

## **Chapitre 2**

---

### Méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique

## Introduction

Comme définies au premier chapitre, les notions inhérentes du risque sismique et du patrimoine immobilier et de sa vulnérabilité nous ont permis de les qualifier dans notre problématique. Or la vulnérabilité traduit la performance probable d'un bâtiment ou d'une famille de structures lorsqu'elles sont soumises à des agressions sismiques.

En effet, au sein même du paradigme de la réciprocité, deux visions distinctes tendent à s'opposer non plus quant au rôle de la vulnérabilité du patrimoine immobilier dans le processus du risque sismique ; poids majeur ou secondaire des caractéristiques du système impacté. En d'autres termes, si tout le monde s'accorde à dire qu'une forte vulnérabilité renforce le risque et accroît potentiellement ses conséquences, il n'y a pas de consensus autour du fait que la vulnérabilité est un point de départ du risque ou un résultat<sup>1</sup>.

Certains pays du monde situé dans les zones à sismicité forte ont développé des méthodes d'analyses de vulnérabilité de leurs bâtis existants. Ces méthodes basées sur le retour d'expérience, et dépendent du budget de l'état ainsi que des bâtiments à analyser. On peut citer certaines méthodes telles que : les Etats-Unis (ATC21, 1988; FEMA, 1997; Hazus, 1999), au Japon (Otani, 2000), en Turquie (E.G, Ergunay and Gulkan, 1991), au Canada (Ventura et *al.*, 2005; Onur et *al.*, 2005), en Italie (Benedetti and Petrini, 1986; GNDT, 1993, Seismocare, 1998; Faccioli et *al.*, 1999; Dolce et *al.*, 2003), mais aussi plus largement en Europe (D'ayala et *al.*, 1997), en Belgique (Jongmans et Plumier, 2000), au Portugal (Oliveira, 2003), en Suisse (Steimen et *al.*, 2004 ; Lang, 2003) ou en Espagne (Roca et *al.*, 2006)<sup>2</sup>.

Ces méthodes nécessitent des informations accessibles et détaillées sur la structure (matériaux de construction, système structural, conception et réalisation...), des moyens de simulations considérables et des forces mobilisables selon leur applicabilité et le nombre des bâtiments à analyser. La précision de l'analyse augmentera avec les moyens mis en œuvre ainsi que des ressources humaines compétentes en dynamique des structures.

Outre les méthodes précises de diagnostic sismique réalisé (constructions par constructions), il existe différentes grandes échelles d'investigation :

---

<sup>1</sup> Alexandre Magnan (Iddri) (n° 01/2009), La vulnérabilité des territoires littoraux au changement climatique : Mise au point conceptuelle et facteurs d'influence « Hypothèses de recherche », Institut du développement durable et des relations internationales, 29p, site : [http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/An\\_0901\\_A.Magnan\\_Vulnerabilite.pdf](http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/An_0901_A.Magnan_Vulnerabilite.pdf), consulté le 20/04/2011.

<sup>2</sup> P.Guéguen et G.Taliercio(programme de recherche 2007), gestion du patrimoine bâti et risque sismique :automatisation de calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments, pôle Grenoblois risques naturels,15p, site : [http://www.risknat.org/pages/programme\\_dep/docs/lgit/2007\\_Gueguen.pdf](http://www.risknat.org/pages/programme_dep/docs/lgit/2007_Gueguen.pdf), consulté le 20/04/2011.

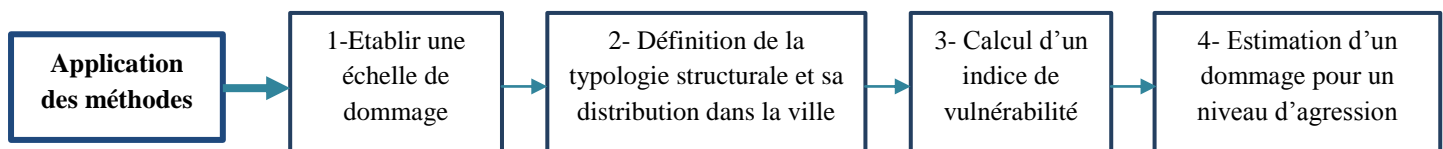
- Analyses très globales; se basant sur des répartitions statistiques de dommages des échelles d'intensités (échelle MS, EMS 1998...) provenant de retour d'expérience.
- Analyses globales; les bâtiments sont analysés de façon statistique.
- Analyses précises; les bâtiments sont étudiés individuellement en se basant sur des méthodes simplifiées par des calculs abrégés<sup>3</sup>. C'est dans cette échelle que porte notre étude.

Augmentation des moyens mis en œuvre →					
Echelle d'analyse	Plusieurs centaines de bâtiments		Quelques bâtiments		Bâtiments individuels
Méthodes	Vulnérabilité EMS 98	Indice de vulnérabilité	Avis d'experts	Calculs analytiques simples	Analyse numérique -Modélisation-
applicabilité	Ville – commune – quartier - parcs immobiliers -bâtiments stratégiques				
Moyens humains	Sans informations –étudiants –techniciens –ingénieurs –ingénieurs confirmés				

**Tableau 2-1 : Les différentes échelles d'analyse et leur applicabilité<sup>4</sup>.**

L'analyse de ces méthodes laisse entrevoir plusieurs similitudes qu'on peut citer comme suit :

1. Toutes admettent différents niveaux d'investigation selon la qualité de l'estimation,
2. Elles graduent les dommages et classent les constructions suivant une typologie prédéfinie,
3. Elles se basent sur la recherche d'indicateurs structuraux qui modulent la vulnérabilité, en fonction des données collectées en auscultant visuellement le bâtiment d'étude.<sup>5</sup>



**Figure 2-1 : Le cheminement des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique**

Ces méthodes permettent aussi d'identifier l'absence, l'insuffisance ou la dégradation des éléments essentiels à la résistance des structures aux séismes, de même que la possibilité d'une interaction défavorable avec le site, qui pourrait aggraver l'action des tremblements de terre sur l'ouvrage. C'est vers une de ces méthodes que nous nous tournerons prioritairement.

<sup>3</sup> Gartia Jean-François, Soutzo Raphaël et Sieffert Jean-Georges, (Mars-Juillet 2007), Elaboration d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments, INSA Strasbourg, 69p. *in* [http://eprints2.insa-strasbourg.fr/309/1/rapport\\_final\\_jean\\_francois\\_garcia.pdf](http://eprints2.insa-strasbourg.fr/309/1/rapport_final_jean_francois_garcia.pdf), consulté le 20/04/2011.

<sup>4</sup> Suze Youance, (17 mars 2010), Une évaluation de la vulnérabilité sismique des églises du Québec, école de technologie supérieure université du Québec, Montréal, 224p. *in* [http://espace.etsmtl.ca/292/4/YOUCANCE\\_Suze-web.pdf](http://espace.etsmtl.ca/292/4/YOUCANCE_Suze-web.pdf), consulté le 25/04/2011.

<sup>5</sup> P.Guéguen et G.Taliercio (programme de recherche 2007), Gestion du patrimoine bâti et risque sismique : Automatisation de calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments, pôle Grenoblois risques naturels, 15p. Site : [http://www.risknat.org/pages/programme\\_dep/docs/lgit/2007\\_Gueguen.pdf](http://www.risknat.org/pages/programme_dep/docs/lgit/2007_Gueguen.pdf), consulté le 20/04/2011.

## **La méthode GNDT (Italie)**

La méthode GNDT a été développée par le Groupe de défense contre les tremblements de terre du Conseil national de recherche de l'Italie<sup>6</sup>, elle propose une évaluation à deux niveaux auxquels correspondent deux formulaires : le niveau I d'analyse globale des bâtiments consiste à la collecte d'informations de base et l'élaboration d'un inventaire, tandis que le niveau II mène vers le calcul d'un indice pondéré de vulnérabilité. Ce deuxième niveau d'analyse consent également à tracer des courbes de vulnérabilité en fonction des modes de rupture probable.

Cette méthode prend sa source dans l'importante base de données découlant des inventaires post-sismiques réalisés en Italie, en 1994. Le nombre de structures endommagées en maçonnerie non armée et en béton est suffisamment élevé pour pouvoir établir des relations entre le taux d'endommagement et les caractéristiques structurales du système résistant. La méthode est maintenant largement utilisée partout en Europe notamment pour l'inventaire des bâtiments historiques permettant ainsi la création d'une importante base de données sur les bâtiments en maçonnerie et en béton armé.<sup>7</sup>

### **Définition de la méthode employée dans notre recherche (GNDT LEVEL II)**

Suivant la méthode GNDT, deux niveaux d'analyse sont utilisés pour traduire la qualité et la quantité d'informations disponibles à partir du diagnostic visuel effectué par des enquêteurs: GNDT level I et la GNDT level II. Quand certains paramètres du niveau II ne peuvent être renseignés, ils sont évalués sur la base des informations de niveau I.

La méthode GNDT level I identifie les différentes typologies de bâtiments et définit des classes de vulnérabilité (A, B, C et D), grâce à une recherche des informations générales facilement repérables sur la structure. Elles concernent la localisation de la structure, ses dimensions, son usage, son état de conservation, sa géométrie ainsi que ses matériaux constitutifs.

---

<sup>6</sup> Sonia giovinazzi and sergio lagomarsino a methodology for the vulnerability analysis of built-up areas,departement of structural and geotechnical engineering, university of genoa, genoa,18p.

<sup>7</sup> Suze Youance, 17 mars 2010, une évaluation de la vulnérabilité sismique des églises du Québec, école de technologie supérieure université du Québec, Montréal, 224p.in [http://espace.etsmtl.ca/292/4/YOUCANCE\\_Suze-web.pdf](http://espace.etsmtl.ca/292/4/YOUCANCE_Suze-web.pdf), consulté le 25/04/2011.

Le deuxième niveau caractérise de façon plus précise la structure grâce à certains paramètres. Pour notre approche nous appliquerons la méthode de GNDT level II .Cette méthode a été appliquée sur les constructions en maçonnerie de la ville d'Alger<sup>8</sup>.

La méthode analyse la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie existants, ce qui signifie l'estimation de leur consistance en termes quantitatifs et qualitatifs, en particulier l'estimation de leur degré d'endommagement vis-à-vis des événements sismiques. Cette estimation de la vulnérabilité est menée dans ce travail via une méthode de classification des bâtiments en maçonnerie appelée « Méthode de l'indice de vulnérabilité ».

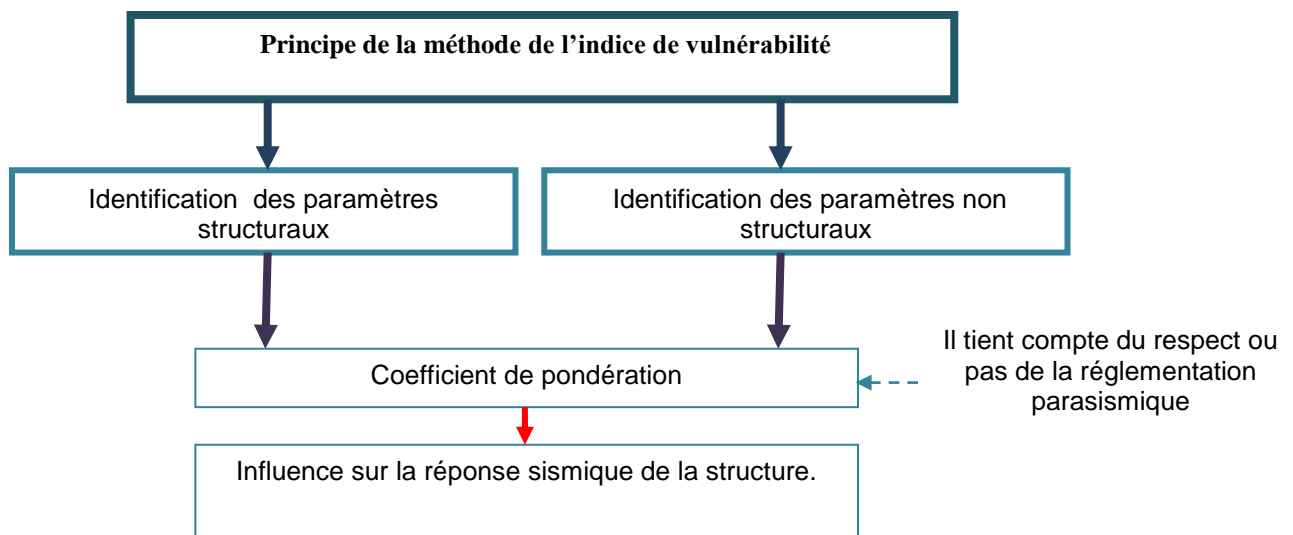
Celle-ci consiste à attribuer à chaque bâtiment une valeur numérique, dite « Indice de vulnérabilité  $I_v$  », qui représente la qualité sismique des bâtiments.

Chaque élément de construction peut avoir un indice de vulnérabilité qui est représenté par un coefficient affecté à chaque classe (A, B, C et D) cumulé par des facteurs de pondération.

Cet indice représente la somme pondérée des valeurs numériques exprimant la qualité sismique des éléments structuraux ou non structuraux qui ont un rôle significatif dans la réponse sismique de la structure<sup>9</sup>.

La somme des indices de vulnérabilité «  $I_v$  » de tous les éléments représente l'indice de vulnérabilité globale de la construction.

Cette approche peut être illustrée par l'organigramme suivant :



**Figure 2-2 : Interprétation du principe de la méthode de l'indice de vulnérabilité**

Une fois l'ensemble des informations recueillis, un tableau sera dressé en se basant sur les développements effectués par (Benedetti *et al.*, 1988)<sup>10</sup>. Ce tableau comportera des

<sup>8</sup> Mehdi boukri et mahmoud bensaïbi (2007), Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris) ,7p.

<sup>9</sup> Duilio Benedetti, Gianmario Benzoni and maria da vinci (1988), seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, departement of structural engineering, politecnico al milano, piazza leonardo da vinci, milano italy, 20p.

paramètres qui vont être considérés comme prépondérants dans l'estimation de la qualité sismique des constructions :

Paramètres	Classes				Facteurs de pondération
	A	B	C	D	
1. Résistance total au cisaillement	0	5	25	45	1.50
2. Régularité en plan	0	5	25	45	0.50
3. Régularité en élévation	0	5	25	45	0.50
4. Connexion de mûrs	0	5	25	45	1.00
5. Type de mûrs	0	5	25	45	0.25
6. Plancher	0	5	25	45	0.25
7. Toiture	0	15	25	45	0.25
8. Conditions du sol	0	5	25	45	0.75
9. Détails	0	0	25	45	0.25
10. Maintenance	0	5	25	45	1.00
11. Modifications	0	5	25	45	0.50

**Tableau 2-2 : Elément de calcul de l'indice de vulnérabilité<sup>11</sup>.**

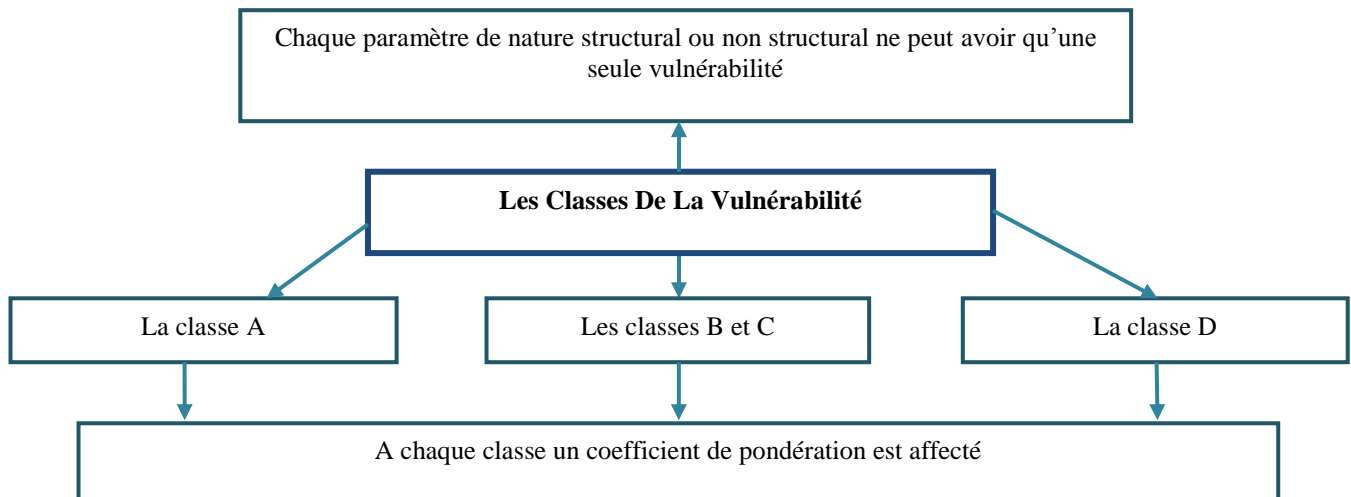
Chaque paramètre de nature structural ou non structural ne peut prendre qu'une seule vulnérabilité, celle-ci représente la classe à laquelle appartient cette construction. A chaque classe un coefficient de pondération est affecté.

La méthode définit quatre classes de vulnérabilité A, B, C et D:

- La classe A : représente des bâtisses réalisées selon le code parasismique et donc offrant une bonne résistance aux séismes,
- Les classes B et C :\_sont des classes intermédiaires et représente une moyenne résistance aux séismes.
- La classe D : représente les constructions ayant un mauvais comportement vis-à-vis des séismes.

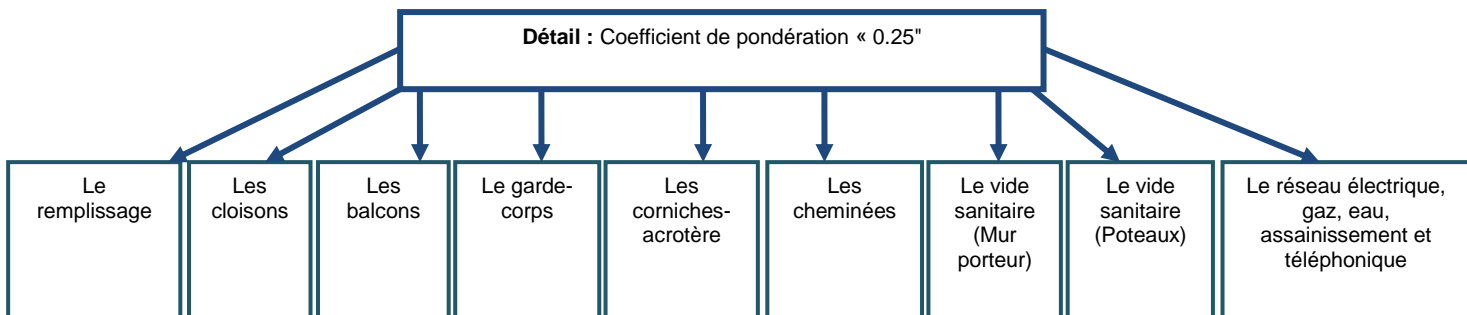
Certains constats ont été remarqués dans les anciens quartiers tels des ajouts ou suppressions au niveau des constructions qui ont pour effet de provoquer une modification des forces appliquées sur les structures, engendrant ainsi un changement dans le centre de masse donc une mauvaise réponse de la structure. Ce paramètre appelé « modifications » est déduit directement des observations in-situ de nos quartiers, il aura pour coefficient de pondération **WM = 0.5**, la différence entre la méthode appliquée dans ce travail et celle de (Benedetti et *al.*, 1988) est l'ajout de ce coefficient.

<sup>10-11</sup> Mehdi Boukri et Mahmoud Bensaïbi (2007), Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris) ,7p.



**Figure 2-3: Les classes de vulnérabilité**

Les éléments « Détails » de pondération  $W=0.25^{12}$ ; il considéré étant l'état de certains éléments composants une construction, le schéma suivant énumère ces différentes composantes à savoir :



**Figure 2-4 : Les différentes composantes de l'élément « détail »**

Remarque :

Le développement de Benedetti assigne des facteurs de pondération pour les éléments précités dans le tableau tels que la régularité en hauteur (élévation, plan et toiture), en les introduisant l'expert à une part de subjectivité.

La classification des constructions se fait en fonction de l'indice de vulnérabilité calculé selon le tableau ci-dessous où chaque intervalle est représenté par une couleur exprimant ainsi l'état du bâti. Les valeurs de l'indice de vulnérabilité sont comprises entre [0 - 450]. Le tableau suivant inventorie l'état des constructions selon le classement de l'indice de vulnérabilité dans les intervalles et donne les éventuels renforcements à entreprendre vis-à-vis le bâti :

<sup>12</sup> Mehdi Boukri et Mahmoud Bensaïbi (2007), Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris) ,7p.

Indice de vulnérabilité	Entre [0 - 35]	Entre [35 - 250]	Entre [250 - 450]
Couleur			
L'état de la bâtisse	Aucune intervention	Nécessite une intervention pour les renforcer vis-à-vis d'un séisme futur	Présentent une faible qualité sismique, ce qui signifie que leur remplacement s'avère indispensable

**Tableau 2-3 : Les intervalles de classement des constructions<sup>13</sup>**

Une étape importante (enquête) précède le calcul de l'indice de vulnérabilité, cette enquête se fait sur la base d'une fiche technique dont l'explication se fait comme suit :

Elaboration de la fiche technique :

La fiche d'enquête établie par (Bensaïbi et *al.*, 2000) <sup>14</sup>regroupe l'ensemble des paramètres de natures structurale ou non structurales pouvant avoir une influence sur la réponse sismique des bâtiments ce qui facilite le calcul de l'indice de vulnérabilité. L'élaboration de cette fiche se fait généralement sur site

La fiche comprend les éléments principaux suivants :

- a) Données générales (adresse, âge, etc....),
- b) Caractéristiques géométriques,
- c) Système structural,
- d) Conditions du sol,
- e) Etat des éléments non structuraux,
- f) Etat des réseaux divers,
- g) Maintenance.

Ces informations permettent d'évaluer qualitativement et quantitativement la qualité sismique des constructions.

<sup>13</sup> Mehdi Boukri et Mahmoud Bensaïbi (2007), Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris) ,7p.

<sup>14</sup> Brahim Mezazigh(C.G.S), m. belazughi, M.N. farsi, A. Remas, M. Badaoui, M . Bensaïbi, Etude de vulnérabilité et d'évaluation du risque sismique de la ville d'Alger, 17p.



Groupe : .....

Nom : .....

### FICHE D'ÉVALUATION DU BATI

Commune : .....

Adresse : .....

#### Type de construction :

Bâtiment ☐ Maison Individuelle ☐ Hangar ☐ Usine ☐

Précaire ☐ Autre (préciser) : .....

#### Usage de la construction :

Habitation	<input type="checkbox"/>	Hospitalier	<input type="checkbox"/>	Commercial	<input type="checkbox"/>
Administration	<input type="checkbox"/>	Sportif	<input type="checkbox"/>	Industriel	<input type="checkbox"/>
Scolaire	<input type="checkbox"/>	Socioculturel	<input type="checkbox"/>	Hydraulique	<input type="checkbox"/>

Autre (préciser) : .....

#### Date de la construction (approximativement) :

Avant 1980 ☐ Après 1980 ☐

Nombre de niveaux : .....

#### Structures-en :

Béton armé ☐ Maçonnerie ☐ Charpente métallique ☐ Bois ☐

Autre (préciser) : .....

Si béton armé préciser : Portique ☐ Voile ☐ Mixte ☐

#### Régularité en plan :

Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise ☐

#### Régularité en élévation :

Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise ☐

#### La construction est-elle :

A l'angle ☐ Au milieu ☐ Isolée ☐

Y'a-t-il présence de cheminées : Oui ☐ Non ☐

Etat général de la construction : .....

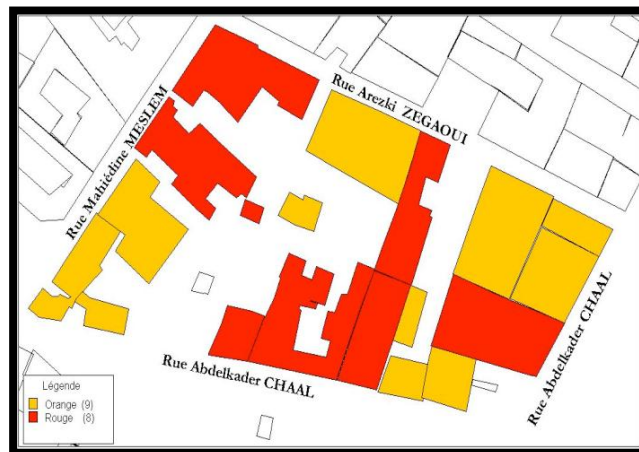
## Exemple de l'application de la méthode

La méthode de l'indice de vulnérabilité a été appliquée sur un échantillon situé dans la commune de Belouizdad (Alger)<sup>15</sup> où les bâtiments sont majoritairement en maçonnerie (voir figure 2-5). Ces bâtiments ont été numérisés et regroupés dans une base de données qui comporte leurs fiches d'enquêtes techniques par un système d'information géographique « SIG ».

Un programme de calcul a été développé afin de permettre le calcul de la valeur de l'indice de vulnérabilité pour chacun des bâtiments étudiés. Puis les injectés dans le SIG, il facilite de visualiser la classification des constructions concernées.

Cette enquête sur site a eu lieu le 23 Avril 2003, quelques jours avant le séisme destructeur du 21 Mai 2003<sup>16</sup>.

Une fois l'enquête sur terrain achevée, un indice de vulnérabilité des constructions a été calculé, ce dernier a donné des résultats comme suit : La moitié de ces bâtiments ont été classés orange et d'autres classés dans la catégorie rouge (voir figure 2-5).



**Figure 2-5 : Etat des lieux de l'îlot étudié avant le séisme<sup>17</sup>**

Une deuxième enquête sur le même échantillon a été refaite suite au séisme afin de valider la classification de la première enquête.

Les résultats obtenus par l'analyse ont donné : la plupart des bâtiments classés en orange avant le séisme, sont désormais classés en rouge, vu leur état de dégradation (voir figure 2-6).

<sup>15-17-18</sup> Mehdi Boukri et Mahmoud Bensaïbi (2007), indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris), 7p.

Les bâtiments qui étaient classés en rouge se sont de plus en plus dégradés et menacent de ruine. Ce qui peut se traduire par un indice de vulnérabilité important (plus la structure est vulnérable, plus son indice de vulnérabilité est important).



**Figure 2-6 : Etat des lieux de l'îlot étudié après le séisme<sup>18</sup>**

Ainsi ceci approuve l'efficacité de la méthode de l'indice de vulnérabilité comme outil d'estimation de la qualité sismique des constructions.

## Conclusion

Au terme de ce chapitre, on peut considérer que les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant sont nombreuses et forment un moyen simple et intelligent de caractériser la criticité sismique et de prédire le niveau moyen des dégâts pouvant se produire à grande échelle dans les bâtiments sous l'action d'une secousse sismique d'une certaine intensité. Aussi elles constituent un socle de connaissances, et sont généralement développées sur la base d'observations sur terrain pour les pays à forte sismicité et ne sont pas toujours pour des raisons économiques adaptées à des pays à sismicité modérée à faible.

Ces procédés permettent de répondre à une gamme assez large de questionnements aux maîtres d'ouvrages, aux exploitants ou aux gestionnaires de parcs immobiliers et d'estimer les faiblesses probables des constructions à partir de recherches visuelles de critères structuraux et non structuraux en fonction des moyens, des informations et des compétences requises.

La méthode présentée dans ce document est celle de « l'indice de vulnérabilité » basée sur le développement de (Benedetti et *al.* 1988); qui consiste à la détermination des conditions

<sup>19</sup> Mehdi boukri et mahmoud bensaïbi (2007), indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger, AFPS (école centrale de paris), 7p.

des constructions en maçonnerie n'ayant pas fait l'objet d'une conception parasismique auparavant par une valeur numérique dite « indice de vulnérabilité ».

Enfin ces moyens d'analyse peuvent être considérées comme une première ébauche d'un arbre de décision qui pourrait être suivi dans le cadre d'une politique active de connaissance et de renforcement des constructions existantes en fonction des paramètres pathologiques des structures et leur capacité de résistance aux efforts latéraux dans le but d'entreprendre d'éventuels renforcement si-nécessaire.