

ABOUBEKR Nabil, Université Tlemcen, Algérie.
AFRA Hamid, CNERIB, Algérie.
AIT-MOUKHTAR Karim, Université La Rochelle, France.
ARNAUD Maurice, INSA Toulouse, France.
BEHIM Mourad, Université Annaba, Algérie.
BELARBI Rafik, Université La Rochelle, France.
BELARBI Abdeldjalil, Houston, USA.
BENSAIBI Mahmoud, Université Blida, Algérie.
BOUAFIA Ali, Université Blida, Algérie.
BOUBAKOUR Fares, Université Batna, Algérie.
BOURAHIL Noureddine, Université Blida, Algérie.
BRARA Ahmed, CNERIB, Algérie.
BROSSEAUD Yve, LCPC Nantes, France.
CHAALAL Omar, Ecole Technique Supérieure, Canada.
CONCHE Florence, CETE Clermont Ferrand.
DJELAL Chafika, Université Artois, France.
GHORAB Hanaa Youcef, Helwan, Egypte.
HALAWEH Mohamed, Université South Florida, USA.
HIMOURI Slimane, Université Mostaganem, Algérie.
KACI Salah, Université Tizi-Ouzou, Algérie.
KHELIDJI Abdelhafid, Université de Nantes, France.
LACHEMI Mohamed, Ryerson, Canada.
LALOUI Lyesse, EPFL Lausanna, Suisse.
MECHERI Karim, Canada.
MELBOUCI Bachir, Université Tizi-Ouzou, Algérie.
NECHNICHE Hocine, Agence Technique, Algérie.
OUDJIT Mohamed-Nadjib, FGC-USTHB, Algérie.
RESHEIDAT Musa, Université Amman, Jourdanie.
ROUAINA Mohamed, Université Newcastle Upon Tyne, Grande Bretagne
TAHAKOURT Abdelkader, Université Bejaia, Algérie.
TAHAR bouchakour, BEREG, Algérie.

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES TRAVAUX PUBLICS (ENSTP)

RESPONSABLE DE LA PUBLICATION

ZERZOUR Ali
Directeur Général de l'ENSTP

COMITE SCIENTIFIQUE

DERRICHE Zohra, Professeur
AMIEUR Mohamed, Maître de conférences (A)
HADID Mohamed, Maître de conférences (A)
TAKI Mohamed, Maître de conférences (A)
ZERZOUR Ali, Maître de conférences (A)

DIRECTEUR DE LA REDACTION

GUETTACHE Brahim

SECRETARE DE REDACTION

BOUDHANE Widad

CONCEPTION ET REALISATION

TRAMES

ALGÉRIE EQUIPEMENT / ENSTP

École Nationale Supérieure des Travaux Publics
Rue Sidi Gardi, 36051, Kouba - Alger
Tel. : +213 (0) 21 28 68 58 / 28 90 37
Fax. : +213 (0) 21 28 87 61
Email : enstp@wiso1.dz
Site Web : www.enstp.edu.dz

SOMMAIRE

DYNAMIQUE DES STRUCTURES

Vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie
Application à la ville d'Alger 2
F. DJAALALI, M. BENSABRI, N. BOURAHLA

MÉCANIQUE DES SOLS

Analyse fiabiliste de la stabilité des talus - Proposition
d'amélioration de la PEM 11
HADERBACHE LAHLOU, L. NASSER

MATÉRIAUX

Influence de la nature chimique des eaux sur le
gonflement des argiles d'in Amenas 20
N. KEBALI, A. ZENKHRI, A. BELFERRAG

Influence du volume de pâte sur le comportement
du béton autoplaçant vis-à-vis du retrait 27
N. BOUHAMOU, N. BELAS, F. BELARDELOUAHAB, A. MEBROUNI

Étude de l'influence des granulats sur le
comportement mécanique du béton basique 36
L. ZEGHICHI, B. MEZGHICHE

Étude expérimentale et probabilistique du frottement
dans un milieu granulaire pulvérulent 42
H. OUAHABI, M. MEGHACHOU

Étude comparative de l'efficacité inhibitrice de corrosion
des armatures en acier par perte de masse 49
L. SAIL, F. GHOMARI, A. BEZZAR, A. KHELIDJ

STRUCTURES

Analyse des contraintes d'interface dans les poutres
en béton armé endommagées renforcées par collage
de plaques en matériaux composites 60
T. HASSAINE DINDJALI, M. AIT AMAR, M. AMEUR, A. TOUNSI,
E.A. ADDA BEDIA

VULNÉRABILITE SISMIQUE DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE APPLICATION À LA VILLE D'ALGER

Fouzia Djaalali¹ — Mahmoud Bensaïbi² — Noureddine Bourahla³

⁽¹⁾ Département de génie civil, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie. djaalaliben@yahoo.fr

⁽²⁾ Département de génie civil, Université Saâd Dahleb, Blida, Algérie. bensaibim@yahoo.co.uk

⁽³⁾ Département de génie civil, Université Saâd Dahleb, Blida, Algérie. nbourahla@yahoo.com

RÉSUMÉ

En Algérie, une grande partie des anciennes constructions sont en maçonnerie de pierre et/ou de brique. Le retour d'expérience post-sismique a mis en évidence la vulnérabilité de ces constructions vis-à-vis de l'action sismique.

Dans notre travail, nous présentons une estimation de l'état des structures existantes en maçonnerie, en utilisant la méthode de « l'Indice de Vulnérabilité ». Cette méthode a été développée pour être utilisable par les ingénieurs et permettre une classification ainsi qu'une description de la « qualité sismique » des constructions en considérant un certain nombre de paramètres. Ces paramètres de nature structurale et non-structurale jouent un rôle significatif dans la réponse sismique du bâti.

Pour ce faire, une fiche technique regroupant l'ensemble des données nécessaires pour déduire ces paramètres ainsi qu'un programme de calcul associé à celle-ci ont été développés et mis sous système d'information géographique. En utilisant ce dernier, une commune type de la ville d'Alger a été étudiée.

MOTS-CLÉS : maçonnerie, construction, vulnérabilité, indice de vulnérabilité sismique.

1. Introduction

Les principaux centres urbains algériens ont été construits durant la période de la présence française en Algérie (avant 1962) et donc essentiellement constitués de constructions en maçonnerie. Ces ensembles ont été en général construits selon le mode de construction de l'époque.

Un des principaux enseignements tiré du retour d'expérience sismique est la faible résistance de ce type de constructions vis-à-vis de l'action sismique. Ceci a été particulièrement visible lors des derniers séismes importants qu'a connus le pays (par exemple Ain-Témouchent en 1999 et Boumerdes en 2003). En effet, les pertes enregistrées au niveau de ce type de bâti ont été importantes. Aussi, et afin d'essayer de réduire l'impact des séismes sur ces constructions, il est primordial de prévoir leur comportement afin de déterminer si des actions de renforcement, voire de remplacement doivent être entreprises. Ces actions ne peuvent être décidées que suite à des études permettant de quantifier la résistance sismique de ces constructions.

Des études de vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie ont fait l'objet de plusieurs études à travers le monde. Ainsi Jara et al. (Jara et al., 1992) ont déterminé un coefficient (k) pour les constructions de la ville de Mexico, permettant la classification du bâtiment étudié en fonction de la résistance de l'étage présentant la plus faible résistance. Cette classification était en conformité avec les enquêtes post-sismique effectuées suite au séisme de Mexico en 1985. Cette approche qui consiste à affecter un coefficient de vulnérabilité à une structure afin de quantifier sa résistance n'est pas la seule. En effet, il ressort des retours d'expériences sismiques, l'influence de certains éléments structuraux et non-structuraux sur la réponse sismique des constructions. Aussi, il a été développé des méthodes permettant de tenir compte de ces éléments à travers l'utilisation d'un coefficient appelé « Indice de Vulnérabilité (IV) ».

L'une des premières études effectuée sur l'indice de vulnérabilité a été initiée par le GNDT (group of National Defence against earthquake) GNDT 1994, (Corsanego et al., 1994), connue sous la dénomination de méthodologie de niveau II. C'est une méthode semi-empirique basée sur l'observation et la collecte de données relatives aux caractéristiques du bâti. Les paramètres structuraux et non-structuraux qui jouent un rôle significatif dans la réponse sismique de la structure doivent alors appartenir à une des quatre classes de vulnérabilités (A, B, C et D) décrites dans la méthode présentée dans les références (Benedetti et al., 1984) et (Benedetti et al., 1998). La somme pondérée de ces derniers définit l'indice de vulnérabilité IV de la construction. D. Benedetti et al. (Benedetti et al., 1998) ont montré à travers le calcul de coefficients

de corrélations que la description des dommages à travers l'indice de vulnérabilité est satisfaisante et que la corrélation augmente avec la sévérité du mouvement sismique. Cette méthode a été utilisée à Gubbio, ville située au nord de la Toscane, où des enquêtes pour l'estimation de l'indice de vulnérabilité ont été effectuées. Les résultats ont permis la classification des constructions de la région et ont montré une bonne corrélation entre les dommages occasionnés par le séisme de 1984 et l'indice de vulnérabilité déjà estimé (Augusti et al., 1985). Cette méthode a été utilisée aussi en Lombardie par Belloni et Padavan (Belloni et al., 1998). L'étude a permis de montrer que la valeur de l'indice de vulnérabilité est d'autant plus grande que la construction est ancienne. Elle a aussi été utilisée au sud de l'Italie par Parisi et al. (Parisi et al., 2006) pour les baciasses en maçonnerie d'un village. Cette étude a permis une classification des constructions en classes de vulnérabilité et de développer ainsi une méthodologie de renforcement pour ces dernières. L'inconvénient de la méthode réside dans le fait que certains paramètres utilisés pour le calcul de l'indice de vulnérabilité ont des coefficients prédéfinis mais d'autres n'en ont pas, ce qui implique d'affecter un coefficient à ces paramètres lors de l'expertise. Ceci ne peut être fait que par un expert. Sur le même principe, le groupe de « vulnérabilité du bâti existant » de l'AAPS (Jacques et al., 1999) a rédigé un guide permettant l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Les paramètres utilisés ainsi que leurs coefficients diffèrent de ceux considérés par le GNDT.

Toujours sur le même principe et dans le cadre du projet européen RISK-UE (RISK-UE, 2003), il a été développé une méthodologie appelée « Level 1 », permettant l'estimation de la vulnérabilité du bâti de plusieurs villes européennes. Dans cette méthode, il est considéré un indice de vulnérabilité de base pour chaque typologie de construction. Des valeurs additionnelles sont ajoutées pour tenir compte de facteurs aggravant ou améliorant la réponse sismique de la construction. Ces valeurs peuvent être positives ou négatives. Cette méthode induit la classification des constructions en typologie. La classification utilisée lors du projet RISK-UE se basait sur l'EMS-98 comme cela a été d'ailleurs entrepris par Chavez et al. (Chavez et al., 1998) pour l'évaluation du risque sismique de la région de Catalogne en Espagne.

La classification en typologie consiste à regrouper un certain nombre de constructions dans des classes. Généralement, ce regroupement est en fonction de la nature du matériau de construction. Parmi les classifications les plus communément utilisées il y a celle proposée par Sauter et Shah (Sauter et al., 1978) qui considèrent dix types de matériaux de constructions et donc dix classes. Par ailleurs, S. W. Cochrane & W. H. Schaad (Cochrane et al., 1992) présentent une classification qui prend en

considération le système structural porteur en plus du matériau de construction. Le GNDT, dans sa méthodologie d'évaluation du risque sismique des constructions dénommé «Level 1» (niveau 1), identifie différentes typologies du bâti dans la zone d'étude et définit trois classes de vulnérabilité (A, B et C) (Braga et al., 1982). De cette manière, une correspondance directe entre la typologie du bâtiment et la classe de vulnérabilité est établie.

Une autre classification consiste à regrouper les constructions en fonction de la nature du matériau (maçonnerie par exemple) et de leur indice de vulnérabilité.

Il apparaît donc que la méthode de l'indice de vulnérabilité est un bon outil d'estimation de la qualité sismique d'une construction.

Dans le cadre de ce travail nous nous proposons, en nous basant sur le principe de cette méthode, de développer un outil spécifique à l'Algérie prenant en compte les caractéristiques des constructions du pays et le retour d'expérience sismique. Cet outil s'affranchira de la contrainte que nécessite l'apport d'un expert pour sa mise en œuvre et sera utilisable par les ingénieurs, d'autant qu'il n'exige pas de moyens matériels importants faisant souvent défaut dans les pays en voie de développement.

2. Méthode de l'indice de vulnérabilité pour l'Algérie

L'indice de vulnérabilité est établi pour chaque construction individuellement.

L'indice de vulnérabilité est un indicateur de l'état de la structure. Il peut être estimé avant et après l'occurrence de l'événement sismique. Il permet de connaître la qualité sismique des constructions d'une région.

L'indice de vulnérabilité se base sur un ensemble de paramètres qui sont soumis à l'investigation de l'ingénieur. Ce dernier devra se prononcer sur leur comportement vis-à-vis d'un séisme. Un coefficient est alors affecté aux différents paramètres. L'indice de vulnérabilité représente la somme de ces coefficients. La difficulté est la définition des paramètres ayant une influence sur la vulnérabilité de la structure ainsi que la détermination des coefficients à affecter à ces paramètres, car de leurs évaluations dépendra la qualité du résultat.

Nous nous proposons de déterminer un indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie.

Pour ce faire, l'ingénieur rempli in situ une fiche technique, préalablement établie. Cette fiche technique comprend des informations de nature descriptive, qualitative et quantitative. Un programme de calcul

que nous avons développé permettra de transformer les informations en valeur numérique. Ces dernières serviront pour le calcul de l'indice de vulnérabilité de la construction considérée. Puis en fonction de cet indice, le programme classera la structure.

2. 1. Paramètres de l'indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité est déterminé pour une construction en tenant compte de l'ensemble des paramètres pouvant influencer de manière directe ou indirecte sa réponse sismique. Ils tiennent compte des caractéristiques du bâtiment ainsi que de la région où il est implanté (résistance au cisaillement, type des murs, maintenance, aléa sismique, nature du sol, ...). De ce fait, les paramètres que nous considérons dans le calcul de l'indice de vulnérabilité ne sont pas tous observables (voir tableau 1). Certains paramètres sont de nature descriptive (typologique) tels que le type de murs, la connexion des murs. D'autres sont de nature quantitative tels que la régularité, les conditions de sol. Le paramètre résistance totale au cisaillement est estimé en considérant la résistance latérale ultime de la structure ainsi que le règlement parasismique en vigueur. Hormis les paramètres déjà établis (Benedetti et al., 1998), nous avons introduit deux paramètres supplémentaires afin de permettre l'estimation de l'indice de vulnérabilité reflétant l'état des constructions en maçonnerie en Algérie :

1-Le paramètre « entrechoquement » qui exprime que deux structures adjacentes peuvent subir des dommages si le joint n'est pas suffisant. Ceci permet de traiter des constructions non isolées tout en tenant compte des constructions voisines situées dans le même îlot.

2-Le paramètre « modification » qui ressort du retour d'expérience sismique en Algérie et qui traduit tous les ajouts ou suppressions constatés sur la structure d'origine et qui résultent de l'absence de contrôle et du manque de respect de la réglementation.

Chaque paramètre considéré peut appartenir à une des quatre catégories définies dans (Benedetti et al., 1998) et qui sont C1, C2, C3 et C4. Ces catégories se déclinent comme suit :

C1 exprime que le paramètre considéré traduit un bon comportement sismique ;

C4 exprime que le paramètre considéré traduit un mauvais comportement sismique ;

C2 et C3 représentent des situations intermédiaires.

Pour chaque paramètre et pour chaque catégorie considérée, un coefficient (k) est identifié exprimant sa qualité sismique. En nous basant sur la bibliographie et sur le retour d'expérience sismique en Algérie nous avons déterminé des coefficients pour chacun des paramètres donnés dans le tableau 1. Le retour

d'expérience sismique en Algérie a été dominant dans le sens où nous avons effectué une analyse statistique relative à 617 bâtiments dans le cas du séisme de Ain Temouchent (1999) et 768 bâtiments dans le cas du séisme de Boumerdes (2003), ce qui nous a permis de déterminer les coefficients donnés dans le tableau 1.

En analysant le pourcentage de bâtiments appartenant aux classes C1, C2, C3 et C4 pour chacun des paramètres et pour les deux séismes cités, nous avons déterminé les coefficients de corrélations montrant l'influence d'un paramètre (indice de vulnérabilité partiel) sur la vulnérabilité du bâti (indice de vulnérabilité total IV). En effet, nous donnons à titre d'exemple (figure 1) le pourcentage de distribution des bâtiments pour quatre paramètres du tableau 1, à savoir, la résistance totale au cisaillement, la régularité en élévation, les modifications et la maintenance pour le séisme de Boumerdes.

Le tableau 1 est un exemple de coefficients de corrélation obtenus en considérant les mêmes paramètres pour les séismes de Ain Temouchent et Boumerdes.

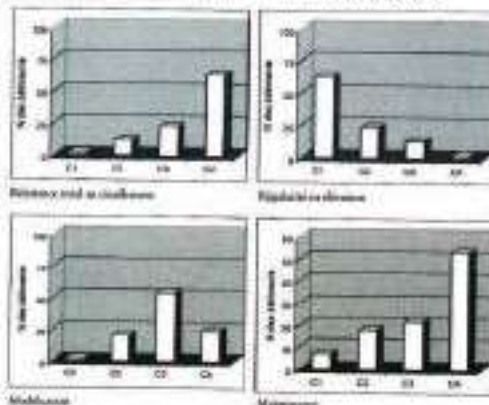


Figure 1 : Exemple de distribution selon les classes C1, C2, C3 et C4 pour le séisme de Boumerdes

Paramètre	Résistance totale au cisaillement	Régularité en élévation	Modifications	Maintenance
Ain Temouchent	64	14	13	46
Boumerdes	48	22	18	52

Tableau 1: Coefficients de corrélation (%) (indice de vulnérabilité total - partiel)

Le coefficient de corrélation représente en général le degré de dépendance linéaire entre deux ensembles de données. Ici, il est utilisé pour exprimer leurs dépendances mutuelles. Le tableau montre que pour les deux ensembles de données (Ain Temouchent et Boumerdes) la résistance au cisaillement ainsi que les conditions de maintenance jouent un rôle important dans la valeur de l'indice de vulnérabilité IV.

La bibliographie fait ressortir un paramètre « détails », ce paramètre est constitué de plusieurs éléments.

Dans les études précédentes, ce paramètre n'était pas explicite. Nous nous proposons de le définir explicitement, ceci à partir de la base de données relative aux séismes de Ain Temouchent et de Boumerdes. A cet effet, un certain nombre d'éléments pouvant entrer dans la réponse sismique des bâtiments a été listé. Ainsi, les éléments déterminés sont : état du remplissage, du bardage, des cloisons, des balcons, du garde-corps, des corniches /acrotères, des cheminées, des vides sanitaires, du réseau électrique, du réseau de gaz, du réseau d'AEP, du réseau d'assainissement et du réseau téléphonique.

Les éléments composant le paramètre « détails » ne sont pas forcément tous présents simultanément dans une construction. En considérant les éléments présents, le paramètre « détails » prendra une des valeurs données pour chaque catégorie C1, C2, C3 ou C4 définie dans le tableau 1.

2. 2. Calcul de l'indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité IV d'une construction est la somme des coefficients (k_i) que prend chaque paramètre. Il s'exprimera comme suit :

$$IV = \sum_{i=1}^{12} k_i \tag{1}$$

Dans le tableau suivant sont donnés l'ensemble des paramètres considérés dans l'étude ainsi que les coefficients que nous avons déterminés.

Paramètre	Coefficient k _i			
	C1	C2	C3	C4
1. Résistance totale au cisaillement	0	0,03	0,32	0,21
2. Régularité en plan	0	0,01	0,04	0,07
3. Régularité en élévation	0	0,01	0,04	0,07
4. Connexion des murs	0	0,03	0,07	0,14
5. Type de toit	0	0,01	0,03	0,05
6. Plancher	0	0,01	0,03	0,05
7. Toiture	0	0,01	0,03	0,05
8. Conditions de sol	0	0,02	0,06	0,10
9. Entassement	0	0,01	0,04	0,07
10. Modifications	0	0,01	0,04	0,07
11. Détails	0	0	0,02	0,03
12. Maintenance	0	0,03	0,06	0,11

Tableau 2: Valeurs des paramètres pour l'évaluation de l'indice de vulnérabilité

La détermination de l'ensemble de ces paramètres devra se faire en se basant sur une expertise de la construction in situ. A cet effet, nous avons développé une fiche technique regroupant l'ensemble des données nécessaires pour évaluer les différents paramètres utilisés et déterminer leurs catégories.

Comme déjà dit, certains paramètres sont de nature descriptive d'autre quantitative. Nous donnons comme exemple de calcul deux paramètres du tableau 2. Le paramètre 'régularité en élévation' de nature quantitative et le paramètre 'connexion des murs' de nature descriptive.

- Paramètre régularité en élévation : une distribution

régulière de la masse et de la rigidité le long de la hauteur de l'édifice constitue un des critères de conception en zone sismique. Ce paramètre joue un rôle important dans la réponse sismique des constructions. Il est définie dans le règlement Parasismique Algérien, et permet ainsi de voir si la construction est régulière en élévation ou ne l'est pas. Ainsi, on définit les quatre classes comme suit :

Coefficient C1 : la construction est régulière en élévation. Trois conditions doivent être vérifiées :

b1- Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément de murs discontinu dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation;

b2- Aussi bien la rigidité que la masse des différents niveaux restent constantes de la base au sommet du bâtiment ;

b3- Dans le cas de décrochement en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs ne dépasse pas 20% dans les deux directions orthogonales. La plus grande dimension latérale du bâtiment ne dépasse pas 1,5 fois sa plus petite dimension.

Coefficient C2 : Les conditions b1 et b2 sont vérifiées :

b3- La variation des dimensions en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs ne dépasse pas 20% dans les deux directions orthogonales. La plus grande dimension latérale du bâtiment est supérieure de 1,5 fois sa plus petite dimension ;

Coefficient C3 : la condition b1 et b3 sont vérifiées :

b2- La construction présente une variation dans la rigidité et dans la masse supérieure à 10% de la base au sommet ;

Coefficient C4 : Seule la condition b1 est vérifiée. La construction est considérée comme irrégulière en élévation.

- Paramètre connexion des murs : ce paramètre exprime la qualité d'organisation des structures verticales, c'est-à-dire qu'il évalue dans quelle mesure les murs sont connectés entre eux.

Coefficient C1: bâtiment conforme aux prescriptions du code des nouvelles constructions ou bien celles du code de réparation et de renforcement ;

Coefficient C2 : bâtiments ayant des bandes en béton armé ou des barres d'acier à chaque étage, ainsi que des joints entre murs orthogonaux appropriés au transfert du cisaillement vertical ;

Coefficient C3: bâtiments ne contenant ni de bandes en béton armé ni de barres d'acier, mais ayant juste des joints entre murs orthogonaux ;

Coefficient C4 : bâtiments avec de faibles ou sans liens entre les murs orthogonaux.

2. 3. Fiche technique

Pour l'évaluation de la vulnérabilité des constructions, une fiche d'enquête ou fiche technique d'évaluation a été élaborée. Sur cette fiche est consigné un certain nombre de renseignements relatifs à la construction étudiée. La fiche technique, développée se divise en quatre parties :

1- 'Les données générales' : cette partie regroupe les informations générales de chaque construction comme : l'adresse, la commune, le n° de la fiche, etc.

2- 'Les caractéristique' : dans cette partie, on trouve les éléments à évaluer sur site de la construction comme l'âge de la construction, sa géométrie, le nombre d'étages, etc.

3- 'La résistance' : cette partie est réservée à la classification des paramètres d'évaluation comme le système structural (nature et qualité du mur porteur), la capacité portante de la structure, la régularité en plan et en élévation, etc.

4- 'Remarque' : cette partie est une légende afin d'aider l'ingénieur à bien remplir sa fiche d'enquête. Elle lui permet aussi de mettre ses remarques ou appréciations.

Ces informations sont introduites dans un programme de calcul de l'indice de vulnérabilité par l'intermédiaire d'un moyen de saisie. Le traitement de cette information permettra la classification de la construction.

2. 4. Classification des constructions

En fonction de la valeur obtenue pour l'indice de vulnérabilité, nous avons défini trois plages P1, P2 et P3 permettant de classer les constructions. Ces plages sont présentées dans le tableau 3 :

Plage	P1	P2	P3
Iv	0 - 0,20	0,20 - 0,60	0,60 - 1
Couleur	Vert	Orange	Rouge

Tableau 3 : Plages de l'indice de vulnérabilité

Ces plages sont en fait des intervalles où va varier l'indice de vulnérabilité. Ainsi, en fonction de l'intervalle où va se situer l'indice calculé, la construction appartiendra à une des plages définies. A chaque plage nous avons associé une couleur de sorte que :

- la plage P1 exprime que la construction présente une bonne résistance sismique et la couleur associée est le vert ;

- la plage P2 exprime que la construction présente une résistance sismique moyenne et la couleur associée est l'orange ;

- la plage P3 exprime que la construction présente une mauvaise résistance sismique et la couleur associée est le rouge.

Ces plages nous permettent ainsi de classer les constructions en classes de vulnérabilité.

Les plages ci-dessus ont été déterminées comme suit : une construction ayant un bon comportement sismique à tous ses éléments qui appartiennent à la catégorie C1, la somme des coefficients est alors zéro qui est donc la borne inférieure du premier intervalle. Si tous les éléments appartiennent à la classe C2 alors la somme des coefficients est égale à 0,2, ce qui traduit la limite d'une structure ayant un bon comportement sismique, et de là, la borne supérieure du premier intervalle est déduite. Les autres intervalles sont déterminés suivant la même logique.

3. Application

Comme application de notre travail, nous avons considéré la commune de Belouizdad. Cette commune de la capitale est située à l'Est du centre d'Alger ; elle possède une superficie de 216 km². Le nombre d'habitants est de 59248 personnes d'après le recensement de 1998 (RGPH, 1998) et le nombre de bâtiments en maçonnerie existants est de 643 bâtiments. Ces derniers sont constitués essentiellement de murs en pierres et/ou en briques d'épaisseur moyenne de 60 cm, le plancher est pour la plupart en voûtain.

Nous nous proposons de déterminer l'indice de vulnérabilité pour ces bâtiments puis nous donnerons la classification de ces derniers selon le critère établi en 2-4. Pour ce faire, une base de données a été établie regroupant ces constructions avec leurs fiches techniques.

L'indice de vulnérabilité calculé pour les 643 bâtiments de la base de données nous permet de présenter les résultats donnés en figure 1 (a, b et c).

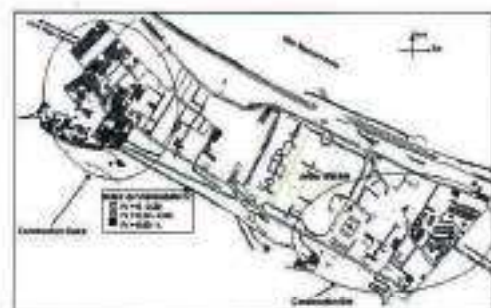


Figure 1a : Indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie de la commune de Belouizdad



Figure 1b : Constructions à l'Ouest de la commune



Figure 1c : Constructions à l'Est de la commune

Ce résultat est alors comparé à celui de l'expertise visuelle effectuée par les ingénieurs du Contrôle Technique de la Construction (CTC) sur 179 bâtiments de la commune d'étude. Cette expertise a été commandée auparavant par les autorités locales de la commune au CTC qui est l'organisme chargé du contrôle des constructions en Algérie.

Nous donnons sur la figure 2 les résultats obtenus par notre méthode pour les 179 bâtiments concernés par l'expertise du CTC. Sur la figure 3 nous donnons les résultats de cette expertise. Cette dernière classe les constructions en trois catégories : celles présentant un bon état, celles présentant un état moyen et enfin celles présentant un mauvais état.

La différence entre les deux résultats est de l'ordre de 9%.



Figure 2 : Résultats de l'étude

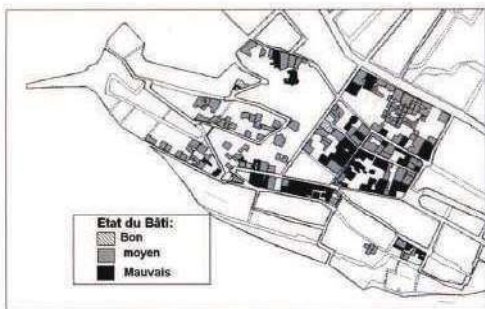


Figure 3 : Résultat de l'expertise du CTC

La différence entre les deux résultats est acceptable et nous permet de considérer que notre méthode donne une classification du bâti en maçonnerie correcte.

Les résultats de l'étude montrent que plus de 80% des constructions en maçonnerie de la commune de Belouizdad présente une qualité sismique moyenne (figure 4). En effet les indices de vulnérabilité pour 508 bâtiments sont compris entre 0.20 et 0.60. Près de 10% des bâtiments sont très vulnérables à l'action sismique et autant ont une faible vulnérabilité. Près de 90% du patrimoine de la commune de Belouizdad nécessite une intervention pour un renforcement ou un remplacement. Pour les bâtiments siglés orange la décision de remplacement ou de renforcement ne pourra être prise que suite à une étude technico-économique. Ce résultat peut s'expliquer par l'ancienneté des constructions, la mauvaise maintenance des bâtiments, les modifications apportées aux constructions, etc.

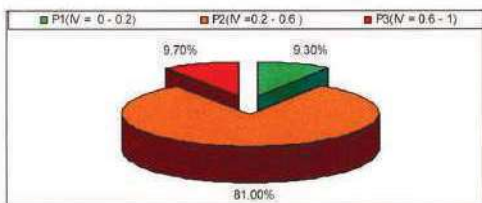


Figure 4 : Distribution des bâtiments de la commune en fonction de l'indice de vulnérabilité

Par ailleurs, nous présentons en figure 5 le nombre de bâtiments ayant les classes de vulnérabilité P1, P2 et P3 en fonction de leur nombre d'étages. Nous constatons que les bâtiments en rez-de-chaussée plus un étage sont ceux qui sont les plus nombreux dans les trois classes.

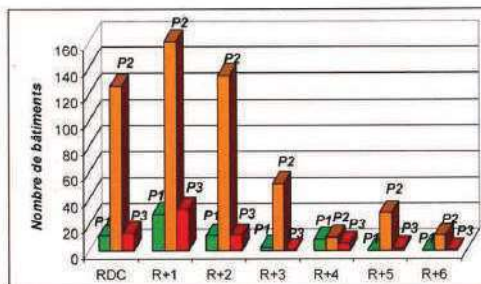


Figure 5 : Classes de vulnérabilité en fonction du nombre d'étages

La figure 6 montre le pourcentage de bâtiments appartenant à une classe de vulnérabilité en fonction des différentes modifications apportées à la structure initiale telles que ajouts, suppressions, surélévation et autres qui modifient la réponse sismique de la construction (augmentation, diminution de la masse et /ou de la rigidité).

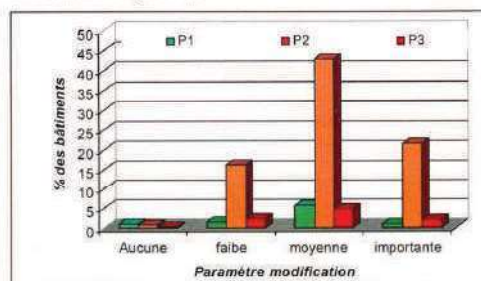


Figure 6 : Pourcentage de bâtiments appartenant à une classe de vulnérabilité en fonction du paramètre « modification »

Cette figure montre l'influence du paramètre « modification » en fonction de son importance (aucune, faible, moyenne ou importante). L'importance de cette modification apportée à la structure originelle est laissée à l'appréciation de l'ingénieur.

Les bâtiments qui appartiennent aux pages P1 et P3 ne posent pas de problème dans le sens où ils sont soit peu vulnérables ou très vulnérable à l'action sismique. Par contre pour les bâtiments de la page P2, l'influence des différents paramètres entrant dans le calcul de l'indice de vulnérabilité peut avoir une importance prépondérante dans le sens où si on arrive à cerner les paramètres ayant entraîné la vulnérabilité de la construction, il serait aisé d'intervenir sur ces derniers pour réduire cette vulnérabilité. Ainsi, il apparaît que près de 65% des bâtiments ont subi des modifications moyennes voire importantes, ce qui justifie l'introduction du paramètre « modification ». En effet, en remédiant à ces modifications on réduirait la vulnérabilité de ces bâtiments. Il va de soi que pour arriver à une vulnérabilité faible il faudra intervenir aussi sur d'autres paramètres.

Conclusion

Afin d'estimer la vulnérabilité sismique des constructions en maçonnerie en Algérie, nous avons utilisé la méthode de l'indice de vulnérabilité. L'indice de vulnérabilité (IV) est obtenu en considérant l'ensemble des paramètres structuraux et non-structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure.

L'utilisation des paramètres, « entrechoquement » et « modification » ainsi que la définition du paramètre « détail », associé à la détermination des coefficients de vulnérabilité pour tous les paramètres considérés, nous a permis de mettre au point une méthode adaptée au contexte algérien et pouvant être utilisée par les ingénieurs locaux.

Une fiche technique a été élaborée regroupant l'ensemble des informations nécessaires pour calculer ou déduire la catégorie des paramètres de l'étude. Cette dernière a permis la collecte de données sur terrain pour toutes les constructions en maçonnerie de la commune échantillon, à savoir la commune de Belouizdad. Par ailleurs, un programme de calcul en Delphi mis au point, fournit la valeur de l'indice de vulnérabilité pour chacune des bâtisses. Notons que toutes ces informations ont été consignées dans un Système d'Information Géographique (SIG). Ce dernier nous donne une classification du bâti en maçonnerie traduisant sa qualité sismique. Il permet d'appréhender la vulnérabilité du bâti d'une manière simple car variant entre zéro et un. Zéro représente des structures pas du tout vulnérables et Un des structures très vulnérables. Ainsi, nous avons établi trois classes de vulnérabilité du bâti (peu vulnérable, moyennement vulnérable et très vulnérable). La détermination de ces classes de vulnérabilité permet de regrouper des bâtiments de caractéristiques différentes mais ayant un comportement sismique similaire. L'étude a montré que plus de 80% des constructions en maçonnerie de la commune de Belouizdad sont d'une qualité sismique moyenne, leurs indices de vulnérabilité étant compris entre 0,20 et 0,6. Par ailleurs, un grand nombre de bâtiments ayant subi des modifications est classé orange et rouge (classe P2 et P3) ce qui montre l'influence du paramètre « modification » et justifie donc sa prise en considération. Nous avons constaté que le nombre d'étage n'influence pas particulièrement la vulnérabilité des bâtiments car quelque soit le nombre d'étage la classe P2 est prédominante.

Nous disposons ainsi d'une méthode fiable, utilisable par les ingénieurs pour estimer la qualité sismique des constructions en maçonnerie en Algérie. Cet outil associé à un système d'information géographique offre un moyen d'aide à la décision à l'adresse des décideurs dans leur gestion de la vulnérabilité sismique de la ville.

Bibliographie

- Augusti G., Benedetti D., Corsanego A., «Investigations on seismic vulnerability and seismic risk in Italy», 4th International conference on structural safety and reliability, May 1985, Kobe, Japan.
- Belloni A., Padovan N., Pergalani F., Petrini V., «An Application of a methodology for assessment seismic risk in urban planning (region Lombardia-Italy) », Proceeding of the eleventh european conference on earthquake engineering, 1998, Balkema.
- Benedetti D., Benzoni G., Parisi M. A., «Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei», Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, 1998, p.183-201.
- Benedetti D., Petrini V., «On the seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure», The industry of construction, vol. 18, 1984, p. 66-78.
- Boukri M., Bensaisi M., «Vulnerability index of Algiers masonry buildings», 14th World Conference on Earthquake Engineering, paper n°0118, October 12-17, 2008, Beijing, China
- Braga F., Dolce M., Liberatore D., «A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scales», Proceeding of the 7th european conference on earthquake engineering, 1982, Athens.
- Chavez J., Goula X., Roca A., Mata F., Presmanes J., Lopez-Arroyo A., «Preliminary seismic risk assessment for Catalonia (Spain)», Proceeding of the eleventh european conference on earthquake engineering, 1998, Balkema.
- Cochrane S.W., Schaad W.H., «Assessment of earthquake vulnerability of buildings», Proceeding of the tenth world conference on earthquake engineering, 1992, Rotterdam, p. 497-502.
- Corsanego A., Petrini V., «Evaluation criteria of seismic vulnerability of existing building patrimony on the national territory», Seismic Engineering, vol. 1, 1994, p.16-24.
- Djallali F., Bensaïbi M., «Vulnérabilité sismique des structures de maçonnerie en Algérie»
- 9ème Congrès de Mécanique, 21-24 Avril, Marrakech, Vol. 1, 2009, Maroc, pp. 22-24.
- Jara M., Guerrero J.J., Aguilar J., «Seismic vulnerability of Mexico city buildings», Proceeding of the tenth world conference on earthquake engineering, Rotterdam, 1992, p. 545-550.
- Jacquet G., Souloumiac R., « Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments existants », Actes du 5ème colloque national AFPS, 1999, Cachan.

France, p. 267-273.

Parisi M. A., et Chesi C., «Experimenting seismic vulnerability assessment and strengthening in a masonry village», 1st european conference on earthquake engineering and seismology, September 2006, Geneva, Switzerland.

RISK-UE, An advanced approach to earthquake risks scenarios with applications to different European towns, WP4: Vulnerability of current buildings, EVK4-CT-2000-00014, 2003.