

RISQUE ET VULNERABILITE SISMIQUE A L'ECHELLE D'UNE VILLE EXEMPLE DE LA VILLE DE CONSTANTINE

Abdelazziz BENMARCE¹, Mohamed HIMEUR^{1,2}, Mohamed BOUAOUD¹, Mohamed GUENFOUD¹

¹ LGCH, Département de Génie Civil et d'Hydraulique. Faculté des Sciences et de la Technologie,
BP 401, 24000 Guelma, Algérie

² CGS, 301, Centre des Affaires El Madina, Cité Boussouf, 25000 Constantine, Algérie

Reçu le 09 Mai 2012 – Accepté le 15 Décembre 2012

Résumé

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier et qui cause le plus de dégâts. De 1990 à aujourd'hui, les séismes ont fait plus de 700 000 victimes dans le monde. Si le mécanisme du séisme est aujourd'hui mieux connu, tant du point de vue de son origine, que de sa propagation, il reste encore un phénomène imprévisible. Evaluer la vulnérabilité constitue un élément essentiel de l'analyse des risques sismiques et gageure lorsque cette analyse porte sur une ville.

Depuis plusieurs années, différentes équipes travaillent à l'élaboration de méthodes d'approche de cette vulnérabilité des villes face à l'aléa sismique. Différents niveaux d'analyse sont ainsi disponibles dans la littérature, depuis l'analyse grande échelle (toute une ville) jusqu'à l'analyse d'un bâtiment particulier. Les méthodologies utilisées dans cet article ont été choisies; de façon à tenir compte des spécificités de la zone d'étude et à permettre leur application à d'autres villes de la région. Afin de trouver un compromis entre ces méthodes, nous nous proposons d'adopter une approche dite "approche par indice de vulnérabilité" que nous appliquerons à l'ensemble du tissu urbain constantinois.

Mots clés : Vulnérabilité sismique, Indice de vulnérabilité, Tissu urbain.

Abstract

The earthquake is the most deadly major natural hazard and it causes a lot of damage. Since 1990, earthquakes killed more than 700,000 people worldwide. If the mechanism of the earthquake is now better known, both in terms of its origin, that its spread, it is still an unpredictable phenomenon. Assess the vulnerability is an essential element of the analysis of seismic risk and challenge when the analysis focuses on a town.

For several years, different teams are working to develop ways of approaching the vulnerability of cities facing earthquake hazard. Different levels of analysis are available in the literature, from the large-scale analysis (a city) to the analysis of a particular building. The methodologies used herein have been chosen; to take into account of the specificities of the studied area and to allow their application to other cities in the region. To find a compromise between these methods, we propose an approach called "vulnerability index" we will apply to the entire urban fabric of Constantine.

Key words: Seismic Vulnerability, Vulnerability Index, urban fabric.

هو . الطبيعي الرئيسي , ويسبب اليوم كثيرا . 1990 اليوم 700:000 ضحايا
يمكن بها تقييم بشكل اساسيا تحليل الهزات الارضية, ويبقى الرهان يتعلق هذا التحليل
بالمدينة.

مستويات التحليل اختيارها; بحيث بعين نهج "نهج" التحليل (مدينة باكملها) تطبيقها . المنهجيات هذه
بين هذه , نهج "نهج" خصوصيات "نهج" تطبيقها الحضرية القسنطينية . لايجاد تسوية
الكلمات الرئيسية : الزلزالية, الضعف, الحضري

Les derniers tremblements de terre (Chlef 1980, Constantine 1985, Oued Djer 1988, Tipaza 1989, Mascara 1994, Ain Témouchent 1999, Béni Ourtilane 2000 et Boumerdes 2003) qui ont eu lieu ces dernières années montrent que l'activité sismique en Algérie est importante et destructrice.

Cette activité touche essentiellement le Nord où se situent les plus grandes villes pour lesquelles le risque sismique va en grandissant avec le développement du tissu économique et la croissance de la population [1].

Ce risque est assez élevé à Constantine du fait de la topographie particulière du site, la grande concentration d'infrastructures économiques et de population. Une attention particulière doit être portée à cette ville pour la protéger, à un niveau acceptable, contre le phénomène sismique qui la menace, qui peut frapper à n'importe quel moment.

Dans cette étude de la vulnérabilité au séisme, nous allons évaluer la vulnérabilité sismique à grande échelle de la ville de Constantine. Ce travail se déroule en deux phases bien distinctes :

- Une première phase de travail dans laquelle nous allons élaborer une série de cartes pour en arriver à une carte prévisionnelle du risque sismique du secteur urbanisé de la ville de Constantine qui servira comme aide à la décision pour l'organisation des secours.
- Une deuxième phase de travail durant laquelle nous allons utiliser une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique afin d'estimer le comportement des constructions lors d'un séisme pour une zone réduite du tissu urbain de la ville de Constantine.

1. METHODE D'ELABORATION D'UNE CARTE PREVISIONNELLE DU RISQUE SISMIQUE

La grande diversité dans les caractéristiques structurelles fait que l'évaluation du risque sismique d'une structure existante est une tâche difficile, car elle implique plusieurs incertitudes (caractéristiques des matériaux, détails de ferrailages et rigidités des éléments).

L'importance des dégâts causés par un séisme provient souvent de la vétusté ou de la qualité des constructions.

On premier lieu, nous allons faire une carte prévisionnelle du risque sismique dans la ville de Constantine qui va nous donner les grandes artères et les zones les plus vulnérables, ensuite l'étude sera raffinée en utilisant la méthode de l'indice de vulnérabilité.

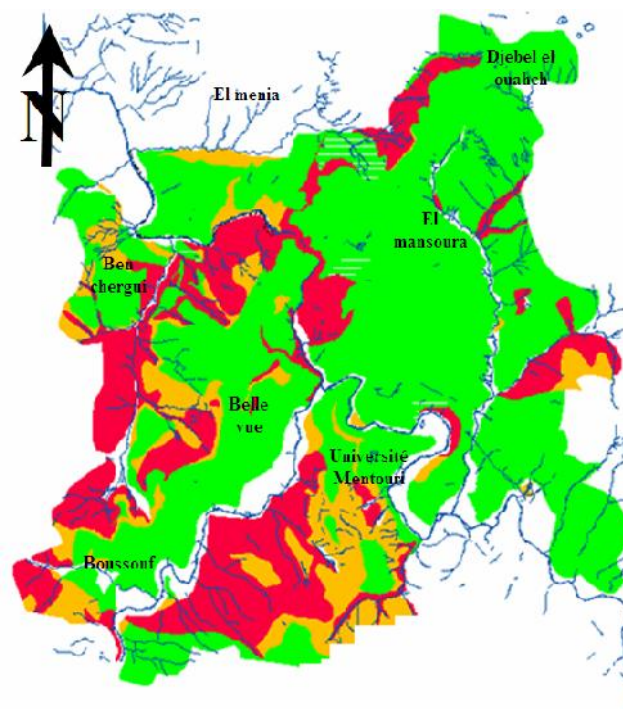
La méthode suivie consiste à cartographier séparément les facteurs naturels et entropiques, qui sont les indicateurs de la vulnérabilité, pour chaque carte nous avons affecté un indice déterminant dans une échelle numérique en rapport avec son importance, par la sommation des indices nous obtenons la carte de la somme indiciaire qui donne un minimum et un maximum de risques susceptibles de produire des préjudices ou des dommages.

1.1. Le facteur naturel « sol »

Le type du sol est reflété par l'indice sol (IS) (Voir Tableau 1). Cet indice permet l'élaboration d'une carte de facteur sol (Voir figure 1). Car la qualité du sol joue un rôle important et c'est pourquoi, la roche dure en place est à choisir plutôt qu'un remblai artificiel ou un terrain meuble, trop souvent gorgé d'eau et dès lors susceptible de se liquéfier sous l'effet des vibrations, et devenir en quelques instants incapable de soutenir un bâti quelconque. Par ailleurs, il faut garder présent à l'esprit le risque des effets induits dus aux tremblements de terre : éboulements, glissements de terrain, etc., qui peuvent mettre en péril plusieurs bâtiments.

Tableau 1 : Classification selon le facteur type du sol

Degré de risque d'Indices (IS)	IS ₁ =1	IS ₂ =2	IS ₃ =3
Influence de séisme sur les fondations	Faible	Moyenne	Forte
Qualité du sol pour construction	Bonne	Moyenne	Médiocre
Couleur	Vert	Orange	Rouge



LEGENDE

- Zone stable - Sol ferme à rocheux
- Zone de stabilité incertaine - Sol meuble
- Zone instable - Sol très meuble
- Zone stable avec le risque d'inondation

Figure 1 : Différents types de sol dans la commune de Constantine [2]

1.2. Facteur naturel pente

Le relief du site est reflété par l'indice de pente (IP). Cet indice permet l'élaboration d'une carte de facteur pente (Voir figure 2), faite à partir de la carte topographique de la ville de Constantine de 1993.

Tableau 2 : Classification selon paramètre « pente du terrain de fondation »

Indice (IP ₁)=1	Indice (IP ₂)=2	Indice (IP ₃)=3
Pente < 15%	Pente de 15% à 45%	Pente > 45%
Risque faible	Risque moyen	Risque fort
Couleur verte	Couleur orange	Couleur rouge

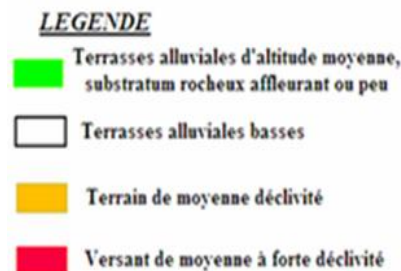
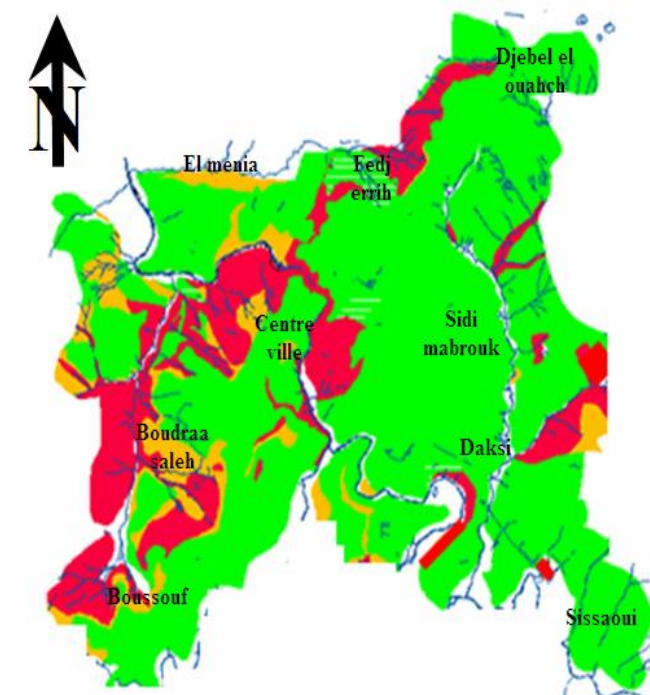


Figure 2 : Déclivités de la commune de Constantine [2]

1.3. Facteur entropique : Age de la construction

La carte d'indice Age du tissu urbain (Voir figure 3), réalisée à partir du plan directeur d'aménagement et d'urbanisme, puis un indice (IA) a été affecté pour chaque période (Voir Tableau 3). Selon le facteur âge on a localisé trois époques de construction et l'étude de son état (règle de constructions adoptées) qui nous permettent d'évaluer son comportement en cas de séisme destructeur.

Tableau 3 : Classifications d'Indice âge de construction dans la ville de Constantine

Indices d'âge de la construction	(IA ₁)=1	(IA ₂)=2	(IA ₃)=3
Age de la construction	De 1988 à 2003 (Période d'apparition de la réglementation parasismique R.P.A)	1962 – 1988 (Construction anarchique menacée par la ruine)	Avant 1962 (Construction coloniale précaire)
Risque sismique	Moyen	fort	Très fort

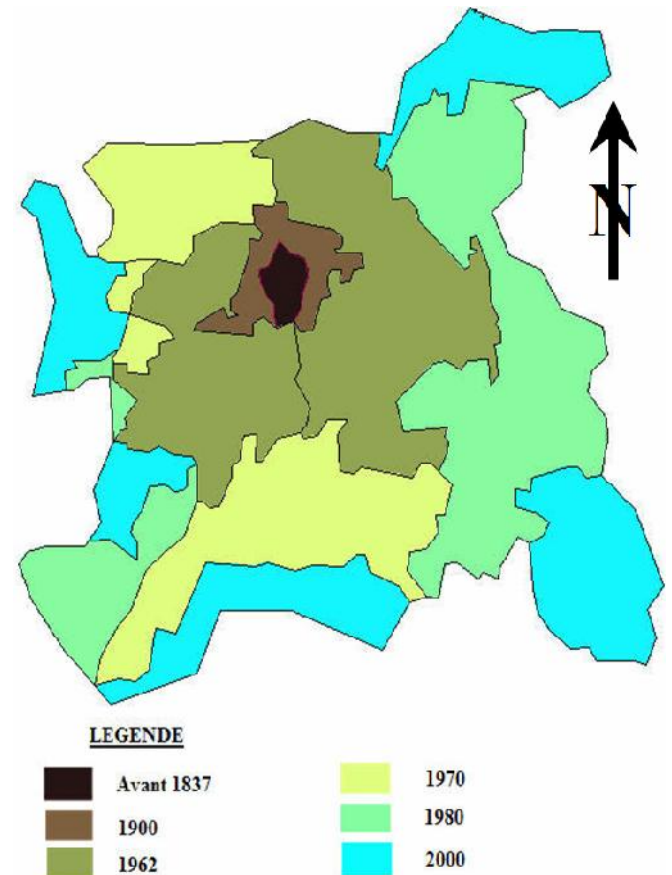


Figure 3 : Extensions urbaines de la commune de Constantine [3]

1.4. Facteur entropique : Age de la construction

Tenant compte de la densité d'habitat comme facteur influant sur la fréquence du risque, il a été affecté l'indice (IH) par catégorie [4], comme indique le tableau 4:

Tableau 4 : Classification d'indice densité d'habitat dans la ville de Constantine.

L'indice (IH) d'habitat	(IH ₁)=1	(IH ₂)=2	(IH ₃)=3
Nombre d'habitat /ha	50-100	100-200	>200
Degré de risque	Moyen	Élevé	Très élevé
Couleur du risque	Couleur jaune	Couleur orange	Couleur rouge

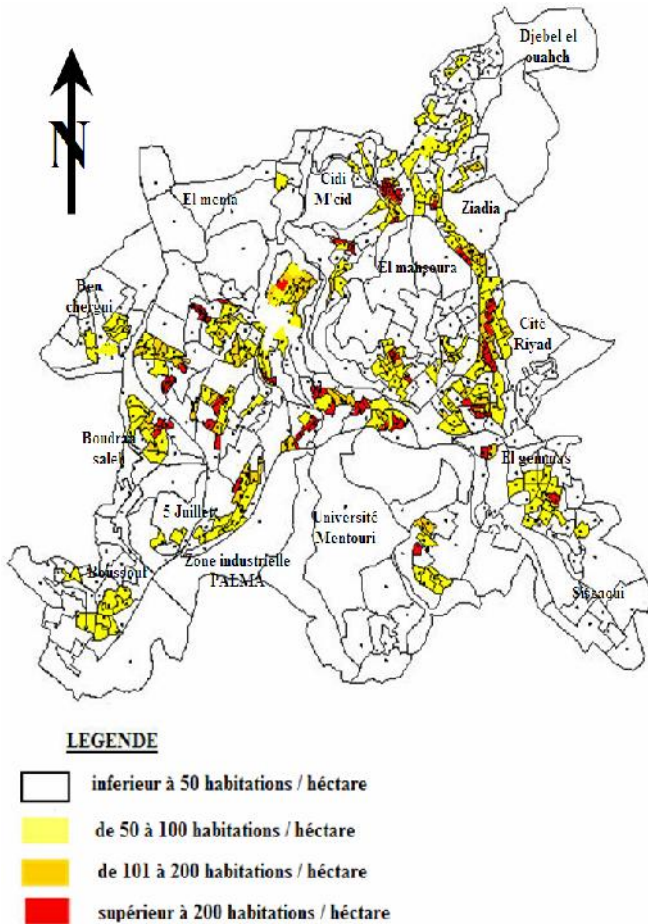


Figure 4 : Densités d'habitat de la commune de Constantine

Le degré de vulnérabilité est déterminé par un calcul arithmétique par lequel nous avons évalué l'importance de chaque indice pour les cartes suivantes (carte de pente, carte géotechnique, carte typologique, carte de densité d'habitat).

La superposition de ces cartes de même échelle va nous permettre de dégager en trois degrés de niveau décroissant de risque comme suit :

- Degré III : zone de vulnérabilité élevée (couleur rouge),
- Degré II : zone de vulnérabilité moyenne (couleur orange),
- Degré I : zone de vulnérabilité faible (couleur verte).

Zone de vulnérabilité	Faible	Moyenne	Elevée
Représentation en %	32%	53%	15%

Où cette carte (Voir figure 5) peut représenter une aide importante pour déduire les zones où il faut faire une amélioration urbaine et une réadaptation parasismique ainsi que le déroulement optimal des opérations de secours en cas de séisme.

2. ESTIMATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE PAR LA METHODE "VULNERABILITY INDEX"

Dans cette partie nous allons évaluer la vulnérabilité sismique d'une zone de la ville de Constantine en utilisant la méthode de l'indice de vulnérabilité réadapté aux spécificités du tissu urbain constantinois.

Ce travail se déroule en deux phases bien distinctes : une première phase de travail sur le terrain durant laquelle les informations les plus pertinentes concernant les bâtiments composant la zone d'étude sont récoltées, puis une deuxième phase durant laquelle la méthode d'indice de vulnérabilité est utilisée afin d'estimer le comportement des constructions lors d'un séisme.

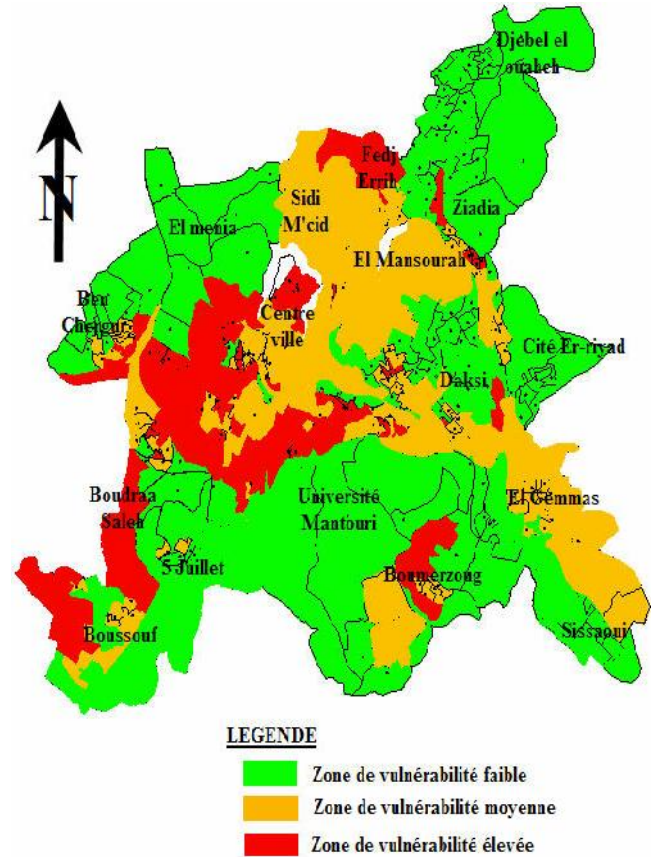


Figure 5 : Risque sismique de la commune de Constantine

Nous avons effectué une enquête sur les constructions du site faisant l'objet de notre étude « Cité CILOC ; Belle vue ; Bel air ». Les bâtiments étudiés sont situés dans les îlots : 397, 398, 399, 400, 401, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 641, 642, 645, 646, 647 (Voir figure 6).

La récolte d'informations comprend un relevé détaillé des bâtiments: Les matériaux de construction utilisés, le nombre d'étages, l'année de construction, la régularité du bâtiment, le système de contreventement et l'état d'entretien qui sont tous des éléments que nous avons essayé de caractériser de la manière la plus précise possible. Tous ces paramètres sont autant d'éléments qui influencent la vulnérabilité d'un bâtiment. Cette récolte de donnée est faite par le remplissage des fiches d'évaluation des bâtiments du tissu urbain faite pour englober tout les paramètres essentiels pour notre étude [6].

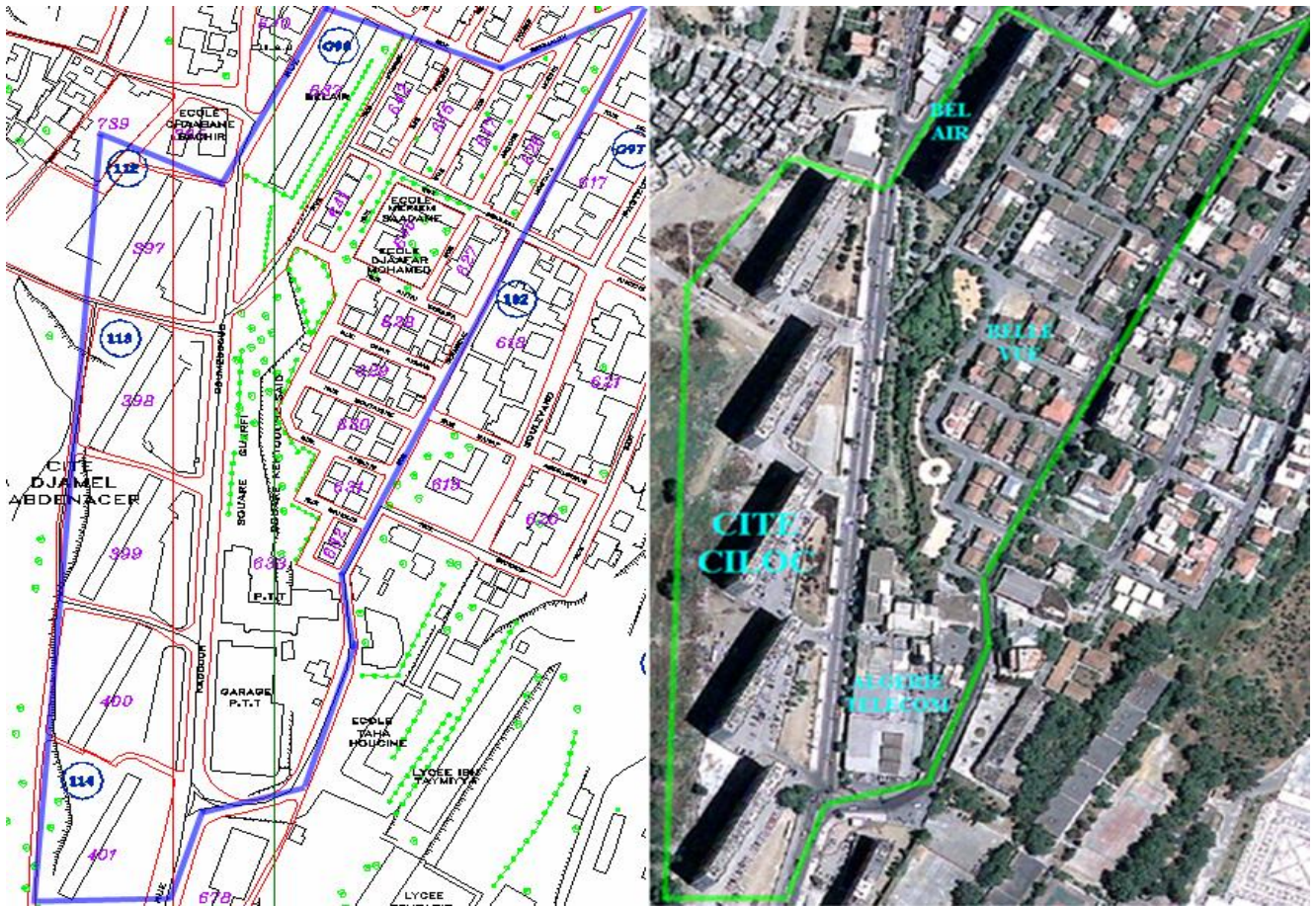


Figure 6 : Périmètre de la zone d'étude [5]

3. PARAMETRES AFFECTANT LA VULNERABILITE

En dehors du type de construction, différents paramètres influent sur le niveau global de vulnérabilité d'une structure à savoir :

- la hauteur de la structure,
- le matériau des éléments structuraux
- la période de construction
- l'état d'entretien,
- la régularité
- la position
- le sol d'implantation

Lors de l'évaluation de différentes constructions de la zone d'étude, nous avons déterminé au mieux possible les différents paramètres présentés ci-après.

3.1. Matériau de construction

Le matériau utilisé pour la construction des contreventements est un paramètre très important. Une première distinction est effectuée entre les bâtiments en maçonnerie et les bâtiments en béton armé. De plus, il faut également déterminer si le bâtiment est stabilisé par des refends verticaux ou par un système de portique. La figure 7 récapitule les matériaux de construction des structures de la zone d'étude.

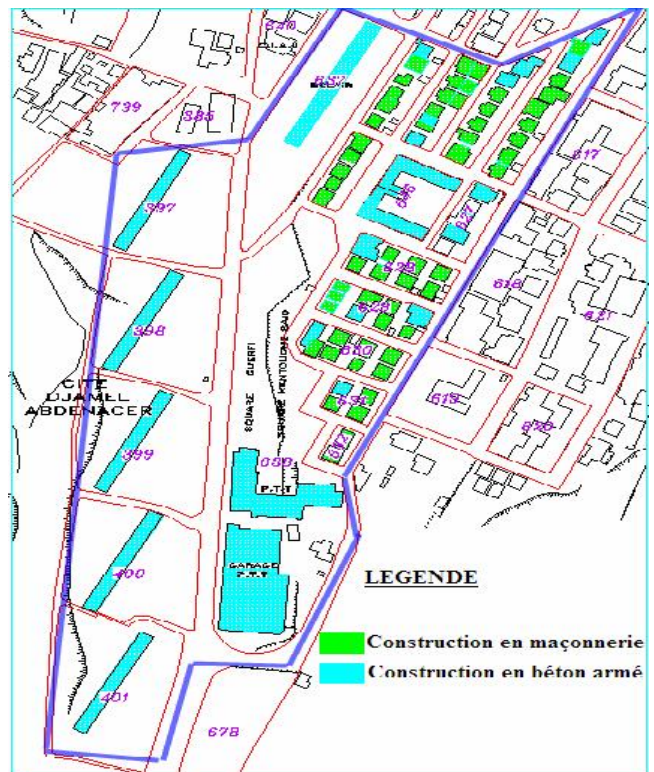


Figure 7 : Classification des constructions suivant leurs matériaux de construction

3.2. Année de construction

Afin de quantifier l'indice de vulnérabilité lié à l'âge de chaque structure, il est nécessaire de déterminer la période de construction des bâtiments. Les différentes périodes ont été choisies selon les années de sortie du règlement parasismique algérien qui sont: avant 1988, de 1988 à 2003, après 2003. La figure 8 récapitule les données concernant la période de construction.

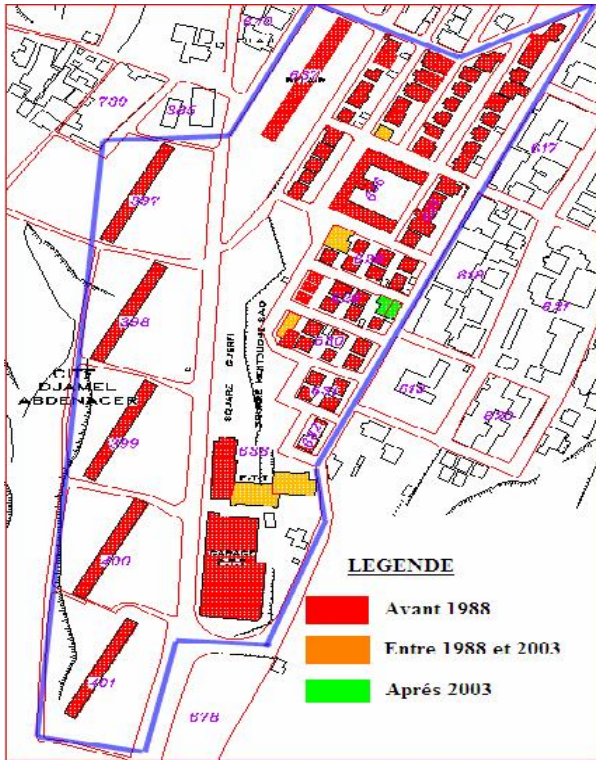


Figure 8 : Classification des constructions suivant leurs années de construction

3.3. Hauteur de la structure

La hauteur de la structure, mais surtout le nombre d'étages de la structure est un paramètre primordial. On considère en effet que seuls les bâtiments dépassant les trois étages sont problématiques d'un point de vue sismique dans une ville à sismicité moyenne telle que Constantine [7]. Les bâtiments plus petits ne subissent que des déformations limitées dues à leurs fréquences de résonance élevée. Les grands bâtiments, quand à eux, subissent des déplacements importants mais ont l'avantage d'avoir été dimensionnés sous l'action sismique. En ce qui concerne les bâtiments en béton, le nombre d'étages est facile à déterminer car il suffit de déterminer le nombre de planchers. Pour les bâtiments en maçonnerie, la difficulté provient du fait que les planchers ne constituent pas forcément des diaphragmes et que les combles, selon leur masse, peuvent également être comptabilisés en tant qu'étage. La présence d'un RDC surélevé ou vide sanitaire est également notée. La figure 9 récapitule les données statistiques concernant le nombre de niveau.

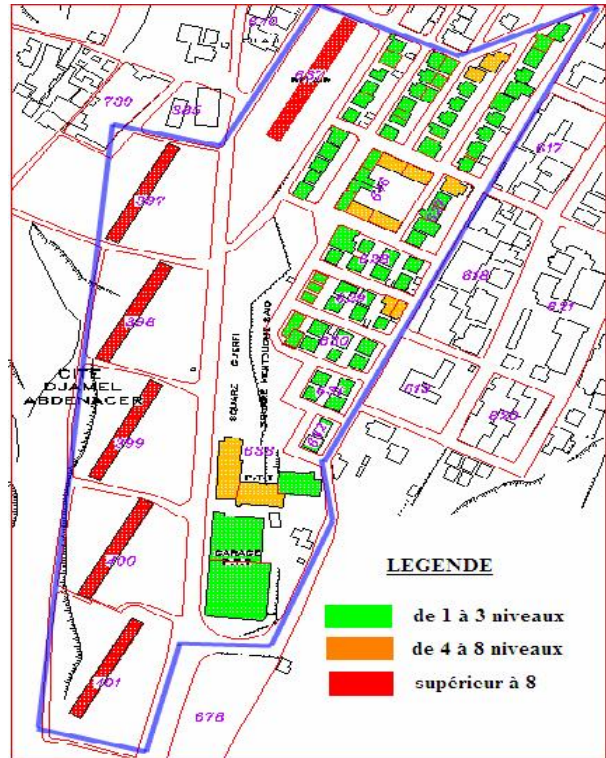


Figure 9 : Classification des constructions suivant leurs nombres d'étage

3.4. Etat général

L'état d'entretien des bâtiments influence également l'indice de vulnérabilité. En effet, un bâtiment qui a fait l'objet d'un entretien régulier se comportera conformément à la résistance attendue.

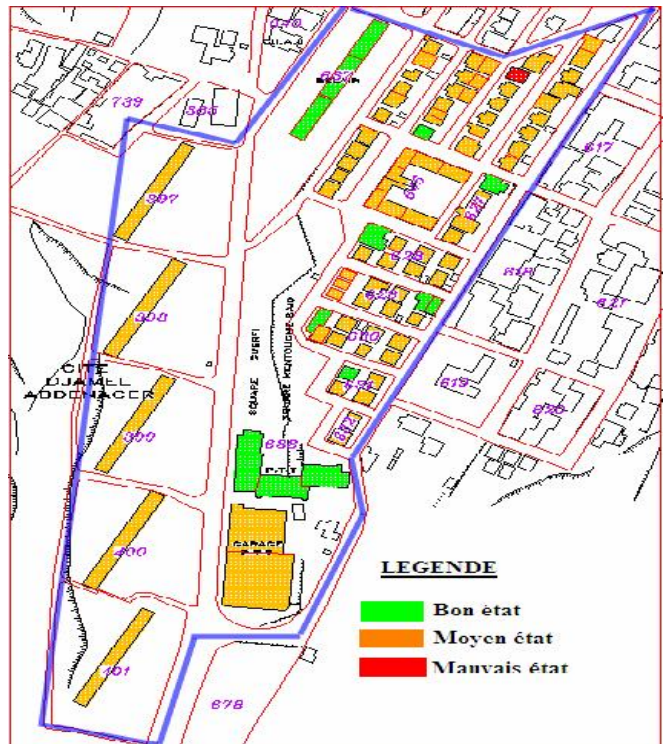


Figure 10 Classification des constructions suivant leur état général

Alors que la résistance d'un bâtiment qu'on a laissé se dégrader pourrait être fortement réduite. La difficulté principale dans la détermination du niveau d'entretien provient du fait qu'un bâtiment peut apparaître bien entretenu car une attention toute particulière a été portée à l'aspect extérieur alors que le système structural du bâtiment n'a fait l'objet d'aucune attention particulière. La figure 10 récapitule les données concernant l'état général des constructions.

3.5. Régularité

Le bâtiment idéal d'un point de vue sismique serait un bâtiment dans lequel aucun saut de rigidité n'est présent et où les éléments internes de rigidité (cage d'escalier, cage d'ascenseur) sont disposés de manière symétrique.

Cependant, de tels bâtiments seraient inconfortables d'un point de vue fonctionnel. Nous avons donc affaire, dans la quasi-totalité des bâtiments observés, à des variations plus ou moins importantes de ce plan idéal. Plus on s'en éloigne, plus la vulnérabilité du bâtiment sera grande.

Il était donc important de déterminer la régularité en plan et en élévation des différents bâtiments évalués (voir figure 11).

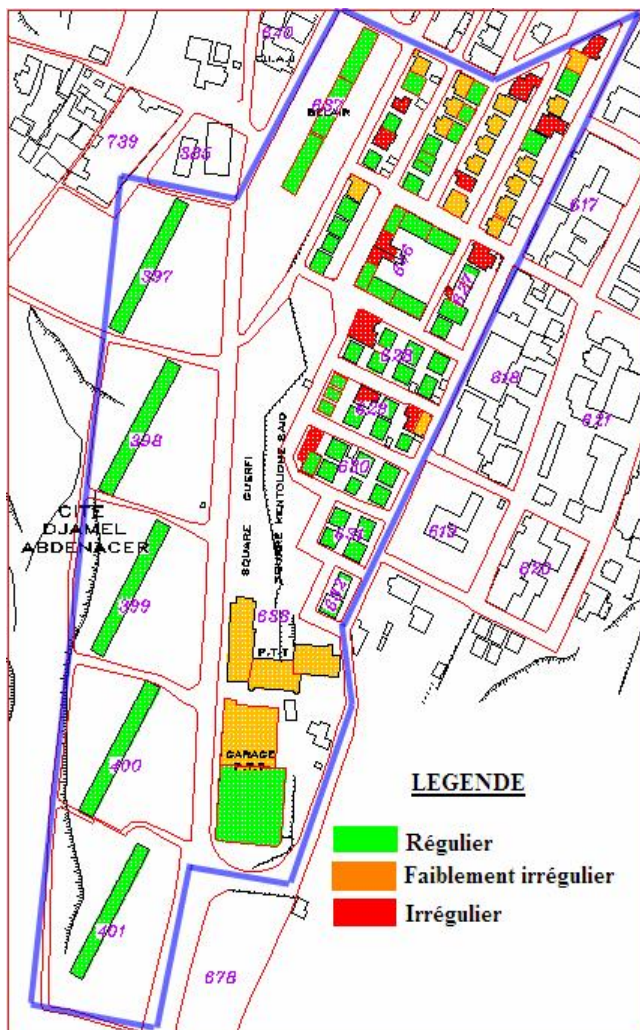


Figure 11 : Classification des constructions suivant la régularité

3.6. Position

La position du bâtiment par rapport aux autres revêt également une certaine importance. En effet, si deux bâtiments accolés l'un à l'autre n'ont pas la même hauteur d'étage et oscillent à des fréquences différentes des problèmes de martèlement peuvent apparaître et causer des dégâts importants.

Il est également important de relever la position relative des bâtiments lorsque ceux-ci sont accolés. En effet, les bâtiments situés dans un angle ou en bout de bloc sont plus vulnérables, car leurs déplacements sont moins entravés. La figure 12 récapitule les données concernant la position des constructions les unes par rapport aux autres.

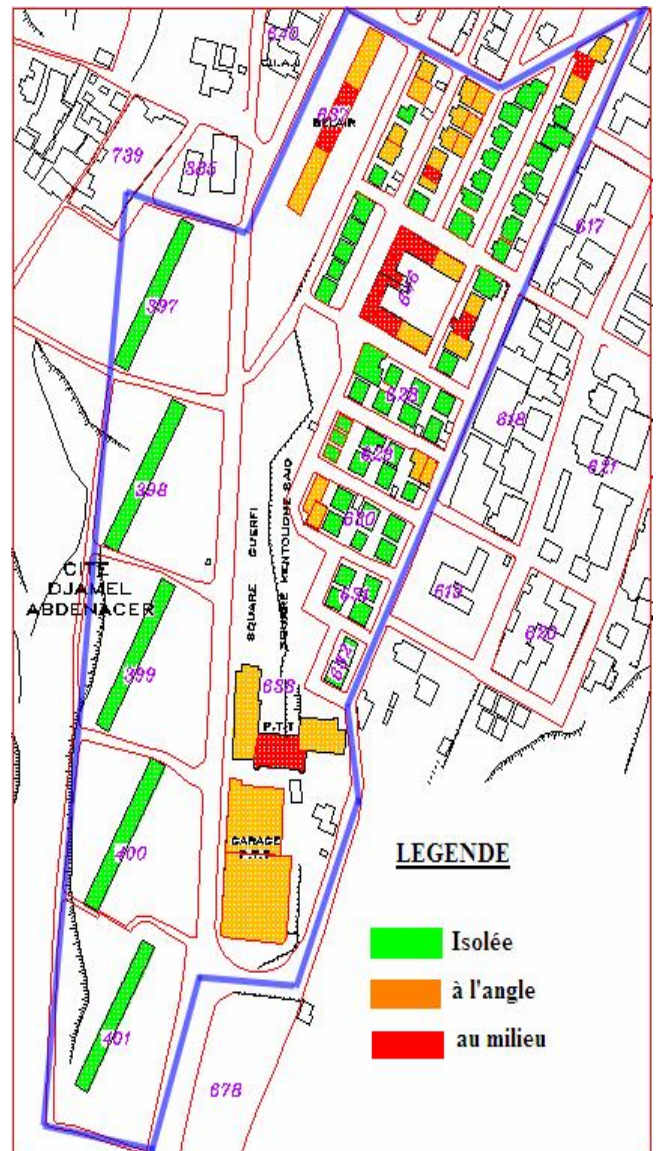


Figure 12 : Classification des constructions suivant la position

3.7. Type du sol

La qualité du sol joue un rôle très important dans l'étude de vulnérabilité, car construire dans des zones instables augmente le risque. La figure 13 donne le type du sol dans notre zone d'étude.

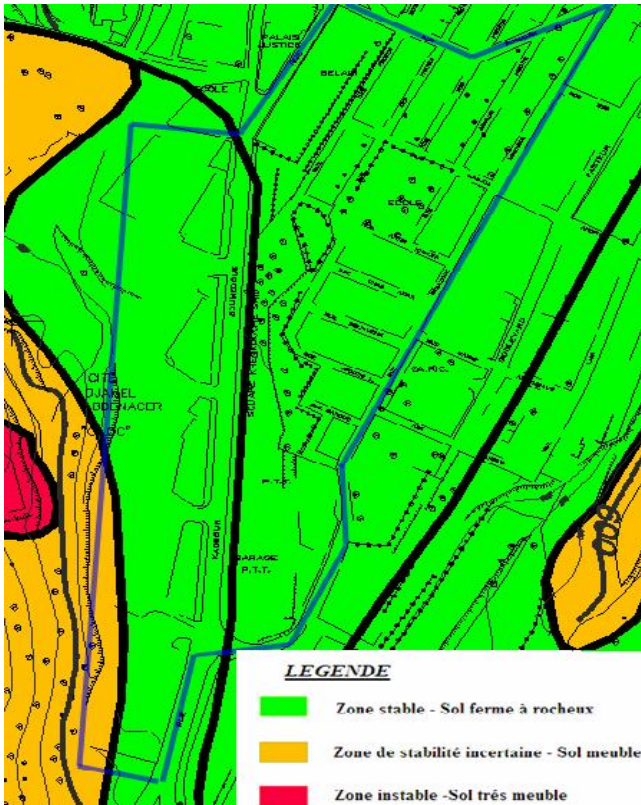


Figure 13 : Différents types de sols

3.8. Topographie du sol « pente »

Plusieurs origines physiques sont avancées pour expliquer l'effet topographique. Principalement on note une origine liée à l'interférence entre la pente du relief et l'angle d'incidence des ondes incidentes rapportée par Kawase et Aki [8] et Pedersen et al [9]. Une deuxième origine viendrait des effets d'interférence des ondes incidentes et diffractées dans la topographie, augmentant le mouvement du sol de surface. Une troisième origine rapportée par Sanchez-Sesma [10] attribue les effets topographiques à la focalisation et la défocalisation des ondes le long de la surface topographique [11].

Même s'il ne fait aucun doute que de tels effets existent, la faible quantité de sites instrumentés pour l'observation de ce phénomène ne permet pas de conclure à des observations statistiquement fiables, d'autant que certaines géométries a priori favorables n'ont pas montré d'amplifications spectaculaires. Cependant, ils existent et il est recommandé de les prendre en compte pour la définition des spectres de dimensionnement lors d'un projet de construction en zone sismique. La figure 14 donne la topographie de notre zone d'étude.

4. ESTIMATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE

Cette phase nous permet, après avoir traité, trié et classé nos données, d'analyser la vulnérabilité des constructions de la zone d'étude face à un tremblement de terre. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode "Vulnerability Index". Grâce à cette méthode de calcul, nous allons estimer la

vulnérabilité sismique. En effet cette méthode de calcul a permis de calculer un indice de vulnérabilité puis de déterminer les dommages qu'un séisme d'une intensité donnée provoquerait. La Figure 15 présente les résultats de l'évaluation des indices de vulnérabilités (IV), A titre de rappel, l'indice est ici présenté sous une valeur moyenne (IV* = IV) et est compris entre 0 pour une vulnérabilité nulle à 1 pour une vulnérabilité sismique maximum.

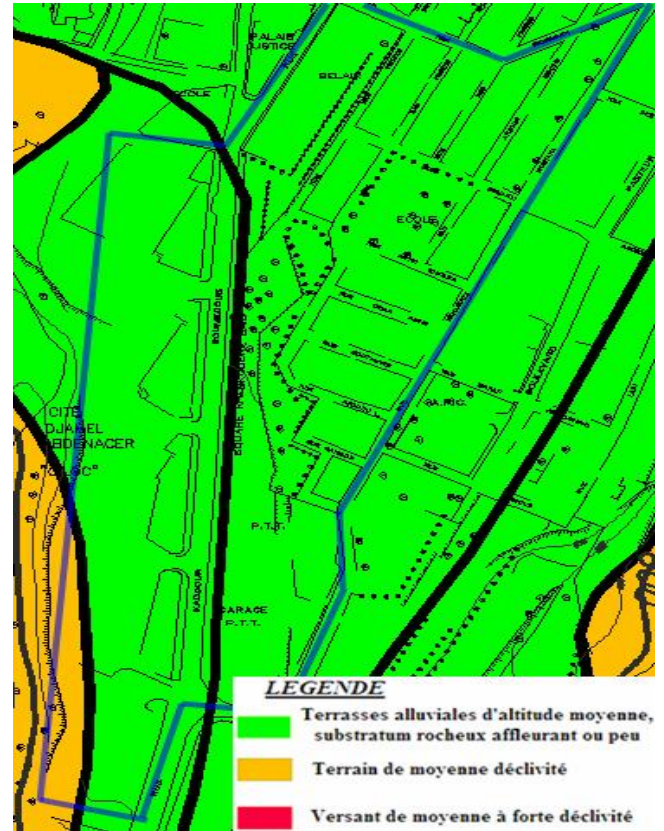


Figure 14 : Topographie de la zone d'étude

Cet indice fournit un premier ordre d'idée des bâtiments ou quartier les plus vulnérables, mais à lui seul il n'est pas suffisant pour caractériser un bâtiment d'un point de vue sismique. En effet, il est utilisé comme paramètre pour le calcul du degré de dommage avec un séisme d'intensité donnée. Ces indices sont tirés d'un traitement statistiques des données affectant la vulnérabilité énuméré précédemment. Etant donné que tous les paramètres n'ont pas la même importance, des coefficients (w_i) sont attribués à chacun des paramètres de façon à pondérer le résultat (Voir tableau 5). Par conséquent l'indice de vulnérabilité est égal à [7] :

$$IV = \sum_i IV_i \cdot w_i$$

Dans notre cas, trois classes sont définies : classe A, B et C. La moins vulnérable est la classe A, elle traduit une bonne résistance à l'action sismique, la plus vulnérable est la classe C, qui traduit un mauvais comportement aux effets du séisme, tandis que la classe B représente la situation intermédiaire.

Tableau 5 : Indices de vulnérabilité proposés pour chaque paramètre en fonction de la classe

N°	Éléments	IV		
		Classe A	Classe B	Classe C
1	Matériau de construction	Béton armé = 0.02	Maçonnerie = 0.09	0.17
2	Etat général	0.02	0.11	0.17
3	Année de construction	0.02	0.09	0.13
4	Type de sols	0.04	0.06	0.09
5	Hauteur	0.04	0.06	0.09
6	Régularité en plan	0.04	0.06	0.09
7	Régularité en élévation	0.04	0.06	0.09
8	Position de la construction	0.04	0.06	0.09
9	Topographie	0.04	0.06	0.09

NB : les indices de vulnérabilité ont été déterminés en tenant compte des spécificités du tissu urbain constantinois.

En fonction de la valeur de IV calculée, on définit la classe à laquelle appartient la structure en se référant au tableau 6 suivant :

Tableau 6 : classification des structures en fonction de leur IV

Classe	Verte	Orange	Rouge
IV	[0 – 0.5]] 0.5 – 0.8]] 0.8 – 1.0]

L'analyse se poursuit par le calcul du dommage pour un bâtiment, causé par un séisme d'intensité donnée. Ce dommage *d* se détermine sur la base d'une relation empirique entre l'indice de vulnérabilité sismique *IV* et l'intensité *I* de séisme selon l'échelle MSK [12] :

$$d = 2.5 \cdot [1 + \tanh((I + 6.25 \cdot IV - 13.1) / 2.3)]$$

I : l'intensité selon l'échelle MSK

IV : Indice de vulnérabilité sismique du bâtiment

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté deux méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique. La première est globale et montre le risque sismique à grande échelle, alors que la deuxième est plus détaillée estimant la vulnérabilité pour une partie du tissu urbain de la ville de Constantine. La principale caractéristique distinctive de cette dernière, réside dans la possibilité d'une description de la qualité sismique des bâtiments, capable de tenir compte des configurations possibles, qui peuvent être estimées avant (en faisant des simulations de scénarios sismiques) et après un séisme (utilisant le retour d'expérience des séismes passés).

Les paramètres choisis sont reconnus comme les plus influents, pour le comportement des bâtiments vis-à-vis du séisme. Une pondération de ces paramètres a été proposée, sur cette base, un calcul de l'indice de vulnérabilité a été effectué et aussi une classification des structures a été donnée permettant de juger de la capacité de la structure à résister ou pas à un séisme donné.

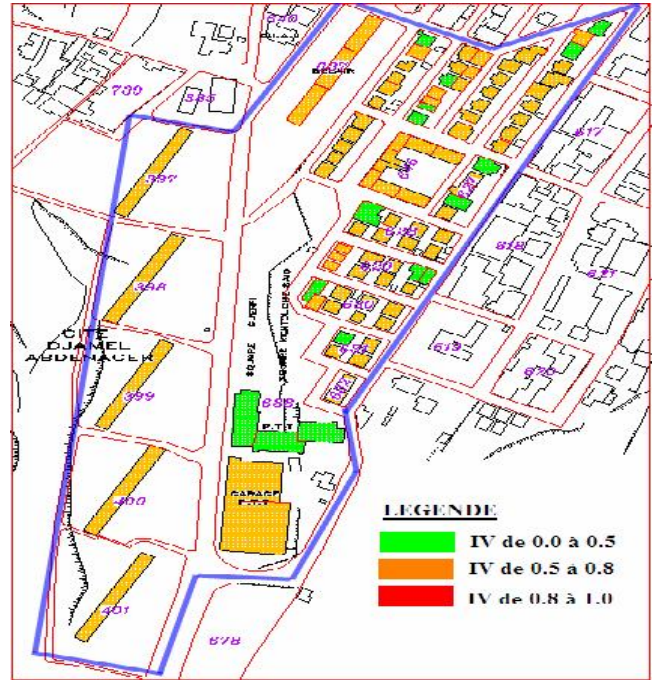


Figure 16 : L'indice de vulnérabilité (IV) pour chaque construction

REFERENCES

- [1] CGS (2010). Etude de vulnérabilité et d'évaluation du risque sismique de la ville de Constantine, Etape Ia.
- [2] Bougdal R., Panet M., Bentabet A., ARCADIS-SIMECSOL (2005). Etude de vulnérabilité aux glissements de terrain de Constantine
- [3] Boussouf R., Constantine : D'une ville attractive à une ville répulsive. Laboratoire d'Aménagement du territoire, Université de Constantine, Algérie.
- [4] RGPH 08, (2008). Recensement Général de la Population et de l'habitat, Office National des Statistiques, Algérie.
- [5] Agence National de l'Aménagement du Territoire (2008). Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la commune de Constantine, Algérie.
- [6] Guéguen P., (2007). Inventaire sismique comme aide à l'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle : la méthode VULNERALP. 7ème Colloque National AFPS 2007. Ecole Centrale Paris.
- [7] C.G.S, « Règlement parasismique Algérien, R.P.A 99 Version 2003 ».
- [8] Kawase H., & K. Aki, (1990). Topography effect at the critical SV-wave incidence: possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows, California, earthquake of 1 October 1987, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 1-22.
- [9] Pedersen, H., B. Le Brun, D. Hatzfeld, M. Campillo & P.-Y. Bard (1994). Ground-motion amplitude across ridges, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**, 1786-1800.
- [10] Sanchez-sesma, Francisco J. & Campillo M.(1993) Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves, *Tectonophysics*, 218, 113-125.
- [11] Agarwal P. & Shrikhande M., (2006). Earthquake resistant design of structures.
- [12] L'échelle macrosismique européenne (1998), Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, V19, Luxembourg, 2001.