



Structures

ÉVALUATION DES COURBES DE VULNÉRABILITÉ DES BÂTIMENTS EN BA DANS LE CONTEXTE ALGÉRIEN

ASSESSMENT OF VULNERABILITY CURVES FOR ALGERIAN RC BUILDINGS

M. MORSLI¹, F. I. BELHEOUANE², M. BENSAIBI³

¹ Professeur, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie
meriem.ouhachi@yahoo.fr

² Maître de Conférences, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie

³ Professeur, École Nationale Supérieure des Travaux Publics, Alger, Algérie

CONTEXTE

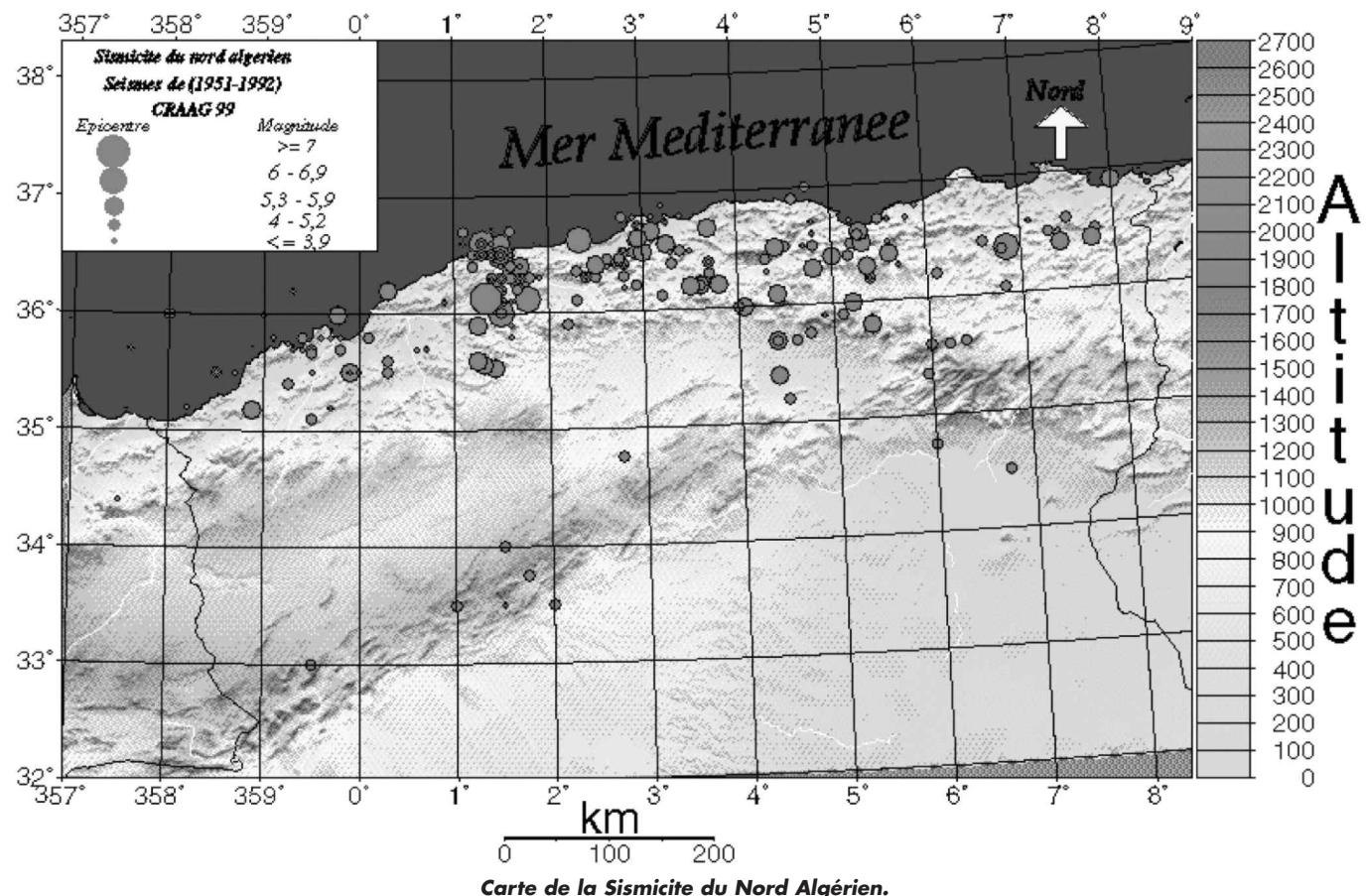
Les bâtiments en béton armé (BA) soumis aux tremblements de terre subissent des dégâts plus ou moins importants en fonction de leur conformité au règlement parasismique actualisé. Les règlements ont pour but de réduire les pertes, néanmoins l'évolution de l'état des connaissances fait que des mises à jour sont réalisées régulièrement. Ceci conduit à la longue à la présence d'un patchwork de structures ayant des résistances variables et donc une vulnérabilité sismique différente.

Afin de réduire cette vulnérabilité sismique, il faut disposer d'un outil de diagnostic fiable. Le présent travail entre dans ce cadre et a conduit au développement d'un programme appelé VP (Vulnerability Program). Composé de deux programmes, le VIP (Vulnerability Index Program) et le PVC (Program of Vulnerability Curves). Il permet d'esi-

timer la vulnérabilité sismique de bâtiment en béton armé. Le VIP calcul l'indice de vulnérabilité de structures en BA et les classe en cinq classes. Le PVC détermine le taux de dommage que pourrait subir une structure pour une intensité donnée, ce qui permet de réaliser des scénarios sismiques et de donner une évaluation de leur comportement vis-à-vis de l'action sismique.

INTRODUCTION

Les études de vulnérabilité à grande échelle s'appliquent à un groupe de bâtiments, à une ville entière, ou encore à une région donnée. L'approche considérée est généralement statistique, car la connaissance du bâti existant est souvent partielle. Ces méthodes empiriques d'analyse de la vulnérabilité, basées sur le retour d'expérience et sur les carac-



RC buildings damaged by recent earthquakes Ain Temouchent 1999 and Boumerdes 2003.



Pounding effect.



Quality of the nodes.



Soft Story.



Short column.



Elevation irregularity.

téristiques structurales des bâtiments à partir d'inspections visuelles, ont été développées dans les pays à forte sismicité : la méthodologie HAZUS a été implantée par la Federal Emergency Management Agency [1] aux États-Unis et par le Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti [2] en Italie tandis que dans le cadre Européen, on citera la méthode élaborée dans le cadre du projet Risk-UE [3]. Dans la majorité de ces méthodes, la vulnérabilité est traitée à partir d'indices et propose une relation entre ces indices et une échelle de dommages. Cette évaluation permet l'estimation des dommages occasionnés par un séisme scénario, permet d'identifier les bâtiments les plus vulnérables qui devraient alors bénéficier d'un renforcement.

Des similitudes apparaissent entre les méthodes : toutes définissent différents niveaux d'analyse traduisant la qualité de l'estimation ; elles utilisent une échelle de dommage et une classification des constructions suivant une typologie prédéfinie ; elles se basent sur la recherche visuelle d'indicateurs structuraux qui modulent la vulnérabilité. À partir d'observations post-sismiques, ces indicateurs sont reliés de façon statistique aux dommages grâce à un indice de vulnérabilité et une pondération qui permettent l'établissement de courbes de vulnérabilité (ou d'endommagement). Ces dernières fournissent le niveau de dommage atteint le plus probable en fonction de l'agression sismique. Ces courbes peuvent être générées de façon empirique [4, 5, 6], par jugement d'experts [7], par méthodes



analytiques [8, 9, 10, 11, 12, 13] et/ou par méthodes mixtes [14,15]. Certains chercheurs tel Hamus ne prennent pas en compte la présence de différentes irrégularités dans cette évaluation et peuvent donc sous-estimer le niveau des pertes attendues. Par ailleurs, beaucoup de chercheurs se sont attelés à la construction des courbes de vulnérabilité [16, 17,18, 19, 20, 21, 22, 23].

Dans le cas de cette étude, l'évaluation des risques sismiques a été réalisée sur des populations de bâtiments en Béton Armé (BA) identifiés comme étant les plus susceptibles de subir des dommages lors d'un séisme. Elle est basée sur les retours d'expérience des récents tremblements de terre de Ain Temouchent en 1999 et de Boumerdès en 2003. Ces séismes ont provoqué un pourcentage élevé de dommages dans ce type de bâtiments. En effet, les bâtiments en BA ont été conçus pour des charges de gravité et renforcés par des dispositions parasismiques établies selon l'ancien règlement parasismique [24, 25]. Ces bâtiments n'étaient pas conçus pour résister aux charges létérales auxquelles ils sont soumis lors d'un séisme donné. En outre, leur vulnérabilité a été aggravée

en raison de la présence d'autres irrégularités telles que les poteaux courts. Notre travail consiste à évaluer la vulnérabilité des bâtiments en BA, lors d'un séisme donné, en tenant compte des données spécifiques au contexte Algérien. La méthode appliquée est celle de l'indice de vulnérabilité ; on premier lieu nous avons évalué l'indice la vulnérabilité des bâtiments [26, 27] et en second lieu nous avons établi les courbes de vulnérabilité que l'on a comparées à celles développées dans le cadre du projet Risk-UE [3].

HISTORIQUE DE LA SISMICITÉ EN ALGÉRIE

Selon le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG) plusieurs tremblements de terre ont frappés l'Algérie. Le tableau 1 regroupe les principaux séismes enregistrés en fonction de leur intensité.

Localité	Date	Io
Alger	03.01.1365	Forte
Gouraya	15.01.1891	X
El kalaâ	29.11.1887	IX-X (VIII)
Sour. El Ghouléne (Aumale)	24.06.1910	X (VIII)
A. El hassan (Cavaignac)	25.08.1922	IX-X
El Attaf (Carnot)	07.09.1934	IX (VII)
Béjaia	12.02.1960	VIII-IX
Chlef (Orléansville-elasnam)	09.09.1954	X-XI
M'sila	21.02.1960	VIII
M'sila	01.01.1965	VIII
Mansourah	24.11.1973	VII
Chlef	10.10.1980	IX
Constantine	27.10.1985	VIII
El affroun	31.10.1988	VII
Dj. Chenoua	29.10.1989	VIII
Mascara	18.08.1994	VII
Alger	04.09.1996	VII
Ain-temouchent	22.12.1999	VII
Béni-ouartilane	10.11.2000	VII
Zemmouri	21.05.2003	X
Lâalam (Kherrata)	20.03.2006	VII
Médéa	22.08.2007	VII
Mostaganem	08.08.2007	VII
Touggourt	08.07.2007	VII
Béni ilmane (Sétif)	14.05.2010	VII
Damous (Tipaza)	10.06.2012	VI

Tableau 1 : Principaux séismes [28].



La tenue des constructions vis-à-vis d'un séisme dépend de plusieurs facteurs, entre autres l'application ou non des règles parasismiques en vigueur lors de la construction. Dans ce qui suit nous donnons un bref historique de l'évolution de la réglementation en Algérie.

ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION EN ALGÉRIE

Après le séisme de Chlef de 1954 et vu les dégâts causés aux constructions de la ville d'Orléansville, les autorités coloniales se sont inspirées des méthodes antisismiques américaines et japonaises pour mettre au point toute une batterie de règlements concernant les calculs techniques et les calculs sismiques en l'occurrence les PS (Prescriptions sismiques) et le règlement Antisismique 55 [29] qui plus tard a été remplacé par le Règlement Parasismique Algérien 62 [30].

À l'indépendance du pays, en 1962, et jusqu'en 1967, les règlements concernant les calculs techniques et les calculs sismiques créés par l'administration coloniale sont restés en vigueur.

En 1968, l'Algérie se dote d'un règlement de Calculs des Constructions en Béton Armé 1968 [31], inspiré du règlement français Béton Armé 60 [32] basé sur la notion de contraintes admissibles pendant qu'en Europe, les règles de calculs en vigueur étaient basées sur la notion d'Etat Limite. En conséquence, en 1993, l'Algérie révise le CCBA68, ce qui donne un ouvrage intitulé "Calculs des Constructions en Béton Armé 93" [33], basé sur la notion d'Etat Limite.

En 1980, après le séisme de Chlef, le calcul parasismique devient obligatoire pour toute nouvelle construction, ce qui donna naissance au premier Règlement Parasismique Algérien (RPA81), révisé successivement en 1983, en 1988 puis en 1999 [34,35,24,25], intégrant dans cette dernière version le calcul des forces sismiques par la méthode dynamique.

En 2003, un séisme ravageur a ébranlé Boumerdes et ses environs. Au vu de l'étendue de la catastrophe et de l'importance des dégâts humains et matériels, la révision du RPA99 s'imposa. Elle a porté sur l'établissement d'une nouvelle carte sismique et sur les conditions de réalisation des bâtiments plus sévères [36].

Aussi, vu l'évolution de la réglementation et des méthodes de calcul de la force sismique, les nouveaux centres urbains et les agglomérations ont été conçus, calculés et réalisés de différentes manières liées à la réglementation en vigueur à l'époque de leur construction, ce qui conditionnent leur vulnérabilité à l'action sismique. Afin de permettre aux décideurs de prendre les décisions adéquates (démolition, réfection, confortement, etc.) de ces constructions, nous avons développé et proposé une méthode basée sur la vulnérabilité des structures en béton armé en tenant compte d'un certain nombre de paramètres. Ces derniers sont, en partie, tirés de la bibliographie et complétés par des paramètres déduits du retour d'expérience sismique en Algérie [26, 27].

MÉTHODE DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ

Principe de la Méthode de l'Indice de Vulnérabilité

La méthode consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment, soit sa "qualité sismique". Ce nombre est appelé indice de vulnérabilité (Iv). Il est obtenu par la somme des valeurs numériques exprimant la "qualité sismique" des éléments structurels et non structurels qui jouent un rôle important dans la réponse sismique du bâtiment [37, 38]. L'indice de vulnérabilité « Iv » est donc un indicateur de l'état de la structure qui peut être estimé avant comme après l'occurrence de l'évènement sismique. Il nous permet de connaître l'état des constructions d'une région et de les classer selon leur vulnérabilité.

Les différents paramètres pris en compte pour cette méthode sont classés en trois catégories. Chaque paramètre a une valeur numérique exprimant la qualité sismique des éléments structurels et non structurels influant sur le comportement sismique de la construction.

Le paramètre ne peut prendre qu'une seule valeur et représente ainsi la classe à laquelle il appartient.

Nous avons distingué trois classes à savoir :

– **Classe A** : dans cette catégorie, sont classés les paramètres ou les éléments réalisés selon le code parasismique en vigueur et donc présentant une bonne résistance au séisme.

– **Classe B** : sont classés dans cette catégorie les éléments conçus selon les anciens codes ou sans tenir tout à fait compte des normes parasismiques lors de leur construction, et qui présentent au moment de leur classification une assez bonne résistance.

– **Classe C** : dans cette classe nous avons les éléments vétustes ou ayant une mauvaise résistance au séisme.

Ces paramètres sont soit de type descriptif ou typologique (comme le type du système de contreventement, la régularité en plan et en élévation, le type de sol, le type de plancher), soit de type qualificatif c'est-à-dire concerne la qualité de l'exécution, le respect des normes en vigueur et l'état de ces éléments (comme la qualité du système de contreventement, la qualité des noeuds, l'état des éléments non structurels).

Définitions des paramètres identifiés

La définition des paramètres choisis pour l'application de la méthode de l'indice de vulnérabilité est basée sur le Règlement Parasismique Algérien modifié en 2003 [36]. Les paramètres retenus sont au nombre de quatorze (14) et définis comme suit :

1. Système de contreventement

Ce paramètre étudie le type du système de contreventement, qui est défini comme étant le système de résistance principale. L'évaluation du système de résistance principale est définie en trois classes :



- **Classe A : Structure Rigide – Résistante** : cette classe regroupe les systèmes de contreventement suivants : Portiques auto-stables avec remplissages en maçonnerie rigide; Voiles porteurs; Noyau et Portiques contreventés par des voiles.
- **Classe B : Structure Rigide – Fragile** : sont regroupés, dans cette classe, les types des systèmes de contreventement suivants : Portiques auto-stables sans remplissages en maçonnerie rigide ; Mixte : portiques/ voiles avec interaction.
- **Classe C : Structure Déformable – Fragile** : dans cette classe, on trouve les autres types de systèmes de contreventement, qui ne sont classés ni dans la classe A, ni dans la classe B.

2. Qualité du système de contreventement

Pour ce paramètre, la classification est faite selon :

- Le type et la qualité des matériaux utilisés.
- La qualité d'exécution et l'état du système.

Selon le RPA99, le comportement des matériaux aux séismes ne peut être dissocié du type de structure qu'ils constituent :

- Le rapport résistance/ masse volumique.
- La rigidité des matériaux qui permet de limiter les problèmes de stabilité de forme.
- La ductilité, qui est la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement.

Trois groupes de classification sont définis :

- **Classe A** : dans cette classe, nous trouvons les structures dont la qualité du système de contreventement est très bonne, c'est-à-dire qu'il respecte toutes les conditions citées par le RPA 99.
- **Classe B** : cette catégorie regroupe les constructions dont la qualité du système de contreventement est moyenne, c'est-à-dire qu'au moins un des critères n'est pas respecté.
- **Classe C** : quand la qualité du système de contreventement est mauvaise, cela signifie que tous les critères ne sont pas respectés.

3. La capacité sismique

La classification de ce facteur se fait en fonction d'un coefficient « α » qui est défini comme étant le rapport entre la force résistante des éléments structuraux de la structure et la force sismique du règlement RPA99.

Les classes sont définies comme suit :

- Classe A** : dans cette classe, la capacité sismique de la structure est plus forte que la force sismique.
- Classe B** : nous trouvons dans cette classe les constructions dont la résistance à la force sismique est moyenne.
- Classe C** : quand la structure présente une faible résistance à la force sismique.

4. Type de sol

La classification de ce paramètre repose sur les caractéristiques du sol. Selon le RPA 99 [33], les types des sols existants sont: S1 : Sol rocheux; S2 : Sol ferme; S3 : Sol meuble et S4 : Sol très meuble.

Les trois classes sont définies comme suit :

Classe A : Sol rocheux (S1), vitesse moyenne de l'onde de cisaillement.

Classe B : sol ferme (S2), dépôts très denses de sables, de graviers et/ou d'argile sur-consolidée sur 10 à 20 m, vitesse moyenne de l'onde de cisaillement.

Classe C : Sol meuble (S3) et Sol très meuble (S4), dépôts de sables et de graviers moyennement denses ou lâches ainsi que dépôts d'argile moyennement raide ou molle.

5. Diaphragme horizontal

Par le paramètre diaphragme horizontal est désigné le type du plancher. La classification de ce paramètre est fonction du type et de l'état du plancher, ainsi que des matériaux utilisés.

Classe A : Plancher rigide : planchers qui se déforment uniquement dans leur plan, c'est-à-dire que tous les points du plancher ont la même déformation. La déformation des planchers est donc une translation ou une rotation.

Classe B : Plancher semi-rigide : planchers qui n'appartiennent ni à la classe A ni à la classe C.

Classe C : Plancher souple : planchers qui se déforment dans les deux plans, c'est-à-dire que chaque point a une déformation indépendante des autres points.

6. Régularité en plan

La définition de la régularité en plan est fonction de la distribution de la masse, de la rigidité et de la forme géométrique en plan. Selon le RPA 99 [36], la régularité en plan est assurée par les critères suivants :

- 1) Le bâtiment doit représenter une configuration sensiblement symétrique dans les deux directions, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.
- 2) À chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment, mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique.
- 3) La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur / largeur du plancher inférieur ou égal à 4.
- 4) Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante, vis-à-vis de celle des contreventements verticaux, pour être considérés comme indéformables dans leurs plans.
- 5) La surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de la surface totale du plancher.

Ainsi, les trois classes sont définies comme suit :

Classe A, Forme régulière : structures qui respectent tous les critères cités auparavant.

Classe B, Forme faiblement irrégulière : constructions partiellement irrégulières, c'est-à-dire les structures qui n'appartiennent ni à la classe A ni à la classe C.

Classe C, Forme irrégulière : bâtiments irréguliers en plan, donc, qui ne respectent aucun des critères cités précédemment.

7. Régularité en élévation

L'importance de ce paramètre dans la méthode de l'indice de vulnérabilité réside dans le fait qu'il touche deux aspects essentiels : la variation de la distribution de la



masse entre deux niveaux successifs et la variation de la résistance du système résistant, entre deux étages successifs.

Pour ce facteur, la réglementation [36] précise que :

- 1) Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu dont la charge ne se transmet pas directement à la fondation.
- 2) La raideur et la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans changement brusque de la base au sommet du bâtiment.
- 3) Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment, entre deux niveaux successifs, ne doit pas dépasser 20% dans les deux directions.
- 4) La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1,5 fois sa plus petite dimension.

Les trois classes définies sont alors :

Classe A, Forme régulière : la structure est classée, dans ce groupe, si tous les critères de classification pour la régularité en élévation sont respectés.

Classe B, Forme faiblement irrégulière : constructions partiellement irrégulières en élévation, donc les structures qui n'appartiennent ni à la classe A, ni à la classe C.

Classe C, Forme irrégulière : constructions irrégulières en élévation, c'est-à-dire ne respectant pas les critères cités auparavant.

8. Qualité des nœuds

On définit les nœuds par la zone de connexion entre les éléments structuraux, c'est-à-dire la zone de jonction fondation-poteau, poteau-poutre, fondation-voile, etc. L'importance de ce paramètre est que l'application de la force sismique se fait dans ces zones de connexion. L'étude et la classification de ce paramètre sont fonction de l'état et de la qualité des zones de connexion des éléments structuraux.

Les trois classes sont définies comme suit :

Classe A, Bonne : constructions dont l'état des zones de connexion de leurs éléments structuraux est bon.

Classe B, Moyenne : constructions dont la qualité de ses nœuds est moyenne.

Classe C, Mauvaise : constructions dont la qualité des zones de connexion des éléments structuraux est mauvaise.

9. Phénomène du poteau court

Ce phénomène se manifeste selon deux aspects :

- Aspect structural : dans ce cas, le poteau court existe dans la conception de la structure (exemple le vide sanitaire). Le calcul du poteau court doit être alors conforme aux règlements en vigueur.
- Aspect provoqué en cours de réalisation : Dans ce cas, la création du poteau court se fait pendant la construction de la structure, ou après, lors des changements apportés à la construction, le long des années de sa vie (ex : ouverture de vasistas).

La définition des classes se fait, dans ce cas, selon le rapport entre l'élément provoquant le phénomène du poteau court (h_i) et la hauteur initiale de l'élément (H) :

$$\beta = \frac{h_i}{H} \quad (1)$$

Dans la référence [IRS, 1999], trois intervalles sont définis pour le rapport β , ainsi nous avons :

Classe A : éléments dont β est tel que : $1 \leq \beta < 0.66$. Pas de risque de présence de poteau court.

Classe B : éléments dont : $0.66 \leq \beta < 0.50$.

Classe C : éléments dont : $\beta \leq 0.50$.

10. Détails

On entend par le paramètre détail, l'état et la qualité des éléments non structuraux qui peuvent influer sur le comportement de la structure lors d'un séisme, ainsi que l'état des divers réseaux qui influent sur la fonctionnalité de la structure.

Les éléments, à prendre en considération, s'ils existent, sont l'état des cloisons, des balcons, du garde corps, de l'escalier, de l'acrotère, du réseau électrique, du réseau gaz, du réseau d'assainissement, du réseau téléphonique et l'état de la toiture.

Les trois classes pour ce paramètre sont :

Classe A, Satisfaisant : plus des trois quarts des éléments existants sont en bon état.

Classe B, Partiellement satisfaisant : la moitié ou le trois quarts des éléments existants sont en bon état.

Classe C, Insatisfaisant : moins de la moitié des éléments existants est en bon état.

11. Maintenance

Les expériences sismiques ont montré l'importance de ce facteur, car il touche l'ensemble des éléments de la structure: les éléments résistants en élévation et les éléments non structuraux.

Classe A : bâtiments dont tous les éléments résistants ne sont pas fissurés et la stabilité des éléments non structuraux est assurée.

Classe B : bâtiments qui ne sont classés ni dans la classe A, ni dans la classe C.

Classe C : bâtiments dont plus de 30% des éléments résistants sont fissurés ou dont l'état de la structure est très mauvais.

12. Modifications

L'introduction de ce paramètre dans notre étude a été déduite à partir des expériences sur site et des observations, car ce facteur tient compte des changements ou des anomalies apportés à la construction. Parmi ces changements, on peut citer les ajouts et/ou les suppressions d'éléments dans les constructions, le changement de l'usage de la structure, l'augmentation importante de la charge permanente ou d'exploitation, etc. Ces facteurs ont pour effet d'engendrer une modification des forces appliquées à la structure. Ceci peut provoquer un changement dans le centre de masse qui se traduira par une altération dans la réponse de la structure.

Les trois classes sont définies comme suit :

Classe A : structures qui n'ont subi aucune modification ou changement.

Classe B : structures dont des changements ou des modifications moyennes sont observés.



Classe C : constructions qui ont subi des modifications importantes. On entend par modifications importantes, les modifications qui touchent les éléments structuraux, donc qui peuvent provoquer un changement dans le centre de masse et/ou le centre de rigidité.

13. Entrechoquement

L'entrechoquement est l'interaction, entre deux structures adjacentes, dont l'effet du comportement sismique de l'une par rapport à l'autre, durant l'occurrence sismique, est important. Dans le RPA99, nous trouvons l'expression suivante pour la justification des joints sismiques :

$$d_{\min} = 15 \text{ mm} + (\delta_1 + \delta_2) \text{ mm} > 40 \text{ mm.} \quad (2)$$

Avec : δ_1 et δ_2 : déplacement maximum des deux blocs, au niveau du sommet du bloc le moins élevé.

Les trois classes sont définies comme suit :

Classe A : constructions ne représentent pas de risque d'entrechoquement. En effet, ces structures sont soit isolées, soit séparées par des joints de rupture d'une épaisseur suffisante. Pour cette classe, l'épaisseur définie est de 10 cm.

Classe B : constructions dont le risque d'interaction entre les structures adjacentes est moyen ou l'épaisseur du joint de rupture est insuffisante (épaisseur entre 4 cm et 10cm). **Classe C** : constructions où le risque de l'entrechoquement est fort, donc les structures ne possèdent pas de joint de rupture.

Pratiquement, c'est le respect ou non de la dimension du joint sismique, définie dans le RPA 99 version 2003, qui déterminera la classification.

14. Conditions du sol

Vu l'importance de ce facteur dans les dégâts sismiques, nous avons introduit ce facteur dans notre étude avec :

Classe A : constructions qui sont implantées dans des sites qui ne présentent aucun risque.

Classe B : constructions qui n'appartiennent ni à la classe A, ni à la classe C.

Classe C : constructions implantées dans des sites à risque : abords d'une falaise, haut ou bas d'une colline, abords d'une rivière ou d'un oued, terrain accidenté avec changement de pente important.

Détermination des coefficients de pondération

À chaque classe de paramètre prédéfini est associé un coefficient « K_i » appelé coefficient de pondération; ce dernier exprime la qualité sismique du paramètre en question.

La détermination des valeurs « K_i » est basée sur le retour d'expérience sismique en Algérie relatif aux données statistiques du tremblement de terre d'Ain Timouchent en 1999 ($M= 5,8$) et du séisme de Zemouri en 2003 ($M=6,8$). L'analyse statistique faite sur 87 bâtiments pour le cas du séisme d'Ain Timouchent et sur 567 bâtiments pour le cas du séisme de Zemouri a permis de déterminer les valeurs des coefficients « K_i » notées dans le tableau (2) et celles des coefficients de corrélation entre quelques paramètres simples et l'indice de vulnérabilité totale pour les deux tremblements de terre considérés (tableau 3).

N° Paramètre	Paramètre	Catégories / K_i		
		A	B	C
1	Système de contreventement	0.00	0.09	0.16
2	Qualité du système de contreventement	0.01	0.03	0.06
3	Capacité sismique	0.00	0.01	0.03
4	Type de sol	0.01	0.03	0.06
5	Diaphragme Horizontal	0.01	0.03	0.06
6	Régularité de plan	0.01	0.03	0.06
7	Régularité en élévation	0.00	0.06	0.12
8	Qualité des noeuds	0.01	0.03	0.06
9	Phénomènes du Poteau court	0.01	0.03	0.06
10	Détails	0.01	0.03	0.06
11	Conditions de maintenance	0.00	0.06	0.09
12	Modifications	0.01	0.03	0.06
13	Entrechoquement	0.01	0.03	0.06
14	Conditions du sol	0.01	0.03	0.06

Tableau 2 : Éléments, coefficients.



Points	Tremblement de terre	Ain Temouchent (1999)	Boumerdes (2003)
Système de contreventement	(1)	22	54
Capacité Sismique	(3)	25	67
Phénomène de Poteau court	(9)	18	46
Conditions de maintenance	(11)	21	50
Modifications	(12)	15	48
Entrechoquement	(13)	17	44
Conditions du sol	(14)	12	27

Tableau 3 : Coefficients de corrélation de certains paramètres.

Ce tableau montre que la capacité sismique est le paramètre le plus influent, suivi par le système de contreventement. Les paramètres phénomène de poteau court, conditions de maintenance, modification et entrechoquement ont le même poids.

L'indice de vulnérabilité est exprimé comme suit :

$$Iv = \sum_{i=1}^{14} Ki \quad (3)$$

Selon la valeur obtenue par l'indice de vulnérabilité, trois classes de vulnérabilité sont proposées pour chacune des catégories des constructions en BA (tableau 4).

Dans les classes "Vert" nous trouvons les constructions qui ne nécessitent pas d'intervention, et dans les classes "Orange", les structures qui nécessitent un renforcement. Une étude dans ce sens devra être en tous cas alors effec-

tuée. Quant à celles appartenant à la classe "Rouge", les structures doivent être évacuées et reconstruites.

Courbes de vulnérabilité semi-empiriques

Dans le tableau 5, cinq classes de dommages sont définies ; la description de chaque classe est donnée ci-après (Elles suivent la description de l'EMS) :

Les Cinq degrés de dommages sont définis et arrangés dans un ordre croissant de vulnérabilité. Pour chaque classe de vulnérabilité (Tableaux 6, 7, 8, 9 et 10), nous avons défini la matrice de probabilité de dommage (DPM) pour les cinq niveaux de dommages présentés auparavant.

CLASSE	VERT		ORANGE		ROUGE
	1	2	3	4	5
IV	0.10 – 0.20	0.20 – 0.40	0.40 – 0.55	0.55 – 0.70	0.70 – 1.00
IVmoy.	0,150	0,300	0,475	0,625	0,850

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

CLASSE	GRADE	DESCRIPTION
Vert	1	Dommages négligeables à légers.
Vert	2	Dommages structuraux légers, dommages non structuraux modérés.
Orange	3	Dommages structuraux modérés, dommage non structuraux importants.
Orange	4	Dommage structuraux importants, dégâts non structuraux très importants.
Rouge	5	Dommages très importants pour les éléments structuraux, effondrement partiel ou total.

Tableau 5 : Description des dommages.



Dommages Intensité	1	2	3	4	5
V					
VI					
VII					
VIII	Rares				
IX	Quelques	Rares			
X	Nombreux	Quelques	Rares		
XI		Nombreux	Quelques	Rares	
XII			Nombreux		

Tableau 6 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 1.

Dommages Intensité	1	2	3	4	5
V					
VI					
VII	Rares				
VIII	Quelques				
IX	Nombreux	Quelques			
X		Nombreux	Quelques		
XI			Nombreux	Quelques	
XII					

Tableau 7 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Vert 2.

Dommages Intensité	1	2	3	4	5
V					
VI	Rares				
VII	Quelques	Rares			
VIII	Nombreux	Quelques	Rares		
IX		Nombreux	Quelques	Rares	
X			Nombreux	Quelques	
XI				Nombreux	
XII					

Tableau 8 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 3.





Dommages Intensité	1	2	3	4	5
V	Rares				
VI	Quelques				
VII	Nombreux	Quelques			
VIII		Nombreux	Quelques		
IX			Nombreux	Quelques	
X			La plupart	Nombreux	Quelques
XI				La plupart	Nombreux
XII					

Tableau 9 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Orange 4.

Dommage Intensité	1	2	3	4	5
III	Rares				
IV	Quelques	Rares			
V	Nombreux	Quelques			
VI		Nombreux	Quelques		
VII			Nombreux	Quelques	
VIII			La plupart	Nombreux	Quelques
IX				La plupart	Nombreux
X					La plupart
XI					
XII					

Tableau 10 : Matrice de probabilité de dommage de la classe Rouge 5.

Les termes utilisés Rares, Quelques, Nombreux et la plupart sont définis en fonction du pourcentage de bâtiments endommagés pour une intensité donnée :

Rares : le pourcentage est compris entre 0 et 5%

Quelques : le pourcentage est compris entre 0 et 20%

Nombreux : le pourcentage est compris entre 0 et 40%

La plupart : le pourcentage est supérieur à 60%

Les courbes de vulnérabilité empiriques sont obtenues à partir de la détermination du taux de dommage moyen « μ_d ». Ce taux est la probabilité associée à chaque degré de dommage que le bâtiment est susceptible de subir. De plus, le taux de dommage moyen permet d'exprimer le pourcentage de bâtiments endommagés à l'aide de la loi bêta.

Le taux de dommage moyen est estimé par l'indice de vulnérabilité des bâtiments et l'intensité séismique sur

l'échelle MMI. Le taux de dommage moyen est donné par l'expression suivante :

$$\mu_d = 2,55 \times (1 + \tanh [I + (7 \times Iv_moy) - 13]/2,5) \quad (4)$$

avec :

I : Intensité sur l'échelle MMI

Iv Moy : Indice de vulnérabilité moyen de chaque classe de vulnérabilité sismique. Ce dernier a été donné dans le tableau 3. Les courbes de vulnérabilité obtenues sont les fonctions de vulnérabilité semi empiriques et sont représentées dans la figure (1) pour chaque classe de vulnérabilité.

Les courbes ci-dessus représentent les courbes de vulnérabilité des structures en béton armé en Algérie et ont été comparées à celles produites par la méthode RISK-UE.

Nous avons donc tracé les courbes données par RISK-UE sur le même graphe que les courbes que nous avons développées (figure 2).

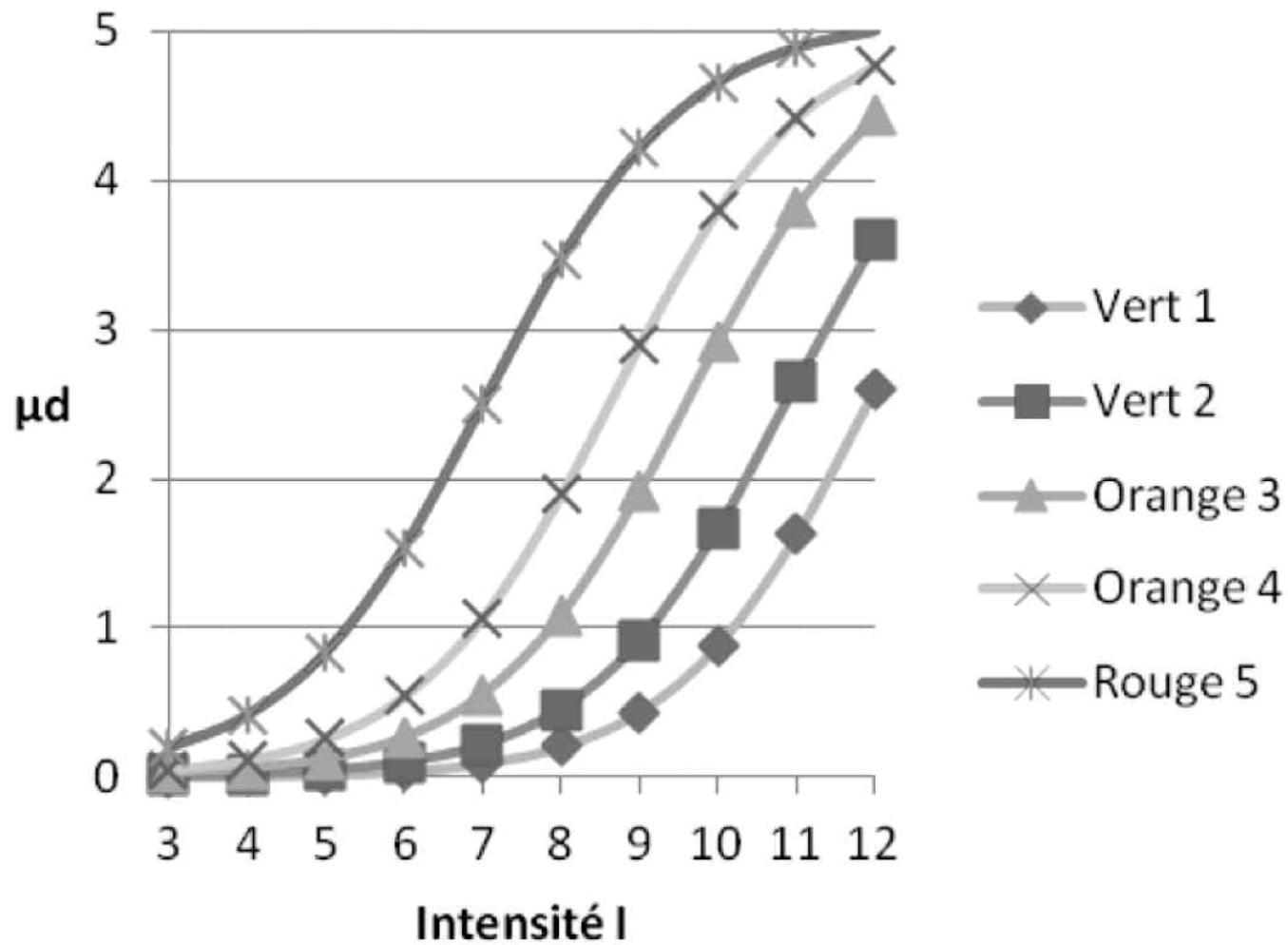


Figure 1 : Courbes de vulnérabilité semi-empiriques.

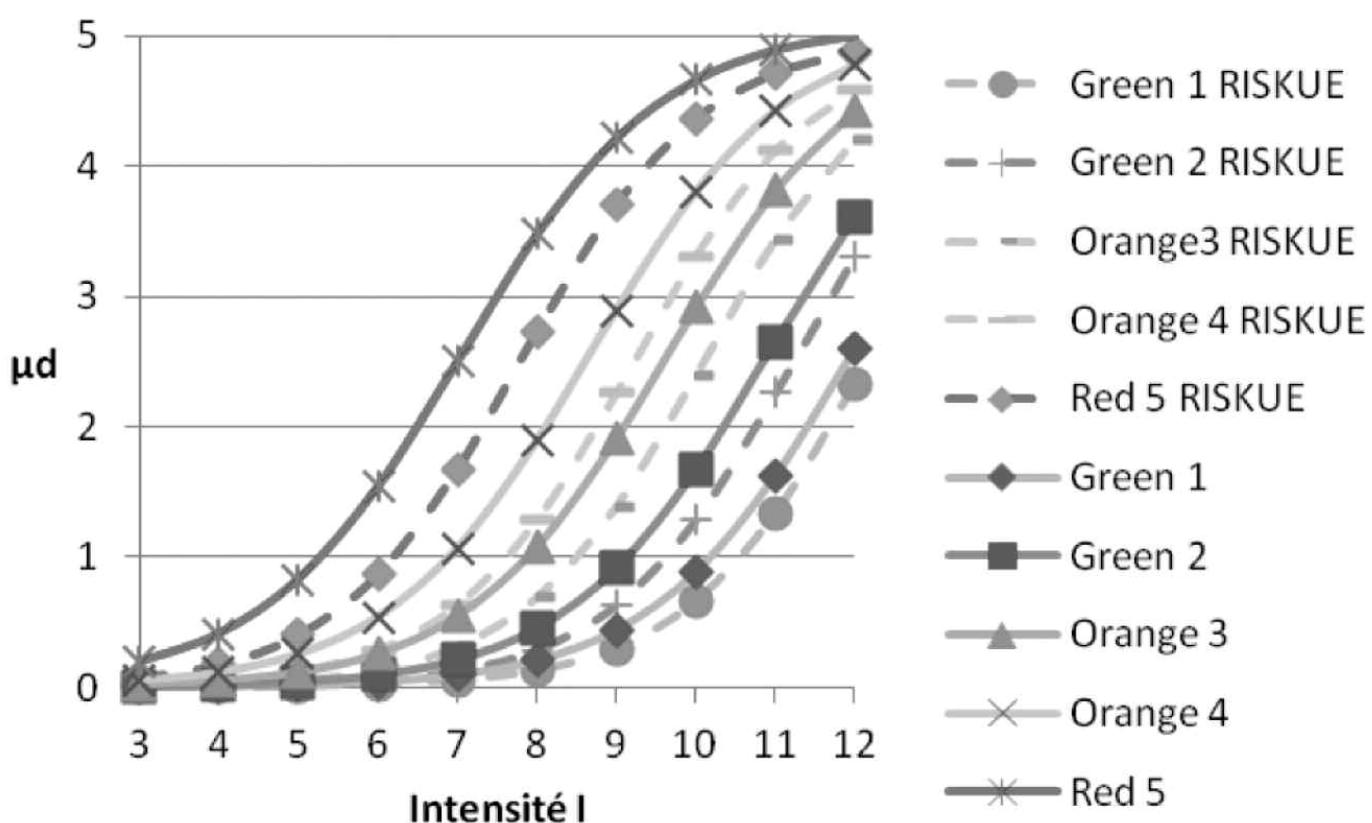


Figure 2 Courbes de vulnérabilité développées et celles de RISK-UE.



On peut remarquer que les courbes de vulnérabilités algériennes sont plus conservatives que celles données par RISK-UE, cela est dû au manque d'entretien et aux transformations faites qui ne sont pas en conformité avec le code de réglementation sismique algérienne.

CONCLUSION

La vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé (BA) a été appréhendée en première approche par la méthode de l'indice de vulnérabilité. Ainsi, les paramètres ayant une influence sur le comportement sismique de la structure ont été identifiés et un facteur de pondération a été donné à chaque paramètre selon les catégories de bâtiments définies. L'expérience des tremblements de terre de Ain Timouchent (1999) et de Boumerdes (2003) a été utilisée. Cette méthode permet de classer les bâtiments BA en fonction de leur vulnérabilité à travers un indice calculé (Iv).

Pour l'estimation de la vulnérabilité à grande échelle, nous avons utilisé une approche statistique. Cette approche consiste à proposer des matrices de probabilité de dommage pour chaque classe de vulnérabilité. Ces matrices expriment la quantification de niveau de dommage correspondant à différentes intensités sur l'échelle MMI. Ceci a permis la construction des matrice de probabilité de dommage (DPM : Damage Probability Matrices).

Nous avons utilisé la loi de probabilité « Béta » pour calculer des matrices de probabilité de dommage continues. Le taux de dommage moyen est calculé en fonction de l'indice de vulnérabilité moyen pour chaque classe de vulnérabilité et l'intensité sismique. Nous avons alors tracé les courbes de vulnérabilité semi-empiriques pour chaque classe de vulnérabilité.

RÉFÉRENCES

- [1] FEMA. *HAZUS Earthquake loss estimation methodology*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1999.
- [2] GNDT. *Instruzioni per la Compilazione della Scheda di Relavamento Esposizione e Vulnerabilità Sismica Degli Edifici*. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Regione Emilia Romagna y Regione Toscana, Italy, 1986, in Italian.
- [3] RISK-UE: “An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities” (2001-2004). Website: <http://www.risk-ue.net>
- [4] ORSINI G, A model for buildings' vulnerability assessment using the parameter less scale of seismic intensity (PSI), *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No 3, 1999, pp 463–483.
- [5] ROSSETTO T AND ELNASHAI A, Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data, *Engineering Structure*, Vol. 25, No 10, 2003, pp1241– 1263.
- [6] SHINOZUKA M, FENG Q, LEE J AND NAGANUMA T, Statistical analysis of fragility curves, *ASCE Journal Engineering*, Vol. 126, No 12, March 2000, pp 1224–1231.
- [7] ATC. *Earthquake damage evaluation data for California*. ATC-13 report, Redwood City, Applied Technology Council, California, 1985.
- [8] MOSALAM K M, AYALA G, WHITE R N AND ROTH C, Seismic fragility of LRC frames with and without masonry infill walls, *Earthquake Engineering*, Vol. 1, No 4, 1997, pp 693–720.
- [9] REINHORN A M, BARRON CORVERA R AND AYALA A G, Spectral evaluation of seismic fragility of structures, *Structural safety and reliability*, ICOSSAR 2001, 2001.
- [10] CHRYSSANTHOPOULOS M K, DYMIOTIS C AND KAPPOS A J, Probabilistic evaluation of behaviour factors in EC8-designed R/C frames. *Engineering Structure*, Vol. 22, No 8, 2000, pp 1028–1041.
- [11] CELIK O C AND ELLINGWOOD B R, Seismic risk assessment of gravity load designed reinforced concrete frames subjected to Mid-America ground motions. *ASCE Journal of Structure Engineering*, Vol. 135, No 4, 2009, pp 414–424.
- [12] ELLINGWOOD B R, CELIK O C AND KINALI K, Fragility assessment of building structural systems in Mid America, *Earthquake Engineering Structure Dynamic*, Vol. 36, No 13, 2007, pp1935–1952.
- [13] ROSSETTO T AND ELNASHAI A, A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures, *Engineering Structure*, Vol. 27, No 3, 2005, pp397–409.
- [14] KAPPOS A, PITILAKIS K, STYLIANIDIS K, MORFIDIS K AND ASIMAKOPOULOS D, Cost-benefit analysis for the seismic rehabilitation of buildings in Thessaloniki, based on a hybrid method of vulnerability assessment. *Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation*, pp 406–413, 1995.
- [15] RAJEEV P AND TESFAMARIAM S, Seismic fragilities for reinforced concrete buildings with consideration of irregularities, *Structural Safety*, No39, 2012, pp. 1-13.
- [16] FEMA (Federal Emergency Management Agency). *HAZUS-MH MR3 technical manual*, Washington, DC FEMA, 2003.
- [17] DIMOVA S L AND NEGRO P, Assessment of seismic fragility of structures with consideration of the quality of construction. *Earthquake Spectra*, Vol 22, No 4, 2006, pp 909–936.
- [18] ERBERIK M A, Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No 3, 2007, pp 387–405.
- [19] KAPPOS A J, PANAGOPOULOS G, Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece, *Structural Infrastructure Engineering*, Vol. 6, No 1, 2010, pp 39–53.
- [20] LAGAROS N D, Life-cycle cost analysis of design practices for RC framed structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5, 2007, pp 425–42.
- [21] LAGAROS N D, Probabilistic fragility analysis: a tool for assessing design rules of RC buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 7, No 1, 2008, pp 45–56.
- [22] TESFAMARIAM S AND SAATCIOGLU M, Risk-based seismic evaluation of reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No 3, 2008, pp 795–821.
- [23] TESFAMARIAM S AND SAATCIOGLU M, Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modelling, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No 1, 2010, pp 235–56.
- [24] Règlement Parasismique Algérien (RPA88), Centre National de Recherche en Génie Parasismique, Algérie, 1988.



- [25] Règlement parasismique Algérien (RPA99), Centre National de Recherche en Génie Parasismique, Algérie, 1999.
- [26] BELHEOUANE F I AND BENSAIBI M, Seismic vulnerability index for reinforced concrete construction in Algeria, Advanced Science Letter, Vol. 13, 2012, pp. 364-368.
- [27] BELHEOUANE F I AND BENSAIBI M, Evaluation of the vulnerability index for reinforced concrete construction in Algeria under seismic action, International Journal of Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications (IJATEMA), Vol. 1, No 1, 2012, pp 101 – 106.
- [28] CRAAG, www.craag.dz/surveillance.html, www.craag.dz, 2012.
- [29] Recommandations Anti-Sismiques 1955, (AS 55).
- [30] Règlement Parasismique Algérien, Centre National de Recherche en Génie Parasismique, 1962, (RPA 62).
- [31] Règles de Calcul des Constructions en Béton Armé 1968, (CCBA 68).
- [32] Règles de calcul du Béton Armé 1960, (BA 60).
- [33] Calculs des Constructions en Béton Armé 1993, (CCBA 93).
- [34] Règlement Parasismique Algérien, Centre National de Recherche en Génie Parasismique, 1981, (RPA 81).
- [35] Règlement Parasismique Algérien, Centre National de Recherche en Génie Parasismique, 1983, (RPA 83).
- [36] Règlement Parasismique Algérien, Centre National de Recherche en Génie Parasismique, Algérie, 2003 (RPA version 2003).
- [37] BENEDETTI D, BENZONI G AND ANDPARISI M A, (Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, Earthquake Engineering and Structure Dynamic, Vol. 16, 1988, pp 183-201.
- [38] YÉPEZ F, BARBAT A H AND CANAS J A, A Method to Perform Computer Simulations of Damage in Buildings for Seismic Risk Evaluation, Technical University of Catalonia, Spain, 1996.

GLISS'GRIP SAS

Salles de bains, baignoires, terrasses, passerelles, plages de piscines, parkings, descentes de garages, halls d'immeubles, magasins...

pour toutes les surfaces neuves ou à rénover :

Les sols glissants ne sont plus une fatalité !

GLISS'GRIP SAS

TOUS LES PRODUITS ANTIDÉRAPANTS POUR TOUTS LES SOLS GLISSANTS

123-125 Avenue Louis Roche, ZI Les Basses Noëls - 92230 GENNEVILLIERS - FRANCE
01 40 86 43 10 - info@glissgrip.com - www.glissgrip.com

