Indices V_I et performances correspondantes des bâtiments étudiés

Table 7 : V_I indices and the corresponding performance of the studied buildings

	Bâtiment 1	Bâtiment 2
V_I	0.556	0.636
P	0.40	0.40

La note de vulnérabilité élevée fait que la performance des bâtiments étudiés vis-à-vis de ce critère est relativement faible ($P = 0.40$). Ce niveau de performance affaiblira à son tour la note de performance globale des ouvrages car ce critère influence la solution finale d'un poids ($w = 0.714$).

5.2.2- Evaluation du critère N_P

Les images capturées sur Google-Maps nous permettent de calculer l'éloignement des bâtiments étudiés aux hôpitaux et casernes de la protection civile les plus proches.

Nous calculons la moyenne des deux distances sus-citées pour chaque bâtiment et nous les trouvons égales à 1.75km pour le premier et 2.05km pour le deuxième. En utilisant l'échelle relative à ce critère (construite à partir d'une enquête auprès des services de la protection civile algérienne), la performance de cet indicateur pour les deux bâtiments est $P = 0.80$.

Concernant l'IP "A", vu la non maîtrise de ce paramètre par les experts de la construction consultés et vue la non disponibilité d'une échelle d'évaluation de cet indicateur (normes, etc.) dans la bibliographie consultée, nous lui avons proposé une évaluation binaire. Nous attribuerons, ainsi, une note complète si des espaces verts, ouverts et accessibles existent et une note nulle dans le cas contraire. Ainsi, nous attribuons une performance complète ($P = 1$) pour l'IP "A" de chaque bâtiment à cause de l'existence des espaces vers ouverts et accessibles pour les deux bâtiments.

5.2.3- Evaluation du critère H

À travers les IPS de ce critère, nous visons à refléter l'adaptabilité du bâtiment aux conditions de sécurité et de résistance exigées par les normes actuelles du pays en vérifiant : son adaptabilité à la réglementation présente (réglementation avec laquelle le bâtiment a été réalisé), l'âge du bâtiment (le bâtiment est-il toujours en durée de vie de service ?) et l'exposition de l'ouvrage aux catastrophes naturelles (sismiques notamment) qui sont souvent sources de pertes de résistance.

Les deux cas étudiés sont des bâtiments d'habitation récemment réalisés avec la dernière version de la réglementation sismique algérienne dans la région de Béjaïa et qui n'ont pas encore été sollicités par des séismes majeurs. Tous les IPS de ce sous-objectif affichent une performance complète $P = 1$, ce qui avantagerait grandement la note de performance globale des bâtiments étudiés vu que cet aspect occupe près de 15% de la solution finale.

5.3- Calcul de la performance sismique PS des bâtiments étudiés

Après avoir calculé les performances des IPS et des critères, et après les avoir pondérés,

nous calculons, à présent, la performance sismique des bâtiments étudiés (Figure 4).

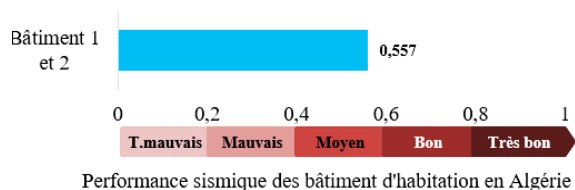


Figure 4 : Performances sismiques des bâtiments étudiés

Figure 4 : Seismic performance of the studied buildings

Nous avons cependant constaté, qu'en termes de vulnérabilité, les bâtiments étudiés sont vulnérables vis-à-vis des séismes (V_I élevée). D'après les catalogues de la méthode Risk-UE, ce type de structures (lourdes) ont un potentiel de vulnérabilité structurelle d'environ 40% et sont rangés dans la classe "vulnérabilité moyenne" ($V_I^* = 0.386$). À cet effet, les autorités doivent penser à alléger les bâtiments d'habitation (utiliser des matériaux légers : hourdis en polyptère, béton léger ; adopter de nouvelles constructions : constructions en bois, constructions métalliques, etc.). En plus, ce niveau de vulnérabilité probable est aggravé par la zone sismique, que nous avons appelé "vulnérabilité régionale". Enfin, d'autres facteurs influencent aussi cet indicateur, comme la hauteur et les régularités en plan et en évaluation.

Dans le cas des bâtiments évalués, le critère N_p était très avantageant, puisque les bâtiments étaient proches des hôpitaux et des casernes de pompiers. Ceci dit, une réflexion particulière doit être apportée à cet aspect de durabilité lors des délivrances des permis de construire des projets de bâtiments d'habitation. Enfin, le critère H était aussi favorable à la note de performance finale des deux bâtiments. Cependant, on ne pourrait pas extrapoler ces résultats au reste du parc résidentiel en Algérie à cause du caractère ancien d'une grande partie du bâti existant.

6- Conclusion et perspectives

Cette étude de cas en utilisant les MAMD nous a permis d'estimer les niveaux de performance sismiques des bâtiments. Les résultats obtenus par la MSP avec l'AHP proposée reflètent la performance sismique des

bâtiments étudiés qui est d'un niveau moyen à bon. La méthodologie proposée utilise une approche structurée pour élaborer et mettre en œuvre des indicateurs, des critères de performance. Une approche descriptive descendante (des critères aux IPS) est développée afin de faciliter l'analyse des paramètres liés à la qualité sismique des bâtiments résidentiels. Une approche ascendante est ensuite utilisée pour produire un score de performance pour chaque élément de chaque niveau et agréger ces paramètres en utilisant la méthode AHP.

L'approche développée donne une première impression sur la performance sismique des bâtiments d'habitation étudiés et, dans une large mesure, celle des bâtiments d'habitation en Algérie, dont les paramètres (zones, mode de construction et/ou de contreventement, etc.) sont similaires qui est moyenne à bonne.

L'étude a permis de cibler les aspects influant qu'il faut maîtriser afin d'améliorer la performance sismique des bâtiments algériens, notamment vis-à-vis de l'aspect social. La pondération, par la méthode AHP standard, des paramètres de performance sismique du modèle multicritère proposé a été faite dans le souci de traduire la situation algérienne qui dépend d'une réglementation privilégiant la structure en dépit de son coût de réalisation et de l'aspect social. Néanmoins, la pondération de ces paramètres de performance peut être sujette à des jugements subjectifs lors de la construction des matrices de décision. Cette subjectivité peut être améliorée avec des études de variantes qui peuvent faire l'objet d'études futures.

La méthodologie développée n'a été validée que dans son principe. D'un point de vue validation des résultats obtenus, il est difficile d'apporter un exemple ou une étude qui permet de montrer d'une manière rigoureuse leur validité. Cependant, quelques éléments de vérification qui peuvent apporter un plus quant à la confiance qu'on peut mettre dans les prédictions existent. Il peut s'agir à titre d'exemple d'une enquête post sismique sur le terrain ou auprès des organismes de la construction (CTC, service de la protection civile, etc.). Ce travail sera effectué dans une étude future lorsque d'avantage de données seront disponibles.

Références bibliographiques

- [1] Moussaoui, F., *Contribution à l'évaluation de la durabilité des bâtiments d'habitation en Algérie*. Thèse de doctorat. Université de Béjaïa, Algérie, pp 195, 2018.
- [2] Harbi, A., et al., *Seismicity, seismic input and site effects in the Sahel-Algiers region (North Algeria)*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Ed. Springer, Vol. 27, n° 5, pp 427-447, 2007.
- [3] Moussaoui, F., et Cherrared, M., *Contribution to assessment of the seismic performance of residential buildings in the Algerian context*. Proc. of the International Conference on Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures (SSCS' 2015), Rio de Janeiro, Brazil. 2015.
- [4] Sangiorgio, V., Uva, G., et Aiello, M. A., *A multi-criteria-based procedure for the robust definition of algorithms aimed at fast seismic risk assessment of existing RC buildings*. Structures, Ed. Elsevier, Vol. 24, pp 766-782, 2020.
- [5] Asadi, E., Salman. A. M., et Li, Y., *Multi-criteria decision-making for seismic resilience and sustainability assessment of diagrid buildings*. Engineering Structures, Ed. Elsevier, Vol. 191, pp 229-246, 2019.
- [6] Gallo, W. C., Gabbianelli, G., et Monteiro, R., *Assessment of Multi-Criteria Evaluation Procedures for Identification of Optimal Seismic Retrofitting Strategies for Existing RC Buildings*. Journal of Earthquake Engineering, Ed. Taylor & Francis, Article in press, Published online: 18 feb 2021.
- [7] Cremen, G., et Galasso, C., *A decision-making methodology for risk-informed earthquake early warning*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Ed. Wiley, Vol. 36, n° 6, pp 747-761, 2021.
- [8] Jena, R., Pradhan, B., et Beydoun, G., *Earthquake vulnerability assessment in Northern Sumatra province by using a multi-criteria decision-making model*. International Journal of Disaster Risk Reduction, Ed. Elsevier, Vol. 46, pp 101518, 2020.
- [9] Ayadi, A., Bourouis, S., et Benhallou, H., *Seismotectonics and seismic quietness of the Oranie region (Western Algeria): The Mascara earthquake of August 18 th 1994, Mw = 5.7, Ms = 6.0*. Journal of Seismology, Ed. Springer, Vol. 6, n° 1, pp 13-23, 2002.
- [10] Nocquet, J.-M., et Calais, E., *Geodetic Measurements of Crustal Deformation in the Western Mediterranean and Europe*. Pure and Applied Geophysics, Ed. Springer, Vol. 161, n° 3, pp 661-681, 2004.
- [11] DeMets, C., et al., *Current plate motions and crustal deformation*. Geophysical Journal International, Ed. Oxford Academic, Vol. 101, pp 425-478, 1990.
- [12] Bezzeghoud, M., et Buforn, E., *Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, Mw=4.8), 1994 Alhoceima (Morocco, Mw=5.8), and 1994 Mascara (Algeria, Mw=5.7) earthquakes and seismotectonic implications*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, n° 2, pp 359-372, 1999.
- [13] Ambraseys, N. N., et Vogt, J., *Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers*. European Earthquake Engineering, Vol. 3, pp 16-29, 1989.
- [14] Yelles-Chaouche, A. K., et al., *La tectonique active de la région nord-algérienne*. Comptes Rendus – Geoscience, Vol. 338, n° 1-2, pp 126-139, 2006.
- [15] Bouhadad, Y., *Occurrence and impact of characteristic earthquakes in northern Algeria*. Natural Hazards, Ed. Springer, Vol. 72, n° 3, pp 1329-1339, 2014.
- [16] Yelles-Chaouche, A.K., *Recent Seismic Activity in Northern ALGERIA*. Proc. of the Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology (FICEES). Tehran, Islamic Republic of Iran. 2003.
- [17] Bouhadad, Y., *The Murdjadjo, Western Algeria, fault-related fold: Implications for seismic hazard*. Journal of Seismology, Ed. Springer, Vol. 5, n° 4, pp 541-558, 2001.
- [18] Benhamouche, A., et al., *Field evidence of seismites in Quaternary deposits of the Jijel*



(Eastern Algeria) coastal region. *Journal of Seismology*, Ed. Springer, Vol. 18, n° 2, pp 289-299, 2014.

[19] Bezzeghoud, M., *Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum Observed Intensity Map (MOI 2014)*. Seismological Research Letters, Ed. GeoScience World, Vol. 86, n°, 1, pp 1-9, 2015.

[20] Harbi, A., Maouche, S., et Benhallou, H., *Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria part II: 20th century seismicity and seismotectonics analysis*. *Journal of Seismology*, Ed. Springer, Vol. 7, n° 2, pp 221-234, 2003.

[21] Harbi, A., Benouar, D., Benhallou, H., *Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria part I: Review of historical seismicity*. *Journal of Seismology*, Ed. Springer, Vol. 7, n° 1, pp 115-136, 2003.

[22] Harbi, A., et al., *Seismicity and Tectonic Structures in the Site of Algiers and its Surroundings: A Step Towards Microzonation*. *Pure and Applied Geophysics*, Ed. Springer, Vol. 161, pp 949-967, 2004.

[23] Ayadi, A., et al., *Seismotectonics and seismic quietness of the Oranie region (Western Algeria): The Mascara earthquake of August 18th 1994, $M_w = 5.7$, $M_s = 6.0$* . *Journal of Seismology*, Ed. Springer, Vol. 6, n° 1, pp 13-23, 2002.

[24] Haouche, A. et al., *The Ain Temouchent (Algeria) Earthquake of December 22nd, 1999*. *Pure and Applied Geophysics*, Ed. Springer, Vol. 161, n° 3, pp 607-621, 2004.

[25] Bouhadad, Y., et al., *The Beni-Ourtlane-Tachouaft fault and seismotectonic aspects of the Babors region (NE of Algeria)*. *Journal of Seismology*, Ed. Springer, Vol. 7, n° 1, pp 79-88, 2003.

[26] Milutinovic, Z.V., et Trendafiloski, G.S., *WP4: Vulnerability of Current Buildings*. RISK-UE Project Handbook, pp 111, 2003.

[27] Johnson, J. D., *Natural Disasters and Adaptive Capacity*. OECD Development Centre, Vol. 237, pp 45, 2004.

[28] Guéguen, P., Michel, C., et Lecorre, L., *A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: Application to Grenoble (France)*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Ed. Springer, Vol. 5, n° 3, pp 467-490, 2007.

[29] Steimen, S., et al., *Reliability of building inventories in seismic prone regions*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Ed. Springer, Vol. 2, n° 3, pp 361-388, 2004.

[30] Moussaoui, F., et al., *A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings—Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study*. *Sustainable Cities and Society*, Ed. Elsevier, Vol. 42, n° August 2017, pp 622-636, 2018.

[31] Poveda, C. A., et Lipsett, M., *A Review of Sustainability Assessment and Sustainability/Environmental Rating Systems and Credit Weighting Tools*. *Journal of Sustainable Development*, Vol. 4, n° 6, pp 36-55, 2011.

[32] Trusty, W., *Standards versus recommended practice: Separating process and prescriptive measures from building performance*. *Journal of ASTM International*, Vol. 5, n° 2, pp 1-7, 2008.

[33] Pohekar, S. D., et Ramachandran, M., *Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Ed. Elsevier, Vol. 8, n° 4, pp 365-381, 2004.

[34] Janssen, R., *On the Use of Multi-Criteria Analysis in Environmental Impact Assessment in The Netherlands*. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Ed. Wiley, Vol. 10, n° December 1999, pp 101-109, 2001.

[35] Saaty, T. L., *Multicriteria Decision Making Series - The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Ressource Allocation*. Ed. McGraw Hill, pp 287, 1980.

[36] Martins, V. N., e-Silva, D. S., et Cabral, P., *Social vulnerability assessment to seismic risk using multicriteria analysis: The case study of Vila Franca do Campo (São Miguel Island,*



Azores, Portugal). Natural Hazards, Ed. Springer, Vol. 62, n° 2, pp 385-404, 2012.

[37] Armaş, I., *Multi-criteria vulnerability analysis to earthquake hazard of Bucharest, Romania*. Natural Hazards. Ed. Springer, Vol. 63, n° 2, pp 1129-1156, 2012.