

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉVALUATION DE LA FONCTION DE VULNÉRABILITÉ ET DU RISQUE SISMIQUE POUR LES STRUCTURES EN POTEAUX POUTRES ÉTUDE DE CAS : WILAYA DE BOUMERDÈS ALGÉRIE

Mohand HAMIZI, Leyla BOUZID, BOUKAIS Said, Naceur Eddine HANNACHI
Département de Génie civil, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 15000, Algérie

1. INTRODUCTION

L'évaluation du risque et de la vulnérabilité sismiques s'est faite sur la base des dommages recensés lors du séisme de Zemmouri-Boumerdès qui a eu lieu le 21 Mai 2003 à 19h44 (heure locale). La magnitude de ce séisme a été de $M_w = 6,8$. Il a touché les régions de Boumerdès et d'Alger dans une zone allant principalement de Blida à Dellys, de dimension approximative 150 km x 80 km [1]. Son épicentre physique a été situé en mer très proche du littoral à 60 km au nord-est d'Alger plus précisément à quatre kilomètres de la côte, en face des villes de Zemmouri et Boumerdès. L'épicentre du choc principal est situé aux coordonnées géographiques suivantes : Latitude : 36°81'N. Longitude : 3°53'E (CGS 2003).

Le mécanisme au foyer, compatible avec l'orientation du champ de contrainte régional, témoigne d'un mouvement de type inverse, sur un plan nodal préférentiel d'azimut N 70° à pendage 45° vers le Sud – Est [2].

Le choc principal a été suivi durant le premier mois de plus de 240 répliques, la plus forte atteignant une magnitude de 5,8. Les mécanismes au foyer de ces répliques sont cohérents avec celui déterminé pour le choc principal : faille de

type inverse d'orientation NNE-SSW. Selon le CRAAG, 5 répliques de magnitude supérieure à 5,0 ont été ressenties dans l'Algérois dans la semaine qui a suivie le choc principal. Le dernier bilan en date du 21 juin 2003, fait état de 2278 morts, 10147 blessés et plus de 15000 sans abri. Les bâtiments endommagés sont situés principalement à Boumerdès, Corso, Zemmouri, Sidi Daoud et Dellys [2].

Le cadre bâti touché par le séisme date en majeure partie des années 80. La majorité des bâtiments qui ont été expertisés peuvent être rassemblés selon quatre grandes familles typologiques :

- 1- Constructions anciennes en maçonnerie non armée et non chaînée.
- 2- Voiles en béton armé.
- 3- Ossature métallique avec murs de remplissage en maçonnerie.
- 4- Portiques en béton armé avec murs de remplissage en maçonnerie généralement de briques, qui représentent 80% des constructions.

Pour des raisons de disponibilité de documents, on a été contraint de faire cette étude sur la ville de Boumerdès et non sur celle de Zemmouri qui est pourtant plus proche de l'épicentre [7].

SEISME DU 21 MAI 2003 - Mw=6.8 ALGER - BOUMERDES - DELLYS

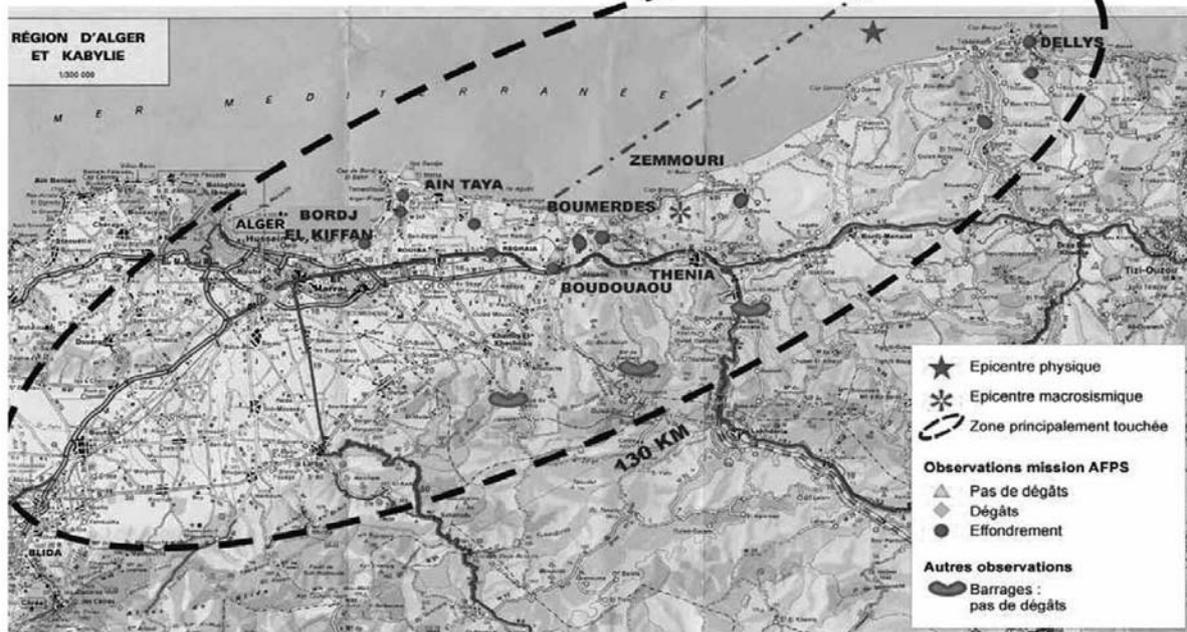


Figure 1. Etendue de la zone du sinistre.

2. OBJECTIF

Cette étude a pour but de tracer la fonction de vulnérabilité, en tenant compte des facteurs pathologiques les plus défavorables et les plus répandus. [8]

Ce tracé se fera grâce à l'analyse des fiches de recensement, qui permettront d'évaluer qualitativement une présomption de vulnérabilité, mais aussi un état des dommages pour chaque structure afin d'avoir finalement une courbe statistique approximant un nuage de points, reflétant le comportement des structures étudiées. L'objectif sera donc de traduire le rapport entre vulnérabilité et dommages par une conclusion sur le bâti existant dans la région touchée par ce séisme, en vue d'éventuelles améliorations.

3. MÉTHODOLOGIE

La méthode utilisée pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments est la méthode empirique développée dans les années 1980 par Benedetti et Petrini [9]. Cette méthode sert souvent de référence pour évaluer la vulnérabilité sismique des structures sur une large échelle géographique, à savoir des quartiers entiers ou des villes [10-13]. Elle évalue la vulnérabilité sismique à partir d'influences individuelles (c'est-à-dire pondérées) d'un ensemble de paramètres structuraux explicatifs supposés gouverner la réponse sismique des structures. Il s'agit principalement de :

- Paramètres mécaniques liés à la conception et à la mise en œuvre, tels que la qualité de la construction (qualité du système porteur, qualité du système de contreventement, état de conservation et âge de l'ouvrage), la géométrie de l'ouvrage (symétrie en plan, régularité en élévation, redondance des fils).
- Paramètres mécaniques liés au sol.

Cette méthode consiste à affecter des indicateurs numériques à chaque bâtiment, appelés indices de vulnérabilité et notés I_V [9]. Ces indices, basées en fait sur une analyse qualitative, génèrent toutefois une valeur qui, à vrai dire, ne permet pas de quantifier ni la vulnérabilité ni le risque sismique d'une manière directe. Il faut en effet établir, à partir d'analyses mécaniques simplifiées, des fonctions de vulnérabilité qui mettent en rapport l'indice de vulnérabilité I_V avec le niveau d'endommagement ou de risque. Cette méthode traduit les niveaux de dommages en termes de risque résiduel de défaillance prenant des valeurs allant de 0 (aucun dommage) à 1 (dommage complet).

4. BILAN DE LA CATASTROPHE

Durant le séisme de Boumerdès, nous avons observé l'influence de certains éléments structuraux et non structuraux sur le comportement des bâtiments. Pour cela une analyse détaillée de chaque bâtiment endommagé a été effectuée.

Elle permettra de déterminer plus tard le type de renforcement à mettre en œuvre sur les constructions endommagées.

Le bilan au 26 juin 2003 fait état de 59525 édifices diagnostiqués dont 34992, soit 58,8%, n'ont subi que des dégâts de négligeables à modérés, et 17755 soit 29,82% ont subi des dégâts importants à très importants, et 6778 soit 11,38% ont été détruits [2].

5. PRINCIPES DE L'ÉTUDE

Notre étude a donc porté sur les bâtiments endommagés lors du séisme du 21 mai 2003. Le recueil des données liées aux dommages a été effectué par les équipes du Centre de Génie Sismique (CGS) et du contrôle Technique de la Construction (CTC) dépêchées sur les lieux de la catastrophe. Les dommages par bâtiment ont été reportés sur des fiches d'évaluation statistiques. Ces fiches contiennent les composantes structurelles et non structurelles, l'identification, l'usage et la description sommaire du bâtiment diagnostiqué. Les résultats de l'enquête relatifs aux dommages sont portés sur ces fiches [7].

Nous avons pris en considération un échantillon de 508 bâtiments. Ce sont tous des structures implantées à Boumerdès, à usage d'habitation (avec ou sans locaux au niveau des rez-de-chaussée).

Trois classifications successives nous ont permis de déterminer les bâtiments à analyser : une classification selon la typologie des structures, une deuxième en fonction du degré de dommage et enfin, une troisième dépendant de critères pathologiques [3].



Figure 2. Effondrement d'un R+1 dû à la transparence du rez de chaussée.

5.1. Estimation des dommages

Pour l'évaluation des dommages de chaque bâtiment, nous avons utilisé les fiches d'expertise du C.T.C. (organisme de contrôle des constructions en Algérie) [7]. Cette évaluation de la vulnérabilité considère cinq niveaux de dommages : « 1 = vert clair » pour les très légers dommages (le bâtiment nécessite des réparations très légères et peut rester en service), « 2 = vert foncé » pour les dommages très réduits (le bâtiment nécessite des réparations mais ne présente aucun danger pour les occupants), « 3 = orange clair » pour des dommages significatifs (le bâtiment nécessite d'importantes réparations et doit être évacué), « 4 = orange foncé quand les dommages sont importants (le bâtiment exige d'importants travaux de confortement et doit être évacué) et « 5 = rouge » pour des dommages très importants (le bâtiment ne peut plus être en service et doit être démolé) (tableau 1).

5.2. Classification selon la typologie des structures

L'échantillon de 508 structures pris en considération se répartit comme suit [7] :

- 1- 340 structures en poteaux poutres en béton armé, soit 66,93% de l'échantillon recensé.
- 2- 64 structures en maçonneries (chaînées ou non chaînées), soit 12,6%.
- 3- 64 structures en voile en béton armé, soit 12,6%.
- 4- 15 structures mixtes (poteaux poutres +voiles en béton armé), soit 2,95%.
- 5- 5 structures en charpentes métalliques, soit 0,98%.
- 6- 20 structures en terres (précaire), soit 3,93%.



Figure 3. Effondrement d'un R+8 dû à l'éclatement des nœuds.

| Niveau des dommages | Description des désordres | Couleur |
|---------------------|---|---------------------|
| 1 | <u>Pas de dommages</u> Vitres cassées et meubles renversés | Vert clair |
| 2 | <u>Dommages légers</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fissures sur cloisons intérieures • Fissures dans les plafonds • Chute des gorges et rosaces | Vert foncé |
| 3 | <u>Dommages modérés</u> <ul style="list-style-type: none"> • Importants désordres dans les éléments secondaires (balcons, cages d'escaliers, ...) • Fissures légères dans les éléments structuraux (les poteaux, les poutres, les dalles, les voiles...) | Orange clair |
| 4 | <u>Dommages significatifs</u> <ul style="list-style-type: none"> • Très importants désordres non structuraux • Dégâts importants dans les éléments structuraux (éclatement des nœuds, rotules plastiques dans les poteaux et les poutres, fissures en X dans les voiles, éclatement des linteaux....) | Orange foncé |
| 5 | <u>Bâtiment à démolir</u> <ul style="list-style-type: none"> • Disparition ou effondrement d'un étage • Inclinaison d'un bâtiment • Glissement et basculement d'un bâtiment • Dislocation d'éléments structuraux | rouge |

Tableau 1. Echelle d'évaluation de degré de dommage.

| | <i>Poteaux poutres</i> | <i>Maçonnerie</i> | <i>Voiles</i> | <i>Mixtes</i> | <i>Charpentes métalliques</i> | <i>Autres</i> |
|--------------------|------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| Vert 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Vert 2 | 106 | 28 | 44 | 7 | 2 | 10 |
| Orange 3 | 99 | 19 | 16 | 4 | 1 | 5 |
| Orange 4 | 9 | 11 | 2 | 4 | 2 | 3 |
| Rouge 5 | 39 | 6 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Total | 304 | 64 | 64 | 15 | 5 | 20 |
| Pourcentage | 66,93% | 12,60% | 12,60% | 2,95% | 0,98% | 3,93% |

Tableau 2. Etat des dommages en fonction de la typologie des bâtiments.

5.3. Classification des bâtiments en fonction du degré de dommage

Nous avons axé notre étude sur les structures en poteaux poutres, qui représentent pratiquement 70% des constructions à usage d'habitation. Parmi 340 structures en poteaux poutres, nous avons noté que [7] :

- 1- 1 structure est classée « Dégâts négligeables à légers », en vert 1.
- 2- 106 structures sont classées « Dégâts modérés », en vert 2.

- 3- 99 structures sont classées « Dégâts sensibles à importants », en orange 3.
- 4- 5 structures sont classées « Dégâts très importants », en orange 4.
- 5- 39 structures sont classées « à démolir », en rouge 5.

Les constructions classées en vert 1 et vert 2 pourront assurer la continuité de leurs fonctions après de simples réparations. Les constructions classées en orange 3 et orange 4 sont des constructions à expertiser, elles nécessitent des investigations supplémentaires. Les constructions classées en rouge ne sont plus fonctionnelles et elles sont à démolir.

5.4. Classification des bâtiments en fonction des différents critères pathologiques

Sur les 508 bâtiments considérés, les dommages que nous avons recensés sont dus à [5] :

- Qualité du système résistant (Qr).
- Qualité du contreventement (Qc).
- Age de la construction (Ag).
- Etat de conservation (Ec).
- Entrechoquement (Et).
- Eléments secondaires (Es).
- Condition de sol (So).
- Infrastructure (If).
- Symétrie en plan (Sy).
- Régularité en élévation (Ré).
- Redondance des fils (Rf).

Après recensement des 340 bâtiments en poteaux poutres, nous avons procédé comme suit :

- Recensement des 11 facteurs pathologiques pour chaque structure (chaque fiche de relevé).
- Comptabilisation des facteurs reliés à des dommages, pour chaque structure (Tableau 3).

- Conversion en pourcentage de ces facteurs, donnant l'importance des dommages en % (Tableau 4).

Les coefficients de pondération normalisés pour le calcul de la fonction de vulnérabilité [3] sont obtenus en divisant chaque coefficient de pondération par le maximum de ces coefficients, égal à 0,98. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

6. ESTIMATION DES DOMMAGES PAR BÂTIMENT

L'état de dommage des structures expertisées dans la ville de Boumerdès a été obtenu en attribuant à chaque élément structurel et non structurel une échelle graduelle représentée par des valeurs et des couleurs [Tableau N°1]. Le degré de dommage pour chaque bâtiment est donc compris entre 0% et 100% [7].

Le degré de dommage maximal sera égal à 55. Il est obtenu lorsque tous les critères pathologiques atteignent la valeur maximale de 5, (11 facteurs x valeur max de 5 = 55). Ce degré est normalisé pour chaque structure en divisant la

| <i>Critères pathologiques (Φ_i).</i> | <i>Comptabilisation des (Φ_i) pour les 340 structures.</i> | <i>Caractéristiques des critères pathologiques</i> |
|--|--|---|
| Qr | 213 | Qualité du système résistant mauvaise. |
| Qc | 116 | Qualité du contreventement mauvaise. |
| Ag | 83 | Endommagés, malgré leur âge concordant avec l'entrée en vigueur du RPA (Règlement Parasismique Algérien). |
| Ec | 233 | Etat de conservation mauvais. |
| Et | 85 | Influence sur / d'une construction adjacente. |
| Es | 335 | Eléments secondaires endommagés. |
| So | 29 | Dommages liés à des mauvaises conditions de sol. |
| If | 75 | Infrastructure endommagée. |
| Sy | 119 | Ne présentant pas de symétrie en plan. |
| Ré | 172 | Irréguliers en élévation. |
| Rf | 173 | Redondance des fils irrégulière. |

Tableau 3. Comptabilisation des 11 facteurs pathologiques pour chaque structure en poteaux poutres.

| <i>Critères pathologiques (Φ_i).</i> | <i>Importance des dommages pour les 340 structures en %.</i> | <i>Coefficient de pondération.</i> | <i>Coefficients de pondération normalisé (R_i).</i> |
|--|--|------------------------------------|--|
| Qr | 62,64% | 0,63 | 0,64 |
| Qc | 34,11% | 0,34 | 0,35 |
| Ag | 24,41% | 0,24 | 0,24 |
| Ec | 68,53% | 0,68 | 0,7 |
| Et | 25% | 0,25 | 0,25 |
| Es | 98,53% | 0,98 | 1 |
| So | 8,53% | 0,08 | 0,08 |
| If | 22,05% | 0,22 | 0,22 |
| Sy | 35% | 0,35 | 0,36 |
| Ré | 50,58% | 0,5 | 0,51 |
| Rf | 50,88% | 0,51 | 0,52 |

Tableau 4. Calcul des coefficients de pondération normalisés en fonction des critères pathologiques.

valeur obtenue par la valeur maximale $D = 55$. Il sera compris entre 0 et 1. [3].

La procédure de l'estimation des dommages est obtenue comme suit :

- Pour chaque structure, nous sommes les degrés de dommages - trouvés d'après le tableau 1- des 11 facteurs, le total est ensuite divisé par 55.
- Obtention de résultats variant de 0 à 1.

7. CALCUL DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ

La méthode de l'indice de vulnérabilité (I_V) permet d'identifier les éléments structuraux et non structuraux susceptible de jouer un rôle significatif dans le comportement sismique du bâtiment [3]. Cet indice est un paramètre

obtenu à partir du diagnostic de tous les éléments composant chaque bâtiment.

L'indice de vulnérabilité (I_V) de chaque structure est égal à la somme des produits de tous les degrés d'appréciation des critères pathologiques par leurs coefficients de pondération selon les concepts d'approche développés dans AFPS N°25 et [3]. Les résultats obtenus s'écrivent de la manière suivante :

$$I_V = \sum_{i=1}^n \phi_i . R_i$$

Avec n : nombre de facteurs pathologiques, pris égal à 11.

$$I_V = 0.64 Qr + 0.35 Qc + 0.24 Ac + 0.7 Ec + 0.25 Et + 1.00Es + 0.08 So + 0.22 If + 0.36Sy + 0.51 Ré + 0.52 Rf.$$

I_V : somme de tous les critères pathologiques.

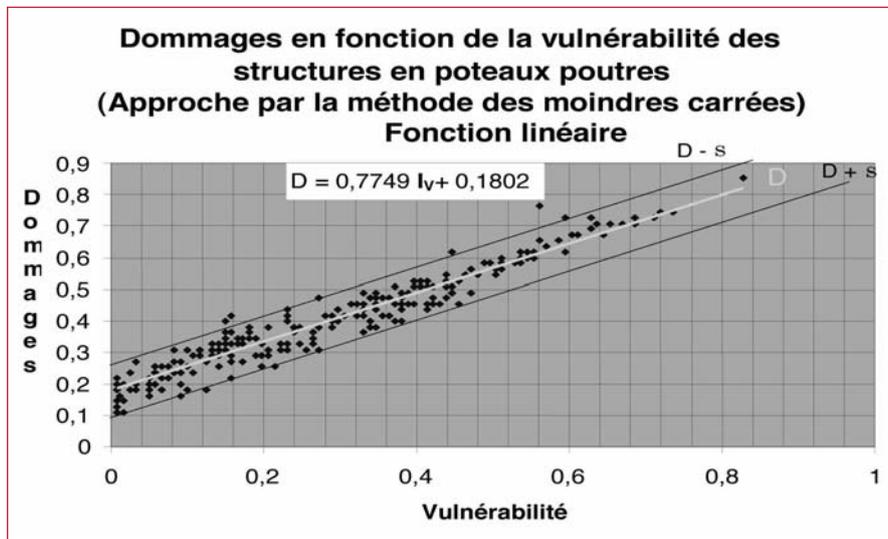


Figure 4. Corrélation linéaire entre D et I_V , $D = a I_V + b$.

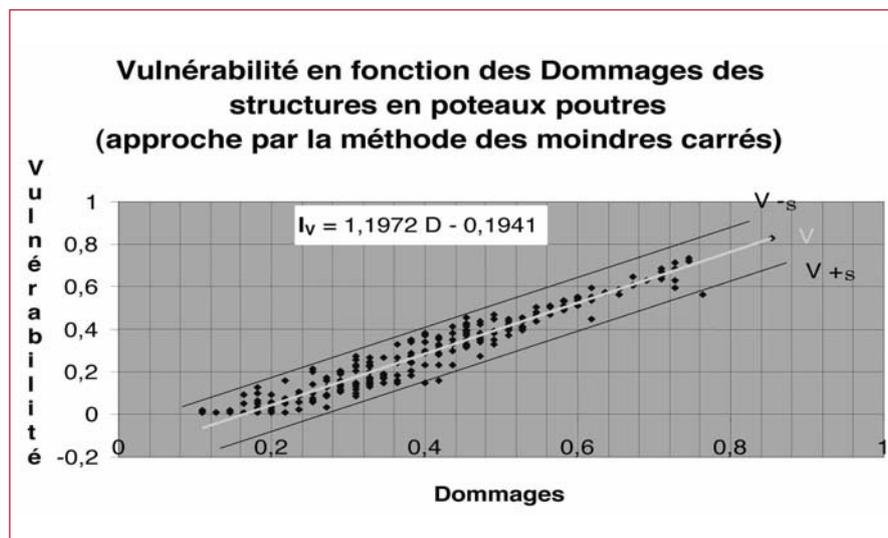


Figure 5. Vulnérabilité en fonction des dommages pour les structures en poteaux poutres. Corrélation linéaire entre I_V et D , $I_V = c D + d$.

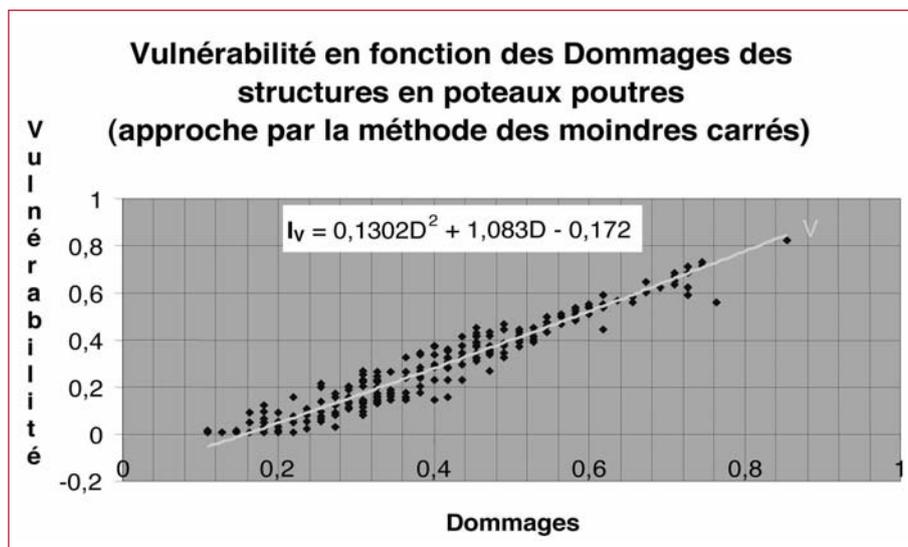


Figure 6. Vulnérabilité en fonction des dommages pour les structures en poteaux poutres. Approchée par une fonction parabolique d'ordre deux.

8. FONCTION DE VULNÉRABILITÉ

Les corrélations entre dommages et vulnérabilité (D , I_v), sont testées par les relations suivantes :

Fonction linéaire : $D = a I_v + b$.

Fonction linéaire : $I_v = c D + d$.

Fonction parabolique : $I_v = a D^2 + b D + c$.

L'analyse des paires (D , I_v) permet de déterminer les coefficients de régression par la méthode des moindres carrés qui propose un lissage du nuage de points.

8.1. Fonction linéaire $D = f(I_v)$

$D = a I_v + b$ où ;

$a = 0,77499$ et $b = 0,1802$.

8.2. Fonction linéaire $I_v = f(D)$

$I_v = c D + d$ où ;

$c = 1,1972$ et $d = -0,1941$.

8.3. Fonction non linéaire d'ordre 2 $I_v = f(D)$

$I_v = a D^2 + b D + c$.

$a = 0,1302$, $b = 1,083$, $c = -0,172$.

9. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude a consisté en l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments en portiques auto stables en fonction des dommages pour le cas du séisme du 21 mai 2003, considéré comme étant un séisme modéré à fort.

Vu les difficultés à traiter les fiches d'évaluation du C.T.C., nous avons considéré seulement 11 facteurs pathologiques pour évaluer la fonction de vulnérabilité.

En guise d'aide à la décision, une approche qualitative a été utilisée et prend en compte les dommages structuraux, les dommages non structuraux ainsi que les prescriptions du règlement parasismique algérien. Des fonctions corrélant les dommages et l'indice de vulnérabilité sont alors tracées en tenant compte des facteurs pathologiques les plus répandus lors du séisme du 23 mai 2003.

En tenant compte des 11 critères pathologiques pris dans le cadre de cette étude, nous pouvons dire que le système poteau poutre est très vulnérable pour des séismes modérés à forts. Parmi les critères pathologiques les plus prépondérants et par ordre de sévérité, nous pouvons citer la qualité des éléments secondaires (E_s) (très mal rattachés à la structure), la qualité du système résistant (Q_r) (mauvaise conception des nœuds), l'état de conservation (E_c) (non entretien des ouvrages), le non respect de la régularité en plan et en élévation ainsi que la redondance des files (S_y , $Ré$, R_f) (non respect du règlement parasismique Algérien).

Cette étude a permis de mettre en évidence la vulnérabilité des bâtiments en portiques auto stables dans le Nord de l'Algérie en cas d'un séisme modéré à fort.

10. RÉFÉRENCES

- [1] Victor DAVIDOVICI : Rapport sur le séisme de Boumerdès du 21 Mai 2003.
- [2] Rapport Préliminaire de la mission AFPS, Séisme du 21 Mai 2003, version 08-07-03.
- [3] Amina FOUFA et Djilllali BENOUAR. Méthodologie de l'évaluation de la fonction de Vulnérabilité et du risque sismique dans les centres coloniaux. Etude de cas : wilaya de Tipaza. Premier colloque national de génie parasismique, Alger, les 04, 05 et 06 juin 1996.

- [4] Règlement Parasismique Algérien (R.P.A) 1999 Addenda 2003.
- [5] Premières recommandations en vue de l'évaluation de la présomption de vulnérabilité du bâti existant. Groupe de travail AFPS. Cahier technique N° 24, mars 2002.
- [6] Milan ZACEK : Construction parasismique. Éditions Parenthèse. Marseille 1996
- [7] Fiche d'évaluation des désordres élaborée par le C.T.C. (Organisme de contrôle des ouvrages)
- [8] Vulnérabilité sismique des bâtiments existants UMLV- 2004 -2005 - D. Combescure.
- [9] Benedetti D., Petrini V. (1984), Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura : proposta di un metodo di valutazione, *L'industria della costruzioni* 18, 66-74.
- [10] Barbat A., Yepez Moya F., Canas J. (1996), Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones, *Earthquake spectra* 12, 109-116.
- [11] GNDT (1993), Rischio sismico di edifici pubblici-parte I aspetti metodologici. Consiglio nazionale delle ricerche. Tech. Rep., Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.
- [12] Aguir R. (2001), Cuantificación del dano sismico. Tech. Rep., FUNVISIS, Caracas.
- [13] LARED (2001), Manual de construcción sísmo resistente de viviendas en bahareque encementado. Tech. Rep., Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina-le red.