



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
Laboratoire ville architecture et patrimoine

Thèse de doctorat en sciences en architecture

**Contribution à l'identification des attributs
architecturaux sismo-résistants de la période coloniale
1830-1930, à Alger.**

Présentée par :

M. Mohamed Adel SOUAMI.

Devant le jury composé de :

Pr. CHENNAOUI Youcef, Président, EPAU.

Pr. MAZZOUZ Said, Examineur, Université Oum El-Bouagui.

Pr. FARSI Mohamed, Examineur, CGS, Alger.

Dr. ABDESSEMED-FOUFA Amina, Examinatrice, Université de Blida.

Dr. SI-YOUCHEF Youcef, Examineur, EPAU.

Pr. ZEROUALA Mohamed Salah, Rapporteur, EPAU.

Pr. BELAZOUGUI Mohamed, Invité, CGS, Alger.

Dr. AIT-MEZIANE Yamina, Invitée, CGS, Alger.

Soutenue le 21 novembre 2016

Remerciements

Mes remerciements vont :

- En premier lieu à mon directeur de thèse Pr. Mohamed Salah Zerouala pour avoir accepté d'encadrer ce travail et pour tous les conseils et orientations qu'il m'a donnés tout le long de ce travail de recherche.
- A l'ensemble du personnel du centre national de recherche en génie parasismique (CGS) pour leur aide, mais plus particulièrement :
 - M. Mohamed Farsi, ingénieur-civil pour son accueil et ses conseils ;
 - M. Boualem Ameer ingénieur-civil pour ses explications sur l'évolution et l'esprit des différents règlements parasismiques ;
 - M. Mustapha Remki, ingénieur-civil pour son aide concernant l'étude et la simulation au séisme des constructions en maçonnerie ;
 - Mme. Farida Moussaoui la bibliothécaire pour son aide concernant la documentation spécialisée sur mon domaine d'étude ;
 - Enfin un grand merci pour Mme. Yamina Ait-Meziane ingénieur-civil pour son aide et suivi concernant l'interprétation des résultats de la recherche.
- A MM. Abdeljalil Milat ingénieur-civil CTC et Abderrezak Bendali-Haçini Architecte enseignant EPAU, pour leurs explications concernant l'étude de vulnérabilité du vieux bâti d'Alger ;
- A MM. Amine Lemdani et Youcef Si-Youcef ingénieurs-civils enseignants EPAU, pour leurs explications concernant le calcul parasismique des structures et la compréhension du règlement parasismique algérien ;
- MM. Nordine Hamoude et Jugurtha Talmatkadi ingénieurs-civils pour les simulations numériques sismiques des cas d'études ;
- A M. Wakas Djenane architecte pour les modèles 3D architecturaux des cas d'études ;
- A Toute l'équipe des architectes collègues et anciens étudiants qui m'ont aidé pour l'enquête et les relevés sur terrain à savoir : Mlles. Sarra Abbad, Ahlem Dorbane, Ibtissem Kaider, Farah Larfi, Samira Merabti, Imen Titous, MM. Mourad Bekkal, Abdellah Bouchafa, Nasreddine Cherifi, Wakas Djenane, Mohamed El-Hadi Fahem, Samir Ghilli, Karim Hadj-Aissa, Salim Lamara et Mohsin Mefoued.
- A MM. Noueddine Chabah et Nacer Igouba pour leur relecture de la thèse.

- A Mmes. Nadia Balamane, Nadia Daoudi et Dalila Himeur, pour les documents concernant ma thèse.
- A M. Chakir Talmat pour avoir plus d'une fois sauvé ma thèse avec ses interventions multiples sur mon ordinateur.
- Enfin un immense merci à Mme. Sabrina Kacher Architecte enseignante EPAU pour ses différents conseils et relecture de ma thèse.

Dédicace

- En premier lieu je tiens à dédier ce travail à mon défunt père qui durant toute sa vie et même sur son lit de mort me poussait à aller toujours plus loin dans mes études et mes recherches, en espérant être digne de la confiance qu'il a placé en moi.
- Ma chère et adoré maman, pour tous les sacrifices et prières qu'elle a fait pour me voir réussir dans tout ce que j'entreprends.
- A ma femme chérie Sabrina pour son dévouement ses encouragements son soutien moral et surtout son immense patience lors de mes moments difficiles et de solitudes, à toi je te dirais jamais assez merci amour.
- A mes enfants Ines-Maylisse et Younes, pour votre présence et vos sourires qui m'ont permis de surmonter les moments de solitudes et d'aller bien au-delà de ce que je pouvais supporter, à vous deux merci d'exister.
- A ma sœur Soumeya, qui crois en moi et qui m'a toujours soutenu à fond la caisse dans tout ce que je fais, mais qui malheureusement vu le sujet de ma thèse n'assistera jamais à ma soutenance.
- A mon frère Nadjib qui j'en suis sûr au fond de lui a toujours été fier de son petit frère.
- A mes défunts grands-parents Papasidi et Mamayema qu'ils reposent en paix.
- A Farida Dahimene, pour sa présence et ses encouragements, un de mes très rares soutien.
- A Nasreddine Cherifi dit Nacer, un vrai ami comme on en trouve plus qui a été présent à chaque rendez-vous difficile.
- A Mehdi Bennai, pour ses conseils mais surtout pour tous ses encouragements.
- A Rafik Balamane, pour sa bonne humeur, sa sagesse et ses encouragements.
- A Akila Saidani, pour sa présence et ses encouragements.
- Un grand merci à tous ceux qui ont cru en moi principalement mes étudiants.
- Enfin un éternel merci à mon maître Ali Mansouri. Sache pour la énième fois que ta flamme et ton désir du savoir brûle toujours au fond de moi et qu'ils ne me quitteront jamais. J'espère seulement que je serai digne de toi et de ton sacrifice pour nous.

Résumé :

Le patrimoine architectural algérois datant de la période 1830-1930 constitue une partie non négligeable de la mémoire urbaine collective. Malheureusement, ce dernier souffre aujourd'hui d'une situation de dégradation assez importante. Une situation qui est d'autant plus dangereuse au fait qu'il soit exposé à un aléa sismique élevé ce qui est au vu de sa composante structurelle en maçonnerie, le rend encore plus vulnérable face aux sollicitations sismiques.

Or, malgré le fait que ce patrimoine ait été réalisé il y a plus d'un siècle sans avoir recours à une réglementation parasismique, qu'il ait subi plusieurs séismes et compte-tenu du fait qu'il ait été mal entretenu, nous observons avec réjouissance qu'il soit encore dans un état d'exploitation acceptable.

Selon nous, ceci peut s'expliquer par la méconnaissance du potentiel sismo-résistant de ce patrimoine, et non pas du fait qu'il en soit dépourvu.

Ainsi, l'objet de cette thèse est de tenter, à travers la connaissance de l'impact des traits de caractères architecturaux et urbains du patrimoine algérois 1830-1930 sur son comportement lors d'un séisme, afin de révéler son potentiel sismo-résistant.

Une recherche qui sera abordée du point de vue de l'architecture et non pas du point de vue du génie civil. Il n'y sera pas question de se substituer ou de minimiser l'importance de l'ingénieur, ou d'un autre acteur participant à l'acte de bâtir. Ce qui nous intéresse, c'est la mise en avant de l'implication des traits de caractères architecturaux dans le comportement de notre corpus d'étude lors d'un séisme.

L'objectif étant de permettre, à travers ce travail de recherche, d'influer sur la mise en place de nouvelles stratégies de préservation et de sauvegarde de ce patrimoine architectural soumis au risque sismique. Des stratégies qui ne se réduiront pas à des actions de renforcement constructif, mais incluraient également la prise en compte des caractéristiques architecturales et urbaines sismo-résistantes de ce patrimoine.

Mots clef : Alger, architecture haussmannienne, vieux bâti, architecture parasismique, vulnérabilité sismique, simulation numérique.

Abstract:

Algerian architectural heritage dating from the period 1830-1930, is a significant part of the collective urban memory. Unfortunately, it now suffers from significant deterioration. This situation is all the more dangerous as this heritage is exposed to high seismic hazards, which, in view of its structural component masonry, makes it even more vulnerable to seismic loads.

Despite the fact that this heritage has been erected over a century, without using paraseismic regulations, it endured several earthquakes. And although it was poorly maintained, we noticed, with great satisfaction, that it remains in an acceptable operating condition.

We believe this can be explained by the lack of knowledge of earthquake-resistant potential of this heritage, not the fact that it has no one.

Thus, by knowing the features of the architectural and urban character of this heritage and their impact on its behavior during an earthquake, this thesis will attempt to reveal its paraseismic potential.

Indeed, this research process will be conducted from an architectural perspective and not a civil engineering one. The objective here is not to replace or minimize the importance of the engineer's role, or that of the other stakeholders involved in the act of building. We are more interested in highlighting the involvement of the architectural traits in the behavior of our corpus of study during an earthquake.

Our purpose is to have a bearing, through this research work, on the development of new strategies in order to preserve and safeguard the architectural heritage subject to seismic risk. Strategies that will not boil down to some constructive actions, but would also include the consideration of the earthquake-resistant architectural and urban characteristics of this heritage.

Key words: Algiers, Haussmannian architecture, old buildings, seismic design, seismic vulnerability, numerical simulation.

ملخص:

يعتبر التراث المعماري الجزائري الذي يعود تاريخه إلى الفترة 1830-1930، كجزء كبير من الذاكرة الحضارية الجماعية. لسوء الحظ، إنه يعاني اليوم من حالة تدهور كبير. وما يزيد من هذه الخطورة هو تعرّضه لخطر زلزال، مما يزيد من هشاشته في مواجهة الحمل الزلزالي بالنظر إلى مكوّناته البنيوي.

رغم انقضاء أكثر من قرن على تشييد هذا التراث من دون الحاجة لأي لوائح المقاومة الزلزالية، و اعتراضه إلى عدة زلازل، ورغم عدم صيانتها بشكل صحيح إلا إنه باق في حالة استغلال مقبولة. بنسبة لنا يمكن تفسير ذلك بجهل قدرة المقاومة للزلازل التي يتمتع بها هذا التراث وليس في غياب أي قدرة لذلك.

كذلك فإن هذه الرسالة ترمي، من خلال الإلمام بأثر ملامح الطابع المعماري والحضري لهذا التراث على سلوكه أثناء وقوع زلزال، إلى الكشف عن قدرته لمقاومة الزلازل.

ويتناول هذا العمل البحثي الموضوع من منظور الهندسة المعمارية و ليس من منظور الهندسة المدنية. لأن الهدف منه ليس التقليل من أهمية دور المهندس والاستعاضة عنه أو عن غيره من الجهات الفاعلة المعنية بعملية البناء. المهم هو تسليط الضوء على تدخّل الصفات المعمارية في سلوك هذا التراث أثناء وقوع زلزال.

الغاية من هذا البحث هي التأثير على تطوير استراتيجيات جديدة لحماية وصون التراث المعماري الذي يواجه خطر الزلازل. استراتيجيات لن تقتصر على أعمال التعزيز البناء بل سوف تشمل كل خصائص مقاومة الزلازل المعمارية والحضرية التي يميّز بها هذا التراث.

كلمات البحث: الجزائر، الهندسة الهوسمانية، المباني القديمة، الهندسة المعمارية المقاومة للزلازل، الهشاشة الزلزالية، المحاكاة العددية.

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Fig. 1 : Alger (crédit photo Mezoued A.). | 3 |
| Fig. 2 : Dégradation du bâti (crédit photo : Guerba M. & Tedjini Bailiche W., Abrous N., Benmenni F.). | 3 |
| Fig. 3 : Exemple de constructions en maçonnerie qui ne se sont pas effondrées suite au séisme destructeur de Haïti en 2010 [Langenbach R., 2010B]. | 6 |
| Fig. 4 : Séisme de 2009 à l'Aquila en Italie, les bâtiments de même typologie constructive et architecturale se trouvant au même endroit ont réagi de manière différente face à la secousse. | 10 |
| Fig. 5 : Schéma méthodologique de la thèse. | 22 |
| Fig. 6 : Les trois types d'oscillations que peut provoquer un séisme sur une construction [Zacek M., 1996]. | 25 |
| Fig. 7 : Carte de la sismicité de l'Algérie du nord Période 2002/2006. | 26 |
| Fig. 8 : Failles sismiques autour d'Alger [Benouar D., 2008B]. | 27 |
| Fig. 9 : Cheminement pour le choix des méthodes de calcul et d'analyse parasismique d'un ouvrage [Chenef M., 2011]. | 31 |
| Fig. 10 : Bon comportement au séisme d'une ancienne mosquée en maçonnerie en comparaison avec les autres constructions récentes en béton armé lors du séisme de Kocaeli en Turquie en 1999 [Langenbach R., 2008B]. (Crédit photo : Marti E., Associated Press). | 36 |
| Fig. 11 : Exemple de bonne tenue des constructions traditionnelles en comparaison avec les constructions récentes en béton armé lors du séisme destructeur en Turquie de 1999 [Langenbach R., 2008B]. | 37 |
| Fig. 12 : Séisme de 2009 à l'Aquila en Italie, l'église St. Maria Del Suffragio n'a subi des dommages qu'au niveau de la coupole. Les façades en maçonnerie sont restées quasiment intactes. | 38 |

| | |
|---|----|
| Fig. 13 : Le de manque de liaisons horizontales au pied (B), au sommet (C) ou entre les éléments verticaux (D) aura tendance à ouvrir le bâtiment. [Davidovici V., 2014, P73]. (Crédit photo : Djennane W.)..... | 42 |
| Fig. 14 : Basculement dû à une grande portée. (Crédit photo : Djennane W.) | 43 |
| Fig. 15 : Fragilisation des angles des ouvertures. (Crédit photo : Djennane W.) | 43 |
| Fig. 16 : Insuffisance du rapport plein/vide. (Crédit photo : Djennane W.)..... | 44 |
| Fig. 17 : Effondrement partiel dû à la différence de niveau. (Crédit photo : Djennane W.)..... | 44 |
| Fig. 18 : Détachement et effondrement de l'angle. (Crédit photo : Djennane W.)..... | 45 |
| Fig. 19 : Basculement du mur et fissures apparentes dans la partie haute du mur de refend. (Crédit photo : Djennane W.) | 45 |
| Fig. 20 : Conditions de régularités en plan par rapport aux proportions, les retraits et les saillies [CGS, 2004]. | 53 |
| Fig. 21 : Conditions de régularités en élévation par rapport aux retraits entre les niveaux [CGS, 2004]..... | 55 |
| Fig. 22 : Présence d'humidité dans les caves à causes des infiltrations et des inondations [CENEAP & CTC, 2007]. | 64 |
| Fig. 23 : Exemple d'un plancher en voutain (Crédit photo : Souami M.A., Djennane W.)..... | 65 |
| Fig. 24 : Identification des communes impliquées dans le diagnostic sur le vieux bâti réalisé pour le compte de la wilaya d'Alger. Durant la première phase, 7 communes considérées comme prioritaires ont été concernées par cette étude. A savoir : Alger Centre, Belouizdad, Bab El Oued, El Harrach, El Madania, Hussein Dey et Sidi M'Hamed [CENEAP & CTC centre, 2007]. | 66 |
| Fig. 25 : Détérioration et manque d'entretien du patrimoine 1830-1930. Prolifération d'une végétation sauvage (Crédit photo : Souami M.A.)..... | 68 |
| Fig. 26 : Rôle de la saillie dans le maintient des éléments du plancher afin d'éviter l'effondrement de ce dernier. | 73 |

| | |
|--|----|
| Fig. 27 : Courbe montrant le niveau d'endommagement d'une construction en fonction des déplacements [Zacek M., 2004]. | 87 |
| Fig. 28 : Oscillation non synchronisée entre deux entités d'un bâtiment ayant des proportions différentes. Exemples : séisme de Kobé, Japon 1995. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 88 |
| Fig. 29 : La surélévation du centre de gravité de la construction provoque une accentuation des oscillations. Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 89 |
| Fig. 30 : Non superposition entre le centre de gravité et le centre de rigidité. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). . | 90 |
| Fig. 31 : Sollicitation de l'angle lors d'un séisme. Il cumule l'ensemble des déplacements de la construction. Exemple : séisme de Colfiorito, Italie 1997. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 90 |
| Fig. 32 : Des porte-à-faux importants, peuvent provoquer l'effondrement de ces derniers en cas de séisme. Exemple : séisme de Kobé, Japon 1995. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 91 |
| Fig. 33 : Tout retrait ou saillie importants, peut induire des dommages assez graves. Exemple : séisme d'Alaska, États-Unis 1964. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004])..... | 92 |
| Fig. 34 : Plus une bâtisse est longue, plus les déplacements entre ses deux extrémités seront importants. Exemple : séisme d'Anchorage, États-Unis 1964. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 92 |
| Fig. 35 : Un élancement excessif, peut conduire à ce que les niveaux supérieurs subissent des oscillations plus importantes. Exemple : séisme de Mexico, Mexique 1985. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 93 |
| Fig. 36 : Une disposition non symétrique des éléments de contreventement, peut accentuer les effets de torsion. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 93 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 37 : Une disposition non symétrique des trémies et éléments rigides, provoque des effets torsion néfastes sur la construction. (Crédit photo : Djennane W., [AFPS, 2004A]). | 94 |
| Fig. 38 : Le changement de la grandeur de la trame structurelle provoque des rigidités différentes, qui peuvent être à l'origine de désordre important en cas de séisme. (Crédit photo : Djennane W.) | 95 |
| Fig. 39 : Création d'un poteau-court à cause du remplissage d'une partie du cadre avec de la maçonnerie ce qui engendre de oscillations différentes dans le poteau. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 96 |
| Fig. 40 : La multiplication des composants structurels d'une construction dans les deux sens, permet de la rigidifier et donc de réduire ses déplacements. (Crédit photo : Djennane W.) | 96 |
| Fig. 41 : Changement de rigidité entre les étages et création d'un niveau souple. | 97 |
| Fig. 42 : L'oscillation de manière différente peut conduire à l'entrechoquement de bâtiments juxtaposés. Exemple : séisme de Californie, États-Unis 1971. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]). | 98 |
| Fig. 43 : La superposition des ouvertures permet à chaque travée structurelle d'osciller de manière synchronisée avec les autres travées. (Crédit photo : Djennane W.) | 98 |
| Fig. 44 : Plan D'Ager en 1833 [Kanoun Y., 2000] | 101 |
| Fig. 45 : Plan D'Ager en 1846 [Kanoun Y., 2000] | 102 |
| Fig. 46 : Plan D'Ager en 1880 [Kanoun Y., 2000] | 102 |
| Fig. 47 : Plan D'Ager en 1895 [Kanoun Y., 2000] | 103 |
| Fig. 48 : A partir d'une taxis génératrice de base, il est possible d'obtenir une composition bien plus complexe. [Souami M.A., 2011] | 105 |
| Fig. 49 : Mise en application du principe de la taxis sur un immeuble d'Alger. (Crédit photo : Souami M.A., [Kanoun Y., 2000]) | 105 |
| Fig. 50 : Démarcation entre le soubassement corps et couronnement grâce au balcon filant. (Crédit photo : Souami M.A.) | 106 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 51 : Marquage de la tripartite horizontale grâce au refend d'angle. (Crédit photo : Bekkal M.) | 107 |
| Fig. 52 : Régularité du plan (immeuble du 37 rue Larbi Ben M'hidi) [Kanoun Y., 2000]. | 107 |
| Fig. 53 : Symétrie de l'immeuble du 37 rue Larbi Ben M'hidi [Kanoun Y., 2000]. | 108 |
| Fig. 54 : Régularité des travées [Kanoun Y., 2000]..... | 109 |
| Fig. 55 : la règle de l'ordonnement (Crédit photo : Bekkal M.)..... | 111 |
| Fig. 56 : Ordonnement des façades sur le boulevard Cheguevara à Alger [Kanoun Y., 2000]..... | 111 |
| Fig. 57 : Vue en perspective de l'ordonnement des façades sur le boulevard Cheguevara à Alger. (Crédit photo : Souami M.A.)..... | 112 |
| Fig. 58 : Continuité des lignes de perspective grâce à l'alignement des planchers. (Crédit photo : Souami M.A.)..... | 113 |
| Fig. 59 : Evolution de la façade durant le 19ème siècle à Paris [Loyer F., 1994]. | 114 |
| Fig. 60 : Aucune différence de fond entre l'ordre existant (1884) et projeté (1902), [Loyer F., 1994]. | 115 |
| Fig. 61 : Traitement des angles afin de ressortir la hiérarchie des rues. (Crédit photo : Bekkal M.) | 116 |
| Fig. 62 : Projection des bow-windows dans les façades. (Crédit photo : Souami M.A.) | 117 |
| Fig. 63 : les hauteurs d'étage de l'immeuble Milk bar, se réduisent du bas vers le haut. (Crédit photo : Souami M.A.)..... | 119 |
| Fig. 64 : Façade de la cour intérieure, Alger. (Crédit photo : Souami M.A.) | 120 |
| Fig. 65 : Un îlot régulier et ramassé, Alger [Kanoun Y., 2000] | 123 |
| Fig. 66 : Vu aérienne de la zone d'étude (Image googleearth)..... | 130 |
| Fig. 67 : symétrie en plan des immeubles. | 135 |
| Fig. 68 : Positions des cages d'escalier et des cours intérieures des immeubles. | 136 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 69: Symétrie des enveloppes des immeubles. | 136 |
| Fig. 70 : Retrait et saillie en plan des immeubles. | 136 |
| Fig. 71 : Grandeur des travées extrêmes et d'angle par rapport aux autres. | 137 |
| Fig. 72 : Rapport plein vide des travées extrêmes et d'angle par rapport aux autres.. | 137 |
| Fig. 73 : Présence de refend d'angle au niveau des travées extrêmes par rapport aux autres et plus particulièrement des travées d'angles des immeubles. | 138 |
| Fig. 74 : Rapport plein vide des enveloppes des immeubles..... | 138 |
| Fig. 75 : Pourcentage de la présence des saillies toute forme confondue (bandeau, balcon ou bow-window) au sein des immeubles..... | 139 |
| Fig. 76 : Continuité entre les hauteurs des planchers des immeubles juxtaposés..... | 139 |
| Fig. 77 : Retrait et saillie en élévation des immeubles..... | 140 |
| Fig. 78 : Encadrement des ouvertures des immeubles. | 140 |
| Fig. 79 : Réduction de hauteur entre le rez-de-chaussée et les autres niveaux des immeubles. | 141 |
| Fig. 80 : Positions des cages d'escalier et des cours intérieures des immeubles. | 141 |
| Fig. 81 : Différence de niveau entre deux bâtiments juxtaposés au sein d'un même îlot. | 142 |
| Fig. 82 : Position des cours au sein des îlots du corpus d'étude. | 142 |
| Fig. 83 : Proportions en plan des îlots. | 143 |
| Fig. 84 : Profondeur des immeubles au sein des îlots..... | 143 |
| Fig. 85 : Régularité des formes des immeubles. | 143 |
| Fig. 86 : Proportion en plan des immeubles. | 144 |
| Fig. 87 : les cinq modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie. (Crédit photo : Hamoud N.)..... | 150 |
| Fig. 88 : Modèles simulés en structure poteaux-poutres en béton armé sans remplissage. (Crédit photo : Hamoud N.)..... | 151 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 89 : Evolution de la période propre du bâtiment en seconde, estimée empiriquement pour les deux typologies structurelles. | 155 |
| Fig. 90 : Evolution de la période propre du bâtiment en seconde estimée numériquement pour les deux typologies structurelles. | 156 |
| Fig. 91 : Rythme de croissance des périodes numériques et empiriques en pourcentage (%) pour les modèles en murs porteurs en maçonnerie en fonction des deux types de multiplication verticale et horizontale. | 156 |
| Fig. 92 : Rythme de croissance des périodes numériques et empiriques en pourcentage (%) pour les modèles en poteaux-poutres en béton armé sans remplissage en fonction des deux types de multiplication verticale et horizontale. | 157 |
| Fig. 93 : Patrimoine architectural algérois 1830-1930. (Crédit photo : Souami M.A., [Kanoun Y., 2000]) | 168 |
| Fig. 94 : Modèle 01 (crédit photo : Talmatkadi J.). | 169 |
| Fig. 95 : Modèle 02. (crédit photo : Talmatkadi J.). | 169 |
| Fig. 96 : Modèle 03. (crédit photo : Talmatkadi J.). | 170 |
| Fig. 97 : Modèle 04. (crédit photo : Talmatkadi J.). | 170 |
| Fig. 98 : Modèle 05. (crédit photo : Talmatkadi J.). | 171 |
| Fig. 99 : Evolution des déplacements en millimètre. | 172 |
| Fig. 100 : Evolution des déplacements relatifs inter-étages en millimètre..... | 172 |
| Fig. 101 : Partage du même mur de refend entre deux immeubles mitoyens. Cas de l'immeuble de la parisienne Alger. (Crédit photo : Souami M.A.)..... | 177 |
| Fig. 102 : L'immeuble îlot avec galerie. (Crédit photo : Bekkal M.). | 178 |
| Fig. 103 : Exemple d'une poutre de reprise métallique pour la reprise des murs porteurs en maçonnerie. (Crédit photo : Souami M.A.) | 179 |
| Fig. 104 : Modèle source. (Crédit photo : Bekkal M.). | 180 |
| Fig. 105 : Caractéristiques du modèle source. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.)..... | 181 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 106 : Modèle référence. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 182 |
| Fig. 107 : Modèle cours. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 182 |
| Fig. 108 : Modèle encadrement. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 183 |
| Fig. 109 : Modèle saillie. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 183 |
| Fig. 110 : Modèle dernière travée. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 183 |
| Fig. 111 : Modèle refend d'angle. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 184 |
| Fig. 112 : Modèle rapport plein/vide. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 184 |
| Fig. 113 : Modèle Hauteur d'étage. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 185 |
| Fig. 114 : Modèle galerie. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.). | 185 |
| Fig. 115 : Evolution des déplacements absolus en millimètre dans le sens des X des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence. | 187 |
| Fig. 116 : Evolution des déplacements absolus dans le sens des Y en millimètre des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence. | 188 |
| Fig. 117 : Evolution des déplacements relatifs en millimètre dans le sens des X des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence. | 189 |
| Fig. 118 : Evolution des déplacements relatifs en millimètre dans le sens des Y des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence. | 190 |
| Fig. 119 : Fiche de diagnostic technique du vieux bâti d'Alger. Page 01 [CENEAP & CTC centre, 2007]. | 230 |
| Fig. 120 : Fiche de diagnostic technique du vieux bâti d'Alger. Page 02 [CENEAP & CTC centre, 2007]. | 231 |
| Fig. 121 : Fiche d'enquête proposée pour l'enquête sur le corpus d'études. Page 01. | 232 |
| Fig. 122 : Fiche d'enquête proposée pour l'enquête sur le corpus d'études. Page 02. | 233 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|---|
| Tab. 1 : Importance des dommages subis par les constructions lors du séisme de Chlef en 1980 en fonction de leur période de construction [Chaker A.A, 1981]. | 9 |
|--|---|

| | |
|---|-----|
| Tab. 2 : Tableau de synthèse de l'enquête de vulnérabilité de l'évaluation du risque sismique de la ville d'Alger [JICA, 2006]. | 63 |
| Tab. 3 : Eléments permettant l'identification de l'indice de vulnérabilité du vieux bâti en maçonnerie d'Alger [Boukri M., 2007]. | 72 |
| Tab. 4 : Corrélation des données. | 125 |
| Tab. 5 : Caractéristiques géométriques des modèles à simuler. | 152 |
| Tab. 6 : Tableau de synthèse de l'estimation des périodes des modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie en multiplication horizontale. | 154 |
| Tab. 7 : Tableau de synthèse de l'estimation des périodes des modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie en multiplication verticale. | 154 |
| Tab. 8 : Estimation des périodes des modèles simulés en poteaux-poutres béton armé sans remplissage en multiplication horizontale. | 154 |
| Tab. 9 : Estimation des périodes des modèles simulés en poteaux-poutres béton armé sans remplissage en multiplication verticale. | 155 |
| Tab. 10 : Dimensions des bâtiments en fonction de la multiplication en plan du modèle de base. | 159 |
| Tab. 11 : Valeurs des périodes propres de la série des immeubles multipliés horizontalement estimées avec l'approche empirique. | 159 |
| Tab. 12 : Dimensions des bâtiments en fonction de la multiplication en élévation du modèle de base. | 160 |
| Tab. 13 : Valeurs des périodes propres de la série des immeubles multipliés verticalement estimées avec l'approche empirique. | 161 |
| Tab. 14 : Tableau de synthèse de l'impact des proportions en plan et en élévation sur la valeur de la période estimée empiriquement ou numériquement. | 165 |
| Tab. 15 : Tableau de synthèse de l'impact des changements des proportions du bâtiment en plan et en élévation sur les valeurs de la flèche. | 166 |
| Tab. 16 : Valeur des déplacements en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau. | 171 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 17 : Valeur en millimètre des déplacements relatifs inter-étage pour chaque modèle niveau par niveau. | 171 |
| Tab. 18 : Classement des valeurs des déplacements absolus de la plus petite à la plus grande, niveau par niveau. | 173 |
| Tab. 19 : Classement des valeurs des déplacements relatifs, de la plus petite à la plus grande, niveau par niveau. | 173 |
| Tab. 20 : Valeurs des déplacements absolus dans le sens X en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau. | 186 |
| Tab. 21 : Valeurs des déplacements absolus dans le sens Y en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau. | 186 |
| Tab. 22 : Valeurs en millimètre des déplacements relatifs inter-étage dans le sens X pour chaque modèle niveau par niveau..... | 186 |
| Tab. 23 : Valeurs en millimètre des déplacements relatifs inter-étage dans le sens Y pour chaque modèle niveau par niveau..... | 186 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction générale | 1 |
| 1.1 Introduction..... | 2 |
| 1.1.1 Alger une zone à risque | 2 |
| 1.1.2 Alger un patrimoine en déperdition..... | 3 |
| 1.1.3 Alger et le risque sismique | 4 |
| 1.2 Problématique | 8 |
| 1.3 Hypothèses..... | 14 |
| 1.4 Méthodologie | 14 |
| 1.4.1 Etat des lieux | 18 |
| 1.4.2 Les fondements théoriques | 19 |
| 1.4.3 Caractéristiques architecturales de l'immeuble 1830-1930 à Alger liées au séisme, et simulations numériques..... | 21 |
| 2. Chapitre I : Etat des lieux | 24 |
| 2.1 Introduction..... | 25 |
| 2.2 La sismicité d'Alger et de ses environs | 25 |
| 2.2.1 Qu'est-ce que le séisme ? | 25 |
| 2.2.2 Cadre géologique et sismicité historique | 26 |
| 2.3 Approche technique du bâti ancien : préjugés et faux-procès | 28 |
| 2.3.1 Calcul et dimensionnement parasismique..... | 29 |
| 2.3.2 Complexité des choix de méthodes de calculs et d'analyse des structures..... | 30 |
| 2.3.3 Modèles et incertitudes..... | 32 |
| 2.3.4 Vulnérabilité des édifices en maçonnerie face au séisme..... | 35 |
| 2.3.5 Réhabilitation du bâti ancien | 46 |
| 2.4 L'architecture parasismique : une approche plurielle..... | 47 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.5 | Architecture et règlement parasismique algérien..... | 50 |
| 2.5.1 | Justification de sécurité | 51 |
| 2.5.2 | Choix de la méthode de calcul : | 52 |
| 2.5.3 | Méthode statique équivalente :..... | 55 |
| 2.5.4 | Méthode dynamique modale spectrale : | 60 |
| 2.5.5 | Eléments secondaires | 60 |
| 2.6 | L'approche sismique du bâti ancien en Algérie : Une vision réductrice..... | 61 |
| 2.6.1 | Etude de vulnérabilité du vieux bâti d'Alger..... | 62 |
| 2.7 | Etudes et recherches sur la vulnérabilité du vieux bâti..... | 69 |
| 2.7.1 | L'approche de Benedetti :..... | 70 |
| 2.7.2 | L'approche FaMIVE :..... | 71 |
| 2.7.3 | Contexte algérien :..... | 71 |
| 2.7.4 | Conclusion | 74 |
| 2.8 | Typologie et prévention parasismique | 75 |
| 2.8.1 | Pertinence de la typologie | 75 |
| 2.8.2 | Type..... | 77 |
| 2.9 | Conclusion chapitre I..... | 78 |
| 3. | Chapitre II : Fondements théoriques | 82 |
| 3.1 | Introduction..... | 83 |
| 3.2 | Génie parasismique | 83 |
| 3.2.1 | La sismicité | 84 |
| 3.2.2 | Intensité | 85 |
| 3.2.3 | L'effort sismique | 85 |
| 3.2.4 | Rigidité | 86 |
| 3.2.5 | Dimensionnement en capacité | 87 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.3 | Principes de l'architecture parasismique | 88 |
| 3.3.1 | Simplicité des formes..... | 88 |
| 3.3.2 | Symétrie | 89 |
| 3.3.3 | Rabaisser le centre de gravité | 89 |
| 3.3.4 | Centre de gravité confondu avec le centre de rigidité | 89 |
| 3.3.5 | Renforcement des angles..... | 90 |
| 3.3.6 | Porte-à-faux..... | 91 |
| 3.3.7 | Saillie et retrait | 91 |
| 3.3.8 | Proportions..... | 92 |
| 3.3.9 | Elancement..... | 92 |
| 3.3.10 | Contreventement vertical | 93 |
| 3.3.11 | Trémies et éléments rigides | 94 |
| 3.3.12 | Régularité des éléments porteurs | 95 |
| 3.3.13 | Poteau-court | 95 |
| 3.3.14 | Redondance des éléments porteurs | 96 |
| 3.3.15 | Niveau souple | 96 |
| 3.3.16 | Entrechoquement..... | 97 |
| 3.3.17 | Superposition des ouvertures : | 98 |
| 3.4 | Architecture 19 ^{ème} /20 ^{ème} siècle à Alger : caractéristiques stylistiques et urbaines..... | 98 |
| 3.4.1 | Histoire urbaine et architecturale d'Alger | 99 |
| 3.4.2 | Caractéristiques stylistiques..... | 104 |
| 3.4.3 | Les règles régissant la façade, la rue et l'alignement..... | 110 |
| 3.4.4 | Typologie des îlots et découpage parcellaire..... | 119 |
| 3.5 | Conclusion chapitre II..... | 124 |

| | |
|---|------------|
| 4. Chapitre III : Immeuble d'Alger 1830-1930 et simulations expérimentales | 127 |
| 4.1 Introduction :..... | 128 |
| 4.2 Enquête sur le corpus d'étude | 129 |
| 4.2.1 Justification de la zone d'étude..... | 130 |
| 4.2.2 Présentation de la fiche de relevé..... | 133 |
| 4.2.3 Lecture et analyses des résultats de l'enquête | 135 |
| 4.2.4 Conclusion de l'enquête | 144 |
| 4.3 Simulation numérique..... | 146 |
| 4.3.1 Modèle est simulation | 146 |
| 4.3.2 Simulation du comportement d'une construction basique..... | 147 |
| 4.3.3 Vérification du comportement d'un mur | 167 |
| A. Présentation des modèles :..... | 168 |
| B. Résultats des simulations :..... | 171 |
| C. Analyse des résultats : | 173 |
| D. Synthèse des résultats : | 175 |
| 4.3.4 Vérification du comportement parasismique d'une typologie spécifique de l'architecture 1830-1930 à Alger..... | 176 |
| A. Choix de l'immeuble îlot à galerie | 176 |
| B. Descriptif et caractéristiques des modèles à simuler..... | 180 |
| C. Résultat des simulations : | 185 |
| D. Analyse des résultats : | 191 |
| 4.4 Conclusion Chapitre III | 193 |
| 5. Conclusion générale..... | 198 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 207 |
| 1. Architecture parasismique : | 208 |

| | |
|---|------------|
| 2. Architecture de la période coloniale :..... | 225 |
| Annexe..... | 229 |
| Annexe 1 : Fiche d'évaluation de la vulnérabilité du bâti ancien établi par le CTC..... | 230 |
| Annexe 2 : Fiche d'enquête..... | 232 |

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

« Les séismes ne lisent pas les normes. »

Professeur Paulay

1.1 Introduction

1.1.1 Alger une zone à risque

La plus grande partie de la population algérienne se concentre principalement dans les villes et plus particulièrement dans la zone nord du pays, une zone qui malheureusement est sujette à d'importants risques et catastrophes de différentes natures.

Au vu de ces spécificités naturelles mais aussi de la présence d'équipements importants, la ville d'Alger est directement concernée par la quasi-totalité des risques identifiés par la loi 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes, à savoir [Loi, 2004] :

- Les séismes et les risques géologiques ;
- Les inondations ;
- Les risques climatiques ;
- Les feux de forêts ;
- Les risques industriels et énergétiques ;
- Les risques radiologiques et nucléaires ;
- Les risques portant sur la santé humaine ;
- Les risques portant sur la santé animale et végétale ;
- Les pollutions atmosphériques, telluriques, marines ou hydriques ;
- Les catastrophes dues à des regroupements humains importants.

Mais de tous ces risques, le séisme constitue à notre sens le facteur le plus prépondérant dans l'identification du niveau de fragilité de la ville d'Alger. Il constitue non seulement un risque en lui-même, mais surtout lors de son avènement il est capable de déclencher par réaction en chaîne la quasi-totalité des autres facteurs de risque.

Un risque qui est d'autant plus important en Algérie compte tenu du vieillissement du parc immobilier qui est constitué pour la majorité du vieux bâti, conduisant de ce fait les autorités à l'obligation de renforcer et de réhabiliter ce dernier. Une obligation qui selon Charles Baloche directeur technique du CSTB et de

Jalil Wolfgang président d'honneur de l'AFPS, constitue le défi du génie parasismique de ce siècle [Amir-Mazaheri D., 2010].

Une urgence qui se justifie encore plus pour une ville comme Alger car elle regroupe les quatre conditions qui en générale provoquent les grandes catastrophes, à savoir [Lazzali F., 2003] :

- Un risque important d'avoir un séisme de grande magnitude ;
- Une distance assez faible par rapport à la faille ce qui peut provoquer des secousses d'une intensité destructrice ;
- Un bâti existant de faible capacité résistante et donc vulnérable ;
- Une grande densité urbaine en bâti et en population.

1.1.2 Alger un patrimoine en déperdition

Le patrimoine architectural et urbain hérités de la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle, représente une part significative voire essentielle, du paysage construit des villes actuels [Minnaert J-B., 2005]. Il constitue une partie non négligeable de la mémoire urbaine collective. Il participe à la définition du paysage urbain de la ville d'Alger et de sa dynamique urbaine (Fig.1).



Fig. 1 : Alger (crédit photo Mezoued A.).

Malheureusement, ce patrimoine se trouve aujourd'hui dans un état de dégradation avancé qui risque de mener à sa disparition : « *Les faits montrent une dégradation inexorable de l'héritage urbain et architectural : manque d'entretien, le neuf mord sur l'ancien, les tissus médiévaux et les centres des petites villes se dégradent.* » [Guerroudj T., 2000] (Fig.2).



Fig. 2 : Dégradation du bâti (crédit photo : Guerba M. & Tedjini Bailiche W., Abrous N., Benmenni F.).

La sauvegarde de ce patrimoine est fondamentale pour la survie de la ville d'Alger et de la préservation du cadre de vie de ses citoyens. Effectivement, ce tissu ainsi que celui de la Casbah d'Alger, concentrent en leur sein les derniers traits du caractère authentique qui rattache Alger à son identité.

Ainsi la réhabilitation du patrimoine algérois 1830-1930 constitue un enjeu important pour les autorités locales [Abdou M. K., 2012].

A ce titre, un plan d'action appelé le plan Blanc¹ d'Alger a été mis en place pour la prise en charge du patrimoine architectural algérois qui selon le discours officiel des autorités ne se limite pas simplement aux opérations de ravalement de façades habituels : « *Nous disposons aujourd'hui d'une stratégie qui vise à s'attaquer à des espaces restreints pour enclencher un processus de contamination et de réhabilitation de l'ensemble du centre historique. Nous avons identifié les premières opérations à lancer. 7 grandes avenues parallèles à la mer (Zighoud Youcef, Che Guevara, Didouche Mourad, Larbi Ben M'hidi, Malika Gaid, Krim Belkacem, Hassiba Ben Bouali) et 7 promenades qui vont des hauteurs de la ville pour déboucher sur la mer ;* » [Abdou M. K., 2012, P20].

Mais afin que cette stratégie puisse se donner le maximum de chance de répondre aux objectifs qu'elle s'est fixée, elle doit, entre autres, tenir compte correctement des différents risques et dangers qui guettent ce patrimoine. Des risques qui peuvent se situer aussi bien en amont qu'en aval de toute opération de réhabilitation.

La sauvegarde de ce patrimoine doit aussi bien identifier l'ensemble des risques auxquels il est soumis, mais également veiller à ce que tout remède ne puisse non le détériorer, mais aussi ne le conduise à la perte de ce qui fait son authenticité.

1.1.3 Alger et le risque sismique

Le patrimoine architectural algérois 1830-1930 est aujourd'hui dans une situation de dégradation qui, selon les spécialistes, semble plus dû à la mauvaise qualité de son entretien qu'à l'absence d'un potentiel sismo-résistant.

¹ Dans le cadre de sa stratégie de restructuration du grand Alger, la wilaya d'Alger a mis en place une stratégie d'action selon différents enjeux. Chacun de ces enjeux est pris en charge par un plan différent. En ce qui concerne la revalorisation des tissus historiques de la ville, ces derniers sont pris en charge par le plan blanc qui concerne au moins 14 communes de la wilaya d'Alger [Abdou M. K., 2012].

Une dégradation qui, selon nous, est accentuée du fait des différentes démolitions ordonnées à cause de la vétusté et du non-conformité de ces édifices - datant de plus d'un siècle- avec la réglementation parasismique algérienne actuelle et du risque d'effondrement que représente ces bâtisses.

Des destructions qui font apparaître dans le tissu des dents creuses, qui vont conduire à la dégradation des bâtisses environnantes et qui à leur tour seront déclarées comme étant insalubres. Un effet boule de neige qui va conduire à la destruction progressive et certaine de tout le patrimoine architectural algérois. Une destruction qui à terme peut, avoir une incidence directe sur le climat social par l'altération du cadre de vie [Stephant J-P., 2007].

Il est ainsi sous-entendu que la non-vérification des justifications de sécurité de la réglementation parasismique algérienne est un facteur d'instabilité et d'absence de bonne tenue de ces édifices face au tremblement de terre !

Cette attitude se base à priori sur la conviction qu'il n'y a pas d'alternative à la sauvegarde de ce patrimoine, mis à part le recours aux matériaux et techniques modernes qui sont forts coûteux. Des préjugés qui, finalement ont conduit à façonner nos réponses et nos attitudes concernant les procédés à mettre en place pour la réduction de la vulnérabilité² des constructions face au séisme [Langenbach R., 1989]

Or, malgré le fait que ce patrimoine ait été réalisé il y a plus d'un siècle, sans avoir recours à une réglementation parasismique, qu'il ait subi plusieurs séismes et compte-tenu du fait qu'il ait été mal entretenu, nous observons avec réjouissance que ce patrimoine soit encore dans un état d'exploitation acceptable.

A ce titre, nous avons eu, ces dernières années, l'occasion d'observer que des bâtiments historiques, se sont mieux comportés lors de séismes majeurs³, comparativement aux constructions modernes en béton-armé.

A titre d'exemple, lors du séisme meurtrier de Haïti⁴, les constructions en maçonnerie du 19^{ème} siècle ont certes subis différents dommages, mais dans l'ensemble elles ne se sont pas effondrées (Fig.3) : *"We then began to survey the*

² La vulnérabilité est la tendance à l'endommagement. Elle est liée aux faiblesses des infrastructures produites par l'homme aussi bien bâtiments, réseaux routiers ou autres face à l'action sismique. De ce fait la vulnérabilité est dépendante de structures sur lesquelles nous pouvons intervenir.

³ Selon le RPA un séisme majeur est un séisme rare qui ne doit pas conduire à un effondrement partiel ou total [CGS, 2004, P3].

⁴ Le 12 janvier 2010, Haïti fût frappée par un terrible séisme de 7,3 sur l'échelle de Richter faisant plus de 220.000 morts. Suite à ce séisme, l'Hôtel Oloffson un bâtiment de 3 étages en maçonnerie non chaîné de 120 ans âge, n'a subi aucun dommage. [Langenbach R., 2013].

historic late nineteenth century houses, almost all of which had suffered through a half-century of neglect, some of which were constructed of rubble stone masonry laid in earth mortar, confined only by piers of fired brick in deteriorated lime mortar. Almost all of these houses - even those of rubble stone - were still standing. Some were heavily damaged, but almost all were still standing after an earthquake which was by then reported to have killed as many as a quarter-of-a-million people!" [Langenbach R., 2013, P11].



Fig. 3 : Exemple de constructions en maçonnerie qui ne se sont pas effondrées suite au séisme destructeur de Haïti en 2010 [Langenbach R., 2010B].

Après tout, c'est bien là l'exigence de tout règlement parasismique en ce qui concerne les nouvelles constructions appartenant aux ouvrages courants ou d'importance moyennes ! a savoir : qu'elles peuvent subir des dommages irréversibles à la seule condition de ne pas s'effondrer ! Pourquoi alors, devrions-nous en exiger plus quand il s'agit du vieux bâti !!!

En ce qui nous concerne, nous estimons qu'il existe une méconnaissance du potentiel sismo-résistant de ce patrimoine, et non pas qu'il soit dépourvu de tout potentiel sismo-résistant : « *Pourtant, malgré ces faiblesses apparentes, il ne faut pas ignorer que ces édifices anciens, au moment où ils ont été édifiés et conçus, sont l'objet de savoir-faire sans doute empiriques qui leur ont permis de résister jusqu'à présent. Cette constatation est primordiale dans les centres anciens, car elle montre que la solution « béton armé » n'est pas la bonne.* » [Marichel R., 2002].

Partant de là, l'objet de notre thèse est de tenter, à travers la connaissance du patrimoine architecturale algérois de la période 1830-1930, de mettre en avant son potentiel sismo-résistant.

Il est important de préciser que notre recherche aborde cette question du point de vue de l'architecte et non celui de l'ingénieur, et ce dans un objectif de développer une meilleure connaissance de ce patrimoine et de son comportement lors d'un

séisme. Cette approche permettra, de proposer des procédures et modalités plus adéquates pour la préservation de ce patrimoine.

Car bien qu'étant une question qui concerne le domaine de l'engineering, le comportement sismique d'un édifice est fortement dépendant du travail de l'architecte : « *Bien qu'il s'agisse de problèmes liés à la résistance mécanique, les caractéristiques mécaniques de la construction (sa forme et ses proportions), de ses structures, et des assemblages constituent des paramètres essentiels. Ces paramètres influent aussi bien sur l'intensité des charges sismiques que sur la capacité de l'ouvrage à y résister. Le rôle que peut jouer le concepteur dans ce domaine et donc déterminant.* » [Zacek M., 1997, P85].

Etant architecte, nous n'avons nullement l'intention de nous substituer ni de minimiser l'importance de l'ingénieur ou d'un autre acteur participant à l'acte de bâtir. Ce qui nous intéresse, c'est la mise en évidence de l'implication de la conception architecturale et des choix relevant de la compétence de l'architecte dans le comportement d'un édifice lors d'un séisme.

Ceci, pour un double objectif de conservation de ce patrimoine et la préservation des vies humaines : « *Parmi les objectifs majeurs de rénovation on compte ceux de remettre à neuf le bâtiment, de lui donner une nouvelle existence, une nouvelle forme, de conserver et sauvegarder le patrimoine du pays, de réconcilier l'architecture existante et l'architecture qui donnera le nouveau look du bâtiment.* » [Mezghani S., 2002].

Un double objectif qui nécessite au préalable la connaissance du bâti et l'analyse de son comportement en fonction des composants qui le caractérisent. Nous offrons ainsi la possibilité lors de nos opérations d'intervention de réduire les risques d'effondrement et de pertes de vies humaines, mais également la réduction de la perte de ce qui fait la richesse et la spécificité de cette architecture.

Ainsi, nous espérons, qu'à travers ce travail de recherche, arriver à influencer pour la mise en place de nouvelles stratégies de préservation et de sauvegarde de ce patrimoine architectural algérien soumis au risque sismique⁵. Des stratégies qui ne se réduiront pas seulement à des actions de renforcement constructif, mais incluraient les caractéristiques architecturales et urbaines de ce patrimoine non pas seulement

⁵ Le risque sismique est la convulsion entre l'aléa sismique et la vulnérabilité de l'ouvrage : Risque sismique = Aléa sismique x Vulnérabilité de l'ouvrage [Amir-Mazaheri D., 2010] voir aussi [Benson C, 2007].

comme valeur esthétique, mais aussi comme facteur de sauvegarde et de bonne tenue aux efforts sismiques.

Ainsi, le potentiel sismo-résistant sera considéré comme un facteur de patrimonialisation de cet héritage, car révélateur d'un savoir-faire incluant toutes les dimensions de l'architecture allant de l'échelle de la ville à celui du détail en passant par celle de l'édifice.

1.2 Problématique

A l'ère de la mondialisation et de la globalisation, la ville se trouve dans l'obligation de répondre à un ensemble fort important de défis qui se rapportent principalement à la question de la qualité du cadre de vie et de production d'un environnement adapté aux exigences et besoins de ses citoyens et des différents enjeux auxquels renvoient ces défis.

Le tissu de la période 1830-1930 d'Alger constitue un des meilleurs exemples algériens en termes de qualité de vie urbaine. Ce dernier est constitué d'un ensemble important de lieux de grandes qualités architecturales et urbaines.

Aujourd'hui, ce patrimoine architectural est considéré comme étant vulnérable au vu du risque sismique qui pèse sur lui. Mais bien que très souvent incriminés, les séismes sont loin de constituer la raison principale de cette détérioration.

Effectivement, malgré l'importance de l'activité sismique⁶, nous constatons que les édifices de la période d'étude n'ont pas, lors des différents séismes, plus souffert que les autres édifices construits plus récemment. D'ailleurs, selon l'avis des différents experts l'état de dégradation avancé des immeubles algérois 1830-1930 –tout comme ceux de la Casbah d'Alger- sont dû, au mauvais voire carrément, à l'absence d'entretien de ces édifices qu'à l'action sismique⁷.

⁶ Il est important de signaler que le site algérois n'a pas été touché par un séisme majeur depuis quasiment trois siècles, mais il n'empêche qu'Alger et ses environs sont régulièrement touchés directement ou indirectement par des séismes de moyenne et de forte magnitude telle que le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 avec une magnitude de 6,8 sur l'échelle Richter, ou encore plus récemment le séisme du 1 août 2014 à moins de 20 km des côtes algéroises avec une magnitude de 5,6 sur l'échelle Richter.

⁷ Comme nous le rappelle Davidovici de nombreuses constructions anciennes ont été édifiées dans des zones hautement sismiques bien avant l'avènement du génie parasismique. Pourtant ces édifices sont résistants aux séismes vu qu'ils ont survécu à de nombreux séismes dévastateurs [Davidovici D., 1999].

Prenons à titre d'exemple le séisme d'El-Asnam du 10 octobre 1980⁸ (actuellement Chlef), une ville qui avait déjà été gravement touché par un important séisme en 1954⁹ (Orléansville). L'état de dégradation des édifices suite au séisme de 1980 en fonction de leur âge révèle que 63,72% des édifices construits avant 1954 dans la ville d'El-Asnam ont été classés par les experts entre vert et orange¹⁰, et 74,33% des édifices construits entre 1973 et 1980 ont été classés dans les mêmes catégories [Chaker A.A, 1981] (Tab.1).

| Période de construction | Vert % | Orange % | Rouge % |
|-------------------------|--------|----------|---------|
| Avant 1954 | 17,31 | 46,69 | 36,28 |
| 1954-1962 | 29,89 | 48,25 | 20,60 |
| 1962-1973 | 45,75 | 38,16 | 15,18 |
| 1973-1980 | 44,70 | 38,03 | 15,67 |

Tab. 1 : Importance des dommages subis par les constructions lors du séisme de Chlef en 1980 en fonction de leur période de construction [Chaker A.A, 1981].

Ainsi, des édifices qui ont été réalisés avant 1954, construits sans règlement parasismique, qui sont mal entretenus et qui ont subi deux séismes destructeurs –Trois si l'on rajoute la forte réplique du séisme de 1980- sont selon les experts classés rouge à 36,28% alors que ceux qui ont moins de 10 ans d'âge sont classés rouge à 15,67% !

Contrairement aux rapports d'experts pour le séisme d'El-Asman qui ont déclarés « qu'il n'y a que 63,72% » des édifices qui ont résisté, en ce qui nous concerne, nous nous posons la question inverse, à savoir : Comment se fait-il que justement « **seulement 36,28%** » des édifices réalisés au début du siècle et ayant souffert de deux tremblements de terre majeurs sont classés rouges ?

Certes, il est reconnu que la maçonnerie en elle-même ne possède pas de bonnes performances en ce qui concerne la résistance au séisme [Berstein D., 1982], mais est-ce que pour autant les constructions en maçonnerie seraient dépourvues de

⁸ Le 10 octobre 1980 la ville d'El-Asnam (Actuelle Chlef), a été touché par un séisme d'une magnitude de 7,3 sur l'échelle Richter. Ce séisme à provoqué la mort de 2633 personnes et la destruction de 70% des constructions. Une heure après le choc principal une forte réplique de 6,5 sur l'échelle Richter a été enregistrée.

⁹ Le 9 septembre 1954, la ville d'Orléans (actuelle Chlef) a été frappée par un séisme d'une magnitude de 6,7 sur l'échelle Richter. Ce dernier à provoqué la mort de 1243 personnes et la destruction de 20.000 habitations

¹⁰ La couleur verte correspond à des bâtiments n'ayant subis aucun dommage voir des dommages légers. La couleur orange correspond à des bâtiments ayant subis des dommages intermédiaires nécessitant des travaux plus ou moins importants. Enfin la couleur rouge correspond à des bâtiments en ruine à démolir.

tout potentiel sismo-résistant ? Est-il possible à ce niveau de considérer plutôt la sagesse préconisée par Davidovici en considérant qu' : « *En matière de génie parasismique pour améliorer nos connaissances, on fait parfois des expérimentations avec des modèles réduits sur des tables vibrantes. Mais on peut aussi considérer un "vrai séisme" comme une expérience à l'échelle un qui touche (malheureusement) des centaines voire des milliers de bâtiments.* » [Davidovici D., 2014].

Pour nous, il est important de démarrer du vrai test grandeur nature qui met véritablement les bâtiments à l'épreuve, et non pas de spéculations abstraites.



Fig. 4 : Séisme de 2009 à l'Aquila en Italie, les bâtiments de même typologie constructive et architecturale se trouvant au même endroit ont réagi de manière différente face à la secousse¹¹.

C'est pour cette raison que notre démarche s'inscrit dans la droite ligne de celle de Langenbach, qui cherche, suite à chaque séisme, non pas à condamner une typologie de bâti ou un dispositif constructif, mais d'essayer d'expliquer, pour quelle raison lors du même séisme, dans la même région sur le même site, des édifices ont été détruits, alors que d'autres n'ont quasiment subis aucun dommage (Fig.4).

Ainsi, à propos de la bonne tenue des constructions traditionnelles lors du séisme de Kocaeli en Turquie en 1999, Langenbach rapporte que : *"In fact, one engineer from a government funded national research center did say to me "oh yes, I*

¹¹ Source de l'image : http://www.boston.com/bigpicture/2009/04/the_laquila_earthquake.html consulté le 05 mars 2016.

saw some traditional timber and brick houses and they didn't seem to be damaged." Photographs them? "No, I did not because they did not seem to be significant." It was at that point that I knew I would have to come to Turkey myself to see what could be found – not to look at ruins, but to look for what had survived." [Langenbach R., 2000, P12].

Il est évident que la réponse n'est pas liée à la réglementation parasismique. Une réglementation qui ne considère fondamentalement que les recommandations et orientations liées au système constructif [Arbajian H., 2000]. Des recommandations qui pour une bonne partie cachent subtilement des orientations et décisions d'ordre architecturales¹².

C'est de là que nous avons supposé que le bon comportement relatif de ces édifices, était lié à des traits de caractère non liés au système constructif dont, entre autres, les caractéristiques architecturales et spatiales, comme l'affirme Leztuzzi : *« Pour fixer les idées, on peut affirmer qu'une bonne conception garantit déjà au moins les ¾ de la sécurité sismique d'un ouvrage. »* [Leztuzzi, 2008B, P93].

Ce sentiment s'appuie sur le fait que des observations post-sismiques ont démontrées que certaines défaillances du bâtiment sont dues à des erreurs de conception. Erreurs qui malheureusement ne peuvent être mises en évidence par des modélisations et donc ne peuvent être prises en charge par le calcul engineering. Des erreurs qui auraient pu être évitées s'il y avait du bon sens dans la conception architecturale et une connaissance des incidences de ces choix architecturaux dans le comportement du bâtiment lors d'un séisme [Kebaili B., 2009].

Ainsi, au vu de la complexité du phénomène sismique et de la pluralité des disciplines qui y interviennent, nous nous inscrivons dans une approche transdisciplinaire qui intègre l'ensemble des intervenants de l'acte de bâtir et de la préservation du patrimoine architectural : *« Ces efforts sont d'autant plus vains, si au préalable, on ne veille pas à la qualité des études aux plans de la conception et du calcul ainsi que de la reconnaissance du sol et du site d'implantation des ouvrages, à la qualité des matériaux et produits de construction, à la qualité des travaux d'exécution, à la qualité du suivi des travaux de réalisation et du contrôle technique de construction, conformément aux exigences réglementaires requises en particulier et aux règles de l'art en général. »* [CGS, 2004, Pv]

¹² Voir titre 2.5 « Architecture et règlement parasismique algérien » P50-61.

Il est grand temps à ce titre que l'Algérie profite pleinement de ses propres expériences suite aux différents cataclysmes qu'elle a connus, mais aussi qu'elle profite des expériences étrangères dans des contextes similaires au notre, afin de revoir sa stratégie d'intervention et de réduction de la vulnérabilité du vieux bâti soumis au risque sismique et de développer une bonne « résilience »¹³ face au risque sismique.

A titre d'exemple, en Italie, depuis déjà plus de deux décennies l'intervention pour la réduction de la vulnérabilité des édifices contre le séisme n'est plus réduite aux ingénieurs. Elle s'étend aussi à d'autres domaines tels que l'architecture et le comportement des utilisateurs aussi bien dans l'occupation que dans l'entretien des lieux. [Ferrigni F., 1990]

Ceci permettra d'éviter des erreurs telles que le recours à des matériaux qui n'interagissent pas avec les matériaux originaux lors des séismes. Des situations qui peuvent non seulement conduire à des dommages forts importants lors des séismes, mais aussi à la destruction de la valeur architecturale de l'édifice [Podesta S, 2002].

Il est important de signaler à ce niveau que notre thèse ne cherche pas à estimer ou à évaluer la vulnérabilité au séisme des édifices étudiés. Notre objectif est de chercher à identifier l'impact de certains traits de caractères de notre corpus d'étude dans son comportement lors de sollicitations sismiques.

Un impact qui pourra servir par la suite dans des études d'évaluation de la vulnérabilité de ce patrimoine, mais aussi à la mise en place de nouvelles stratégies de réhabilitation.

Effectivement, la mise en conformité du vieux bâti avec le règlement parasismique actuel est impossible, aussi bien du point de vue économique que logistique. Aussi la philosophie en terme réhabilitation du vieux bâti en ce qui concerne la question parasismique, est de chercher à voir jusqu'à quel niveau on peut réduire les exigences de sécurité sans pour autant remettre en cause ni la vie des personnes, ni les enjeux (économiques, environnementaux...etc.).

Car autant la marge de manœuvre, pour pallier à toute erreur de conception ou de calcul est importante en ce qui concerne le nouveau bâti, autant cette marge est bien plus réduite, quand il s'agit du vieux bâti. Il s'agit à ce niveau d'aller chercher à

¹³ La résilience consiste en la capacité d'une société exposée à différents risques d'opposer une bonne résistance afin d'assurer sa pérennité, grâce à sa capacité de tirer des leçons à partir des catastrophes passées [Nation-unies, 2005]

« gratter au maximum toutes les réserves que le bâtiment peut avoir pour résister justement à ces actions horizontales. » [Lestuzzi P. 2013A].

Ainsi, notre problématique consiste à : **rechercher en quoi les caractéristiques architecturales et urbaines du tissu 1830-1930 de la ville d'Alger influent sur le comportement et l'amélioration des performances de ces édifices lors d'un séisme. Il est ainsi question d'identifier le potentiel sismo-résistant du corpus d'étude selon le point de vue de l'architecte dans un objectif de participation à la préservation et la sauvegarde de ce patrimoine.**

De ce fait, ce travail de thèse cherchera à améliorer la connaissance sur le comportement lors d'un séisme du patrimoine architecturale algérois 1830-1930 afin non seulement de prévenir les endommagements possibles, mais aussi de proposer éventuellement des mesures pour la réduction de la vulnérabilité de ce patrimoine. Des mesures qui tiendront compte de l'impossibilité d'imposer les mêmes niveaux de sécurité entre nouvelles et anciennes constructions : « *La question centrale dans ce contexte, est de savoir dans quelle mesure un bâtiment qui ne répond pas aux dernières prescriptions sismiques est problématique et, accessoirement, jusqu'où peut aller son déficit par rapport à ces prescriptions, avant que la situation ne soit plus tolérable.* » [Lestuzzi P. 2013B, P3]

Dès lors, notre étude se fixera comme objectif principale l'identification des caractéristiques et des dispositifs architecturaux sismo-résistants du patrimoine architectural algérois 1830-1930.

Ceci, dans l'espoir de mise en place aussi bien de nouvelles stratégies de réhabilitation et de sauvegarde de ce patrimoine soumis au risque sismique, que de nouvelles approches pédagogiques pour l'enseignement de la prise en charge de la question parasismique dans le projet architectural.

Ainsi, notre recherche tentera d'améliorer les études de vulnérabilité du vieux bâti d'Alger 1830-1930 à travers l'identification de l'impact de certains traits de caractère inhérents à ce patrimoine dans son comportement face au séisme.

Cette identification des dispositifs sismo-résistant du patrimoine nous permettra non seulement de le préserver à moindre coût, mais surtout de conserver l'essence de ce qu'il est et de ne plus le réduire seulement à la dimension stylistique et l'esthétique : *"When people understand historic structures not only as archaic and obsolete building systems, but also as repositories of generations of thought and knowledge of how to live well on local resources, societies can begin to rediscover the*

value of these traditions once again by seeing them in a new light – one that, at its most fundamental level, can save lives.” [Langenbach R., 2008B, 2100].

1.3 Hypothèses

Suite aux différentes lectures et surtout investigations et visites sur site, nous sommes arrivés à la conclusion que le domaine de l’engineering ne peut à lui seul, ni assurer la résistance des édifices face au séisme, ni expliquer la bonne tenue de certains édifices suite à un séisme. Il fallait pour cela chercher dans d’autres environnements inhérents à la construction tels que la conception, la réalisation, l’entretien...etc.

En ce qui nous concerne, nous avons cherché du point de vue architectural les raisons qui pourraient prédisposer ce patrimoine à un bon comportement lors d’un séisme.

Ainsi, nous avons émis l’hypothèse qu’un certains nombre de traits de caractères architecturaux et urbains du patrimoine architecturale algérois 1830-1930 ont prédisposés ce dernier afin d’avoir une bonne tenue aux efforts sismiques. Parmi ces traits de caractères ont peut citer :

1. Les canons de l’architecture néoclassique et ses règles stylistiques ;
2. Les règles régissant l’organisation de la façade et la rue de l’époque (alignement, gabarit, retrait...etc.) ;
3. Les principes de l’architecture urbaine (tracé urbain) de cette période.

1.4 Méthodologie

En ce qui concerne la question de la construction parasismique, il est considéré en général que la bonne tenue des bâtiments aux efforts sismiques est principalement liée au calcul et à la conformité de la structure au règlement parasismique, reléguant de ce fait l’architecture au second plan au profit de l’engineering.

En réalité, ceci doit s’inscrire dans une démarche globale et dont le calcul de la structure ne constitue qu’un des facteurs fondamentaux de cette démarche : « *Il serait vain de prétendre prémunir une construction contre les effets du séisme, par la seule vertu des calculs dits antisismiques.* » (Règles PS69 cité in [Zacek M., 1996, P15].

Autrement dit, la prise en compte de la dimension parasismique dans la construction, ne peut pas se réduire à l'application des différentes prescriptions réglementaires. Il s'agit plutôt de s'inscrire dans une approche globale qui tient compte de tous les facteurs ayant des implications sur le comportement du bâtiment : « *L'étude parasismique s'intéressera donc aussi bien au site, aux fondations, à la forme architecturale, à la structure porteuse, qu'aux éléments non structuraux, aux façades et aux équipements.* ». [Davidovici V., 1999, P18]

Ainsi, outre le calcul structurel, d'autres facteurs rentrent en ligne de compte pour assurer un bon comportement des édifices lors des séismes :

- **Usage et entretien** : Le comportement des usagers et l'entretien du lieu constituent deux facteurs importants afin d'assurer une bonne tenue d'un édifice lors d'un séisme : *"Poor maintenance and poor materials in the cores of walls are indications of potentially poor performance in an earthquake."* [Decanini L., 2010, P219].

L'absence de prise en compte de ces facteurs peut engendrer des dysfonctionnements assez graves : « *Le meilleur moyen de conserver un monument n'est pas de procéder hâtivement à des restaurations à mesure qu'elles apparaissent nécessaires, mais de veiller en permanence à l'entretenir soigneusement afin de pouvoir réparer les parties endommagées et usées avant que les dégâts ne deviennent sérieux.* » [Sanpaolesi P., 1973, P117].

Les transformations au sein d'une construction risquent de changer la rigidité de certaines parties de l'édifice, ce qui peut engendrer un déplacement du centre de rigidité provoquant des torsions importantes, ce qui peut conduire à l'effondrement du bâtiment.

- **La conception architecturale** : Différents spécialistes et analyses post-sismiques, ont révélé l'impact direct et destructeur que peut avoir une mauvaise conception architecturale. Ils insistent sur le fait que le calcul d'engineering et la conception architecturale jouent un rôle fondamental pour éviter l'effondrement à la condition de considérer ces deux facteurs sur le même pied d'égalité [AFPS, 2011].

A ce titre, Lestuzzi et Badoux nous rappellent que les sollicitations sismiques profitent de la moindre faille de conception pour fragiliser l'édifice. D'après eux, les erreurs de conception ne peuvent être rattrapées par des calculs aussi sophistiqués qu'ils puissent être. En bref,

mieux vaut une structure bien conçue et mal calculée qu'une structure bien calculée mais mal conçue [Lestuzzi P., 2008B].

- **Réalisation et suivi** : Il est arrivé assez souvent que des bâtisses dont les structures n'ont pas été calculées aux efforts sismiques, se soient bien comportées lors d'un séisme grâce à une réalisation qui respecte les différentes règles élémentaires de l'art de la construction¹⁴.

Inversement, il faut noter que parmi les causes les plus importantes qui accentuent l'effet destructeur d'un séisme, on peut citer le manque de culture sismique constructive [Foufa A., 2001].

C'est ce qui fait dire à certains spécialistes, qu'il serait dangereux voire même irresponsable de ne pas assurer le suivi de tout projet réalisé en zone à forte sismicité par des spécialistes du domaine [Kebaili. B, 2009].

En résumé, on peut considérer que la bonne tenue d'un édifice par rapport au séisme repose sur :

1. La conception architecturale ;
2. Le calcul parasismique ;
3. La qualité d'exécution et de réalisation du bâtiment ;
4. L'entretien du bâtiment.

Ces différents facteurs doivent être traités avec une attention égale, car dans le cadre du parasismique ils constituent une chaîne appartenant à une démarche globale dont il ne faut en aucun cas briser le moindre maillon. La négligence d'un des maillons peut entraîner la destruction de l'ouvrage et ce quel que soit la qualité de prise en charge des autres facteurs [Martin P., 2006].

Ainsi, l'objectif de notre travail de thèse –qui nous l'espérons constituera un maillon de la chaîne de la sauvegarde et de la réhabilitation du vieux bâti- est la recherche de la mise en évidence de dispositifs architecturaux permettant de participer à la bonne tenue sismique des bâtiments du patrimoine architectural algérois 1830-1930.

¹⁴ Suite au séisme de Chlef en 1954, il a été constaté qu'une construction réalisait on respectant les règles de l'art avait de forte chance de bien se comporter lors d'un séisme. [Collectif, 1955, P04]

Vu la multiplicité des domaines auxquels fait appel l'architecture¹⁵, et les différents domaines qui interviennent en génie parasismique, parler de l'influence des choix architecturaux sur le bon comportement parasismique du bâti revient à parler d'échelles variées qui vont de l'aménagement du territoire au détail d'exécution.

Effectivement, la prévention contre le risque sismique commence déjà par le choix de l'implantation territoriale en fonction de la présence de l'aléa sismique avec la présence entre autres de failles sismiques capable de produire des séismes majeurs.

Dans une deuxième échelle dite « urbaine » il faudra s'implanter sur des terrains qui ne risquent pas d'accentuer la conséquence du séisme. Une accentuation aussi bien directe par l'amplification des effets du séisme à cause de la topographie ou la nature du sol, qu'indirectement à cause de la grande densité humaine et du risque d'éboulement ou de tsunami [IGE, 2004].

C'est à l'échelle urbaine aussi que vont être déterminés les facteurs permettant la gestion de la crise post-sismique par la programmation adéquate des espaces publics et des équipements stratégiques tel que les hôpitaux¹⁶, les postes de décisions, les casernes d'interventions des pompiers...etc. [Quatre M., 2000].

A l'échelle dite « architecturale », il faudra faire attention en premier lieu à l'impact de l'interaction sol/structure ou tout simplement sol/bâtiment. Il faut veiller à ce que la période propre du bâtiment soit la plus éloignée que possible de celle du site. Ceci est possible par l'intervention sur les facteurs qui déterminent le degré de rigidité du bâti tel que le poids, la forme, la proportion, le nombre de travées...etc. [Zacek M., 1996].

Il est important de veiller au niveau de l'échelle architecturale à ce que l'aspect global du bâtiment (forme, proportions...), sa fonction (sa nature et sa distribution), son traitement (Enveloppe et ouvertures), ainsi que les choix constructifs (éléments de façades, système porteur...) ne participent pas à fragiliser le bâtiment face au séisme, mais bien au contraire à améliorer son comportement face à ce risque.

Enfin à l'échelle dite de détails, il faudra veiller à la bonne exécution des recommandations techniques et assurer les bonnes liaisons entre les éléments

¹⁵ Voir le travail de Ben-Saci : [Ben-Saci A., 2000].

¹⁶ A titre d'exemple on peut citer l'hôpital de Kobe au Japon, qui lors du séisme important de 1995, a parfaitement résister au séisme, mais malheureusement suite à l'effondrement du pont qui le relié au reste du territoire à vu son fonctionnement fortement perturbé. [Davis I., 2001]

structuraux tels que les murs entre eux ou la transmission des efforts entre planchers et les éléments verticaux et leurs transmissions aux fondations.

Concernant ce travail de thèse, nous avons focalisé sur l'échelle dite architecturale, en ayant procédé comme suit :

- Une recherche bibliographique sur des travaux de recherches, des rapports post-sismiques ou de retours d'expériences, et les règlements et normes parasismiques actuelles ;
- Une enquête avec fiche technique relevant les caractéristiques sismo-résistants de 190 bâtiments du patrimoine architectural algérois 1830-1930 ;
- Des modélisations numériques afin de vérifier le comportement dynamique de modèles sous charge sismique.

Afin d'y parvenir, nous avons suivi un cheminement selon trois étapes :

1. Etat des lieux ;
2. Les fondements théoriques ;
3. Identification des traits de caractères architecturaux de l'immeuble algérois 1830-1930 liés au séisme, et simulations numériques de ces traits de caractères.

1.4.1 Etat des lieux

Ceci consiste en une identification de la prise en charge de la question parasismique dans la construction en générale et plus particulièrement en Algérie. Dans un premier temps nous procéderons à une présentation des traits de caractères de la sismicité d'Alger et de ses environs avec un rappel historique de la sismicité de la région.

Dans un deuxième temps, nous aborderons à travers quelques exemples internationaux la question de la prise en charge du vieux bâti par rapport au risque sismique afin d'identifier les préjugés et faux procès établis à l'encontre du vieux bâti en général et le vieux bâti en maçonnerie en particulier.

Cette partie a été réalisée à travers le recours à différents travaux de chercheurs tels que Ferrigni F., Agnès Levret, Randolph Langenbach, Amina Foufa...etc.

Suite à cela, un constat de la situation de la prise en compte de la question parasismique a été établi :

- Présentation des nouvelles approches concernant la prise en charge de la question parasismique ;
- Architecture et parasismique en Algérie.

Ceci a été effectué sur la base de documents produits par différents experts et organismes algériens et étrangers spécialisés dans le domaine tels que le centre national de recherche appliquée en génie parasismique (CGS), le Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique (CRAAG), l'organisme du contrôle technique de la construction (CTC), l'agence française du génie parasismique (AFPS), federal emergency management agency (FEMA)...etc.

Parmi les différents documents consultés on peut citer :

1. Les différents règlements parasismiques algériens ;
2. Les rapports post-sismiques algériens et étrangers ;
3. Les fiches d'évaluation des dommages post-sismiques et de vulnérabilité du bâti ancien algériens et étrangers ;
4. Différentes productions scientifiques concernant la question du séisme en Algérie et à l'étranger.

Enfin, dans un dernier temps, nous avons présenté un état des lieux du risque sismique et de la vulnérabilité du vieux bâti d'Alger, ainsi que des recherches concernant cette question. Cette partie a été réalisée en se basant sur les travaux du rapport établi conjointement par le CGS et le bureau d'études japonais JICA, sur le diagnostic technique et socio-économique de l'hyper-centre urbain de la wilaya d'Alger réalisé par le CTC centre en collaboration avec le centre national d'études et d'analyses pour la population et de développement (CENEAP), ainsi que différents actes de colloques et de séminaires qui ont traités de cette question.

1.4.2 Les fondements théoriques

Cette étape a été effectuée en trois phases :

1. Premièrement, un rappel des caractéristiques architecturales reconnues comme permettant une bonne tenue à l'effort sismique en nous basant sur les travaux d'experts reconnus tels que Milan Zacek, Pierino Lestuzzi, Marc Badoux Victor Davidovici, Patricia Balandier, l'association française

du génie parasismique (AFPS)... etc. Deuxièmement, identification des différentes pathologies que risquent de subir les bâtiments en maçonnerie en cas de séisme à partir des travaux de recherches et de rapports d'enquêtes post-sismiques, dont entre autres AFPS, Chaillou A., Combescure D., Davidovici D., Giuffré A., Levret A., Mebarki A., Zerbi S. ...etc.

2. Identification des caractéristiques stylistiques de l'architecture Algéroise 1830-1930, des règles d'urbanisme de l'époque régissant la façade, la rue et l'alignement, ainsi que les caractéristiques des formes urbaines des îlots et parcelles de cette époque. Etant donné le manque de production de travaux de recherche sur les caractéristiques de l'architecture du corpus étudié, nous nous sommes basés certes sur des travaux de recherches de chercheurs algériens tel que Bennai M. (2010), ou le projet de recherche PCI¹⁷, mais aussi sur les textes réglementaires et les travaux de spécialistes reconnus du tissu parisiens de la fin du XIXe et du début du XXe siècle tels que Philippe panerai, Jean Castex, François Loyer, Pierre Pinon ainsi que sur les textes et archives de Louis Bonnier architecte chargé de la rédaction des règlements régissant la rue et la façade de la ville de Paris à la fin du XIXe et début du XXe siècle. Ce choix se justifie par l'histoire architecturale et urbaine croisée entre les deux villes d'Alger et de Paris qui a été démontré à travers les travaux de recherches de différents auteurs¹⁸.
3. Enfin, nous avons réalisé une mise en relation entre d'un côté, les caractéristiques d'une architecture parasismique et les pathologies que risquent de subir les constructions en maçonnerie lors d'un séisme, et de l'autre, les différents traits de caractères de ce patrimoine (stylistiques, réglementation urbaine et propriétés des formes urbaines). Ce croisement des données nous a offert la possibilité de relever théoriquement la présence au sein de notre corpus d'étude des dispositifs aptes soit à assurer un bon comportement parasismique soit à prévenir les pathologies dues au séisme.

¹⁷ Le projet de coopération international (PCI) à consisté en une recherche réalisée en association entre le laboratoire de recherche LVAP de l'EPAU et Universidad Politécnica de Madrid pour le diagnostic et la réhabilitation du quartier historique de Larbi Ben M'hidi à Alger.

¹⁸ Voir les travaux de [Cresti F., 1993A], [Cresti F., 1993B], [Çelik Z., 1997] et [Hakimi Z., 2011].

1.4.3 Caractéristiques architecturales de l'immeuble 1830-1930 à Alger liées au séisme, et simulations numériques

Les conclusions partielles obtenues dans l'étape précédente font l'objet à ce niveau, de vérifications par simulations numériques grâce à un logiciel de calcul des structures et de simulation de l'action sismique.

Afin d'y parvenir, nous avons procédé en deux grandes étapes avec la deuxième qui se divise à son tour en deux sous-étapes :

1. Tout travail sur l'évaluation et la réduction de la vulnérabilité du bâti face au séisme nécessite en premier lieu, la constitution d'une base de données des traits de caractères du bâti par rapport à son potentiel sismo-résistant [Ait-Meziane Y., 2002].

L'objet de cette étape de la recherche est d'identifier les traits de caractères du notre corpus d'études en rapport avec la vulnérabilité face au séisme. Cela a été réalisé suite à une enquête sur terrain sur la base d'une fiche technique de renseignements qui reprend de manière synthétique les résultats des deux premiers chapitres de la thèse.

En premier lieu, il est question de justifier et de présenter la zone d'investigation, puis de présenter la fiche de relevé, et enfin, de présenter les résultats de l'investigation sur site.

2. La deuxième étape consiste en la recherche d'outils pour estimer ce risque [Ait-Meziane Y., 2002]. C'est dans ce but que nous avons décidé d'avoir recours à la simulation numérique afin d'évaluer le potentiel sismo-résistant de notre corpus d'étude, mais surtout d'identifier des composants bien spécifiques de ce patrimoine qui participent à l'atténuation des effets du séisme sur ce dernier.

Afin de finaliser cette étape, nous avons décidé de la diviser en deux temps :

- Etant donné la complexité et la pluralité des effets d'un tremblement de terre, et vu le nombre important des caractéristiques d'un édifice pouvant intervenir lors d'un séisme, nous avons jugé utile de réaliser des simulations basiques pour valider les hypothèses de départ avant de nous engager dans des simulations plus complexes.

Effectivement, au vu du nombre important de caractéristiques à vérifier, et du nombre tout aussi important de critères de sécurité à justifier vis-à-vis du séisme, toute simulation constituerait un travail de longue haleine qui nécessiterait un investissement fort important. Il a été ainsi plus judicieux de prendre un minimum de sécurité avec des simulations basiques qui permettraient aussi de rééquilibrer en cas de besoin la démarche de simulation finale.

- Les premiers résultats de simulations étant probants, il s’agissait dans cette ultime étape de choisir une typologie sur la base du travail d’enquête réalisée in situ, et d’étudier l’impact de différents traits de caractères sur le comportement dynamique sous charge sismique.

Chacun de ces paramètres donnera lieu à un modèle spécifique.

Enfin, en dernier lieu nous présenterons et interpréterons les résultats des simulations.

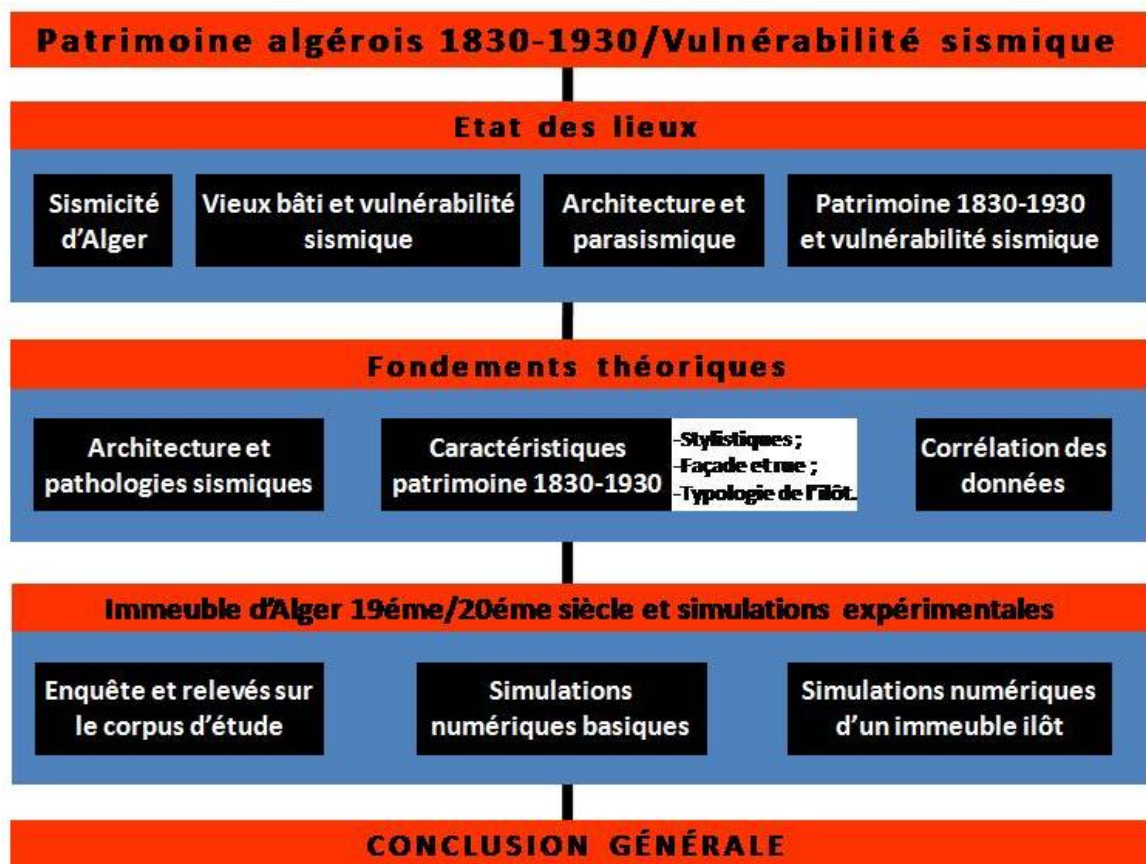


Fig. 5 : Schéma méthodologique de la thèse.

Ainsi notre démarche consiste à identifier différents composants de la typologie architecturale du patrimoine algérois 1830-1930 en rapport avec l'architecture parasismique, et de voir grâce à la simulation numérique paramétrique leur impact sur la performance de ce patrimoine lors d'un séisme. Une performance qui se base sur les principes et les règlements parasismiques actuels (Fig.5).

A noter que l'évaluation de la performance d'une construction existante peut être établie grâce à un facteur de conformité. Un facteur qui peut être obtenu par : « *un rapport de résistances (résistance ultime/résistance requise de référence) ou de déformations (capacité en déplacement/déplacement imposé de référence).* » [AFPS-CSTB, 2013, P09].

En ce qui nous concerne, nous avons opté pour l'étude de ces performances par rapport à la capacité de déformation¹⁹ des constructions et non pas à la résistance, car notre objectif étant d'améliorer les performances de comportements de ces constructions face aux sollicitations sismiques.

En effet, lors de la recherche de la réduction de la vulnérabilité du bâti ancien, il est bien plus important de se rapprocher le plus possible de son comportement réel sous efforts sismiques, afin de minimiser les coûts de sa réhabilitation : « *Lorsque l'approche est purement qualitative, basée sur un indice de vulnérabilité déterminé à dire d'expert (analyse d'une situation sans justification par un calcul), la définition de l'action sismique n'a pas de sens : l'objectif de la procédure est d'obtenir une amélioration du comportement par le biais de certaines dispositions constructives, sans les vérifier par le calcul.* » [AFPS-CSTB, 2013, P10].

Ceci pour la raison que nous abordons la problématique parasismique sous l'angle de l'architecture et non pas celui de l'engineering, mais de plus, selon les experts, l'évaluation de la performance sismique des constructions est beaucoup plus pertinente quand il est question de l'évaluation de la vulnérabilité du vieux bâti : « *L'amélioration du niveau de performances d'une structure est souvent identifiée à l'augmentation de sa résistance mécanique. Un tel raisonnement est erroné car l'objectif est d'atteindre un niveau de performances (non-effondrement, réparabilité, etc.) et non pas un niveau de résistance aux forces données (cependant, lorsqu'on vise l'absence de dommages, l'accroissement de la résistance peut être une solution).* » [Zacek M., 2004, P37].

¹⁹ La capacité de déformation sera étudiée par rapport à l'importance des déplacements absolus des bâtiments étage par étage, ainsi que du déplacement inter-étage.

2. CHAPITRE I : ÉTAT DES LIEUX

« Quoi qu'il en soit, dans l'exercice de leur activité, tous les acteurs de la construction devraient toujours garder à l'esprit l'expression qui rappelle que ce ne sont pas les séismes, mais bien les bâtiments qui tuent ! »

Lestuzzi P. & Badoux M.

2.1 Introduction

La prise en charge du vieux bâti par rapport à la question parasismique étant une problématique d'actualité. Ce chapitre vise à évaluer cette prise en charge dans le contexte international et algérien en particulier.

Pour ce faire, nous allons tenter de mettre en avant les cadres historique et géologique de la sismicité de la région étudiée. En conséquence, l'évaluation de la vulnérabilité de la ville d'Alger et de ses environs est appréciée face à l'aléa sismique.

En second plan, ce chapitre tentera de dissiper quelques idées préconçues sur le comportement des édifices en maçonnerie face au séisme, tentative qui va introduire l'explication des nouvelles approches et démarches quant à la prise en charge du vieux bâti face au séisme.

2.2 La sismicité d'Alger et de ses environs

2.2.1 Qu'est-ce que le séisme ?

L'action sismique consiste en l'application sur un bâtiment d'un mouvement qui peut engendrer différents types de mouvements selon trois axes de libertés. Le premier étant un mouvement latéral, le deuxième vertical et enfin le troisième la rotation (Fig.6).

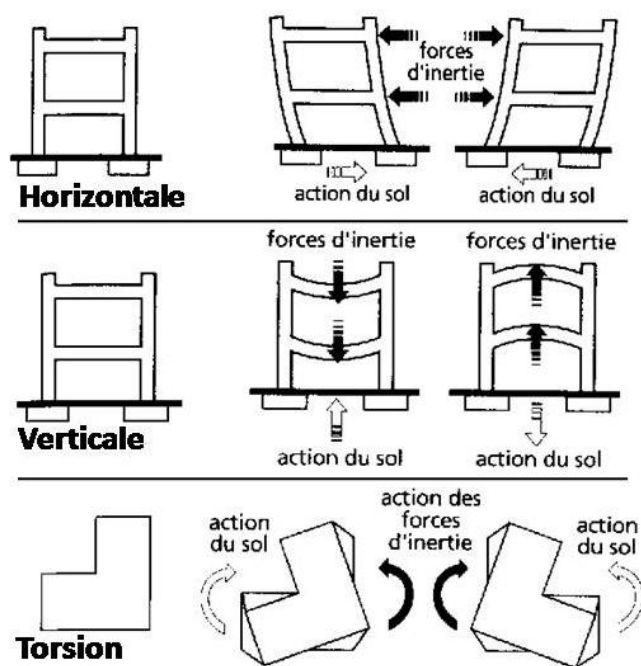


Fig. 6 : Les trois types d'oscillations que peut provoquer un séisme sur une construction [Zacek M., 1996].

Cette spécificité du séisme en tant que force dynamique produit de l'énergie qui est appelée à être emmagasinée par le bâtiment. Ce dernier est à ce titre appelé à dissiper cette énergie sous différentes formes [Badoux M. 2003].

La spécificité des efforts sismiques par rapport aux autres efforts considérés comme statiques, et que non seulement elles sont de nature dynamique, mais surtout leurs valeurs et donc leurs impacts sur le bâti est directement dépendants de ce dernier, à savoir de son architecture et de sa conception : « Pour un séisme donné, l'importance des oscillations auxquelles un bâtiment sera soumis, ainsi que leur nature, dépendent entièrement de son architecture. En cas de conception inadéquate, ces oscillations peuvent être très préjudiciables : torsion de l'ouvrage, oscillations asynchrones de ses différentes parties, concentrations des déformations sur certaines zones, etc. L'architecture d'un ouvrage détermine donc l'action sismique à laquelle il sera exposé lors d'un séisme. L'application des règles parasismiques a pour but de conférer aux ouvrages une résistance suffisante vis-à-vis de cette action ». [Zacek M., 2008].

2.2.2 Cadre géologique et sismicité historique

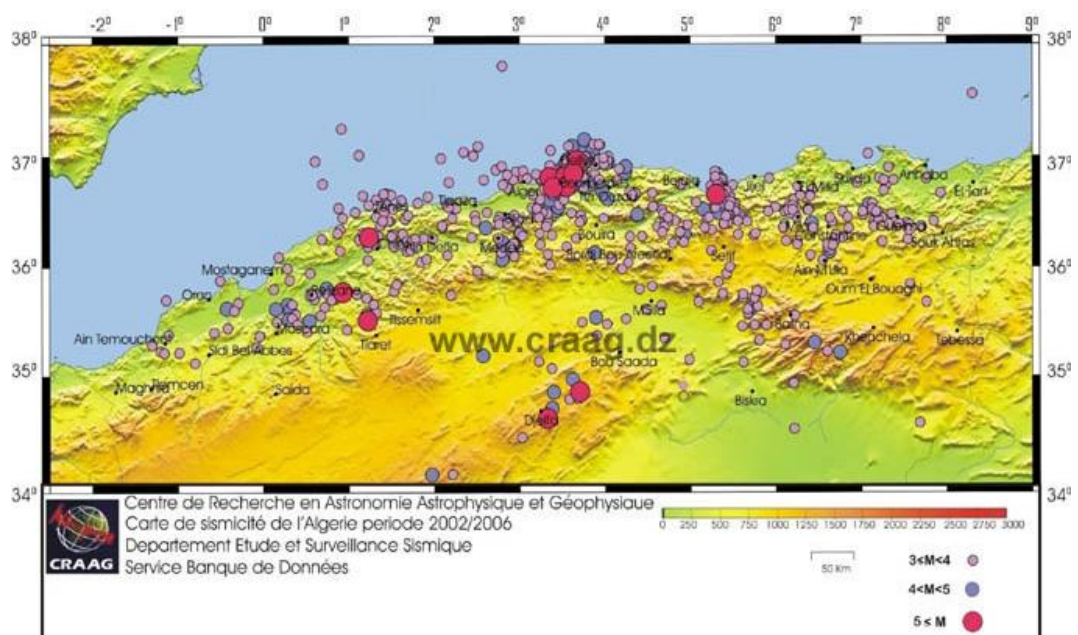


Fig. 7 : Carte de la sismicité de l'Algérie du nord Période 2002/2006.

D'une manière générale, les séismes se produisent principalement à la bordure des plaques tectoniques du globe terrestre. C'est pour cette raison que le nord de l'Algérie situé à la frontière entre les plaques tectoniques africaine et eurasiennne, qui se déplacent en mouvement compressif d'une valeur moyenne de un centimètre par

an, est de manière périodique sujet à de forts séismes destructeurs responsables d'importantes pertes humaines et matériels [Hamane M., 2009]²⁰ (Fig.7).

Au niveau de son travail de thèse de doctorat, Abdessemed-Foufa [Foufa, 2007], a identifié à travers les différents catalogues de sismicité de l'Algérie réalisés par différents chercheurs²¹, 553 séismes connus qui ont frappés l'Algérie sur une période allant de 1365 à 1992. 99 de ces séismes avaient une magnitude supérieure à 3 et 60 supérieure à 5.

En ce qui concerne la ville d'Alger et de ses environs, le premier tremblement de terre destructeur recensé dans l'histoire de cette ville et de sa région est celui de 1365²², qui a atteint une forte magnitude conduisant à la destruction d'Alger et l'inondation d'une partie de la ville suite à un tsunami.

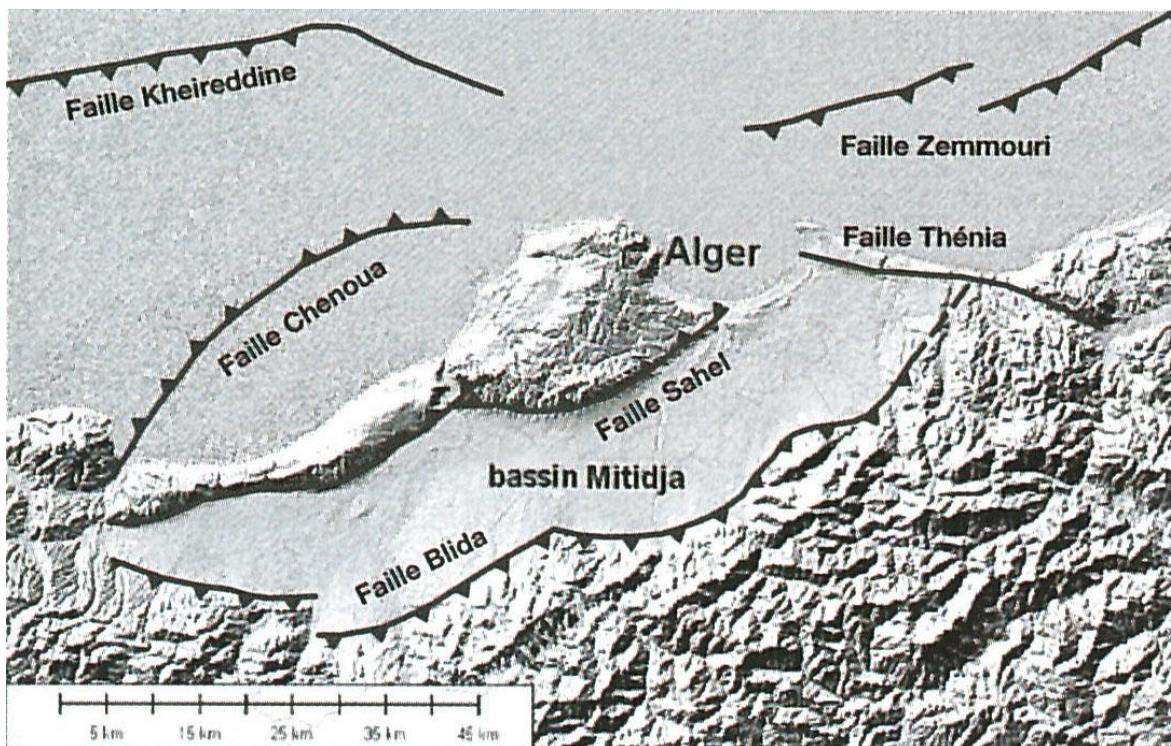


Fig. 8 : Failles sismiques autour d'Alger [Benouar D., 2008B].

Plus récemment, on peut rappeler les conséquences destructrices du dernier événement sismique majeur, celui survenu le 21 mai 2003 à Zemmouri avec une

²⁰ Selon le CRAAG, le réseau de surveillance mis en place enregistre en moyenne près de 50 secousses par mois, mais dont la majorité sont de faible magnitude et situées la plupart du temps à l'extérieur des centres urbains et des regroupements humains.

²¹ Pour plus de détail voir les travaux de [Ambraseys N. et Vogt J., 1991], [Ambraseys N. et Vogt J., 1988], [Mohrane A. et al., 1994], [Benouar D., 1994], [Benouar D., 2004] et [Harbi A., 2005]

²² CRAAG : http://www.craag.dz/r_sismologique.php consulté le 05 mars 2016.

magnitude de 6,8 sur l'échelle Richter et qui à provoqué la mort de plus de 2.200 morts²³.

Cette activité sismique de la région algéroise est liée à la présence de six (6) failles principales susceptibles de provoquer des séismes autour d'Alger [JICA, M.H.U & C.G.S, 2006]. De ces six failles, deux sont considérées comme pouvant provoquer des séismes violents. La faille de Kheireddine à l'Ouest et la faille de Zemmouri à l'Est d'Alger (Fig.8).

Ainsi, la ville d'Alger capitale politique et économique avec sa double concentration de population et d'équipements stratégiques constitue probablement la ville où les enjeux liés aux risques sismiques sont les plus importants dans notre pays.

2.3 Approche technique du bâti ancien : préjugés et faux-procès

L'évaluation et l'intervention sur le bâti existant en général et le vieux bâti en particulier par rapport à la protection sismique sont bien plus compliquées que leur prise en charge par rapport aux nouvelles constructions.

Effectivement, pour les nouvelles constructions, on possède encore une marge de liberté au niveau de la conception du projet afin de disposer de nouveaux éléments pour assurer la stabilité face au séisme, situation qui n'est pas possible en ce qui concerne les édifices déjà réalisés [Lestuzzi P., 2013A].

Intervenir sur le vieux bâti en rapport avec la réduction du risque sismique, implique la résolution d'un problème hautement complexe. Une complexité qui est due à la multiplication des facteurs mais surtout au manque d'informations liées à ces différents facteurs. A titre d'exemple, on peut citer l'hétérogénéité des matériaux et leur vieillissement qui restent difficiles à évaluer. Pire encore, si ces matériaux sont situés dans des endroits difficilement accessibles tels que les fondations. Il y a aussi la difficulté à identifier la nature de la structure et donc à l'analyser ...etc. Ce qui en fin de compte complique la modélisation du comportement de ce patrimoine face aux sollicitations sismiques [Marichal R., 2002].

²³ CRAAG op.cit.

Or, c'est de l'évaluation de ces paramètres et de l'interaction entre eux que dépend l'évaluation du comportement de l'édifice face au séisme et donc de sa vulnérabilité vis-à-vis de ce dernier.

2.3.1 Calcul et dimensionnement parasismique

Il est admis que la prise en charge du risque sismique au début de la conception architecturale est moins chère que si on devait réhabiliter un édifice après sa réalisation. De plus, le surcoût engendré par cette prise en charge au départ n'est pas important au vu du prix global de la construction.

En réalité, cette affirmation n'est que relativement vraie. La relative importance du surcoût induit par la prise en compte de la dimension sismique dans la conception est dépendante du niveau de sécurité désiré par rapport à l'occurrence possible d'un événement sismique majeur. En d'autres termes, le facteur de sécurité est dépendant de la période de retour estimée d'un séisme et de son intensité. Deux facteurs qui, même si la connaissance dans le domaine parasismique a bien évolué, restent impossibles à prédire à 100%²⁴.

Cette incertitude a conduit à la mise en place de démarches qui essaient, en fonction de la probabilité -donc du pourcentage d'occurrence- d'un événement sismique et de son importance, de chercher à identifier différents coefficients de sécurité à prendre en compte lors du calcul parasismique. Ces coefficients sont directement dépendants de la nature du projet, de sa rentabilité et de ses incidences sur l'environnement.

Ce qui est visé dans la pratique, c'est l'obtention d'un risque acceptable. Un compromis entre la probabilité d'occurrence, le surcoût de la protection et les conséquences de l'accident²⁵.

C'est de là qu'est né l'esprit des différents règlements parasismique, à savoir, le but de tout règlement parasismique est de chercher à sauver des personnes et non les bâtiments. De ce fait, il est tout à fait admis que les projets puissent subir des dommages lors de certains séismes.

²⁴ Sept scientifiques italiens de renommée internationale ont été condamnés à 6 ans de prison pour avoir sous-estimé le risque sismique de la région de l'Aquila en Italie 6 jours avant le séisme destructeur du 6 avril 2009. La communauté scientifique avait précisé qu'il était impossible « de prévoir l'imprévisible ! »

²⁵ Selon Martin, ce qui est entendu par « conséquence » c'est les pertes considérées comme acceptables par la société suite à une catastrophe majeure [Martin M., 2000].

Dans certains cas comme des projets résidentiels ou projets ne recevant pas du public ou des hangars de stockage de produits non nocifs à l'environnement, il peut même être toléré en cas de séisme majeur que ces édifices subissent des dommages irréversibles à la simple condition de ne pas s'effondrer.

Ce qui n'est pas toléré par contre, c'est l'effondrement d'immeuble entraînant la mort des personnes qui s'y trouvent, ou qu'un ouvrage dit d'importance vitale (bâtiments abritant les centres de décisions) ne soit pas opérationnel après le séisme, ou que les ouvrages qui peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'environnement (usines chimiques) soient détruit après le séisme [CGS, 2004].

En fin de compte, les différentes démarches mises en place pour la réduction de la vulnérabilité du bâti face au risque sismique, cherchent à réduire ce risque, mais sont dans l'incapacité –vu la complexité du phénomène– d'éliminer ce risque. Ce qui implique un niveau de fiabilité relatif vis-à-vis des expertises ou des recommandations.

Il est ainsi plus sage quand il s'agit de mesure parasismique, de parler de bon sens et non pas de « science exacte » et de « vérité absolue » : « *Les bâtiments conformes aux règles parasismiques ont rarement subi des dommages graves. Le respect des règles réduit donc considérablement le risque d'effondrement des constructions, sans toutefois le garantir. En effet, lors des séismes majeurs, il est arrivé que des bâtiments calculés selon les règles de construction parasismique soient parfois sévèrement endommagés ou même effondrés.* ». [AFPS, 2004A, P02].

2.3.2 Complexité des choix de méthodes de calculs et d'analyse des structures

Au vu du caractère hautement aléatoire et imprévisible du séisme, de la dépendance de son action sur les immeubles, d'un nombre important de paramètres et de la viabilité économique des solutions parasismiques à apporter, des approches hautement complexes ont été mises en place afin de dimensionner les édifices. [Chenef M., 2011].

Ces approches n'interdisent pas les différentes compositions architecturales, mais en contrepartie, les compositions complexes qui ne respectent pas certaines règles de base auront des méthodes de dimensionnement, de justification et de réalisation bien plus compliquées [AFPS, 2009]. Chacune de ces méthodes nécessitant des calculs et des analyses plus compliquées les unes par rapport aux autres.

Dans le cas par exemple de la réglementation parasismique algérienne (RPA99/ version 2003), il est identifié trois méthodes différentes de calcul des forces sismiques [CGS, 2004].

Le recours à l'une de ces méthodes, dépend d'un certain nombre de facteurs dit de régularité du bâtiment en plan et en élévation.

Le calcul et le dimensionnement sismique des ouvrages par les ingénieurs de structure suivent un cheminement assez complexe qui permet à la fin, l'identification de coefficients de pondération qui peuvent lourdement pénaliser l'ouvrage du point de vue de la conception et du coût du projet (Fig.9).

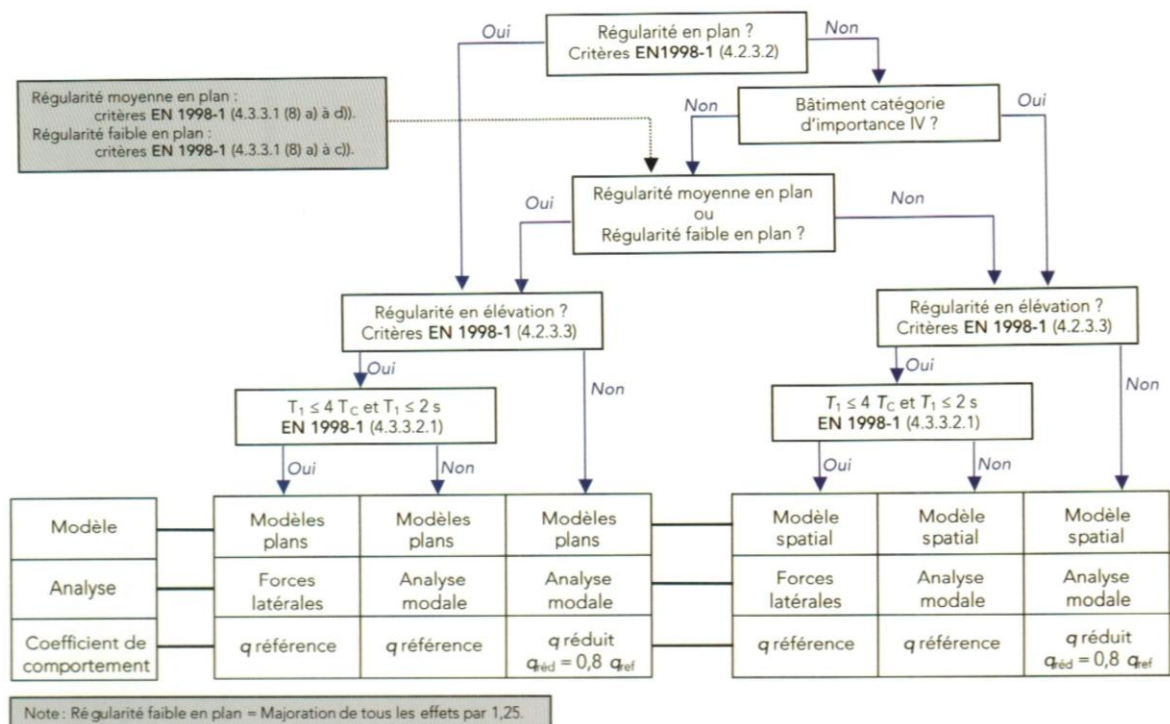


Fig. 9 : Cheminement pour le choix des méthodes de calcul et d'analyse parasismique d'un ouvrage [Chenef M., 2011].

Plus les règles de régularités ne sont pas respectées, plus le bâtiment risque d'avoir un comportement imprévisible, ce qui implique l'augmentation de la valeur des coefficients dit de « sécurité »²⁶.

²⁶ Ces différents coefficients de sécurité ne sont en réalité que l'expression de l'incapacité des spécialistes à identifier avec certitude aussi bien les traits de caractères du séisme que le comportement de la construction, qui comme nous le rappelle Kovarik en réalité peuvent être considérés comme des coefficients d'ignorance. [Kovarik J-B., 2000]

En d'autres termes, la réduction de la valeur des coefficients de calcul qui pénalisent l'ouvrage se base fondamentalement sur des critères de régularité de la conception architecturale et donc fondamentalement dépendant du choix de l'architecte !

2.3.3 Modèles et incertitudes

L'une des raisons les plus importantes de la stigmatisation de la maçonnerie est le recours abusif aux modèles numériques. Des modèles qui ont été mis en place sur la base de la connaissance du comportement du béton armé et de la structure métallique. Deux matériaux qui sont considérés théoriquement et sous certaines conditions comme étant des éléments finis contrairement à la maçonnerie.

En réalité, cette maîtrise n'est qu'illusoire puisque elle ne se base pas sur une vérité absolue, mais plutôt sur des modèles qui sont générés par des outils numériques. Des outils qui sont inventés par l'homme sur la base d'interprétations possibles –et non pas absolues- des phénomènes observés : « *Pour schématiser, en génie civil une modélisation est généralement élaborée en considérant : une théorie (des hypothèses et des simplifications), un type d'analyse (statique, dynamique), une échelle de modélisation (globale, locale), des lois de comportement des matériaux, des techniques de résolution (calcul incrémental), des renseignements sur l'objectif (réparation d'ouvrage ancien, projet d'ouvrage neuf) et sur les bases technologiques du projet (agrément dans le domaine des ouvrages d'art ; connaissance des états initiaux et phasage des opérations sur le terrain dans le domaine des ouvrages de géotechniques), etc.* » [Prat M., 2000, P119]

Des hypothèses qui sont à leur tour simplifiées afin de permettre leurs interprétations mathématiques grâce à des formules qui, à leur tours, permettront leurs modélisations.

Concrètement, ceci consiste en la réduction de la complexité du phénomène sismique grâce à des schématisations qui vont permettre d'en simplifier l'étude. Ceci n'est possible que par la réduction d'un certain nombre de facteurs dynamiques en de simples coefficients qui estiment l'impact de ces facteurs dans le comportement du bâtiment. Sans tenir compte par exemple de leur caractère temporel à savoir la durée de la vibration.

Toute cette démarche donne l'illusion de la certitude et de la véracité du résultat, vu qu'elle est cachée derrière un rideau de calculs mathématiques et des modélisations informatiques. Une certitude qui peut conduire à de dangereuses dérives : « *De plus, face aux résultats donnés par l'ordinateur, l'ingénieur a trop*

souvent tendance à abdiquer sa responsabilité, c'est-à-dire à ne pas vérifier ses résultats par une analyse et une interprétation rigoureuse. » [Davidovic V., 1999, P103].

Or ces différents calculs sont limités pour différentes raisons, parmi lesquelles on peut citer :

- Le calcul se base sur la force, alors que le séisme c'est de l'énergie qu'il faut d'abord à absorber puis dissiper ;
- L'hypothèse de calcul se base sur une seule accélération violente et maximale, alors que dans la réalité, le séisme est une suite d'accélération de différentes intensités.

Une situation qui a mené à la condamnation des structures anciennes par rapport à leur vulnérabilité face au séisme vu la grande difficulté de les simuler et modéliser numériquement, malgré le fait qu'elles aient résisté lors de séismes majeurs : *“Old ways of building that are based on an empirical wisdom passed down through the ages will probably defy most attempts to be rationalized into systems that can be calculated, but the evidence remains that some of these systems nevertheless have worked well even in large earthquakes. Because of this lack of set rules and methodologies for quantification, the evaluation of older structures after earthquakes can lead to broadly divergent views on the significance of particular damage and on the reparability of the structures, which inevitably has led to the unnecessary destruction of traditional houses and even whole city districts and rural villages – at tremendous social costs.”* [Langenbach R., 2010A, P15].

Ceci est d'autant plus regrettable vu que la démarche de calcul des structures au séisme repose principalement sur l'estimation d'un nombre important de coefficients et non des vérités absolues. Des coefficients qui sont, pour beaucoup donnés par convention et non par calculs, ce qui enlève énormément à l'image de certitudes procurée par le recours aux mathématiques et à la modélisation informatique [Benouar D., 2001].

Ces coefficients sont appelés « coefficients de sécurité » afin de rassurer les personnes. En réalité ces derniers ne font que cacher ou réduire la marge de notre ignorance vis-à-vis du phénomène sismique. Des coefficients qui, outre leur limitation, devront en plus résoudre la difficile équation entre le surcoût du projet et la sécurité du bâtiment et des personnes [Martin P., 2006].

A titre d'exemple, un bâtiment est calculé sur la base de prescriptions réglementaires qui déterminent la capacité d'accélération du site d'études.

Prescriptions, qui reposent sur des accélérations nominales hypothétiques et non pas véridique dans l'absolue. Car même si ces hypothèses reposent sur des observations et des enquêtes, rien n'assure que ces sites sont incapables de dépasser l'accélération hypothétique.

De plus, même si en général, les accélérations atteintes lors de séisme majeur varient de 0,3 g à 0,8 g, les règlements parasismiques imposent généralement un coefficient bien inférieur à ces valeurs. Ce qui amène à poser la question de chercher à comprendre les raisons qui ont quand même permis la non destruction des édifices lors d'événement sismique majeur²⁷.

C'est pour cette raison que ces coefficients sont mis à jour après un événement sismique majeur comme pour la ville d'Alger suite au séisme de Boumerdes en 2003 avec son passage de zone de sismicité modérée, à zone à sismicité élevée.

Cette réalité du domaine du génie parasismique est entourée par une profonde incertitude. Elle est certes, nettement moins rassurante que celle d'une approche qui manipule les calculs et les formules, ce qui suppose de la certitude là où il n'y en a pas. Mais cette incertitude fait partie de la réalité sismique. L'accepter permettra d'entrevoir de nouvelles possibilités pour la réduction de la vulnérabilité au lieu de persister dans des alternatives qui vont finir par dénaturer le patrimoine architectural, sans pour autant parvenir à le sauver [Benouar D., 2006].

C'est pour cette raison qu'une importance capitale est donnée aux retours d'expériences suite à chaque séisme. C'est l'occasion de la mise à jour des connaissances grâce aux nouvelles observations. Ces dernières permettent la validation ou non des hypothèses émises lors des derniers séismes et la formulation de nouvelles grâce à la confrontation avec la réalité. Ceci permettra de développer les modèles numériques afin qu'ils puissent se rapprocher de la réalité des comportements des ouvrages lors d'un futur séisme [Filiatrault A., 1996].

Finalement l'univers de l'engineering en général et celui du parasismique en particulier sont dominés par l'incertitude due au processus de modélisation et de calcul de l'action sismique qu'il soit numérique ou pas : « *La compétence de l'ingénieur s'exerce dans un contexte incertain : incertitudes sur le comportement et les conditions de mise en œuvre des matériaux, incertitudes sur l'environnement, incertitudes sur les*

²⁷ Bien que lors du séisme de Boumerdes en 2003 on a pu enregistrer des accélérations maximales qui ont dépassées les 0,5 g, la mise à jour de la réglementation parasismique algérienne donne un coefficient d'accélération du sol qui varie de 0,18 g à 0,4 g.

conditions extrêmes d'exploitation des ouvrages et même incertitudes sur les incertitudes. » [Martin M., 2000, P01].

Une incertitude qui même si elle est présente, reste assez mal acceptée par la société voire même par une bonne partie des professionnels du domaine qui préfèrent se rassurer derrière des résultats numériques obtenus à travers des calculs savants et complexes réalisés par des ordinateurs performants.

Ainsi, comme nous le rappelle Davidovici : « *Le séisme est l'épreuve de la vérité pour l'ensemble du bâti et surtout pour tous les acteurs participant à l'acte de construire* ». [AFPS, 2003, P19]. Face à cette épreuve ultime, et bien que désavantagées par les calculs et les modélisations numériques, les structures du vieux bâti nous ont offert quelques exemples qui justement défient les pronostics.

Cet état de fait est directement lié à la nature même de la sollicitation et à la particularité du comportement sismique des bâtiments. Effectivement, la capacité de l'effort sismique sur un bâtiment et sa bonne tenue face au séisme sont directement dépendantes de lui. Si à cela, on ajoute le fait que la réponse au séisme d'une structure est dynamique, cyclique, et fortement non linéaire, on aboutira à la conclusion que la réponse détaillée et réelle d'une structure face au séisme est généralement hors de portée des outils numériques aussi développés soient-ils.

Une situation qui selon les spécialistes, perdurera pour longtemps car il réside dans la nature aléatoire et imprévisible des séismes en rapport avec un nombre important de paramètres (nature du sol, environnement immédiat, intensité, durée du séisme...). Ce qui induit que cette situation ne risque pas d'être fondamentalement modifiée par le développement de nouveaux outils analytiques [Lestuzzi P., 2009].

C'est pour cette raison que les logiciels de simulations numériques et calcul des structures aux séismes se basent sur des hypothèses de simplification de la réalité sismiques afin d'en permettre la simulation : « *Pour des raisons pratiques, le calcul « au séisme » est basé sur des hypothèses simplifiées qui ne reflètent pas toujours fidèlement leur comportement réel.* » [AFPS, 2004A, P05].

2.3.4 Vulnérabilité des édifices en maçonnerie face au séisme

D'une manière générale, les édifices en maçonnerie souffrent d'une mauvaise réputation en ce qui concerne leur capacité à bien se comporter lors des séismes. Mais qu'en est-il en réalité ?

Dans l'absolu, la maçonnerie résiste très mal à la torsion, qui est l'un des efforts les plus importants mais aussi l'un des plus destructeurs lors d'un séisme [Brestein D., 1982]. Mais malgré cela, il semblerait à en croire certains spécialistes, que cette réputation est surfaite²⁸, et quelle est due à deux facteurs fondamentaux : la méconnaissance de ce système structurel et la difficulté d'adapter ce système aux modèles mathématiques de calculs utilisés, qu'à son manque de résilience face aux efforts sismiques [Ministère des biens culturels italiens, 1986].



Fig. 10 : Bon comportement au séisme d'une ancienne mosquée en maçonnerie en comparaison avec les autres constructions récentes en béton armé lors du séisme de Kocaeli en Turquie en 1999 [Langenbach R., 2008B]. (Crédit photo : Marti E., Associated Press)

Ce sentiment est renforcé par la considération par de nombreux ingénieurs –à tort- que les techniques d'aujourd'hui apportent les solutions ultimes à la réduction de vulnérabilité des immeubles face au séisme, alors qu'il a été souvent impossible d'explicitier de par le passé, les raisons qui ont fait que des anciens bâtiments ont mieux résisté aux séismes que des édifices plus récents [Crocker E., 2000].

²⁸ Cette réputation est aussi liée aux différentes images diffusées par les médias suite aux séismes sans en faire une lecture critique. Lors du séisme du 26 décembre 2003 de Bam en Iran de magnitude 6.6 sur l'échelle de Richter, des images ont fait le tour du monde montrant la quasi-destruction de la ville historique de Bam réalisée en maçonnerie. A en croire Langenbach, parmi les parties qui ont été le plus affectées par le séisme, ce sont les constructions restaurées, alors que les édifices qui n'ont jamais été restaurées, et qui étaient délabrés avant le séisme sont restés quasiment intacts. Il en conclut que ce sont de mauvaises techniques de restauration dues à une non maîtrise des techniques de construction d'origine qui ont conduit à la vulnérabilité et donc à la destruction de ce patrimoine lors de ce séisme [Langenbach R., 2008A].

Effectivement, on a pu observer des anciens bâtiments en maçonnerie qui ont bien résisté aux tremblements de terre, comme lors du séisme de Kocaeli en Turquie en 1999 : *“The results of damage assessment studies in several districts of Kocaeli and Sakarya show that, the traditional buildings, which are timber frame structures, masonry and frameless brick buildings presented good earthquake resistance even though they were made from weak local materials.”* [Gülhan D., 2000, P5]²⁹ (Fig.10 & 11).



Fig. 11 : Exemple de bonne tenue des constructions traditionnelles en comparaison avec les constructions récentes en béton armé lors du séisme destructeur en Turquie de 1999 [Langenbach R., 2008B].

D'autres exemples tels que le séisme de San Fernando en Californie en 1971, ou celui de Spitak en Arménie en 1988 –avec des bâtiments de 1910- en structure murs porteurs en de maçonnerie –qu'ils soient chaînés ou pas- ont montré une bonne stabilité d'ensemble grâce au réseau des murs dans les deux sens [Amir-Mazaheri D., 2010]. Certes les constructions en maçonnerie ont subi des dommages, mais contrairement aux constructions en béton-armé, elles ne se sont pas effondrées, sauvant ainsi un nombre important de vies humaines.

²⁹ On peut retrouver différents exemples d'architectures traditionnelles qui possèdent des dispositifs parasismiques qui ne soient pas directement dépendant du système structurel, mais plutôt à celui de l'architecture. A titre d'exemple on peut citer l'architecture traditionnelle chinoise dans la province du Zhejiang avec la projection de grandes chambres qui possèdent de grandes portées au milieu, loin des extrémités. Ceci permet de réduire l'effet de la torsion vu que les travées d'angle sont plus rigides grâce à la petitesse de leur portée [Zhang Z., 2000]. Voir aussi les travaux de [Poursoulis G., 2002].

Plus récemment, on peut citer l'exemple des séismes de l'Aquila en 2009 en Italie, et celui de Lorca en 2011 en Espagne. Durant ces deux séismes le bâti ancien a certes subi des dommages, mais plusieurs bâtiments anciens en maçonnerie se sont assez bien comportés.

Au niveau de l'Aquila, la façade de l'église S. Maria Del Suffragio est presque intacte grâce à un rapport largeur/hauteur favorable (1/1), mais aussi aux renforcements des angles de cette église [AFPS, 2009] (Fig.12).



Fig. 12 : Séisme de 2009 à l'Aquila en Italie, l'église St. Maria Del Suffragio n'a subi des dommages qu'au niveau de la coupole. Les façades en maçonnerie sont restées quasiment intactes³⁰.

Pour ce qui est de la ville de Lorca, le Palacio Guevara de 1694, s'est bien comporté grâce à son plancher en bois qui a agi comme un chaînage pour empêcher les murs de sortir de leur plan [AFPS, 2011B].

Autant d'exemples qui n'en éliminent pas pour autant la fragilité de ce type de bâti vis-à-vis du séisme, mais, au moins, devraient nous conduire à ne pas le condamner aussi facilement. Il serait plus sage d'aller chercher à apprendre de ces différents exemples afin de mieux préserver notre patrimoine³¹.

³⁰ Source de l'image : http://www.boston.com/bigpicture/2009/04/the_laquila_earthquake.html consulté le 05 mars 2016.

³¹ Pour plus d'information voir les travaux de Langenbach Randolph sur différents séismes tel que Bam 2003, Kocaeli 2001, Northridge en 2004, Haiti en 2010 [Langenbach R., 2000], [Langenbach R., 2003], [Langenbach R., 2005], [Langenbach R., 2008A], [Langenbach R., 2008B], [Langenbach R., 2010A],

Mais bien que les constructions en maçonnerie aient déjà fait leurs preuves in situ, elles sont aujourd'hui menacées par de nouvelles législations qui ne tiennent pas compte des spécificités structurelles des constructions en maçonnerie [Langenbach R., 1995].

Finalement, le problème repose sur la dominance du recours aux structures en béton armé et métallique, qui reposent sur des logiques de comportements très différentes par rapport à la maçonnerie : « *La science des constructions, instrument traditionnel d'étude de la mécanique des corps solides fatigués par des forces statiques ou dynamiques et de ses applications pratiques, est en mesure d'élaborer par calcul des vérifications sismiques de projets satisfaisantes dans le cas de constructions en béton armé ou en acier pour lesquelles on peut accepter les hypothèses simplificatrices de l'homogénéité et de la continuité du moyen de résistance, mais cette science n'a pas beaucoup d'efficacité et de pertinence quand on applique ses schémas canoniques sur des constructions existantes en maçonnerie.* » [Palermo G.,1993, P74].

Mais malgré la différence de comportement, entre les nouveaux matériaux et la maçonnerie, cela n'a pas empêché le recours à ces nouveaux matériaux pour le renforcement du bâti ancien. Des interventions qui ont souvent conduit à dénaturer le bâtiment à préserver, mais aussi à proposer des garanties de sécurité illusoires du fait que ces modèles se basent sur les logiques de comportements du béton et de l'acier qui sont différents de ceux de la maçonnerie [Ministère des biens culturels italiens, 1986].

C'est afin d'éviter ce type de perte de bâtiment à grande valeur patrimoniale, tout en cherchant à les préserver des risques sismiques, qu'il est important de veiller à produire des codes différents pour le nouveau bâti et le bâti ancien. Ce dernier devra être basé sur la recherche de performances à atteindre et non pas de procédure à appliquer à la lettre.

a. La maçonnerie et le séisme :

Lors de différents séismes majeurs, on a pu observer dans différentes régions du monde une bonne tenue des édifices en maçonnerie. Par exemple, au Cachemire, Langenbach rapporte que des personnes qui ont assisté au tremblement de terre de

[Langenbach R., 2010B], [Langenbach R., 2012], [Langenbach R., 2013], ainsi que les rapports de mission post sismique de l'AFPS sur les séisme de l'Aquila en 2009 [AFPS, 2009] et de Lorca en 2011 [AFPS, 2011B].

1885 ont, certes, relevé le niveau important des dégâts, mais avec le constat que peu de maisons se sont effondrées [Langenbach R., 1989].

Finalement, une question se pose. Du moment que la maçonnerie n'est pas naturellement prédisposée à résister aux efforts sismiques, qu'est ce qui pourrait expliquer la bonne tenue de ce type de construction lors de séismes modérés voire même majeurs ?

L'action du séisme se manifeste à travers un mouvement vibratoire auquel est soumis l'édifice. Ce mouvement ondulatoire conduit à une accumulation dans un laps de temps très réduits d'une quantité d'énergie importante au sein des bâtiments.

Cette énergie cumulée, est connue sous le nom de force d'inertie $F_i = M \times A$ avec :

- F_i : Force d'inertie
- M : Masse du bâtiment
- A : accélération

Ainsi, la quantité de force à laquelle est soumis un édifice est directement dépendante de l'accélération, mais aussi de la masse de l'édifice. Une masse qui soumet le mur porteur à un important effort vertical qui lui est bénéfique pour le stabiliser lors d'un séisme. [Zerbi S., 2011].

C'est pour cette raison que la réflexion sur la réduction de la vulnérabilité des édifices face au séisme, ne peut pas se réduire à la simple question de résistance, elle doit aussi s'intéresser à la capacité de stockage et de dissipation de l'énergie afin d'éviter l'effondrement [Bachmann H., 2002].

Justement, c'est grâce à cette capacité de dissipation de l'énergie accumulé, que des spécialistes semblent expliquer les raisons de la bonne tenue des édifices en maçonnerie face au séisme³². Cette capacité semble liée au frottement des différents éléments de la maçonnerie qui grâce à ce mouvement, ainsi que la fissuration des murs, permettent de dissiper de l'énergie.

Ce phénomène a été observé lors du tremblement de terre de 1986 au Salvador. Effectivement, suite aux enquêtes post-sismiques, il a été relevé sur les différents bâtiments qui ne se sont pas effondrés que la contrainte sismique a été distribuée sur

³² Voir les travaux de Langenbach et Ait-Meziane : [Langenbach R., 1989], [Langenbach R., 1995] [Langenbach R., 2005], et [Ait-Meziane Y., 2002]

toute la paroi et non pas concentrée sur certains points. La contrainte engendrée par le séisme a été dissipée par le frottement de la maçonnerie et le bois du plancher et non pas par la présence d'éléments rigides.

Concernant les bâtiments qui se sont effondrés, les analyses ont démontré que la cause principale de cette défection n'était pas due à la mauvaise tenue supposée de ce type de structure au séisme, mais plutôt au pourrissement du bois composant ces constructions. Ainsi, le manque d'entretien de ces édifices a conduit à l'affaiblissement du système constructif dû à l'attaque des termites et fourmis blanches et non pas au potentiel sismo-résistant du système structurel lui-même. Un constat aussi observé lors du tremblement de terre de Bam en 2003, où les termites avaient une part de responsabilité dans la fragilisation de la structure.

D'autres facteurs favorisant la bonne tenue de ces édifices résident non seulement dans la régularité et la simplicité des formes de ces bâtiments, mais aussi l'effet de masse qui participe grandement à la stabilité du bâtiment à la condition que le bâtiment ne soit pas élancé.

En résumé, les facteurs favorisant le comportement des immeubles en maçonnerie porteuse chaînée ou pas sont ³³:

- Existence ou pas d'un réseau de murs bien harpés ;
- Disposition quasi-régulière des murs sur le périmètre extérieur et à l'intérieur du bâtiment et à tous les niveaux ;
- Liaisons efficaces entre les planchers et les murs ;
- Non-modifications du bâtiment d'origine.

b. Pathologies et types de dommages des structures en maçonnerie face au séisme :

Plus les composants d'une structure sont solidaires entre eux et travaillent ensemble, plus cette structure permet d'offrir une meilleure capacité de résistance au séisme. Ceci implique une attention particulière à apporter à différents points névralgiques des bâtiments, tels que :

- Les connections entre les différents éléments constructifs du bâtiment (planchers, murs, toitures...) ;

³³ Voir travaux de [Amir-Mazaheri D., 2010].

- Les différentes ouvertures, aussi bien sur les élévations (fenêtres, portes...etc.), que les planchers (cages d'escaliers, gaines...).

Suite aux différentes enquêtes et recherches post-sismiques, on a pu relever des pathologies et dommages récurrents concernant les constructions en maçonnerie³⁴ :

- Effondrement des murs, dû à de mauvaises ou absence de liaisons avec les autres murs et planchers, ce qui nécessite des chainages suivant les 3 directions afin d'assurer un comportement monolithique du bâtiment. (Fig.13).

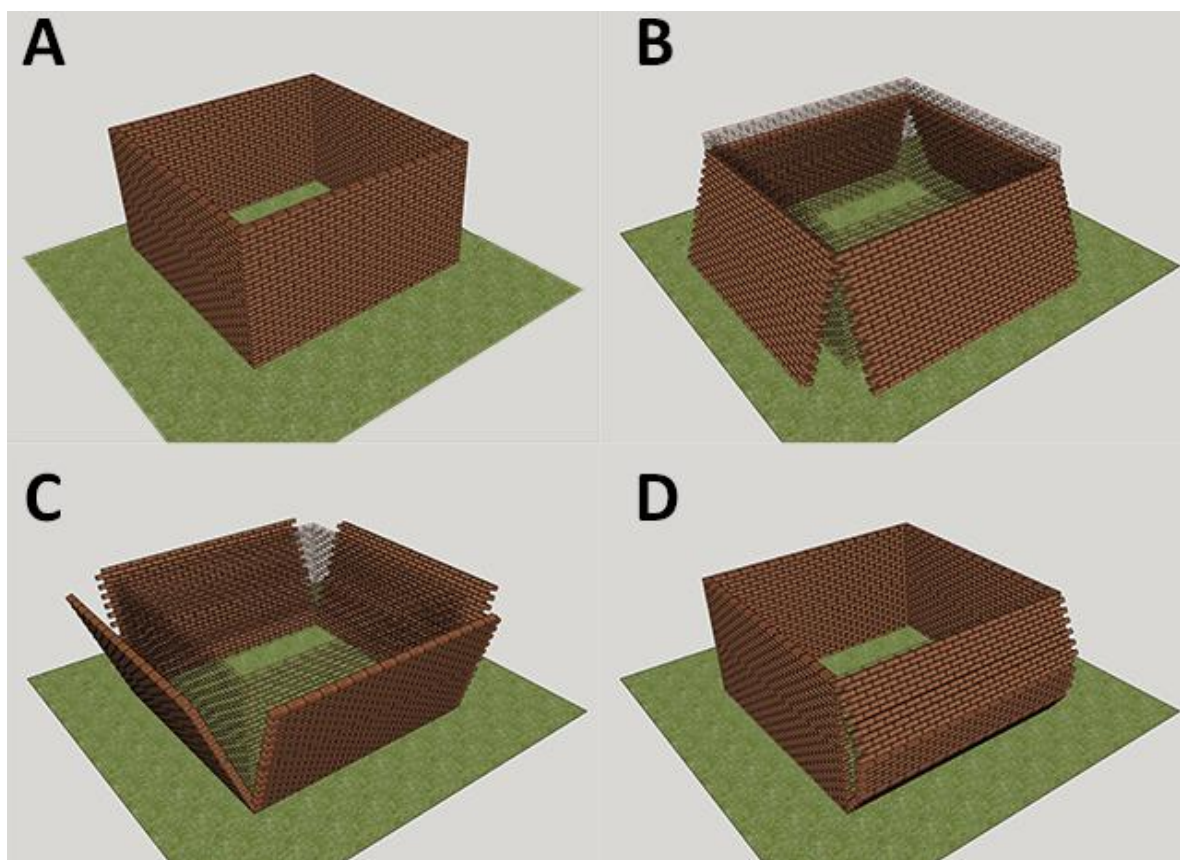


Fig. 13 : Le de manque de liaisons horizontales au pied (B), au sommet (C) ou entre les éléments verticaux (D) aura tendance à ouvrir le bâtiment. [Davidovici V., 2014, P73]. (Crédit photo : Djennane W.)

³⁴ Ces différents points sont le résultat d'un travail de synthèse que nous avons effectué suite la lecture de différents travaux de recherches et de rapports d'enquêtes post-sismiques, dont entre autres : [AFPS, 2004B], [Chaillou A., 2003], [Combesure D., 2002], [Davidovici D., 1999], [Giuffré A., 1993], [Levret A., 2002], [Levret A., 2003], [Koller M. G. et al, 1995], [Mebarki A., 2008], [Mezouar N., 2003], [Zerbi S. 2011]...etc.

- Rupture et basculement des murs extérieurs dûs à des portées trop importantes entre murs porteurs ou l'absence de poutre perpendiculaire aux murs périphériques.



Fig. 14 : Basculement dû à une grande portée. (Crédit photo : Djennane W.)

- Fissures inclinées à 45° en partant des angles des ouvertures, portes ou fenêtres, dûes à de grandes ouvertures, de petits trumeaux, ou d'absence de chaînage et d'encadrement des ouvertures (Fig.15).

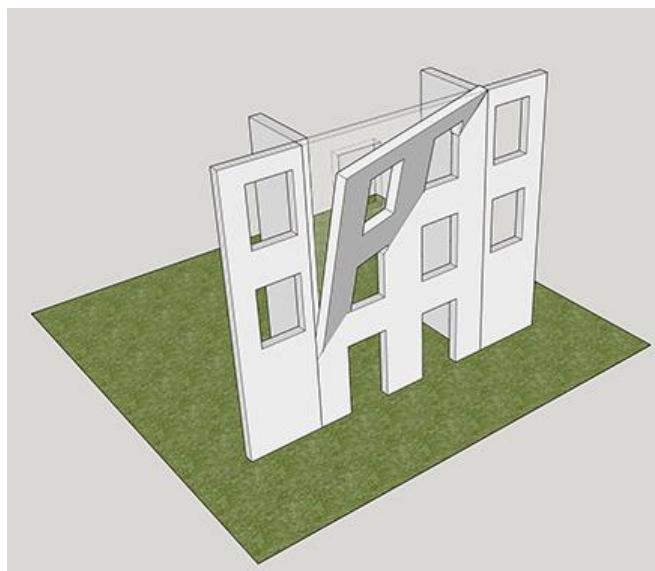


Fig. 15 : Fragilisation des angles des ouvertures. (Crédit photo : Djennane W.)

- Effondrement des planchers dû à une surcharge ou un surpoids des planchers.

- Perte de résistance du mur en maçonnerie avec l'augmentation de son élancement, à savoir l'augmentation du rapport de la hauteur par la largeur.
- Effondrement des murs dû, entre autres à un rapport plein vide insuffisant entre le mur et les ouvertures qui le composent, ou l'absence d'encadrement des ouvertures voir aussi la présence de petits trumeaux ou de la continuité de ces derniers sur la totalité du mur (Fig.16).

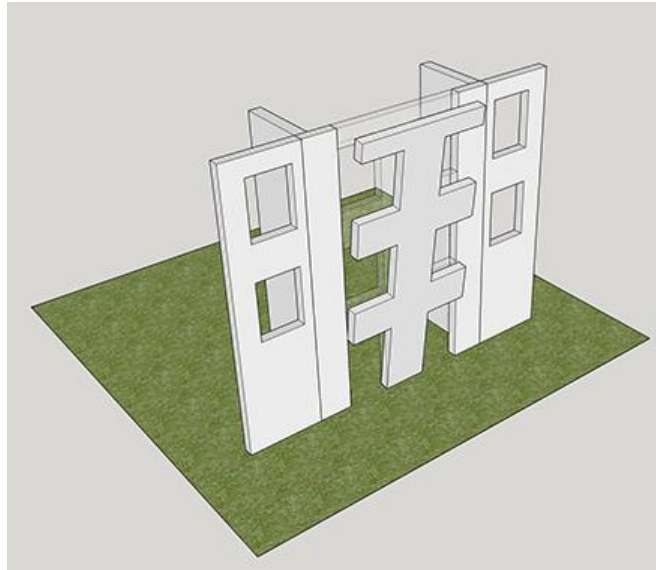


Fig. 16 : Insuffisance du rapport plein/vide. (Crédit photo : Djennane W.)

- Effondrement partiel de la construction dû à une interaction entre l'édifice et les bâtisses qui lui sont adossées à cause de la différence de hauteur totale entre les immeubles ou une différence des hauteurs d'étages des deux immeubles (Fig.17).



Fig. 17 : Effondrement partiel dû à la différence de niveau. (Crédit photo : Djennane W.)

- Vulnérabilité des angles due à l'accumulation des efforts ce qui peut conduire à des effondrements (Fig.18).

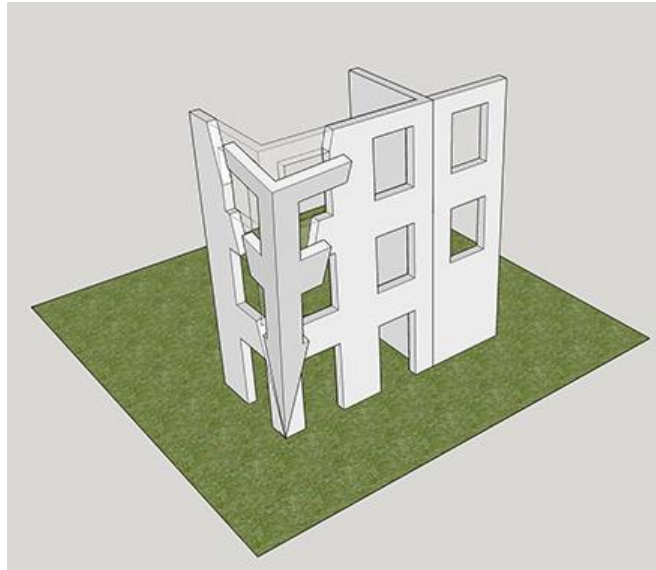


Fig. 18 : Détachement et effondrement de l'angle. (Crédit photo : Djennane W.)

- Décollement de façade surtout dans les parties supérieures du bâtiment avec risque de basculement du mur (Fig.19).

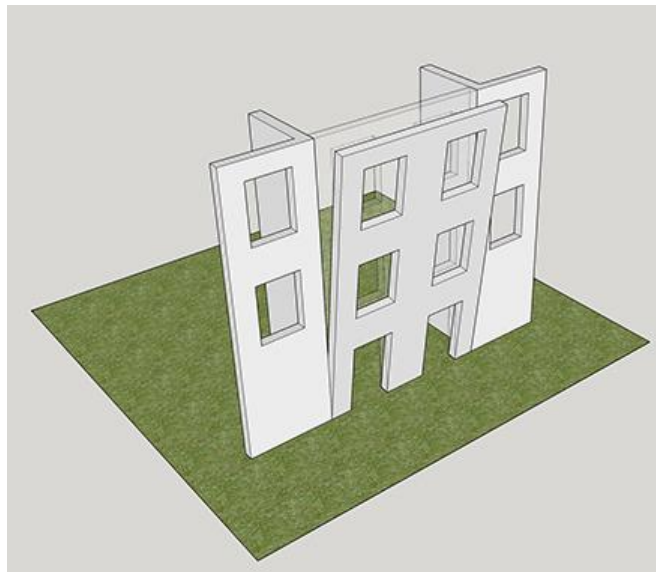


Fig. 19 : Basculement du mur et fissures apparentes dans la partie haute du mur de refend. (Crédit photo : Djennane W.)

c. Conclusion :

Ces différents exemples nous ont montré que le patrimoine en maçonnerie est malheureusement condamné pour un manque de connaissance ou des préjugés qui n'ont rien à voir avec son potentiel sismo-résistant. Un potentiel qui est fortement dépendant de la bonne qualité de l'entretien de ce patrimoine.

Un état de fait qui a eu pour conséquence le recours quasi exclusif à des « *techniciens* » qui appliquent passivement les règlements et techniques dont la finalité et les motivations leur échappent » [Ferrigni F., 1990, P22].

2.3.5 Réhabilitation du bâti ancien

Toute intervention en rapport avec la conservation et la sauvegarde d'un patrimoine architectural, doit veiller à la préservation de son intégrité matérielle et identitaire et ceci quelle que soit la nature du danger qui menace ce patrimoine. La réhabilitation du vieux bâti en rapport avec la prise en charge du risque sismique, doit veiller au respect de cette règle. Car la rentabilité où la mesure de l'efficacité d'une action –où plus exactement d'un ensemble d'actions- doit se vérifier par rapport à la cohérence de l'ensemble des enjeux liés à la réhabilitation et la réduction de la vulnérabilité du vieux bâti face au risque sismique.

A ce titre, deux approches s'offrent à nous afin de diminuer la vulnérabilité d'un bâtiment face au séisme [Amir-Mazaheri D., 2010] :

- Soit augmenter sa résistance au séisme ;
- Soit réduire les effets de l'action sismique.

Malheureusement, sur la réalité du terrain, le réflexe systématique est la recherche de renforcement et la rigidification du bâti.

Sauf qu'en réalité, ce choix ne constitue pas toujours la bonne solution. Ainsi l'expérience cumulée après chaque séisme a démontré que l'endommagement d'une structure est plus la conséquence d'une déformation excessive plutôt que d'un dépassement de résistance.

Conduisant à penser que le plus important lors d'une opération de réhabilitation est l'amélioration du comportement du vieux bâti face au séisme et la recherche de le soustraire aux efforts sismiques et non pas l'augmentation de sa résistance à ses efforts.

Etant donné que l'importance des efforts sismiques que subit un bâtiment est directement liée à sa configuration, il est clair qu'une recherche de réduction de l'impact des efforts sismiques passe entre autres, par l'amélioration de sa configuration et de ses caractéristiques architecturales, et non pas d'agir seulement sur sa structure.

A noter aussi que le renforcement de la structure, entrainerait en général un surpoids de la structure. Un surpoids qui aura comme conséquence l'augmentation des charges sismiques que va subir le bâtiment.

En d'autres termes l'amélioration des performances du bâti ancien, ne passe pas automatiquement par la case renforcement de la structure. Différentes options s'offrent à nous pour réduire la vulnérabilité du bâtiment³⁵ :

- La maîtrise du poids du bâtiment : allègement des planchers, changement de l'exploitation du bâtiment... etc. ;
- La réduction de la fragilité du bâtiment due à la qualité des matériaux ;
- L'amélioration de la régularité et la redistribution des charges pour éliminer la torsion ;
- L'amélioration de la ductilité des matériaux ;
- La maîtrise des raideurs qui conditionnent la valeur de la période propre ;
- L'augmentation de la résistance globale ou locale du bâtiment ;
- Prévenir l'entrechoquement par une meilleure maîtrise de la période propre du bâtiment et de ses déplacements.

Il saute aux yeux directement que dans plusieurs de ces actions, l'intervention de l'architecte est non seulement évidente mais surtout importante. Par exemple, la réduction du poids grâce au changement d'activité, où la recherche de la régularité par la redistribution des charges...etc. Le tout, bien sûr, dans un désir de maintien de la typologie statique originale [Palermo G., 1993].

En dernier lieu, signalons l'existence aussi de la technique de l'isolation sismique. Une technique assez coûteuse et nécessitant une maîtrise assez importante du procédé technologique. Deux raisons qui font que le recours à cette dernière est généralement assez exceptionnel.

2.4 L'architecture parasismique : une approche plurielle

Depuis l'avènement du domaine parasismique, une évolution importante a été réalisée pour l'amélioration des connaissances sur le comportement et l'amélioration

³⁵ Pour plus de détails voir [Zacek M. 2004], [OFEV, 2008], [Amir-Mazaheri D., 2010] ainsi que [Bothara J. & Brzev S. 2011].

de la sécurité des bâtiments et des vies humaines lors des séismes. Mais cette évolution n'a pas réussi à éliminer totalement les risques encourus, et ceci même dans des pays dits développés tel que le Japon comme on a pu l'observer lors du séisme de Kyoto en 1995 et plus récemment celui de Fukushima en 2011.

Mais chacun de ces cataclysmes a été l'occasion d'apprendre et d'améliorer les connaissances sur le domaine parasismique. C'est l'occasion de vérifier le bien fondé des hypothèses émises sur le comportement sismique des bâtiments.

Ce sont autant d'occasions offertes pour valider sur le terrain le comportement des différents modes constructifs sans préjugé préalable. En bref, chaque événement sismique est une tragédie en soi, mais c'est aussi l'occasion d'en apprendre encore plus sur les séismes et le comportement des édifices afin d'améliorer notre connaissance et nos approches face au séisme [Reitherman R., 2006].

Ceci permet la mise à jour, voire la formulation, de nouvelles démarches et stratégies pour appréhender aussi bien les nouvelles constructions que le vieux bâti. Mais la mise en place de ces nouvelles démarches est assez complexe du fait de la pluralité des domaines concernés par le phénomène sismique : « *Dans le domaine des phénomènes naturels et plus particulièrement des séismes, la recherche de l'information s'appuie sur diverses compétences : sismologues, géologues, historiens, archéologues, architectes, ingénieurs du bâtiment, etc.* » [Levret A., 2003].

Cet état de fait a conduit au niveau de la réhabilitation du patrimoine, à la nécessité de mise en place d'approches transdisciplinaires où il ne faut pas se contenter d'aborder la question parasismique sous l'angle technique seulement, mais plutôt par rapport à une vision globale de la question sismique et patrimoniale³⁶. Il faut aussi chercher à vérifier leur faisabilité, leur acceptation par les populations locales, la

³⁶ Les études post-sismiques réalisées au Japon suite au séisme de Kobe en 1995, ont montré que 80% des bâtiments réguliers et 40% des bâtiments irréguliers, construits sans règles parasismiques, ont bien résisté au séisme. De ce fait l'âge, le calcul voir le respect rigoureux de la réglementation parasismique ne constituent pas une garantie totale pour la préservation des constructions. Ils ne constituent pas non plus les seuls dispositifs de préservation du bâti ancien face au séisme. D'autres facteurs appartenant à d'autres disciplines participent à expliciter cet état de fait [Amir-Mazaheri D., 2010].

On peut citer aussi l'exemple du séisme du 5 juin de 1688 au village de San Lorenzello où les mêmes bâtisses dans certains lieux ont été totalement détruites alors que celles se trouvant sur d'autres lieux ont peu souffert du terrible séisme. Ceci ne peut pas simplement s'expliquer avec une approche reposant exclusivement sur l'aspect technique du système constructif [Esposito E., Luongo G., Marturano A. et Pordido S., 1989].

préservation de l'identité patrimoniale du bâtiment... [Ministère des biens culturels italiens, 1986].

Effectivement, les raisons explicitant les endommagements suite à un séisme sont multiples. Certes, le calcul et le respect des recommandations techniques en font partie, mais d'autres facteurs y participent aussi, tels que la connaissance du site et de ses effets, les défauts de conception, la qualité de l'entretien, la qualité de la réalisation...etc. [Davidovici V., 2000].

La préservation de l'intégrité patrimoniale est fondamentale. La conservation de l'authenticité doit constituer une condition fondamentale de la réhabilitation. Sinon, au vu des coûts investis à quoi bon chercher à préserver ce patrimoine si finalement on le dénature [Gerroudj T., 2000]. Des interventions qui se limitent à l'aspect technique, risquent de dénaturer l'objet patrimonial et d'effacer la raison même de son classement et du désir de sa conservation.

Importer des solutions toutes faites à partir de contextes différents, sans chercher à les réadapter au contexte local, c'est prendre le risque de voir disparaître tout le patrimoine architectural locale, car n'aboutissant qu'à la reproduction du même standard à l'infini³⁷.

Ce type d'action, peut même mener à fragiliser le bâtiment par rapport à l'action sismique comme par exemple lors de l'opération de rénovation de l'hôpital de Aziza Othmana à Tunis en 1996. Suite à la dégradation des planchers en IPN, il a été décidé de les remplacer par une dalle de 10 cm en béton armé en gardant les mêmes murs en maçonnerie, ce qui malheureusement favorise l'effet de pendule inversé [Mezgheni S, 2002].

Une démarche qui est remise en cause en Italie suite aux différents exemples qui ont démontré de la contre productivité entraînant l'effondrement des constructions. Car, à défaut d'amortir et de dissiper l'énergie, ces planchers lourds augmentent les forces sismiques.

Les opérations de restauration et de renforcement du vieux bâti doivent veiller à concilier entre les structures d'origine et les nouveaux éléments introduits. Eléments qui peuvent être mal adaptés au contexte local pour différentes raisons, telle que la différence de rigidité entre les matériaux, ou des fréquences de vibrations différents

³⁷ Ce fût le cas dans la ville historique de Kotor au Monténégro et au village de montagne de Piódau au Portugal. Dans les deux cas les planchers en bois ont été remplacés par des planchers en béton armé [Langenbach R., 1995].

entre ancien et nouveau matériau [Marichal R., 2002]. Il faut ainsi éviter d'imposer des solutions qui correspondent à d'autres logiques de constructions et de comportement actuel³⁸.

Ainsi, dans le domaine de la préservation et le renforcement du patrimoine architectural face au risque sismique, l'ingénieur doit collaborer avec différents acteurs tel que le propriétaire, l'architecte, l'entrepreneur, les spécialistes du patrimoine..., afin de répondre aux différents impératifs de cette réhabilitation³⁹.

2.5 Architecture et règlement parasismique algérien

A ce niveau, nous allons faire une lecture de la réglementation parasismique algérienne en rapport avec l'architecture. Il s'agit de chercher derrière les différentes recommandations et formules de calculs, la présence directement ou indirectement des choix inhérents à l'architecture et à l'architecte⁴⁰.

Depuis leur apparition à Los-Angeles en 1934, les règlements parasismiques n'ont pas cessé d'évoluer au gré des connaissances accumulées principalement après chaque séisme [Benouar D., 2001].

L'objectif de ces règlements, est de définir des niveaux de sécurité pour la protection des personnes, tout en fixant le seuil des pertes économiques acceptables en fonction de la nature stratégique des projets et de l'impact de leur destruction sur l'environnement : *« Les débats entre les membres du GTS étaient souvent très passionnés. Chacun d'entre eux était conscient de l'importance des problèmes posés et des conséquences des décisions à prendre. En particulier, la problématique sécurité/coûts a été un souci constant tout au long des travaux pour les membres du GTS appelés à trancher. »* [CGS, 2004, PXV].

³⁸ Dans le cas du séisme de Lorca en 2011, des bâtiments juxtaposés sans joint en maçonnerie de pierre se sont bien comportés grâce à un effet de groupe. Alors que des édifices isolés et bien plus éloignés de l'épicentre ont subi des dommages bien plus significatifs [AFPS, 2011].

³⁹ Pour plus d'informations, voir les travaux de [Allen D.E., 1999], [Kebaili B., 2009] et [Lestuzzi P. 2008B]

⁴⁰ Il est possible de classer les règlements parasismiques algériens en deux générations. Une première dont l'approche est quasiment tournée vers le domaine du génie civil (RPA81, le RPA81/Version 1983 [CGS, 1983] et le RPA88 [CGS, 1988]), et une deuxième génération avec une approche plus globale de la question parasismique en considérant que la question de la réglementation parasismique n'est pas exclusive de l'ingénierie génie civil et du calcul parasismique mais en intégrant d'autres domaines connexes (RPA99 [CGS, 1999] et le RPA99/Version 2003 [CGS, 2004]). Malheureusement, il faut noter que cette ouverture n'a intégré que de nouveaux profils d'ingénieurs, sans faire appel aux architectes [Souami M.A., 2012B].

Concrètement, ceci se matérialise par la vérification d'un certain nombre de critères qui vont justifier la sécurité du bâtiment. Une justification qui passe principalement par le calcul de la structure de l'édifice, afin qu'il puisse résister aux efforts sismiques. Un calcul qui repose fondamentalement sur l'estimation des forces sismiques auxquelles pourrait être soumis le bâtiment.

Bien que l'Algérie possède un passé sismique assez lourd - Oran 1790 (3.000 morts), Blida 1825 (7.000 morts), Chlef 1954 (1243 morts et 20.000 maisons détruites)- il a fallu attendre 1980 et le tragique événement du séisme de Chlef pour que le premier règlement parasismique algérien inspiré directement du règlement américain UBC (version de 1976) voit le jour [Belazougui M., 1993].

C'est suite à ce terrible événement, que le RPA81⁴¹ à vu le jour en 1981. Ce dernier fût assez régulièrement mis à jour avec les versions de 1983, 1988 et de 1999. Enfin, suite au séisme de 2003 de Boumerdes une dernière mise à jour a été établie, connue sous le nom de RPA99/Version 2003.

2.5.1 Justification de sécurité

Selon le règlement parasismique algérien (RPA99/version 2003), les objectifs de sécurité de la structure vis-à-vis des efforts sismiques sont considérés comme atteint si l'on a vérifié les critères suivants [CGS, 2004] :

- Résistance des éléments et de leurs liaisons : Ceci dépend entre autres de l'importance des portées, et de l'importance des porte-à-faux.
- Ductilité des sections et des éléments : Capacité d'une structure de subir avant rupture des déformations irréversibles sans perte significative de résistance sous sollicitations alternées.
- Equilibre et stabilité d'ensemble (effet P- Δ) : Capacité d'une structure à conserver sa géométrie et sa position de base. Elle est fonction de la forme géométrique en plan et en élévation, et du dispatching des masses du projet.
- Résistance des planchers : Vérification de la capacité des planchers à résister aux forces sismiques tout en assurant la transmission des efforts aux éléments de contreventements verticaux. Cette résistance est, entre

⁴¹ Règlement parasismique algérien 1981.

autres, dépendante de l'importance des percements au sein des planchers, de la proximité de ces ouvertures par rapports aux éléments de structures verticaux et des proportions des planchers.

- Stabilité des fondations : Le système de fondation doit former un ensemble résistant et rigide.
- Résistance et stabilité des éléments secondaires et des éléments non structuraux : Leur prise en charge est fondamentale sinon ceci risque de produire des effets catastrophiques tels que la transformation des composants de la façade en de projectiles dangereux pour les passants.
- Largeur des joints et déformations relatives d'étage : Ceci permet d'éviter l'effet d'entrechoquement. Ce phénomène est dépendant de l'importance de déplacement du bâtiment, lui-même dépendant de la période fondamentale du bâtiment, qui est elle-même dépendante des différents choix de l'architecte : poids, proportions de bâtiment...etc.

En résumé, sur les sept (7) justifications de sécurité que doit assurer l'édifice, cinq (5) dépendent directement ou indirectement des choix architecturaux. Effectivement, à l'exception de la ductilité et de la stabilité des fondations, l'ensemble des autres critères (5/7) sont dépendant de l'architecture du projet.

2.5.2 Choix de la méthode de calcul :

La vérification de ces différents critères de sécurité repose fondamentalement sur le calcul des efforts sismiques auxquels est soumis le bâtiment. A ce titre, le RPA99/Version 2003 propose 3 méthodes de calcul⁴² :

- Méthode statique équivalente⁴³ ;
- Méthode modale spectrale ;
- Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes.

⁴² Le règlement parasismique algérien (RPA99/Version 2003), accepte le recours à d'autres méthodes de calcul plus élaborées sous réserve de justification scientifique appropriée. Ceci dit, il n'y a aucune mention dans ce règlement sur les conditions et justifications à satisfaire pour utiliser d'autres méthodes.

⁴³ La méthode de calcul statique équivalente, est considérée comme étant la méthode la moins contraignante et donc la moins pénalisante pour le bâtiment. Elle repose sur les conceptions parasismiques les plus récentes aux États-Unis [Zeghichi L., 2005].

Le choix du recours à chacune de ses méthodes repose fondamentalement sur le respect de certaines règles de régularité⁴⁴.

En ce qui concerne la méthode statique équivalente, il est stipulé au niveau du règlement que : « *l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des dispositions constructives* » ! [CGS, 2004, P25].

Ainsi, il est sous-entendu que le recours aux méthodes de calcul parasismique dynamique n'oblige pas l'application rigoureuse des dispositions parasismiques ! Chose qui serait totalement dangereuse car, comme spécifié dans ce même règlement, le fait que la chaîne des intervenants en rapport avec le parasismique soit brisée peut annuler l'ensemble des efforts des autres acteurs de la chaîne.

A. Critères de régularité du projet en plan

Selon le règlement parasismique algérien RPA99/Version 2003, les projets architecturaux sont classés comme étant réguliers en plan si ces derniers respectent un certains nombres de critères [CGS, 2004] :

- **A1.** Le bâtiment doit être quasiment symétrique dans les deux sens par rapport à la rigidité et à la distribution des masses.
- **A2.** A chaque niveau et pour chaque direction, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne doit pas dépasser les 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

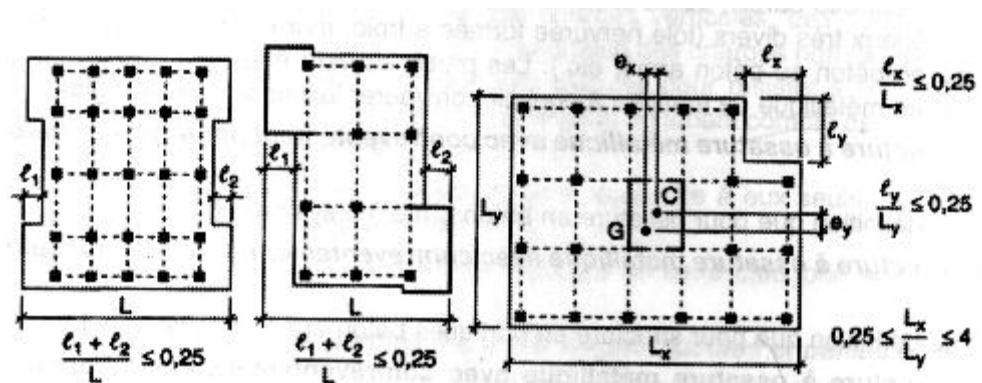


Fig. 20 : Conditions de régularités en plan par rapport aux proportions, les retraits et les saillies [CGS, 2004].

⁴⁴ Pour ce qui est de la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes, le recours à cette dernière dépend aussi de la disponibilité d'un personnel qualifié pour le calcul avec cette méthode.

- **A3.** La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur/largeur du plancher inférieur ou égal à 4. De plus, la somme des saillis et des rentrants du bâtiment dans une direction ne doit pas excéder les 25% de la dimension totale du bâtiment dans cette direction(Fig.20).
- **A4.** Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis à vis de celle des contreventements verticaux. Dans ce cadre, la surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de celle de ce dernier.

Au final, l'ensemble de ces critères relève soit, exclusivement de l'architecture (rapport de proportions largeur/longueur, retraits et saillies, pourcentages du vide dans les planchers) ou indirectement (symétrie des masses et des rigidités, superposition du centre de rigidité et du centre des masses).

Effectivement, en ce qui concerne la distribution des masses, cette dernière relève entre autres des prérogatives de l'architecte grâce à l'organisation et le dispatching des espaces et donc des charges d'exploitations, mais aussi du choix des différents matériaux et équipements du projet et donc de leurs poids.

Pour ce qui est de la rigidité, cette dernière est dépendante, entre autres, de la masse, de la nature des matériaux –choisie par l'architecte- mais aussi de l'inertie qui est, dépendante principalement de la forme du projet et de ses dimensions.

En bref, les critères de régularité en plan, sont principalement inhérents à des choix architecturaux.

B. Critères de régularité du projet en élévation

Selon le règlement parasismique algérien RPA99/Version 2003, un projet architectural est considéré comme régulier en élévation si ce dernier respecte les critères suivants [CGS, 2004] :

- **B1.** Les éléments de contreventements verticaux doivent être continus sans interruption jusqu'à la fondation.
- **B2.** La raideur et la masse entre les niveaux doit rester constante ou alors diminuer de manière progressive sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.
- **B3.** Le rapport masse/rigidité entre deux niveaux successifs ne doit pas varier de plus de 25% dans chaque direction de calcul.

- **B4.** Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan entre deux niveaux successifs ne doit pas dépasser les 20% dans les deux directions de calcul. Le rapport entre la plus grande dimension de plan et la plus petite dans la même direction ne doit pas être inférieur au 2/3 (Fig.21).

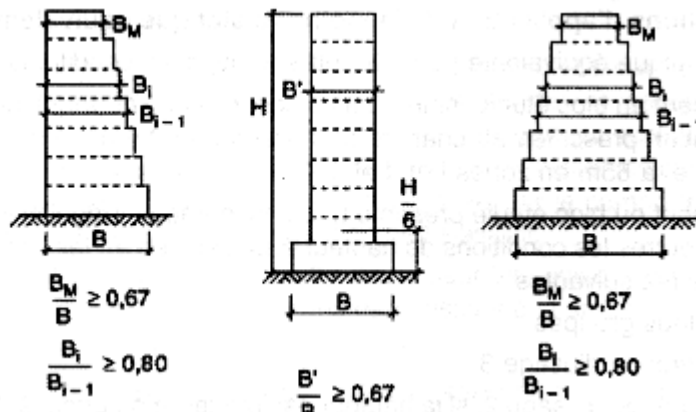


Fig. 21 : Conditions de régularités en élévation par rapport aux retraits entre les niveaux [CGS, 2004].

Il est à noter, que les petits volumes sur la toiture, tels que buanderies, salle de machines d'ascenseurs...etc. peuvent ne pas respecter les règles B3 et B4 et être calculés comme des éléments secondaires.

Encore une fois, on relève que les critères de la régularité en élévation sont quasiment tous dépendants de l'architecture.

Le critère B1, consiste en une directive qui va s'imposer à l'organisation de l'espace architectural. Mais pour ce qui est des trois autres directives, ces dernières relèvent soit exclusivement de l'architecture (B4, rapport de retrait entre les différents niveaux) soit sont en rapport avec l'architecture (B2 et B3, changement progressif de la masse, de la raideur ou du rapport masse/rigidité entre deux niveaux).

Or, comme explicité précédemment, la distribution des masses est fortement dépendante des prérogatives de l'architecte. Il en est de même que pour la rigidité.

2.5.3 Méthode statique équivalente :

Cette méthode remplace les forces réelles dynamiques exercées par le séisme, par un système de forces statiques équivalent. La valeur de cette force sismique dite (V) est obtenue grâce à la formule suivante [CGS, 2004] :

$$V = \frac{A \times D \times Q \times W}{R} \quad (1)$$

- **A** : Coefficient d'accélération de la zone d'intervention. Sa valeur varie en fonction du niveau de sismicité de la zone d'intervention, ainsi que du groupe d'usage auquel appartient le projet. Il est totalement indépendant des choix de l'architecte ou de l'ingénieur génie civil.
- **D** : Facteur d'amplification dynamique moyen. Il est fonction de la période fondamentale de la structure⁴⁵(T), du facteur de correction d'amortissement (η) et de la catégorie du site.

Le facteur (D) est calculé de trois manières différentes en fonction de la valeur de la période du bâtiment en comparaison avec une période caractéristique associée à la catégorie du site appelé T₂.

- La valeur de T₂ est donnée par le règlement parasismique indépendamment des choix de l'architecte et de l'ingénieur.
- Pour ce qui est du facteur d'amortissement (η), ce dernier est calculé grâce à la formule de :

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0.7 \quad (2)$$

(ξ) étant le pourcentage d'amortissement critique en fonction du type de structure du type de matériau utilisé et de la densité de ce dernier. Autant de critères qui sont directement dépendant du choix de l'architecte exclusivement ou en concertation avec l'ingénieur.

- En ce qui concerne le calcul de la période fondamentale de la structure (T), cette dernière peut être estimée grâce à deux formules empiriques :

$$T = C_T h_N^{3/4} \quad T = 0.09 h_N / \sqrt{D} \quad (3)$$

où h_N est la hauteur de l'immeuble, D la longueur de l'immeuble dans le sens du calcul, est C_T coefficient dépendant du système de contreventement, et du type de remplissage.

⁴⁵ On retrouve assez souvent au niveau du RPA99/Version 2004 la désignation du projet sous le nom de structure ! Un lapsus assez révélateur à notre sens sur l'idéologie de ce règlement, à savoir la prédominance de l'engineering sur l'architecture.

En bref la quasi-totalité des paramètres rentrant dans le calcul empirique de la période propre sont dépendant des choix architecturaux⁴⁶.

- **R** : Coefficient de comportement global de la structure. Il est donné par le règlement parasismique comme valeur unique en fonction du système de contreventement.

Un système de contreventement dont le choix devrait dépendre d'une concertation au moins entre l'architecte et l'ingénieur.

- **Q** : Facteur de qualité dont la valeur est dépendante de 6 paramètres. L'absence de vérification de chacun de ces paramètres, conduit à une majoration entre 5 et 10 pour cent de la valeur de l'effort sismique total.

Ces six paramètres sont :

- Conditions minimales sur les files de contreventement ;
- Redondance en plan ;
- Régularité en plan ;
- Régularité en élévation ;
- Contrôle de la qualité des matériaux ;
- Contrôle de la qualité de l'exécution.

A l'exception des deux paramètres qui dépendent du professionnalisme du maître de l'ouvrage, de l'entreprise de réalisation, du suivi de l'architecte et de l'ingénieur, l'ensemble des autres paramètres sont soit exclusivement dépendants de l'architecture du projet, soit établis suite à une concertation entre l'architecte et l'ingénieur.

Il est important de relever le danger que peut constituer la tolérance par la réglementation algérienne d'une absence de suivi et d'un contrôle assidu de la construction.

Effectivement, on relève dans le cadre du RPA qu'en cas de non observation du suivi de la réalisation du projet ou d'absence de contrôle de la qualité des matériaux, il suffit au niveau du calcul de l'effort

⁴⁶ Selon Charleson, les facteurs les plus importants dans la détermination des périodes propres des bâtiments sont la hauteur, le poids et le type de structure [Charleson A., 2008].

sismique d'avoir recours à une pénalisation par la majoration de l'effort de l'ordre de 10% pour le suivi de chantier, et de 5% pour la qualité des matériaux ! [CGS, 2004]⁴⁷.

Il est tout à fait acceptable de comprendre ou de justifier une telle démarche de pénalisation dans le cas de la vérification et de l'estimation de la vulnérabilité d'un édifice existant, mais ceci est extrêmement dangereux dans le cas de projet en cours de réalisation, comme nous le rappelle Kebaili : « *Ce qui doit nous inciter à de plus de contrôle contrairement à la réglementation Algérienne qui tolère cette pratique moyennant une pénalisation au niveau de l'effort sismique par le facteur Q magique qui se substitue aux règles de l'art et à l'ingénieur. Or aucune pénalité au monde ne peut se substituer au contrôle de l'exécution et des matériaux et aucune structure ne peut être jugée parasismique sans ces deux missions* » [Kebaili B., 2009, P166].

Un avertissement qui, bizarrement, est rappelé en introduction du règlement parasismique par le groupe de travail spécialisé (GTS) mis en place pour la mise à niveau de la réglementation parasismique algérienne : « *Le GTS considère que si des amendements et des enrichissements sont apportés à la réglementation parasismique en vigueur pour l'améliorer et l'actualiser progressivement sur la base des expériences et des résultats des études et des recherches réalisées, il va sans dire que ces efforts sont vains si leur application n'est pas effective et rigoureusement suivie par les différents intervenants dans l'acte de bâtir.* » [CGS, 2004, Pv].

Cette démarche a d'ailleurs montré ses limites malheureusement à chaque séisme. Les différentes enquêtes post-sismiques en Algérie ont à maintes reprises fait ressortir que la pénalisation de l'effort sismique par des coefficients n'a pas empêché des dommages importants dans les constructions à cause de la mauvaise qualité des matériaux et de l'absence d'observation des prescriptions constructifs lors de la réalisation.

⁴⁷ Des travaux de recherches ont relevé d'autres limites du RPA, tel que le travail de Belkheir qui a démontré l'existence de dispositions préférentielles pour l'emplacement des voiles permettant une meilleure performance sismique. Or justement le RPA, ne propose pas d'article en ce qui concerne la disposition des voiles [Belkheir M.A., 2012].

A titre d'exemple, lors du séisme du Boumerdes en 2003, le système structurel qui a le plus souffert est le portique auto-stable. Or ce dernier est l'un des systèmes constructifs les plus prisés dans les zones sismiques vu ses performances parasismiques [Afra H., 2003].

Cette état de fait d'après Afra est dû à un ensemble de défaillances liées à la réalisation telle que l'absence des armatures en zone nodale, ou la mauvaise qualité du béton : « *Cependant, il est à signaler que les procès-verbaux d'écrasement réalisés par les laboratoires d'essais mentionnent clairement et avec insistance que l'éprouvette écrasée a été confectionnée et fournie par l'entrepreneur ; ce qui laisse entendre que le béton ayant servi pour confectionner l'éprouvette, n'est pas forcément celui qui a été utilisé lors du coulage des éléments de structure.* » [Afra H., 2003, P628]⁴⁸.

A notre sens, l'existence même de ces deux facteurs de qualité (contrôle de la qualité du matériau et de la qualité de l'exécution) au sein du règlement parasismique, constitue en soi non pas un coefficient de sécurité, mais au contraire un facteur de risque ! Ceci constitue officiellement une tolérance inacceptable au sein du règlement parasismique.

Effectivement, comme le rappelle le règlement lui-même, tous les efforts de l'ensemble des acteurs sont vains si un maillon de la chaîne n'est pas respecté. Dans ce cas bien précis, nous parlons du maillon le plus important à savoir celui de la réalisation et de la construction. Car, à quoi bon respecter toute la chaîne si à la fin, la réalisation n'assure pas la concrétisation de tous les dispositifs de sécurité. C'est malheureusement le constat fait lors des différentes enquêtes post-sismiques, ou il s'est avéré que la plupart des erreurs qui ont conduit à l'endommagement des bâtiments sont de nature conceptuelle ou constructive⁴⁹.

- **W** : Poids total de la construction. A savoir le poids des charges permanentes que celui des charges d'exploitation pondérées par un

⁴⁸ Voir aussi différents travaux de Belazougui [Belazougui M., 2003], [Belazougui M., 1990].

⁴⁹ Lors du séisme du 17 août 1999 à Kocaeli en Turquie d'une magnitude supérieure à 7 sur l'échelle Richter, des constructions traditionnelles se sont bien mieux comportées face au séisme que des constructions récentes du fait qu'elles aient été réalisées avec des matériaux de qualité et une bonne qualité d'exécution [Gülhan D., 2000]

coefficient en fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation.

Ce facteur est lui aussi directement dépendant des choix de l'architecture, aussi bien dans le choix des matériaux et des équipements que sur la distribution des charges d'exploitations.

En résumé, il semblerait que le calcul de l'effort sismique total, -à l'exception du facteur lié à la nature du sol- est soit exclusivement dépendant des choix de l'architecte, soit en concertation entre ce dernier et d'autres intervenants de l'acte de bâtir principalement les ingénieurs.

En bref, le calcul de l'effort sismique repose essentiellement sur des choix architecturaux.

2.5.4 Méthode dynamique modale spectrale :

Les forces sismiques sont représentées dans cette méthode par un spectre de réponse de calcul. Ce dernier, selon le RPA, est dépendant des paramètres suivants :

- **A** : Coefficient d'accélération de la zone (donné par le règlement) ;
- **η** : Facteur de correction d'amortissement dépendant de ξ ;
- **ξ** : Pourcentage d'amortissement critique (donné par le règlement) ;
- **R** : Coefficient de comportement de la structure (données par le règlement) ;
- **T₁, T₂** : Périodes caractéristiques dépendantes de la catégorie du sol (données par le règlement).
- **Q** : Facteur de qualité.

Ces différents paramètres comme nous les avons déjà identifié, sont à l'exception du coefficient d'accélération de la zone (A) et des périodes T₁ et T₂, fortement dépendant des choix architecturaux.

2.5.5 Eléments secondaires

Bien que les différents séismes ont fait ressortir l'impact négatif que peuvent jouer les éléments secondaires principalement les murs en maçonnerie lors d'un tremblement de terre, nous relevons malheureusement, le manque voire l'absence de la prise en compte de ce dernier au sein de la réglementation : « *Or, la pratique*

courante a montré que les maçonneries fabriquées en Algérie sont beaucoup plus rigides par rapport aux valeurs supposées dans le dimensionnement. La mise en œuvre des murs en maçonneries en doubles paroi confère une rigidité encore plus importante aux murs de sorte que la déformation supposée du cadre du portique est largement gênée ; ce qui modifie le processus de rupture envisagé lors de la conception. Les portiques sont alors endommagés en subissant des éclatements aux niveaux des zones nodales. » [Afra H., 2003, P627].

Citons aussi l'exemple des poteaux-courts. Ces derniers constituent l'un des facteurs d'endommagement récurrents lors d'un séisme. Or le RPA limite quasiment l'apparition de ce phénomène aux éléments de structure. Malheureusement, dans la réalité des faits, ce phénomène peut être aussi provoqué par des éléments non structuraux : « *La présence des poteaux courts dans une structure peut résulter soit de sa conception initiale, soit de la présence d'éléments rigides (structuraux ou non) mis en place après la construction et limitant leur déformée.* » [AFPS, 2011, P369].

2.6 L'approche sismique du bâti ancien en Algérie : Une vision réductrice

Un des éléments nous permettant d'apprécier la limitation de l'approche concernant la réhabilitation du vieux bâti vis-à-vis de l'action sismique, ce sont bien les fiches d'évaluation post-sismique et les fiches d'évaluation de la vulnérabilité du vieux bâti.

Il est important de faire la différence entre les fiches d'évaluation post-sismique et celles réalisées pour les diagnostics de l'état du vieux bâti. Les premières permettent, dans le cadre d'enquêtes effectuées juste après un séisme, d'estimer rapidement en cas de réplique le danger qu'encourt l'immeuble dont la solidité a été peut-être ébranlée lors de la secousse principale.

Les deuxièmes fiches sont utilisées dans le cadre d'enquêtes pour le diagnostic de la vulnérabilité du vieux bâti dans l'absolu. Ces enquêtes ne sont pas réalisées dans l'urgence contrairement aux enquêtes post-sismique. Elles ont pour objectif d'évaluer la capacité de réaction d'un immeuble lors d'un séisme d'une intensité spécifique qui pourrait advenir dans un avenir proche ou lointain.

La lecture de ces deux fiches pour le cas de l'Algérie, fait ressortir une dominance des facteurs liés au domaine de l'engineering, avec une quasi-absence des critères architecturaux.

Ceci peut être compréhensible pour ce qui est des fiches d'évaluation post-sismique mais en aucun cas en ce qui concerne l'évaluation de la vulnérabilité.

Effectivement, les deuxièmes ont pour but la mise en place de stratégies d'actions pour la préservation du cadre bâti en identifiant les causes ou facteurs de fragilisation de ce cadre lors d'un séisme. Or, ces facteurs sont justement de différentes natures et appartiennent à différents domaines. Ce qui normalement devra conduire à la proposition de fiches d'évaluation plus synthétiques et surtout plus exhaustives.

2.6.1 Etude de vulnérabilité du vieux bâti d'Alger

A. Vulnérabilité à l'échelle urbaine :

En ce qui concerne l'identification de la vulnérabilité urbaine au risque sismique de la ville d'Alger, l'équipe de recherche de JICA et du CGS⁵⁰, a pris en considération six classes de facteurs :

1. Densité de la population ;
2. Âge du bâtiment ;
3. Valeur économique ;
4. Mouvement potentiel de la surface de sol ;
5. Risque de rupture de terrain en pente ;
6. Facilité d'évacuation et de secours.

Dans un premier temps, chacun de ces critères a été évalué par commune puis classé selon une échelle d'évaluation allant de 1 à 5. Dans un deuxième temps, ces différents critères ont été croisés entre eux afin de déterminer la vulnérabilité de chaque site.

Cette manière de procéder, a permis aux enquêteurs d'identifier cinq groupes de communes de la région d'algéroise en fonction du degré de leur vulnérabilité urbaine face au séisme.

⁵⁰ Dans le cadre de l'évaluation du risque sismique de la ville d'Alger, une étude a été confiée par le gouvernement algérien à la la Japan International coopération Agency (JICA) qui l'a été confié à OYO International Coopération, bureau Japonais spécialisé dans les études de risque sismique dans les sites urbains en collaboration avec le CGS et d'autres institutions algériennes.

- **Groupe I :** Présence d'un nombre important de vieux bâtiments construits avant 1981. Ils sont considérés comme relativement fragiles car réalisés sans recours à des normes parasismiques de la construction.
- **Groupe II :** Ces communes regroupent des zones économiques importantes identique au groupe I, mais avec une densité démographique assez élevée et des difficultés plus importantes pour l'évacuation et l'intervention des secours.
- **Groupe III :** Ce sont des communes situées sur des terrains en pente avec un risque important de rupture de terrains. Elles souffrent aussi de difficultés d'intervention des secours et de l'évacuation des personnes.
- **Groupe IV :** Son l'importance économique varie de modérée à élevée, possède un potentiel important de mouvement de la surface de sol.
- **Groupe V :** La vulnérabilité urbaine des communes de ce groupe varie de faible à modérée.

| Groupe | Code | Commune | Densité démographique | Âge de bâtiment | Valeur économique | Potentiel de mouvement de la surface de sol | Risque de rupture de terrains en pente | Difficulté d'évacuation /secours |
|--------|------|----------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|---|--|----------------------------------|
| I | 1601 | ALGER CENTRE | M | E | E | M | M | F |
| | 1610 | EL BIAR | F | E | E | M | E | M |
| | 1627 | EL MOURADIA | F | E | E | M | E | M |
| | 1617 | HUSSEIN DEY | F | E | E | E | M | M |
| | 1631 | EL MAGHARIA | M | E | E | E | M | M |
| | 1609 | BIR MOURAD RAIS | F | M | E | M | M | M |
| | 1618 | KOUBA | F | M | E | M | M | M |
| | 1619 | BACH DJERAH | M | M | E | E | M | M |
| | 1616 | BOUROUBA | M | M | E | E | M | M |
| II | 1605 | BAB EL OUED | E | E | E | F | M | F |
| | 1604 | HAMMA EL ANNASSER | M | E | E | M | M | F |
| | 1602 | SIDI M'HAMED | M | E | E | M | M | F |
| | 1607 | CASBAH | E | E | E | F | M | M |
| | 1603 | EL MADANIA | M | E | M | M | E | M |
| III | 1606 | BOLOGHINE IBNOU ZIRI | M | E | E | F | E | E |
| | 1608 | OUED KORICHE | M | E | E | F | E | E |
| | 1628 | HYDRA | F | E | M | M | E | E |
| | 1612 | BIRKHADEM | F | M | E | M | M | E |
| | 1625 | RAIS HAMIDOU | F | F | M | F | E | E |
| | 1611 | BOUZAREAH | F | M | M | F | E | M |
| IV | 1629 | MOHAMMADIA | F | M | E | E | F | F |
| | 1615 | OUED SMAR | F | M | E | E | F | F |
| | 1621 | BAB EZZOUAR | M | M | E | E | F | F |
| | 1613 | EL HARRACH | F | E | M | E | F | F |
| | 1630 | BORDJ EL KIFFAN | F | F | M | E | F | M |
| | 1620 | DAR EL BEIDA | F | F | M | E | F | M |
| | 1626 | DJASR KACENTINA | F | F | M | E | M | M |
| V | 1622 | BEN AKNOUN | F | F | E | M | M | F |
| | 1623 | DELY BRAHIM | F | F | M | M | M | F |
| | 1639 | BORDJ EL BAHRI | F | M | F | M | F | F |
| | 1640 | EL MARSA | F | M | M | F | M | F |
| | 1624 | HAMMAMET | F | M | F | F | M | M |
| | 1644 | AIN BENIAN | F | M | F | M | M | M |
| | 1632 | BENI MESSOUS | F | F | M | M | M | M |

E: Élevé. M: Modéré. F: Faible

Tab. 2 : Tableau de synthèse de l'enquête de vulnérabilité de l'évaluation du risque sismique de la ville d'Alger [JICA, 2006].

L'étude à fait ressortir que la ville d'Alger possède une grande vulnérabilité vis-à-vis du risque sismique. Cette vulnérabilité due au vieillissement des bâtiments mais surtout à leur manque d'entretien (Tab.2), est plus importante au niveau des anciens quartiers tels que la Casbah, Alger centre, Bab-El-Oued, 1er mai, Hussein-Dey,...etc.. A ceci, s'ajoute encore la difficulté d'accès à ces quartiers en cas d'évacuation, à cause de l'étroitesse de leurs rues.

B. Vulnérabilité à l'échelle du bâti :

Le patrimoine architectural algérois 1830-1930 souffre aujourd'hui d'un état de dégradation assez avancé et quasi-continu qui est dû à différents facteurs⁵¹.

Parmi les causes qui reviennent le plus souvent dans les différents rapports d'expertises ou d'études sur la vulnérabilité du vieux bâti d'Alger, on peut citer l'occupation illicite des immeubles au niveau des terrasses et des caves. Deux endroits, où semble se concentrer les pathologies de la construction du vieux bâti d'Alger.

Ces différentes occupations ont engendré non seulement des surcharges de poids non prévues par les concepteurs d'origine mais surtout ont provoqué des désordres au sein des immeubles.



Fig. 22 : Présence d'humidité dans les caves à causes des infiltrations et des inondations [CENEAP & CTC, 2007].

⁵¹ Un état de dégradation tel, qu'il a poussé la wilaya d'Alger, à lancer en septembre 2006 un projet important pour le diagnostic technique et socio-économique de l'hypercentre urbain d'Alger. Un projet confié conjointement au centre national d'études et d'analyses pour la population et de développement (CENEAP), et l'organisme national de contrôle technique du bâtiment (CTC) centre, et dont l'un des objectifs principaux est l'identification de la vulnérabilité du vieux bâti [CENEAP & CTC centre, 2007].

Les nouveaux occupants ont cherché à se brancher illégalement au niveau des réseaux d'évacuations. Ces différents branchements se sont réalisés sans faire appel à un cadre réglementaire ni à des professionnels du métier. Ce qui malheureusement a entraîné la multiplication des désordres au sein des bâtiments tels que l'infiltration des eaux dans les murs porteurs en maçonnerie (Fig.22).

Une infiltration qui attaque aussi le système porteur des planchers et des balcons, qui sont constitués pour une bonne partie en voutains de maçonnerie remplie de tuf ou de sable et avec des IPN métalliques. Des IPN qui subissent une détérioration assez avancée due à la corrosion du métal (Fig.23).

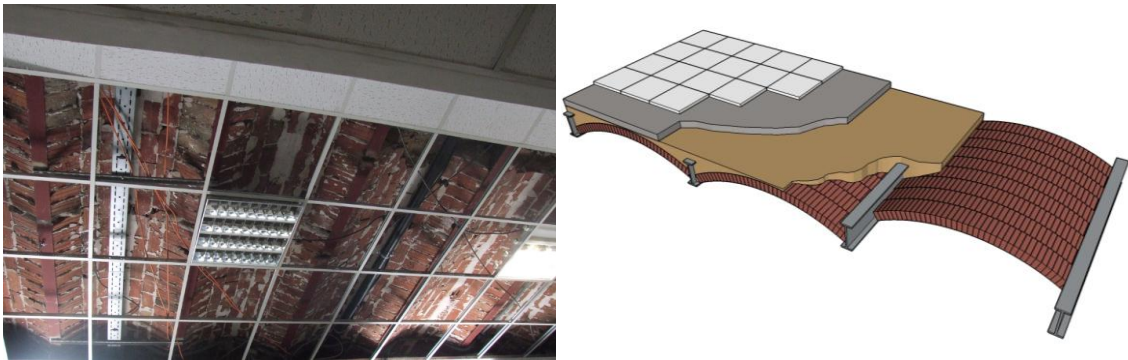


Fig. 23 : Exemple d'un plancher en voutain (Crédit photo : Souami M.A., Djennane W.).

L'étude de diagnostic sur le vieux bâti réalisée en 2007 pour le compte de la wilaya d'Alger⁵² (Fig.24), a classé les immeubles expertisés en quatre (4) classes en fonction de leur niveau de dégradation [CENEAP & CTC centre, 2007] :

- **Classe 1** : Dégradation mineure qui correspond à un état correct de la construction ne présentant que des désordres légers facilement réparables
- **Classe 2** : Dégradation moyenne se manifestant par des désordres plus ou moins importants mais localisés. L'intervention serait moyenne
- **Classe 3** : Dégradation moyenne correspond à un état critique de la construction. L'intervention serait lourde.
- **Classe 4** : Dégradation très avancée correspond à un état de délabrement très avancé et généralisé de la construction ou immeuble menaçant ruine (IMR).

⁵² Ce diagnostic réalisé dans sa première tranche sur sept (7) communes considérées comme prioritaires et a concerné 17.617 immeubles.

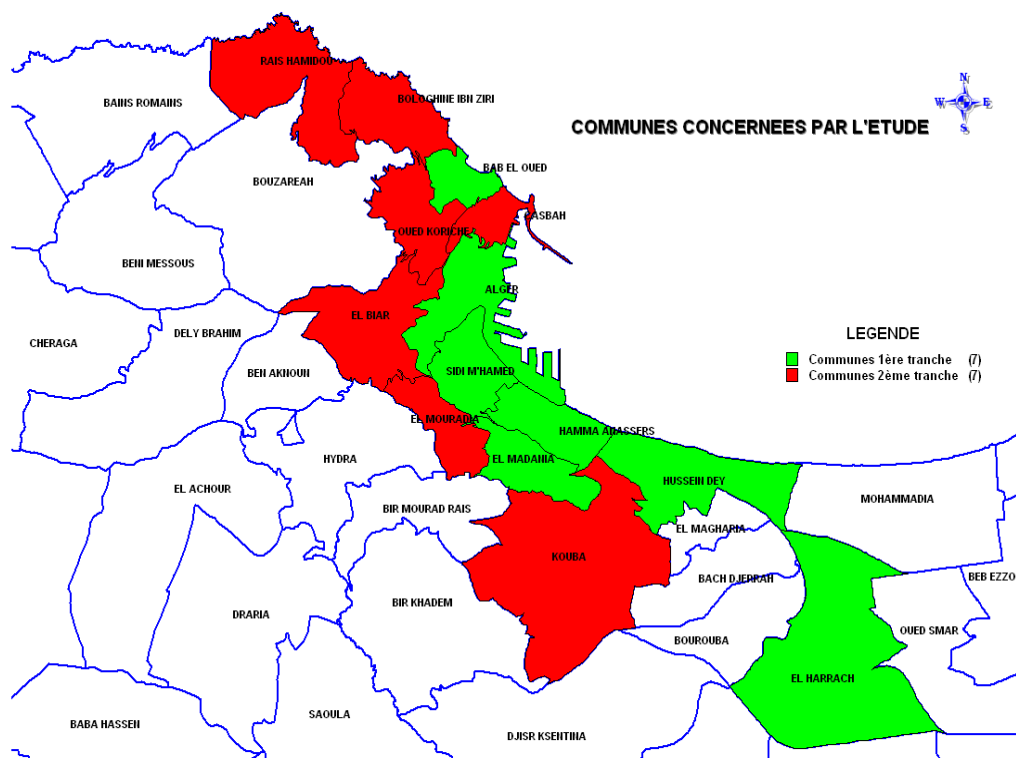


Fig. 24 : Identification des communes impliquées dans le diagnostic sur le vieux bâti réalisé pour le compte de la wilaya d'Alger. Durant la première phase, 7 communes considérées comme prioritaires ont été concernées par cette étude. A savoir : Alger Centre, Belouizdad, Bab El Oued, El Harrach, El Madania, Hussein Dey et Sidi M'Hamed [CENEAP & CTC centre, 2007].

Sur les 17617 immeubles expertisés, 259 -à savoir 1,5%- du parc immobilier ont été classé en classe 4 menaçant ruine, pour 15,2% en classe 3, 45% en classe 2 et 37,8% en classe 1⁵³.

Ainsi, sur l'ensemble du parc immobilier étudié, la situation est considérée comme relativement moyenne. Car en effet seul 2% du parc est considéré comme des immeubles menaçant ruine et 15,2% sont des immeubles en situation nécessitant des interventions de confortement lourdes.

Différentes raisons explicitent la dégradation du vieux bâti d'Alger [CENEAP & CTC centre, 2007] :

- L'eau sous toutes ses formes : pluviale, ménagère, souterraine ;
- Manque et absence d'entretien ;

⁵³ 86 immeubles, ce qui représente 0,5% ont été classés dans une catégorie précaire sans avoir la moindre explication sur les niveaux de dégradation de cette catégorie, à part le fait que c'est un niveau de dégradation encore plus catastrophique que la classe 4.

- Transformations anarchiques opérées sans aucune étude préalable (surélévation, extension, suppression, changement d'usage, scellement) ;
- Incivisme des usagers ;
- Vieillesse des matériaux ;
- Taux d'occupation élevé des logements ;
- Etanchéité des terrasses défectueuse ;
- Différentes catastrophes naturelles qu'a connu la région d'Alger (séismes de Tipaza 1989, séisme d'Alger 1996, inondations de Bab El Oued en 2001 et le séisme de Boumerdes en 2003).

Ainsi, le séisme ne constitue qu'une des multiples raisons qui interviennent dans la dégradation du vieux bâti d'Alger. D'ailleurs, selon M. Milat⁵⁴, le manque d'entretien de ces immeubles constitue la principale raison de détérioration de ce patrimoine, avec comme coupable désigné à différentes reprises, l'eau.

L'eau de pluie malheureusement conduit à développer, partout où il passe un cadre végétal qui est responsable de différents dommages. Les brèches ainsi créées dans les murs en maçonnerie, favorisent l'épanouissement d'une végétation de fontaine et de mousses. Ce qui conduit à se développer tout le long de ces zones humides, une végétation assez dense qui va à son tour fixer plus d'humidité dans une logique de cercle vicieux interminable [Adam J-P, 1983].

Ceci, sans compter sur le risque de dépôt de graine au niveau des fissures, ce qui risque d'entraîner l'apparition de plantes dont les racines vont s'infiltrer au sein de la maçonnerie en détériorant la stabilité de ces murs [Sanpaolesi P., 1973].

Ce coupable qui est l'eau, devient avec le manque d'entretien encore plus grave quand ce vieux bâti est exposé à des agents externes telle que la proximité de la mer qui favorise et accélère la détérioration de ces immeubles.

A titre d'exemple, l'étude de vulnérabilité du vieux bâti d'Alger, a fait ressortir que les immeubles se trouvant en hauteur éloignés de la mer tels que ceux du quartier El-Madania, étaient en meilleurs état que ceux se trouvant directement à proximité de la mer du côté de Bab El-Oued, Alger Centre, Belcour...etc [CENEAP&CTC centre, 2007].

⁵⁴ Entretien réalisé avec M. Milat ancien ingénieur CTC qui a participé à l'enquête sur le diagnostic du vieux bâti d'Alger réalisée pour le compte de la wilaya d'Alger en 2007. Entretien réalisé le 22/12/2014.



Fig. 25 : Détérioration et manque d'entretien du patrimoine 1830-1930. Prolifération d'une végétation sauvage (Crédit photo : Souami M.A.).

Certes, d'autres facteurs comme le séisme participent à la dégradation de ce patrimoine. Mais en réalité, ces facteurs exogènes, ne constituent aux dires des experts que la goutte d'eau qui fait déborder le vase. Un facteur comme le séisme, ne fait qu'achever le travail de destruction largement entamé par le mauvais, voire l'absence d'entretien de ces immeubles (Fig.25).

Pour preuve, l'enquête sur le diagnostic du vieux bâti sur 17.617 immeubles, n'a fait ressortir que 259 immeubles menaçant ruines (IMR), et ceci malgré le vieillissement important de ce parc immobilier, le manque flagrant de son entretien, sa réalisation sans recours à un règlement parasismique et le fait qu'il ait subi à différentes reprises des séismes modérés.

Ainsi, ce vieux bâti dont l'âge varie entre 100 et 150 années souffre d'un laisser-aller général de la part de ses locataires. Ces édifices se retrouvent ainsi livrés à eux même, avec de temps à autre quelques opérations de ravalement de façade.

L'absence d'un cadre juridique qui obligerait les uns et les autres à certaines obligations, conduit à ce que ce soit les parties communes, comme la cage d'escaliers, la terrasse ou la cave qui deviennent les espaces les plus affectés [Baba-Ahmed T., 2013].

Mais, même dans le cas d'opération de mise à niveau des réseaux par exemple, ces opérations deviennent l'occasion de la détérioration de ce vieux bâti. A titre d'exemple, l'opération de rénovation du réseau en eau potable du quartier Larbi Ben M'Hidi, a conduit malheureusement à la détérioration du cadre bâti. Effectivement, la mauvaise exécution, ainsi que le manque de connaissance de ce cadre bâti a mené à l'apparition de fuite d'eau, de saignées dans les murs...etc. [Baba-Ahmed T., 2013].

Il en ressort qu'une opération de réhabilitation du vieux bâti, afin de réduire sa vulnérabilité vis-à-vis du risque sismique, ne passe pas obligatoirement par le renforcement de sa structure, mais par l'élimination de la cause de sa détérioration.

C'est à ce titre, que dans la commune de Noto en Sicile, parmi les mesures prises pour réduire la vulnérabilité du bâti face au séisme, on peut noter la protection contre les intempéries avec la réalisation de toiture de protection [Chaillou A., 2003].

2.7 Etudes et recherches sur la vulnérabilité du vieux bâti

Vu l'importance du parc immobilier du vieux bâti, et du rôle centralisant qu'il joue dans nos vies de tous les jours (cadre vie, attractivité touristique, mémoire et identité...), de nombreuses études menées de par le monde, ont cherché à préserver ce patrimoine architectural en évaluant leur degré de vulnérabilité.

En général, les études de vulnérabilité en zone sismique se fixent les objectifs suivants [Ikhlef A., 2000] :

- Evaluation de la vulnérabilité et de ses causes ;
- Produire une démarche simple pour l'évaluation rapide et efficace de la vulnérabilité ;
- Produire des recommandations pour pallier le plus efficacement possible à la réduction de la vulnérabilité du vieux bâti ;
- Participer à la mise en place de stratégies d'interventions en fonction de moyens et objectifs à atteindre pour la réhabilitation.

Différentes études ont été mises en place, afin d'estimer la vulnérabilité grâce au développement des courbes qui rendent compte du degré de vulnérabilité du bâti existant « *Les courbes de vulnérabilité expriment le taux de dommage que pourrait subir une certaine classe de bâtiments à différentes intensités du séisme. Ces courbes sont fonction du système constructif (matériaux, type de structure,...) et des caractéristiques des sols sur lesquels est bâtie la ville.* » [Djaalali F., 2003A, P396].

L'évaluation de la vulnérabilité sismique repose fondamentalement sur le recueil des données suite à des enquêtes post-sismiques. C'est pour cette raison qu'il est important qu'en amont de toute étude de vulnérabilité, de procéder à un travail d'enquête in-situ avec des fiches techniques qui renseignent efficacement et rapidement sur la présence et l'état des différents composants pouvant intervenir sur la bonne tenue du bâti lors d'un séisme.

La démarche de mise en place des courbes de fragilité repose sur quatre étapes [Nollet M-J., 2009] :

1. Caractérisation structurale du bâtiment selon des classes typologiques (matériau, système structural, système de résistance latérale, etc.) ;
2. Modélisation et analyse de la structure dans le domaine non linéaire pour obtenir une courbe de réponse (courbe de capacité statique ou courbe de réponse dynamique) ;
3. Identification de points d'états limites caractéristiques représentant l'initiation de différents niveaux de dommages ou niveaux de performance ;
4. Construction de la courbe de fragilité par la mise en commun de la courbe de réponse et de la demande sismique.

Comme on peut le constater, la formulation de ces courbes de fragilité repose fondamentalement sur le comportement de la structure et la résistance des matériaux. Elle ne tient malheureusement pas compte ou pas assez, de l'impact de la conception architecturale.

2.7.1 L'approche de Benedetti :

A travers ses travaux, Benedetti a cherché à identifier la vulnérabilité des constructions en maçonnerie en Italie, en faisant appel aux indices de vulnérabilité qui caractérisent le niveau d'endommagement que risque de subir un bâtiment en cas de séisme. Ceci consiste à identifier un ensemble de facteurs intervenant dans la fragilisation ou la bonne tenue d'un édifice lors d'un séisme et d'affecter ces différents facteurs par une valeur. Chacun de ces facteurs sera affecté d'un coefficient de pondération en fonction de son importance [Benedetti, 1992]⁵⁵.

La somme des valeurs de tous les facteurs nous donnera à la fin l'index de vulnérabilité, qui indiquera le niveau de vulnérabilité de la construction.

Ces différents facteurs sont selon Bendetti [Djaalali F., 2003B]:

- Connexion de murs ;
- Types de murs ;

⁵⁵ Voir aussi [Benedetti, 1985].

- Conditions de sol ;
- Résistance totale au cisaillement ;
- Régularité en plan ;
- Régularité en élévation ;
- Diaphragme horizontal ;
- Toiture ;
- Détails ;
- Maintenance.

Notre travail de thèse, s'inscrit dans le même esprit. Bien qu'il n'est pas question pour nous d'identifier les courbes de vulnérabilité du corpus étudié, mais l'identification de l'impact de certains dispositifs architecturaux permettra d'enrichir cette approche avec de nouveaux facteurs. Ce qui, à notre sens, améliorera l'évaluation de la vulnérabilité de ce patrimoine.

2.7.2 L'approche FaMIVE :

L'approche FaMIVE (Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation) mise en place par D'Ayala et Seranza, permet par croisement avec des mécanismes effondrements, d'identifier les différentes formes de défaillances qui peuvent survenir lors d'un tremblement de terre [D'Ayala D., 2003].

Plus précisément, elle consiste en un logiciel qui, à travers l'analyse statique équivalente des murs extérieurs d'un bâtiment en maçonnerie, permettra de prédire aussi bien la charge maximale et le mode de rupture possible de ce bâtiment [Merazka S., 2012].

2.7.3 Contexte algérien :

Différents travaux de recherches, en équipe ou individuellement, ont cherché à identifier les courbes de vulnérabilité du vieux bâti de la ville d'Alger. D'une manière générale, ces dernières se sont appuyées sur l'approche de Benedetti, en cherchant bien sûr à la contextualiser par rapport au cas algérien.

Toutes ces méthodes se sont basées sur la prise en compte de facteurs participant à la bonne tenue ou non d'un bâtiment lors d'un séisme (structure, régularité en plan, l'âge, qualité des matériaux, qualité des jonctions...).

- **Boukri et Bensaïbi** : Sur la base de la méthode « GNDT level II », -qui n'est que la version mise à jour de la méthode de Benedetti et Petrini appelé aussi GNDT, les deux chercheurs ont développé un outil afin d'estimer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie de la ville d'Alger face au séisme [Boukri M., 2007].

Aux différents indices de vulnérabilité proposés par la méthode GNDT, ces derniers ont rajouté un nouveau facteur qu'ils ont appelé « modifications ».

Ce facteur, d'après les auteurs est assez important dans le contexte algérois du fait de la pluralité des transformations et rajouts opérés par les occupants du vieux bâti. Des modifications qui ont, pour beaucoup, accentué la vulnérabilité de ce patrimoine car non réalisées selon les règles élémentaires de l'art de bâtir (Tab.3).

| 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 murs | 0 | 5 | 25 | 45 | 1.00 |
| 5. Type de murs | 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 |

Tab. 3 : Eléments permettant l'identification de l'indice de vulnérabilité du vieux bâti en maçonnerie d'Alger [Boukri M., 2007].

- **Remki** : Dans le cadre de son travail de recherche en magister Remki, a cherché à développer une méthodologie pour l'étude de l'endommagement et de la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger [Remki M., 2010].

Son approche repose sur la caractérisation d'un ensemble de paramètres intervenant dans la réponse sismique des bâtiments. Ces paramètres sont pour l'essentiel : la capacité des structures, la nature du sol, les spécificités des matériaux, la fonction du bâtiment...etc.

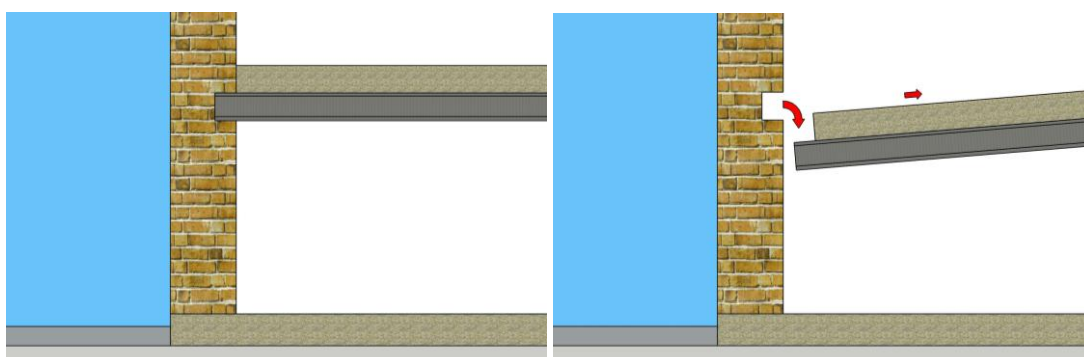
Ces différents traits de caractères détermineront une classification typologique des bâtiments à partir de laquelle seront déterminées les fonctions de vulnérabilité des bâtiments sur un site spécifique.

En fin, la vérification de la vulnérabilité des bâtiments grâce à la modélisation numérique en cherchant à déterminer la capacité de la structure en se basant sur deux conditions tirées du RPA, à savoir :

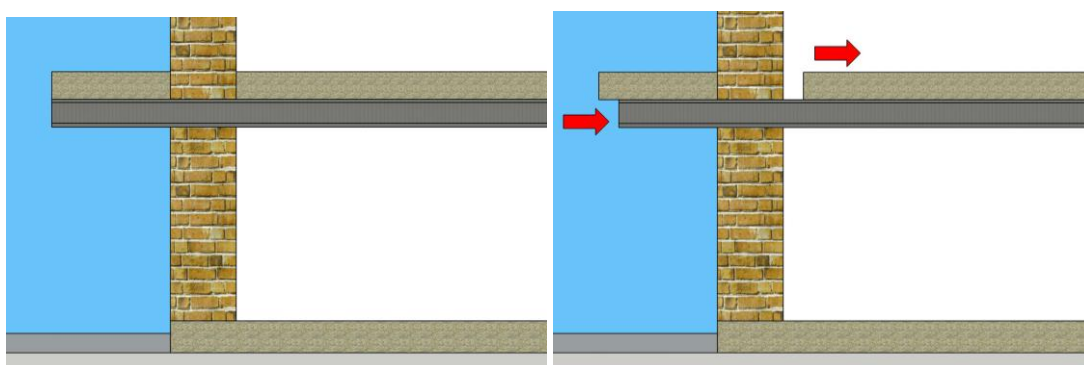
- La résultante des forces sismiques de calcul V_t ne doit pas être inférieure à 80% de la résultante des forces sismiques calculées empiriquement ;
- Les déplacements relatifs latéraux entre deux étages ne doivent pas dépasser 1% de la hauteur d'étage.

Il est important de noter les raisons de l'incertitude révélées par l'auteur au niveau de la modélisation numérique liée entre autres à la distribution aléatoire de la masse, et à la difficulté de l'identification de la rigidité des différents éléments composant la structures du vieux bâti en maçonnerie d'Alger-centre.

- **Ait-Meziane** : Dans son travail de magistère Ait-Meziane Y. a cherché à partir d'outils simples pour l'évaluation des dommages, à développer des fonctions de vulnérabilité pour le bâti de la ville d'Alger, ou plus exactement pour le quartier de Bab El-Oued [Ait-Meziane Y., 2002].



A) Effondrement d'un plancher lors d'un séisme suite à une insuffisance de longueur d'appuis.



B) Maintien du plancher sans effondrement grâce à la saillie des éléments du plancher.

Fig. 26 : Rôle de la saillie dans le maintien des éléments du plancher afin d'éviter l'effondrement de ce dernier.

Parmi les raisons responsables de la vulnérabilité du vieux bâti identifiées par Ait-Meziane Y. , on peut citer :

- L’insuffisance de la longueur d’appui des éléments du plancher qui en cas de séisme, se retrouvent rapidement en position de console, ce qui peut conduire à l’effondrement des planchers.
- En cas d’un bâtiment mitoyen, ce dernier possède dans la majorité des cas des ouvertures sur les murs de façade et des murs opaques sur les pignons. Ce qui, en cas de séisme, va surtout et en premier lieu endommager les murs de façades.

2.7.4 Conclusion

La lecture globale de ces différentes approches pour l’évaluation de la vulnérabilité du vieux bâti face au risque sismique, nous a permis d’identifier trois points fondamentaux pour la suite de notre travail de recherche :

- Toute étude de vulnérabilité repose sur l’identification de facteurs influant sur le comportement dynamique des immeubles face au séisme ;
- Etant donné que les approches étudiées et réalisées par des ingénieurs, les critères identifiés reposent fondamentalement sur l’aspect structurel et constructif des immeubles à évaluer ;
- Les différentes approches aboutissent à l’identification de différents groupes de vulnérabilité en fonction des caractéristiques des immeubles étudiés.

En ce qui concerne notre travail de recherche, ces trois points attirent notre attention sur l’importance de l’identification des critères architecturaux les plus pertinents en ce qui concerne notre corpus d’étude.

Enfin, par souci d’efficacité en ce qui concerne la réhabilitation d’un parc immobilier important, on relève tout l’intérêt de classer ce parc selon des typologies architecturales homogènes, en tenant compte de leurs caractéristiques et de leurs vulnérabilités face au séisme. Ceci nous offrira l’occasion d’établir des stratégies d’intervention plus pertinentes.

2.8 Typologie et prévention parasismique

2.8.1 Pertinence de la typologie

La réduction de la vulnérabilité du patrimoine architectural algérois 1830-1930 face au séisme, nécessite la mise en place d'une démarche spécifique vue l'importance de ce parc immobilier, mais surtout de l'incertitude de l'estimation de cette vulnérabilité⁵⁶.

Deux facteurs, qui impliquent la mobilisation de moyens financiers et humains forts importants afin d'assurer cette réduction de la vulnérabilité de ce patrimoine est la sauvegarde des vies humaines : « *En effet, sauf exception, les constructions existantes ne sont pas conformes aux normes parasismiques actuelles ; et restaurer cette conformité est généralement impossible dans des conditions économiques acceptables. Il faut donc formuler les prescriptions d'une façon adaptée au bâti existant, très divers dans sa composition.* » [Saint-Martin J-M., 2005, P257].

C'est pour ces raisons, que la démarche à mettre en place devra être pragmatique en tenant compte de l'impossibilité d'évaluation de la vulnérabilité bâtiment par bâtiment, mais en même temps, de l'obligation de réduire la vulnérabilité de ce patrimoine au vu des enjeux et risques concernés. Ceci, sans parler du fait que la réhabilitation d'un tissu occupé –comme dans notre cas-, doit se faire avec le maintien de la population sur place, sinon, ceci impliquera un coût et des moyens logistiques bien plus importants.

Raisons pour lesquelles, il est recommandé d'agir avec des opérations légères et ponctuelles afin de tenir compte de l'ensemble des enjeux concernés [AFPS-CSTB, 2013]. Des stratégies de réhabilitation qui devront s'appuyer en premier lieu sur le potentiel de comportement des constructions.

C'est dans cette optique, qu'une démarche reposant sur l'identification de typologies composant le patrimoine bâti en fonction de leur potentiel sismo-résistant devient intéressante : « *Le renforcement d'un bâtiment peut être envisagé à trois niveaux : le renforcement isolé d'un bâtiment particulier, le renforcement d'un groupe de bâtiments (quartier, parc immobilier privé) et le renforcement à un niveau global.*

⁵⁶ Des incertitudes dues à la méconnaissance ou à la difficulté de connaître la résistance de l'ensemble des éléments porteurs et de la qualité de leurs liaisons ; la nature du sol ; la nature des rapports de la construction avec les bâtisses environnantes qui dans le cas du vieux bâti constituent souvent une seule unité constructive [Zacek M., 2004].

L'approche typologique est particulièrement adaptée aux deux derniers cas, mais elle peut être utilisée judicieusement au stade de l'étude de faisabilité et de l'avant-projet dans le premier cas. » [AFPS-CSTB, 2013,41].

Effectivement, au vu de la richesse et surtout de la variété typologique de ce patrimoine en fonction de sa position topologique, ces formes, ces principes organisationnels...etc., il est apparu nécessaire d'avoir une vue d'ensemble sur ce dernier et ce en fonction de ses caractéristiques architecturales les plus pertinentes par rapport à la question du comportement face au séisme.

Dans le domaine de l'identification de la vulnérabilité du bâti face au séisme, le recours à la classification par typologie est assez courant⁵⁷. Nous relevons malheureusement le fait que, ceci se limite principalement aux caractéristiques structurelles et constructives, sans tenir compte des autres paramètres architecturaux intervenant dans l'accentuation ou la réduction de la vulnérabilité des édifices face aux séismes.

A partir de cette typologie, il est possible de définir des bâtiments types, représentatifs du bâti visé, qui vont servir à illustrer les méthodes d'évaluation de la capacité résistante et les techniques de renforcement.

Il est ainsi question à travers cette approche de chercher, avant de lancer une opération de réhabilitation sismique lourde en investissement, à réaliser une première évaluation rapide et approchée de la vulnérabilité de chaque typologie [Cherfaoui A. & Afra H., 1996]. Ceci permettra de mieux cerner et d'évaluer dans un premier temps, les endommagements que risque de subir le bâti ancien en fonction de ses caractéristiques stylistiques, architecturales et urbaines.

Finalement, il s'agit d'une approche qualitative qui établira un premier diagnostic, qui vérifiera la nécessité d'aller vers une analyse plus lourde et plus approfondie de la construction.

Ceci permettra, la mise en place d'une stratégie de réhabilitation plus efficace, plus ciblée et surtout moins coûteuse. Car le choix de la nature de l'intervention et des actions à mener, cherchera un compromis entre risque encouru, vulnérabilité à éliminer, les compétences techniques disponibles et les ressources économiques.

En résumé, l'approche se base sur la catégorisation du patrimoine architectural étudié par type, en fonction des caractéristiques architecturales en rapport avec les

⁵⁷ A titre d'exemple voir le travail de Hamazi M., Rassoul I. et Hannachi N.E. [Hamazi M., 2008].

facteurs de vulnérabilités liées au séisme. Ceci nous permettra de classer les différents édifices en fonction des dommages que risque de subir ce patrimoine en cas de séisme. Ce qui en fin de compte, constitue un outil pragmatique important offert aux responsables pour l'organisation des actions concernant la réhabilitation du vieux bâti face au risque sismique [Martin C., 2002]

2.8.2 Type

Une approche typologique pour l'identification des types à étudier consiste en une opération de récolte d'informations permettant d'identifier les règles d'organisation et de formation des édifices dans l'aire d'intervention.

Ceci consiste en une recherche des différentes règles élémentaires, impersonnelles et communes qui se retrouvent dans les différents ouvrages. Chercher ce qu'il y a de commun ou de différent entre les édifices réalisés dans la même aire culturelle et à la même époque [Malfroy S., 1986].

La réduction d'un phénomène complexe à un ensemble de traits caractéristiques pertinents, peut sembler réductrice par rapport à sa réalité. En fait, ceci n'est réducteur que dans le cas où l'on nie les autres traits de caractères.

Dans notre cas par exemple, c'est de ne considérer que la mauvaise résistance dans l'absolu des murs porteurs en maçonnerie face au séisme pour décréter toute construction en maçonnerie vulnérable face au séisme.

En réalité, la question n'est pas de réduire, mais de chercher la pertinence des traits de caractères identifiés par rapport à l'objectif attendu. Ceci, en veillant à ne pas éliminer les autres traits qui le caractérisent, mais à chercher l'apport de chacun d'eux par rapport à l'objectif attendu d'où l'importance de la question de la pertinence.

Ce risque de réduction, est d'ailleurs balayé par la définition du type donnée par l'école muratorienne qui le définit comme : « *Un type, c'est de l'information opératoire enracinée dans une tradition expérimentale. La caractéristique essentielle du type tient à sa nature synthétique : les savoir-faire qu'il recèle sont déjà organisés entre eux, c'est-à-dire qu'ils ne se contredisent pas et produisent un effet intégrateur sur l'action.* » [Malfroy S., 1986, P192].

En bref, ce qui définit le type, ce ne sont pas les objets physiques, mais la nature de la relation ou de l'organisation qui les maintient entre eux afin d'assurer la cohérence de l'ensemble. Ceci, par opposition au standard qui lui est un trait de caractère physique qui se définit de manière autonome et indépendante par rapport

aux autres standards et donc, ne se souciant en aucun cas de la cohérence de l'ensemble [Malfroy S., 1986].

2.9 Conclusion chapitre I

A travers ce chapitre, nous avons cherché à nous familiariser avec notre contexte d'étude, par une identification de la vulnérabilité de notre corpus d'étude face au risque sismique.

Afin d'y parvenir, nous avons tenté, principalement grâce à différents exemples de retour d'expériences nationales et internationales, d'identifier la réalité sur terrain du comportement des structures en maçonnerie lors de séismes majeurs.

Cette lecture nous a permis d'identifier différentes pathologies dues au séisme dont souffrent les constructions en maçonnerie.

Parmi les choses les plus importantes à retenir, c'est l'importance du risque qui entoure notre corpus d'étude et ceci pour deux raisons. Premièrement, un aléa sismique fort important et deuxièmement, une vulnérabilité du vieux bâti principalement due au manque d'entretien.

Effectivement, les différentes recherches effectuées ont démontré la capacité des constructions en maçonnerie à bien se comporter –du moins à ne pas s'effondrer comme l'exige la réglementation- lors d'événement sismique majeur comme ce fût le cas en 1999 à Izmit en Turquie, 2010 à Haïti, et même plus récemment en 2015 au Tibet .

Bien au contraire, dans certains exemples étudiés, les vieilles constructions en maçonnerie ont bien mieux réagi que les nouvelles constructions en béton-armé.

L'autre point important, est le recours quasi-exclusif en Algérie en cas de réhabilitation à une approche de renforcement et d'augmentation de la rigidité de la structure.

Or, comme nous l'avons vu, il existe d'autres approches qui consistent en la recherche de soustraire le bâtiment des effets de l'effort sismique. Le but de telles opérations étant de chercher le confortement et non pas le renforcement. Car le but poursuivi, est d'éviter l'effondrement en cas de séisme majeur, la limitation de dommages en cas de séisme modéré et en aucun cas l'absence totale de dommages en cas de séisme.

Ceci, peut être atteint en contrecarrant les effets négatifs des constructions lors d'un événement sismique. Or, le comportement des constructions du vieux bâti est différent par rapport aux nouvelles constructions. Il n'est pas possible à ce titre d'adopter les mêmes stratégies de réhabilitation que pour les nouvelles constructions.

Les stratégies de réhabilitation du vieux bâti doivent être adaptées en fonction de différents paramètres tels que des pathologies que risque de subir le bâtiment, des moyens à mettre en place, du niveau de sécurité recherché...etc.

Ceci ne passe pas obligatoirement par la case de la recherche de la performance absolue, ni l'application strict des niveaux de sécurité exigés par la réglementation parasismique pour les nouvelles constructions. Chercher à diagnostiquer le vieux bâti en se référant aux règles applicables aux nouveaux bâtiments, nous amènerait à conclure qu'aucun bâtiment ne satisferait les normes de sécurité !⁵⁸

Arrivé à une telle conclusion serait une aberration, non pas seulement du fait de la condamnation d'un patrimoine architectural de grande valeur, mais surtout de nier le fait observable sur le terrain, à savoir que ce patrimoine n'était pas démuné de toute capacité à bien se comporter lors d'un séisme comme il a été observé lors des différents séismes.

D'ailleurs sur ce point, la réglementation parasismique algérienne en ce qui concerne les nouveaux ouvrages ne demande pas une protection à 100% du bâti et des personnes contre l'avènement de séismes : « *Les présentes règles visent à assurer une **protection acceptable** des vies humaines et des constructions vis-à-vis des effets des actions sismiques par une conception et un dimensionnement appropriés.* » [CGS, 2004, P01].

Par le terme « Protection acceptable », il est admis qu'une protection totale, n'est ni possible ni recherchée⁵⁹.

Il n'est pas, non plus conseillé comme nous l'avons relevé, d'avoir recours systématiquement aux nouveaux matériaux, et ceci pour une triple raison :

⁵⁸ C'est pour cette raison que le règlement californien concernant les bâtiments historiques autorise pour ces derniers que le calcul sismique peut se baser sur la capacité ultime de la structure sans recours à des coefficients de sécurité importants [CBSC, 2013].

⁵⁹ La réglementation parasismique qui est entrée en vigueur depuis 1983, révisée en 1988, en 1999 et en 2003 reste toujours insuffisante au vu des constatations faites durant tous les séismes qui nous ont frappés et marqués. Ces derniers sont révélateurs d'insuffisance en matière de conception et de réalisation d'ouvrages capables de résister aux effondrements, les diagnostics établis culpabilisent toujours la nature mais jamais nos carences en matière de réglementation de conception et de réalisation. [Kebaili B, 2009]

- Premièrement, ceci est quasiment impossible vu les implications en termes de moyens matériels, financiers, humains, temporels... etc., et ceci même pour les pays les plus riches et les plus développés⁶⁰.
- Vu de la différence de comportement entre les anciens et les nouveaux matériaux, certaines opérations de ce type ont conduit non pas à l'amélioration du comportement des édifices, mais à leur affaiblissement.
- Ces opérations ont conduit à la défiguration de ce patrimoine et donc à la déperdition de sa valeur patrimoniale.

De ce fait, les procédés et approches de réhabilitation doivent s'imprégner d'un grand réalisme adapté au contexte économique-socio-culturel de la région d'intervention. L'objectif étant de permettre la diffusion, la maîtrise mais aussi l'acceptation de ces techniques. En bref, une solution basique mais adaptée au contexte local, vaut bien mieux qu'une solution technologique mais importée et donc décontextualisée [Houben H, 2006].

Il serait plus sage, de chercher à comprendre et d'identifier à travers les différents composants de ce patrimoine architectural –région par région et non dans l'absolu- les apports positifs ou négatifs que ces traits de caractères peuvent apporter lors d'un séisme [Langenbach R., 1989].

Ainsi, même en cas d'existence de recommandations, il ne faut pas oublier qu'aucune réglementation ne peut prétendre à l'exhaustivité. Les différentes orientations réglementaires, ne constituent qu'un ensemble de garde-fous. Un ensemble certes, qui aide à prévenir la catastrophe, mais en aucun cas ne l'élimine [Mathieu H. 2000].

Il sera de ce fait plus pertinent de laisser aux intervenants transdisciplinaires, la responsabilité du choix de la stratégie la plus adaptée afin de permettre la réduction de la vulnérabilité du bâtiment face au risque sismique.

Une stratégie qui cherchera à répondre à des performances et objectifs de comportement, plutôt que d'avoir recours à des modèles et dispositifs constructifs standards.

⁶⁰ Selon Charles Baloche directeur technique du CSTB et Wolfgang Jalil président d'honneur de l'AFPS, aucun code parasismique n'a pu imposer le renforcement global du vieux bâti du fait de l'importance de l'impact économique d'une telle décision [Amir-Mazaheri D., 2010].

Finalement, ces systèmes constructifs ont, encore bien des choses à nous apprendre sur la question de la réduction de la vulnérabilité des constructions face aux séismes, comme ils peuvent nous renseigner sur l'importance de développer des démarches transdisciplinaires.

Il nous appartient de ce fait à nous architectes, mais aussi à l'ensemble des intervenants dans le domaine de la production architecturale d'identifier les approches les plus adéquates. Ceci, aussi bien pour l'identification de la vulnérabilité, du potentiel mais aussi des approches pour le confortement et la réhabilitation du bâti. Des approches qui doivent chercher le bon équilibre entre sécurité, sauvegarde et gestion des moyens économiques et humains [Aysen Y., 1995].

3. CHAPITRE II : FONDEMENTS THÉORIQUES

« La société a, de nos jours, de plus en plus tendance à considérer l'accident comme un échec, comme si on pouvait atteindre le risque zéro. »

Martin M. & Pliskin L.

3.1 Introduction

L'objet de ce deuxième chapitre, est la vérification du point de vue théorique si le patrimoine architectural algérois 1830-1930 est potentiellement doté de traits de caractères lui permettant de bien se comporter lors d'un séisme.

Afin d'y parvenir, nous présenterons les principes qui régissent les deux composants fondamentaux de notre thèse. A savoir les fondements de l'architecture parasismique, ainsi que les principes et les caractéristiques de l'architecture du corpus étudié.

Nous chercherons lors de la présentation de chaque caractéristique de l'architecture étudiée, d'identifier en quoi ce trait de caractère participe à une bonne tenue lors d'un séisme.

Ceci sera réalisé, en mettant en adéquation chaque caractère avec les principes de l'architecture parasismique ainsi que les différentes pathologies qui risquent de subir une construction en maçonnerie identifiée au chapitre précédent.

Cela nous permettra de vérifier le bienfondé du point de vue théorique de nos hypothèses de départ.

3.2 Génie parasismique

Le génie parasismique est la discipline qui étudie le comportement des immeubles face à l'action sismique. Il cherche l'élaboration de procédés efficaces pour atténuer l'aléa sismique dans le but d'assurer la sécurité des usagers lors de l'occurrence d'un séisme.

Il semblerait que c'est aux Etats-Unis après le séisme de San Francisco de 1906, que se développa durant les années 1920, la préoccupation de résister aux efforts sismiques.

A ce moment, on a considéré à tort qu'il suffisait de réduire l'effort sismique à une force horizontale ponctuelle estimée le plus souvent à 10% du poids total du bâtiment. Mais rapidement, on évoluera vers la considération que la résistance au séisme relève plus de la capacité à se déformer que de la résistance globale du bâtiment..

Jusqu'au début des années 1950, les principaux intervenants dans le domaine parasismique furent les ingénieurs, les sismologues et les géophysiciens, ouvrant la

voie dans le développement de cette science multidisciplinaire, relativement nouvelle. Mais aujourd'hui, suite à la prise de conscience de la complexité du phénomène sismique, le recours à d'autres acteurs du domaine de la construction tels que les urbanistes, les architectes, les sociologues...etc. devient impératif⁶¹.

Effectivement, les expériences passées telle qu'à Kobe au Japon en 1995, ont démontré que le respect des règles parasismiques est loin de constituer un facteur suffisant pour la protection contre le séisme.

Une structure non homogène et non solidaire, une mauvaise conception ou un mauvais suivi de chantier, peuvent induire des erreurs qui ne pourront jamais être récupérées par aucun calcul de structure aussi élaboré et minutieux soit-il. Des erreurs qui induiront des catastrophes sur le comportement sismique du bâtiment [Lestuzzi P., 2008B].

Ainsi, le génie parasismique veille à la production des recommandations sur le projet qui vont permettre le dimensionnement et la conception parasismique. Des recommandations qui, pour être établies, font appel à un certain nombre d'éléments clefs qui participent au comportement de l'édifice lors d'un séisme.

3.2.1 La sismicité

Elle désigne l'importance du séisme auquel risque d'être soumise une région. Elle est exprimée par une magnitude identifiée sur l'échelle de Richter⁶². Mais la connaissance de la magnitude, est loin de pouvoir nous informer sur la capacité destructrice d'un séisme.

A cette magnitude, il faut additionner tout un ensemble de données physiques fondamentales, telle que la distance de l'épicentre, la profondeur du foyer, la durée du séisme en général et de la phase forte en particulier, la valeur de l'accélération maximale des sols traversés, la vitesse de déplacement, le contenu fréquentiel du mouvement sismique... [Davidovici V., 1999].

Autant de facteurs qui rendent difficile la maîtrise complète ou même partielle des effets du séisme sur le bâtiment. Il est ainsi quasi impossible de prédire et de

⁶¹ Voir travaux de : [Benouar D. 2001], [Filiatrault A., 1996], [Fuentes A., 1998] et [Martin P., 2006]

⁶² La magnitude d'un séisme représente l'énergie libérée par un séisme, par contre l'intensité mesure les effets et dommages d'un séisme. Ainsi l'intensité se mesure objectivement grâce à des instruments, alors que la magnitude repose sur des observations ce qui fait que c'est plus une appréciation [Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 2010].

définir quantitativement les vibrations, durées, accélérations, périodes de résonance,... autant de paramètres fondamentaux pour déterminer le comportement d'un ouvrage face au séisme.

3.2.2 Intensité

L'intensité d'un séisme évalue le niveau destructeur d'un séisme par l'intermédiaire de l'observation sur site et du relevé du degré dévastateur de ce dernier sur une grille de mesure qui ne repose pas sur les outils de mesure instrumentale.

Ce second type d'échelle se base sur l'observation des effets d'un séisme sur l'environnement. C'est typiquement le type d'échelles qui va intéresser les architectes⁶³.

Effectivement, c'est l'identification des différents impacts du séisme sur le cadre bâti indépendamment de la magnitude du séisme qui va nous conduire véritablement à introduire de nouvelles recommandations aussi bien, pour la protection et la réduction de la vulnérabilité du cadre bâti existant, que pour la conception de nouveaux bâtiments : *« En effet, en matière de design parasismique, on s'intéressera moins aux caractéristiques intrinsèques de l'onde sismique depuis sa source et bien plus aux effets de son arrivée au contact du tissu urbain et de sa propagation à travers le bâti. Il en est de même quant à l'appréciation de l'amplitude du désastre qui pourrait en découler...jugement élémentaire au regard de toute politique de mitigation d'un risque. »* [Weliachew B., 2004, P34].

3.2.3 L'effort sismique

Contrairement aux charges qui sollicitent ponctuellement le bâti, les charges sismiques sollicitent le bâti à travers un mouvement dynamique du sol : *« En effet, les sollicitations sismiques possèdent les quatre particularités suivantes : elles sont horizontales, cycliques, dynamiques, et elles agissent comme une charge interne. La conjonction de ces particularités font des sollicitations sismiques un cas à part dans l'ensemble des charges que doit supporter une structure au point que l'intuition et le bon sens, même ceux de spécialistes des structures, sont fréquemment mis en défaut. »* [Lestuzzi P., 2008A, P9].

⁶³ Parmi ces grilles on peut citer l'échelle de mesure européenne MSK.

La spécificité de ses charges est qu'elles sont non seulement aléatoires et non prévisibles, mais leurs intensités et surtout leurs impacts, sont fortement dépendants du comportement du bâti et donc de sa configuration et de ses caractéristiques.

Ceci implique, que toute extravagance dans le volume architectural, ou dans la conception de son système porteur, auront comme conséquence d'amplifier les effets du séisme et de conduire à la concentration d'efforts sur des points névralgiques.

Parmi les risques que provoquent les efforts sismiques, on peut citer la présence d'irrégularités en plan qui produisent des torsions préjudiciables à la stabilité du bâtiment.

3.2.4 Rigidité

La rigidité permet d'identifier la capacité de la structure à résister aux différents déplacements qui vont solliciter le bâtiment. De ce fait, elle participe à l'identification de la période propre du bâtiment et donc, détermine le comportement dynamique de ce dernier face au séisme⁶⁴.

L'intensité des sollicitations sismiques sur le bâti est directement dépendante de son comportement dynamique. Un comportement qui est, entre autre, directement dépendant de la configuration du bâtiment, de sa fréquence et de la distribution des masses en son sein [Badoux M., 2003].

Ainsi, une répartition non uniforme des masses dans un immeuble, aura une incidence directe sur sa rigidité ou plus exactement sur l'existence de rigidités différentes entre les différentes parties du bâtiment. Ce fait implique un comportement non cohérent entre les différentes parties qui composent l'immeuble.

Ceci est dû à la rigidité qui intervient directement dans l'estimation de la période propre de l'édifice. Ce qui implique, qu'en cas de rigidités différentes entre les parties d'un immeuble, ces dernières vont onduler de manière différente et non homogène, impliquant ainsi des sollicitations et donc des concentrations d'efforts différents pouvant provoquer des dégâts importants lors d'un séisme.

⁶⁴ La période propre d'un bâtiment constitue l'un des paramètres les plus importants afin de déterminer son comportement global vis-à-vis du séisme. Sa valeur est dépendante d'un certain nombre de paramètres. Parmi les plus importants on peut citer la rigidité, les dimensions, le poids...

3.2.5 Dimensionnement en capacité

C'est une approche qui repose sur l'évaluation des performances d'une construction non pas en fonction des forces, mais en fonction des déplacements. En effet, au-delà des déformations élastiques, les dommages que subit une construction, sont plus dépendantes des déplacements des éléments constructifs que de la force subie. En conséquence, la performance d'une construction est plus dépendante des traits de caractères de cette construction que de la force sismique qu'elle subit [Zacek M. 2004] (Fig.27).

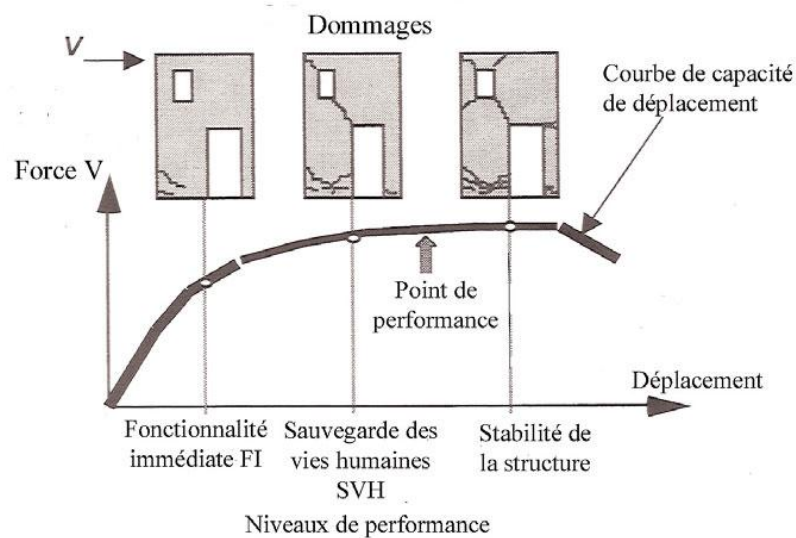


Fig. 27 : Courbe montrant le niveau d'endommagement d'une construction en fonction des déplacements [Zacek M., 2004].

Une telle démarche révèle que, l'amélioration des performances d'une construction ne repose pas obligatoirement sur l'augmentation de sa résistance mécanique mais sur sa capacité à se déformer sans s'effondrer. Chose qui est fort intéressante dans le cas du vieux bâti.

Effectivement, comme explicité dans le chapitre précédent, en général, l'augmentation de la résistance mécanique des bâtiments est obtenue par l'introduction de nouveaux matériaux comme le béton-armé. Or, ces matériaux ne se comportent pas de la même manière que la maçonnerie face au séisme, sans parler du fait du risque de détérioration du caractère identitaire de ce bâtiment.

Ainsi, trouver un moyen qui permet d'améliorer des performances d'une construction sans passer par une intervention lourde, ne peut être que bénéfique au vieux bâti.

3.3 Principes de l'architecture parasismique

3.3.1 Simplicité des formes

La forme des bâtiments est l'élément le plus important afin d'éviter des désordres qui risquent d'être importants dans le cas de forme compliquées [Besacier G., 2003] (Fig.28).

Il faut chercher des formes simples, basiques, régulières et compactes afin d'éviter les contraintes destructrices de la torsion⁶⁵ engendrées par des formes complexes telle que les formes en « L » qui conduisent à une concentration de contraintes dangereuses au niveau du changement de direction. Ceci conduit à une déformation importante pouvant conduire à l'effondrement de la partie commune aux deux ailes [Davidovici D., 1999].



Fig. 28 : Oscillation non synchronisée entre deux entités d'un bâtiment ayant des proportions différentes. Exemples : séisme de Kobé, Japon 1995. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Les formes simples, permettent aussi d'obtenir des structures simples ce qui facilitera le dimensionnement, la réalisation et l'entretien de ces immeubles.

Ceci permet aussi, d'obtenir une position favorable du centre de rigidité par rapport au centre des masses. Réduisant de ce fait, les effets négatifs de la torsion et dotera les constructions réalisées dans de bonnes conditions d'une marge de résistance supplémentaire en cas de séisme : « En « favorisant » les structures « régulières », qui de fait auront les « 90% de masse modale » sur les premiers modes en translation. Ce qui signifie concrètement que les déformations se feront régulièrement et globalement sur l'ensemble de la structure. Dans ce cas, même si l'action sismique de référence est inférieure à l'action réelle sous séisme majeur, l'application des règles

⁶⁵ Il est important de s'intéresser à la question de la torsion du fait qu'elle réduit la capacité de résistance de la structure [Bensalah M.D., 2011]

de mise en œuvre des matériaux et l'hyperstaticité de la structure apporteront effectivement la ductilité nécessaire à la survie de l'ouvrage. » [Balandier P., 2001, P41].

3.3.2 Symétrie

Les formes les plus stables sont celles ayant une double symétrie sur les deux axes. Ceci permet de confondre le centre de rigidité avec le centre des masses du bâtiment [El-Nashai A.S., 2010].

Dans le cas contraire, au niveau des bâtiments dissymétriques, les mouvements d'origine sismique vont générer des oscillations de torsion importantes, qui vont conduire à une amplification des désordres [Houben H., 2006].

3.3.3 Rabaisser le centre de gravité

Il est conseillé de chercher à rabaisser au maximum le centre de gravité afin d'éviter la création et l'accentuation des efforts sismiques liés au balancement du bâtiment. Ce qui risque de provoquer le renversement de l'immeuble (Fig.29).

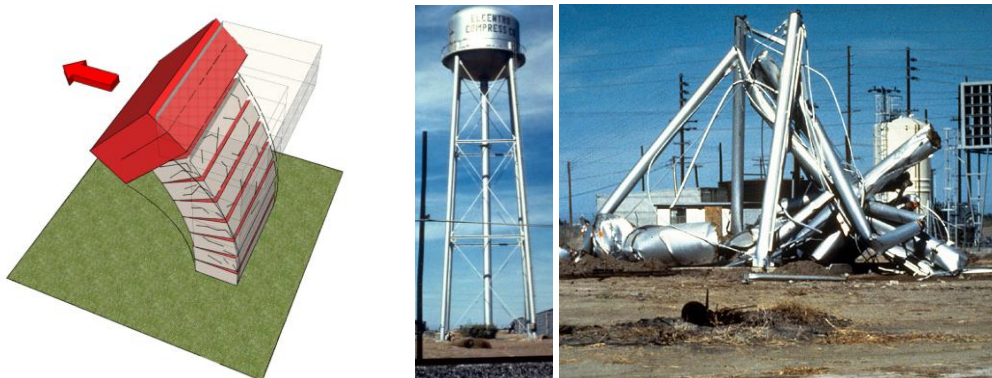


Fig. 29 : La sur levation du centre de gravité de la construction provoque une accentuation des oscillations. Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]].

Le rabaissement, peut être obtenu par l'augmentation de la masse des parties inférieures de l'immeuble, ou par l'élargissement de la base [Lestuzzi P., 2008B].

3.3.4 Centre de gravité confondu avec le centre de rigidité

Dans le cas d'une superposition entre le centre de rigidité avec le centre de gravit ⁶⁶, le bâtiment est sollicité en déplacement horizontal. Par contre, dans le cas où le centre de gravité ne se confond pas avec le centre de rigidité, le bâtiment subit non

⁶⁶ Dans certains ouvrages le centre de gravité est aussi identifié sous le nom de centre des masses.

seulement une sollicitation horizontale, mais également un effort de torsion qui provoque une augmentation des efforts et des déformations, ce qui risquerait d'être fatal au bâtiment lors d'un séisme (Fig.30).



Fig. 30 : Non superposition entre le centre de gravité et le centre de rigidité. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Cette excentricité peut avoir différentes origines. Une excentricité due à la conception même du bâtiment provoquée par des formes irrégulières, non symétriques et non compactes. Une mauvaise distribution des charges et des masses de l'immeuble [Zerbi S., 2011].

3.3.5 Renforcement des angles

Les angles des bâtiments font partie des éléments les plus sollicités lors d'un séisme (Fig.31). Cette vulnérabilité est due au fait qu'ils perçoivent comme charges verticales que le poids d'un quart de travée, alors que la poussée qu'ils ont à équilibrer est celle d'une travée complète [Amir-Mazaheri D., 2010].

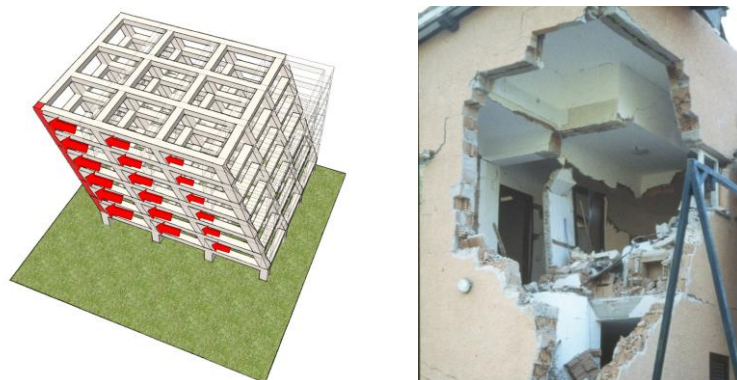


Fig. 31 : Sollicitation de l'angle lors d'un séisme. Il cumule l'ensemble des déplacements de la construction. Exemple : séisme de Colfiorito, Italie 1997. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Il est, de ce fait, recommandé de palier à cette fragilité par le renforcement de ces derniers, entre autres, avec des formes arrondies [Zacek M., 1996], ou à défaut de ne pas les fragiliser avec la projection par exemple d'ouvertures trop proches des angles [AFPS, 2004A].

3.3.6 Porte-à-faux

Il est conseillé d'éviter la création de porte-à-faux important afin de ne pas fragiliser le bâtiment lors des séismes par la création de zones sensibles.

Effectivement, la présence de porte-à-faux peut provoquer des effets négatif appelés effet de console qui peuvent en fonction de leurs importance (poids, portées...etc.) modifier la répartition des sollicitations (Fig.32).

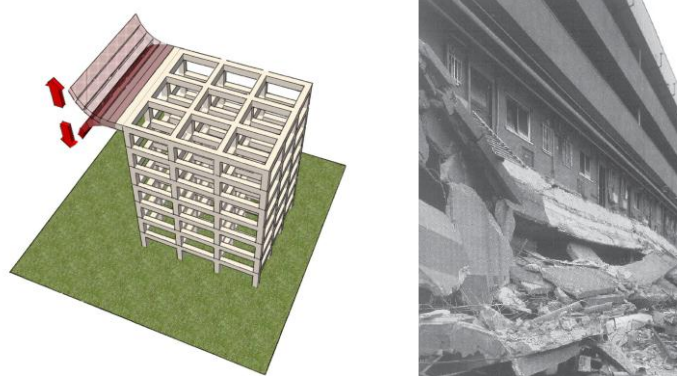


Fig. 32 : Des porte-à-faux importants, peuvent provoquer l'effondrement de ces derniers en cas de séisme. Exemple : séisme de Kobé, Japon 1995. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

D'une manière générale, les balcons –à savoir des porte-à-faux de petite portée et non lourdement chargés- se comportent bien au séisme [Amir-Mazaheri D., 2010]. C'est à ce titre que les RPA, autorise les porte-à-faux qui ne dépassent pas les 1,50m.

3.3.7 Saillie et retrait

La présence de retrait et de saillie dans le bâtiment de manière brusque, fragilise le bâtiment du fait de la création des zones de rigidité différentes. De ce fait, il est recommandé que la variation dans la rigidité se fasse de manière graduelle et progressive et non pas brusque.

Ainsi il est conseillé de ne pas avoir des retrais de plus de 15% de la longueur de l'immeuble entre deux niveaux successifs, tout en évitant que le retrait global sur l'ensemble de l'immeuble ne dépasse les 33% de la longueur [Fuentes A., 1998] (Fig.33).

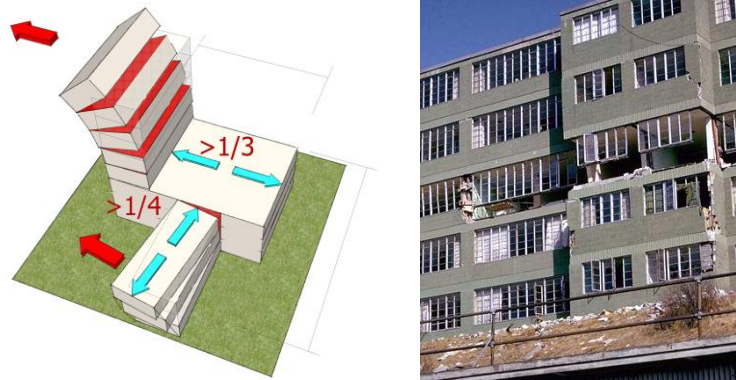


Fig. 33 : Tout retrait ou saillie importants, peut induire des dommages assez graves. Exemple : séisme d'Alaska, États-Unis 1964. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

3.3.8 Proportions

Bien plus que les dimensions absolues du bâtiment, ce sont les proportions qu'il faut chercher à respecter afin d'assurer un bon comportement du bâtiment face au séisme [El-Nashai A.S., 2010].

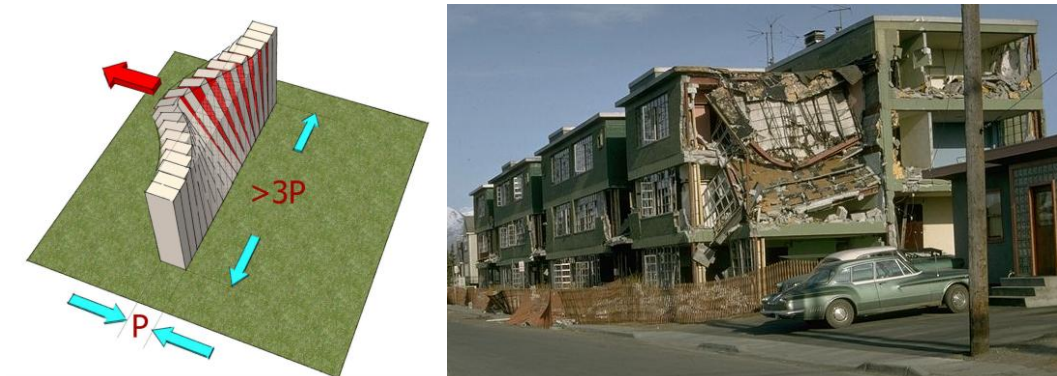


Fig. 34 : Plus une bâtisse est longue, plus les déplacements entre ses deux extrémités seront importants. Exemple : séisme d'Anchorage, États-Unis 1964. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Dans le cas où les proportions dépassent le rapport de 1 pour 3, les déplacements dus au séisme ne seront plus uniformes, provoquant aussi des concentrations d'efforts néfastes pour l'immeuble. [Iestuzzi P. 2008B] (Fig.34).

3.3.9 Elancement

Pour ce qui est de l'élanement global du bâtiment, il est recommandé que le bâtiment ne dépasse pas dans son rapport largeur/hauteur, un rapport de 1/3 afin d'éviter l'effet coup de fouet. Ceci permettra d'éviter la surélévation du barycentre de l'immeuble, ce qui lui épargnera le risque de balancement et donc de renversement (Fig.35).

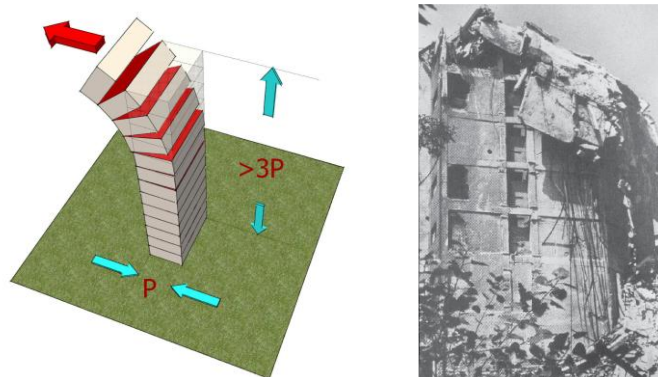


Fig. 35 : Un élancement excessif, peut conduire à ce que les niveaux supérieurs subissent des oscillations plus importantes. Exemple : séisme de Mexico, Mexique 1985. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

3.3.10 Contreventement vertical

Le contreventement vertical des bâtiments consiste en la capacité de reprises des charges sismiques avec des éléments verticaux et continus sur toute la hauteur de l'immeuble.



Fig. 36 : Une disposition non symétrique des éléments de contreventement, peut accentuer les effets de torsion. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Ce dernier est bien plus efficace quand il est situé en périphérie ou à proximité de la périphérie du bâtiment plutôt qu'à l'intérieur. Ceci permet d'augmenter la raideur du bâtiment afin de contrecarrer les effets négatifs de la torsion [Fuentes A., 1998] (Fig.36).

Par contre une répartition aléatoire des ouvertures tout le long de ses éléments verticaux, peut entraîner des concentrations d'efforts qui risquent de provoquer des effets néfastes sur l'immeuble [Amir-Mazaheri D., 2010].

Il faut aussi faire attention au rapport plein/vide au niveau de ces murs, et encore plus dans le cas de murs en maçonnerie qu'en béton. Effectivement, au vu du

caractère hétérogène des murs en maçonnerie, il ne faut pas les fragiliser avec un pourcentage d'ouverture important.

Ainsi, le pourcentage de la surface des ouvertures au sein des murs en maçonnerie ne devra pas dépasser les 20% de la surface totale du mur. De plus, la largeur des ouvertures devra être inférieure à 35% de la largeur des murs. Enfin, il faut assurer une largeur des trumeaux minimum de 90 cm [Houben H. 2006].

3.3.11 Trémies et éléments rigides

Dans le cas de la programmation de trémies (cage d'escalier, gaine...), de vides (mezzanine) ou des éléments rigides telle que la structure en mur porteur de la cage d'escalier, il est conseillé de les placer soit au milieu, soit de manière symétrique par rapport à l'édifice, afin de ne pas générer de la torsion dans le bâtiment en cas de séisme (Fig.37).

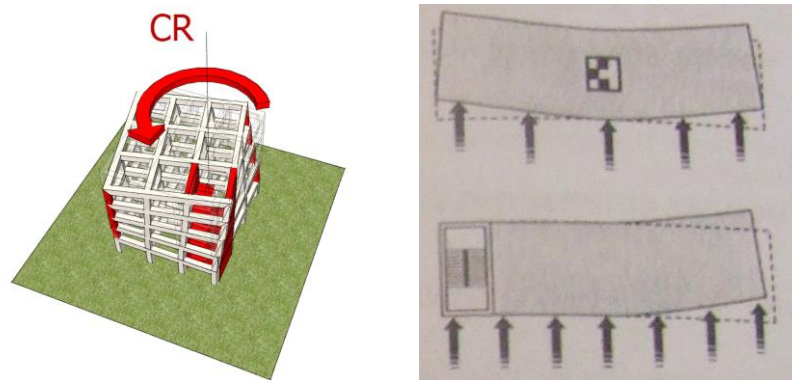


Fig. 37 : Une disposition non symétrique des trémies et éléments rigides, provoque des effets torsion néfastes sur la construction. (Crédit photo : Djennane W., [AFPS, 2004A]).

Il est aussi important, de minimiser les ouvertures au niveau des planchers avec les trémies des cages d'escalier, des ascenseurs, des gaines...etc, surtout à proximité des éléments participant au contreventement. Il faut à ce titre préserver au maximum la rigidité du diaphragme [El-Nashai A.S., 2010].

Effectivement, les planchers jouent un rôle très important pour favoriser la rigidité d'ensemble et réduire les déplacements horizontaux des bâtiments. Mais en même temps il faut éviter d'avoir une rigidité plus importante dans un sens par rapport à l'autre car ceci risque de provoquer des effets de torsion. C'est pour cette raison qu'il faut éviter d'avoir des planchers très allongés [Fuentes A., 1998].

3.3.12 Régularité des éléments porteurs

Selon Lestuzzi et Badoux, le maître mot d'une bonne conception parasismique, c'est la régularité [Lestuzzi P., 2008B]. Elle permet à l'édifice de réagir de manière solidaire et homogène vis-à-vis de l'effort sismique. Ainsi, La régularité de la trame structurelle est fortement recherchée (Fig.38).

La régularité et simplicité de la structure permettront lors de la modélisation de se rapprocher le plus possible de son comportement réel en cas de séisme. De plus, ceci facilitera grandement le calcul de la structure mais également sa réalisation dans de meilleures conditions [Fuentes A., 1998].

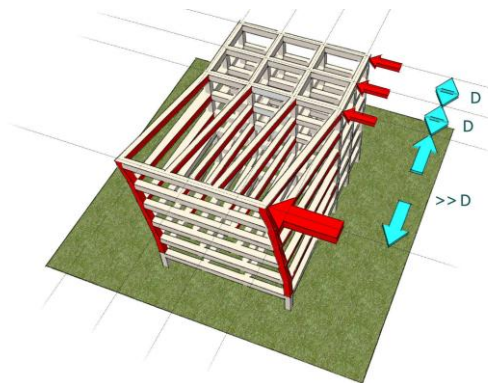


Fig. 38 : Le changement de la grandeur de la trame structurelle provoque des rigidités différentes, qui peuvent être à l'origine de désordre important en cas de séisme. (Crédit photo : Djennane W.)

3.3.13 Poteau-court

Des changements de rigidité dans les éléments structuraux induisent un comportement différent au sein du même élément car suite aux efforts sismiques, cet élément aura des parties avec des rigidités différentes. Ceci est dû à l'existence au sein du même élément d'une partie plus rigide qu'une autre.

Ces changements de rigidité peuvent être provoqués aussi bien, par l'interaction des éléments structuraux entre eux, mais pire encore par l'interaction entre les éléments structuraux et des éléments dits secondaires tels que les murs de séparation, les fenêtres ou autres qui ne sont en général pas pris en considération par les règlements parasismiques [Kebaili B., 2009] (Fig.39).

En cas de présence sur le même étage de poteaux identiques mais de hauteurs différentes, ces derniers ne vont pas tolérer les mêmes déformations. Cette situation va engendrer la formation dangereuse de rotules plastiques dans des endroits qui n'ont pas été prévus pour [Badoux M., 2003].

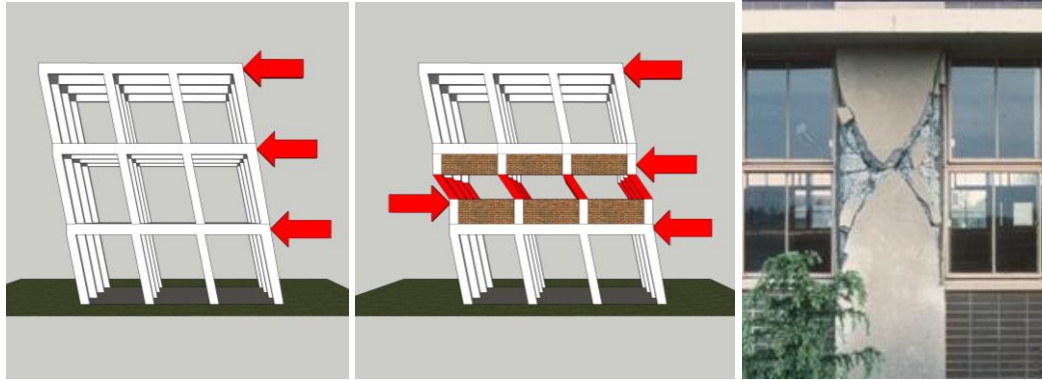


Fig. 39 : Création d'un poteau-court à cause du remplissage d'une partie du cadre avec de la maçonnerie ce qui engendre de oscillations différentes dans le poteau. Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

3.3.14 Redondance des éléments porteurs

Une recherche de redondance au niveau de la structure est conseillée. Ceci passe par la multiplication du nombre des travées dans les deux sens. Ce qui fait, qu'il est préférable d'avoir pour la même distance plusieurs petites travées que quelques-unes assez longues [CGS, 2004] (Fig.40).

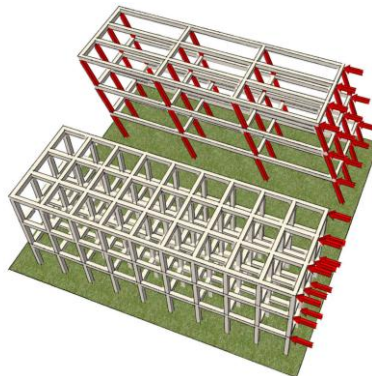


Fig. 40 : La multiplication des composants structurels d'une construction dans les deux sens, permet de la rigidifier et donc de réduire ses déplacements. (Crédit photo : Djennane W.)

3.3.15 Niveau souple

Afin de permettre au bâtiment de réagir de manière identique et suivant la même ondulation à tous ses niveaux, il faut éviter la présence d'un niveau susceptible d'avoir une rigidité différente par rapport aux autres niveaux. Ceci permet de minimiser le risque d'effondrement d'un niveau dû à sa réaction totalement différente par rapport aux autres niveaux lors d'un séisme (Fig.41).

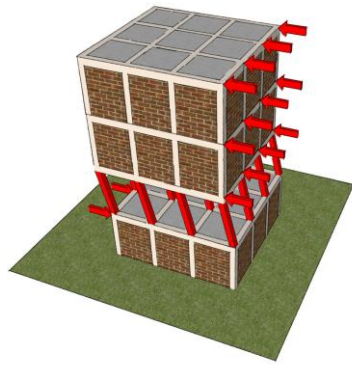


Fig. 41 : Changement de rigidité entre les étages et création d'un niveau souple.

Exemple : séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

Ce phénomène est d'autant plus destructeur si cette déperdition de rigidité est plus vers le bas du bâtiment que vers le haut. Elle peut provoquer le cisaillement des éléments porteurs dans la partie base du bâtiment avec toutes les conséquences catastrophiques que cela peut engendrer.

Ce phénomène peut être provoqué par un changement de hauteur entre les niveaux, mais aussi un changement de rigidité au sein des éléments structuraux d'un niveau à l'autre, que la présence d'éléments secondaires, à savoir murs de séparation, enveloppes extérieures... etc. [Kebaili B., 2009].

3.3.16 Entrechoquement

Ce phénomène fortement dangereux en cas de séisme, consiste en la collision entre deux édifices juxtaposés l'un à l'autre. Ce qui en fait un endommagement sismique typique dans les centres urbains [Lestuzzi P. 2008A].

Ainsi, dans le cas d'absence ou d'insuffisance de joint, deux édifices juxtaposés risquent de rentrer en collision pour deux raisons principales [Lestuzzi P., 2008B] (Fig.42) :

- des hauteurs d'étages différentes entre les deux bâtiments, conduisant les planchers à percuter les éléments porteurs de l'autre immeuble au niveau des éléments porteurs verticaux ;
- des hauteurs d'immeubles différentes, ou toutes autres raisons conduisant à avoir des périodes d'immeubles différentes ce qui fait qu'ils vont onduler de manières différentes.

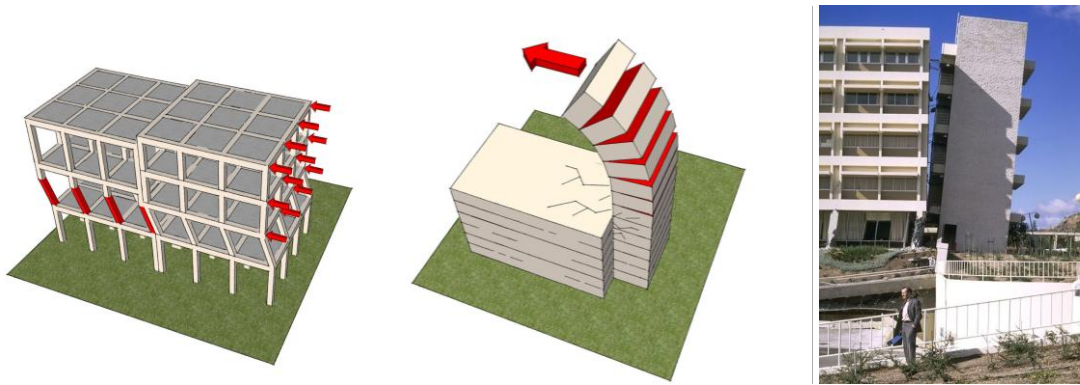


Fig. 42 : L'oscillation de manière différente peut conduire à l'entrechoquement de bâtiments juxtaposés. Exemple : séisme de Californie, États-Unis 1971. (Crédit photo : Djennane W., [Zacek M., 2004]).

3.3.17 Superposition des ouvertures :

L'alignement vertical des ouvertures, que ce soit en façade ou dans les murs intérieurs, permet d'améliorer le comportement sismique du bâtiment. Cela évite la création d'irrégularités ou niveau des différents murs susceptibles de participer à la résistance aux efforts sismiques [Lestuzzi P., 2008B] (Fig.43).

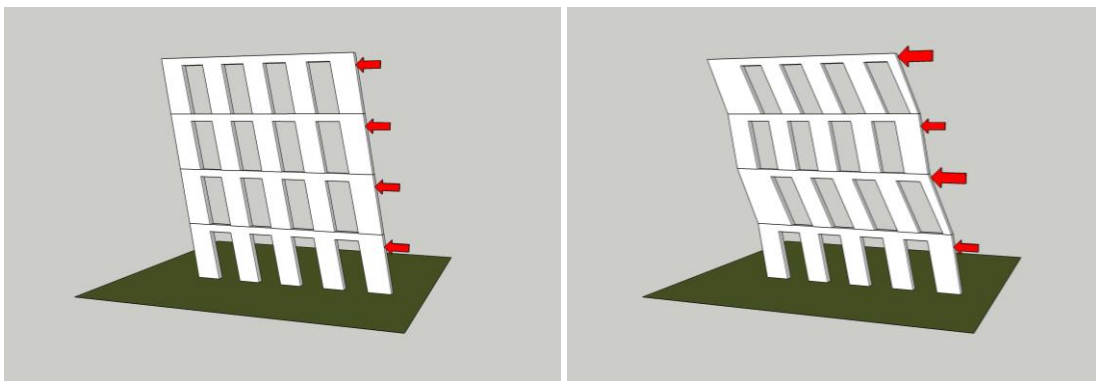


Fig. 43 : La superposition des ouvertures permet à chaque travée structurale d'osciller de manière synchronisée avec les autres travées. (Crédit photo : Djennane W.)

3.4 Architecture 19ème/20ème siècle à Alger : caractéristiques stylistiques et urbaines

Nous allons identifier à ce niveau, les différentes caractéristiques du patrimoine architectural algérois étudié à travers le filtre de la bonne architecture parasismique.

Il ne sera pas question d'identifier l'ensemble des traits de caractères du corpus étudié, mais plutôt d'en faire ressortir ceux qui participent d'un point de vue théorique à lui conférer un potentiel sismo-résistant intéressant.

L'identification des traits de caractères de ce patrimoine architectural, va s'appuyer, entre autres, sur les textes de lois régissant la rue et la façade de la ville de Paris. Car comme nous le rappelle Malverti « *Jusqu'à la première guerre mondiale, les architectes viennent de la métropole et construisent les immeubles qui ressemblent beaucoup à ceux édifiés à Paris ou à Marseille.* » [Malverti X., 1992, P35].

Effectivement, vu le destin croisé de l'histoire urbaine et architecturale de ces deux villes qui a été démontré par plusieurs chercheurs comme Hakimi, Cresti...etc., il nous a semblé tout à fait opportun d'utiliser ces différents décrets pour caractériser ce patrimoine⁶⁷ : « *Quand on débarque, la blanche ville de marbre qu'on a admiré de la mer disparaît ; on n'a devant les yeux que les maisons à six étages du boulevard de la République, et le voyageur déçu qui s'imaginait arriver en Afrique peut croire un moment qu'il n'a pas quitté la rue de Rivoli.* » [Bourde P., 1880]

3.4.1 Histoire urbaine et architecturale d'Alger

Il est important de signaler qu'il ne sera pas question de présenter l'histoire architecturale et urbaine de la ville d'Alger dans toutes ces périodes. Mais plutôt de présenter l'histoire d'urbaine et architecturale du corpus étudié pour la période 1830-1930, depuis l'avènement du colonialisme français, jusqu'au centenaire de la colonisation avec la fin de l'application des principes dit haussmanniens⁶⁸.

Il n'est pas non plus question de chercher à présenter une histoire exhaustive de notre période d'étude. Effectivement, notre démarche consistera à rechercher dans cette histoire tout élément saillant permettant d'identifier ou de justifier, un trait de caractère en rapport avec un potentiel sismo-résistant.

a. Introduction :

Dès les premières années de la colonisation française en Algérie, les différentes interventions urbaines et d'extensions de la ville d'Alger faisaient l'objet de réflexions au sein de commissions mises en place par les autorités, afin de veiller à l'évolution de la ville selon un urbanisme régulateur et des schémas les plus cohérents possibles.

⁶⁷ Selon François Béguin les villes du sud de la méditerranée n'étaient que le reflet de celle produites en [Béguin F., 1983, P11].

⁶⁸ Le modèle dit « Haussmannien » fait référence au baron Haussmann préfet de la ville de Paris de 1853 à 1870. Ceci même si il est reconnu aujourd'hui que les prémices de ce style ont été mis en place bien avant l'avènement du baron Haussmann [Quéré J-P., 1998]

A titre d'exemple, dès 1854, le gouverneur général Randon, avait institué une commission afin d'étudier les alignements et les réserves de fortifications à proximité de quartiers tels que le quartier de Bab el-Oued et de l'Agha. Un travail qui a permis l'application de lois venant de France : « *La nouvelle politique du gouvernement français en Algérie aller de pair avec la politique d'urbanisme menée en France, et surtout à Paris.* » [Cresti F., 2003, P78].

Ce rattachement à l'histoire, de la ville européenne et méditerranéenne, est une constante de l'histoire urbaine de la ville d'Algérienne en général et de la ville d'Alger en particulier : « *Jusqu'à la Première Guerre mondiale, les architectes viennent de la métropole et construisent des immeubles semblables à ceux de Paris ou de Marseille.* » [Picard A., 1994, P126].

Pour plus de détails, nous allons présenter l'histoire urbaine et architecturale de la ville d'Alger durant la période de colonisation française en nous appuyons sur le phasage établi par Attilio Petruccioli. Selon lui, cette histoire se divise en 4 phases qui correspondent à des changements dans la nature de la production architecturale et urbaine [Petruccioli A., 2007] et [Petruccioli A., 1993].

En ce qui nous concerne, nous n'allons présenter que les trois premières, la quatrième ne concerne pas notre corpus d'étude, car elle va bien au-delà de notre période d'étude, à savoir 1930.

b. Phase 1 : 1830-1846

Cette période commença avec l'occupation française en 1830 jusqu'au traçage du premier plan extramuros par rapport à la Casbah d'Alger à savoir en 1846. Elle perdurera plus ou moins jusqu'en 1854.

A leur arrivée à Alger, les colonisateurs français se sont installés dans la partie basse de la médina et à l'intérieur de ses remparts. Ceci en attendant de pouvoir pacifier le pays et de se permettre des extensions au-delà des limites protectrices des remparts.

Durant cette phase, les opérations se sont concentrées à l'intérieur des remparts de la Casbah d'Alger dans sa partie basse. Ces opérations consistaient en la restructuration d'îlots ou d'implantation d'îlots sur les terrains après destruction du bâti existant. Des îlots de dimensions limitées de 20-25 mètres sur 30-40 mètres, en se basant sur le cadre réglementaire urbain français de 1784.

Ces nouveaux tracés urbains étaient guidés par l'impératif sécuritaire. Une vision qui perdurera selon Lespès jusqu'en 1880. C'est ce qui avait conduit les

nouveaux colonisateurs à s'installer à l'intérieur des remparts existants : « *Les rues de Bab el Oued et de la Marine sont tracées en lignes brisées, « dispositions prise dans l'intérêt de la défense, pour éviter les enfilades ».* En 1832, pour des raisons que, 125 ans plus tard, on aurait appelé « anti-terroristes », un arrêté interdit l'exécution « ...des balcons, des auvents, des stores, des plantes, des saillies quelconques sur les façades des maisons... » » [Deluz J.J., 1988, P11].

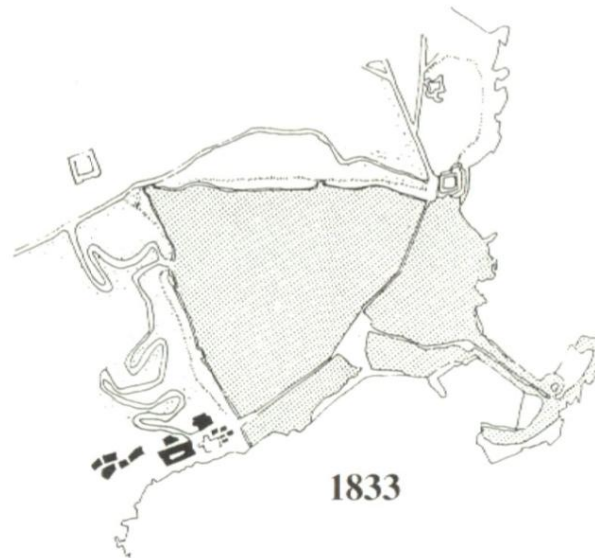


Fig. 44 : Plan D'Ager en 1833 [Kanoun Y., 2000].

Le moment le plus important de cette période, sera la réalisation de la place des martyres (ex-place du gouvernement) en 1842 (Fig.44). Elle met en place la nouvelle vision de l'organisation de la ville et annonce surtout le recours au modèle urbain dit haussmannien qui va être réalisé à Paris [Hakimi Z., 2011].

c. Phase 2 : 1846/1854-1881

Cette phase commence depuis la première installation coloniale extramuros de la Casbah d'Alger, jusqu'à la pacification du pays et la destruction vers 1881 du rempart réalisé par le pouvoir colonisateur.

Elle coïncide avec les grands travaux de restructuration de la ville de Paris par le baron Haussmann et tous les regards étaient tournés vers Paris [Lespes R., 1933]. Ainsi, le dimensionnement de la rue et le rapport de l'immeuble à la rue sera déterminé en se basant sur la nouvelle réglementation imposée à Paris à partir de 1859.

Durant cette phase, on assiste à la première installation urbaine proprement dite sur un site vierge à partir de 1846. Ce plan d'extension dit plan Guiauchain⁶⁹,

⁶⁹ Architecte des bâtiments civils et palais nationaux.

traçait les lignes de la première ville dite européenne à l'extérieur des remparts de la Casbah d'Alger, mais circonscris à l'intérieur des nouveaux remparts réalisés par les colonisateurs (Fig.45 & 46).

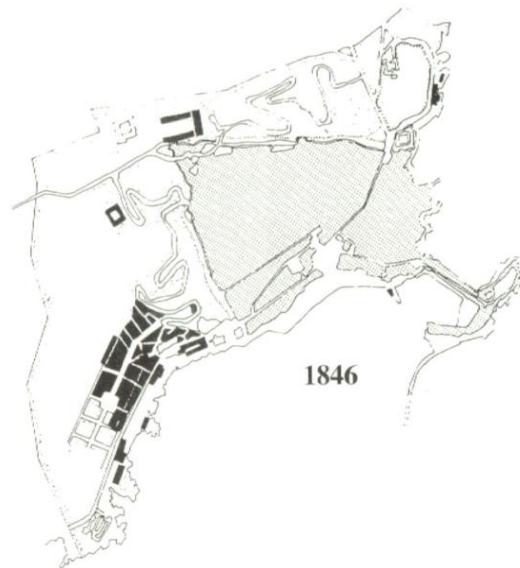


Fig. 45 : Plan D'Ager en 1846 [Kanoun Y., 2000].

Cette nouvelle extension de la ville, s'est développée sur le maillage des rues de Ben M'Hidi (ex-d'Isly), Harichet (ex-Mogador), Abane Ramdane (ex-Constantine). Elle prévoyait aussi l'extension du port ainsi que l'extension des rampes Debbih Cherif et Areski (ex -Rovigo et Vallée). Une extension que l'on peut considérer aujourd'hui comme une opération haussmannienne avant l'heure [Deluz J.J, 1988].

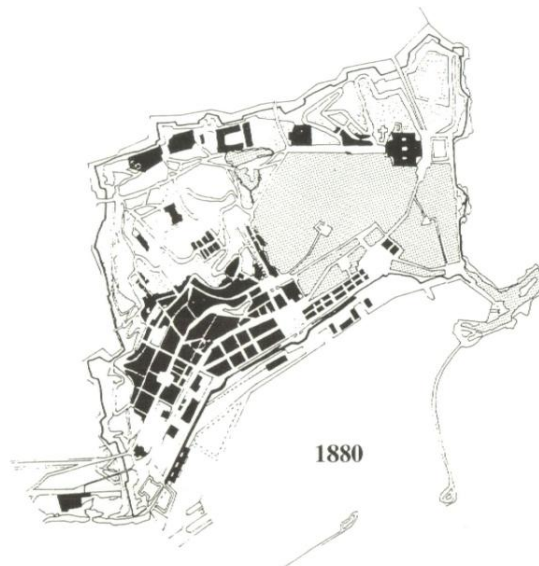


Fig. 46 : Plan D'Ager en 1880 [Kanoun Y., 2000].

Cette première extension, a permis la réalisation d'immeubles dit haussmannien. Des Immeubles de style et de forme néoclassique à la mode de l'époque [Djermoune N., 2011].

L'un des événements majeurs de cette période, est certainement la réalisation du boulevard de l'impératrice (actuel boulevard Che Guevara). Un boulevard qui a unifié le traitement du front de mer de la ville dans ce nouveau quartier [Celik Z., 1997].

En ce qui concerne la composition de la façade, on voit naître l'axe de symétrie qui sera matérialisé par la présence d'un nombre impair de travées et l'introduction du portail au centre de la façade.

d. Phase 3 : 1881-1930

Cette phase va depuis la destruction des nouveaux remparts construits par les français, jusqu'au centenaire de la colonisation française. Ce sera la période du développement de la ville sur les coteaux, à travers des chemins forts sinueux afin de relier les différentes parties de la ville (Fig.47).

Durant cette phase, la ville fût encore une fois dessinée en appliquant les nouveaux règlements urbains parisiens, principalement celui de 1884.

Parmi les grandes transformations de cette phase, on peut noter le remplacement des pans coupés des îlots par la projection de bow-windows ou de terrasses. Aussi, les longues façades favorisent la prise en charge du rythme avec introduction du bow-window rectangulaire au milieu de la façade [Petroccioli A., 1993].

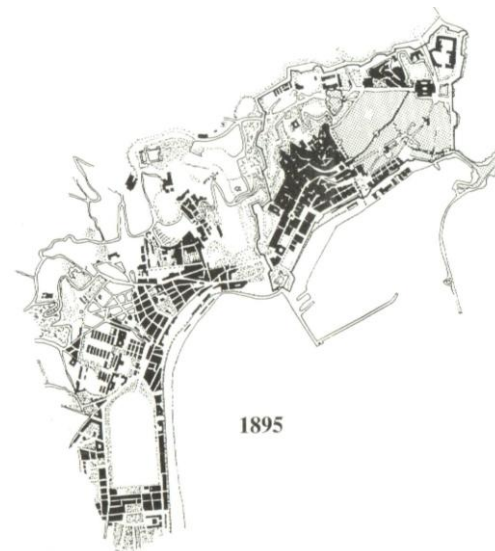


Fig. 47 : Plan D'Ager en 1895 [Kanoun Y., 2000].

Au début du XX^e siècle, on assiste à la confrontation entre deux styles architecturaux. Le premier a recours au vocabulaire des colonnes et pilastres, des corniches et entablements, des bas-reliefs floraux...etc. d'inspiration française en référence à l'architecture produite à Paris de style néo-classique.

Le second, d'inspiration locale avec des décors dits islamiques de style néo-mauresque dit aussi le style Jonnart du nom du gouverneur général qui l'avait imposé [Hakimi Z. 2011].

En revanche, même si les deux styles sont différents du point de vue du langage et de l'écriture architecturale, il n'en est rien en ce qui concerne la typologie de l'immeuble⁷⁰, que ce soit en termes de rapport à l'environnement, de l'organisation fonctionnelle ou du système constructif. Il s'agissait de la même typologie que l'on venait plus tard habiller au grès du style désiré, selon les fondements de l'éclectisme [Benevolo L., 1998].

3.4.2 Caractéristiques stylistiques

D'une manière générale, le patrimoine architectural algérien datant de 1830 à 1930 est fondamentalement constitué de bâtiments de style néoclassique qui se caractérisent par un certain nombre de propriétés.

Ces propriétés étaient fondées sur des principes esthétiques supérieurs et des concepts abstraits tels que la symétrie et les proportions. Ceci dans un désir de recherche d'un vocabulaire savant inspiré de l'architecture de l'antiquité : « *Assurant la justesse de l'arrangement des parties et l'excellence du tout, ces divers champs se nomment : l'ordonnance, la disposition (ou distribution), la proportion, la bienséance, l'économie. L'ordonnance concerne la taille des éléments, absolument en rapport à la totalité de l'ouvrage ; la disposition regarde à la fois la figure et la situation des éléments alors que la proportion est l'ensemble des rapports de la totalité avec les parties, des parties entre elles et des parties avec le tout.* » [Gresset P., 1985, P10].

La taxis : c'est un ordonnancement qui consiste en un schéma normatif de la trame ordonnatrice dont la finalité et l'équilibre des éléments d'un édifice par l'élimination entre autre de configurations contradictoires : « *Les parties doivent donc former un tout, et aucune partie ne peut être rajoutée ou retranchée sans que le tout perde sa cohérence. Les parties sont donc subordonnées au tout.* » [Lucan J., 2010, P25]. Ainsi, à partir d'un schéma de base, il est possible de générer un ensemble infini de schémas plus complexe mais qui en finalité, produit un élément certes complexe, mais très équilibré [Tzonis A., 1985] (Fig.48 & 49).

⁷⁰ Selon Lathuillière, le style néo-mauresque dit aussi le style Jonnart manquait terriblement de sincérité du fait qu'il était conçu sur la base de plan occidentaux qu'on ne faisait qu'habiller avec des éléments décoratifs néo-mauresque. [Hakimi Z. 2011].

| | | |
|---|---|---|
| A | B | A |
| B | C | B |
| A | B | A |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A | B | C | B | A |
| B | C | B | C | B |
| C | D | F | D | C |
| B | C | B | C | B |
| A | B | C | B | A |

Fig. 48 : A partir d'une taxis génératrice de base, il est possible d'obtenir une composition bien plus complexe. [Souami M.A., 2011].

Elle repose sur deux fondements :

- Articulation entre les différents éléments selon des combinatoires simples ;
- Les combinaisons sont répétées de façons périodiques et régulières.

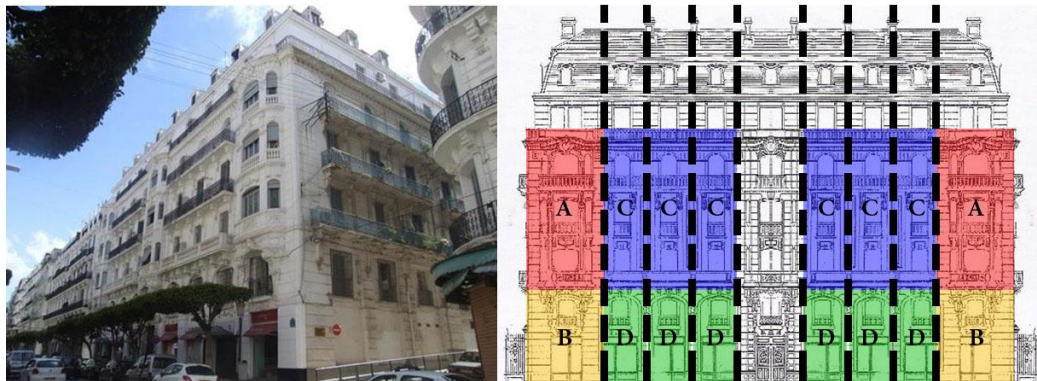


Fig. 49 : Mise en application du principe de la taxis sur un immeuble d'Alger. (Crédit photo : Souami M.A., [Kanoun Y., 2000])

Du Point de vue sismique, la taxis offre différents avantages que l'on peut résumer comme suit :

- La régularité qu'elle impose, aboutie généralement à des formes symétriques et équilibrées, avec distribution équilibrée des éléments porteurs. Ceci, conduit à la superposition du centre de rigidité avec le centre géométrique.
- Cette régularité sur les éléments de façades se répercute aussi sur la régularité des autres éléments rigides du projet telles que les gaines.
- Une régularité qui se matérialise aussi par une transition graduelle et non brusque entre les éléments de l'édifice d'un étage à l'autre. Permettant de la sorte de se prémunir du phénomène de l'étage souple.

La tripartie : l'édifice est constitué aussi bien à la verticale qu'à l'horizontale de trois unités. Une unité de départ, une unité centrale et une unité d'arrivée, ce qui implique une démarcation entre les trois unités. Dans le sens vertical, il y a un

allégement des unités du bas vers le haut⁷¹, et dans le sens horizontal, il y a un renforcement des unités aux extrémités pour bien les démarquer par rapport aux autres édifices.

Afin de matérialiser le principe de la tripartite, on peut noter le recours à des balcons filants qui matérialisent la tripartite verticale en marquant le passage entre le soubassement et le corps, et le passage entre le corps et le couronnement (Fig.50). La tripartite verticale, peut aussi être marquée grâce à la hauteur plus importante du rez-de-chaussée par rapport à celle des autres niveaux.



Fig. 50 : Démarcation entre le soubassement corps et couronnement grâce au balcon filant. (Crédit photo : Souami M.A.).

Pour ce qui est du marquage de la tripartie horizontale, elle est matérialisée grâce, entre autres, au recours au refend d'angle (Fig.51).

Sismiquement parlant, ces différents dispositifs offrent différents avantages :

- Les balcons situés en général au premier et dernier étage peuvent être assimilés à des chaînages horizontaux. Ce qui permet de contrecarrer les problèmes de mauvaises ou absences de liaisons entre les murs et les planchers, mais aussi de minimiser le risque de décollement de la façade et de son effondrement.
- Le recours au refend d'angle permet d'améliorer le contreventement et de prévenir le décollement de façade, minimisant de la sorte le risque de basculement et d'effondrement du mur.

⁷¹ Selon Cantelli, l'immeuble haussmannien ne faisait que *perpétuer le un langage* d'ordre classique [Cantelli M., 1998, P116].

- La hauteur plus importante du rez-de-chaussée par rapport aux autres niveaux offre à ce dernier, la possibilité d'avoir un poids supérieur par rapport aux autres. Une caractéristique qui permet de rabaisser le centre de gravité de bâtiment, réduisant de la sorte le risque de balancement ou d'effondrement des planchers supérieurs à cause d'un surpoids.



Fig. 51 : Marquage de la tripartite horizontale grâce au refend d'angle. (Crédit photo : Bekkal M.)

Le plan régulier : C'est la recherche de la rigueur des choses, avec le recours à des tracés rigoureux des façades rectilignes et des intersections à angle droit [Jestaz B., 2000] (Fig.52).

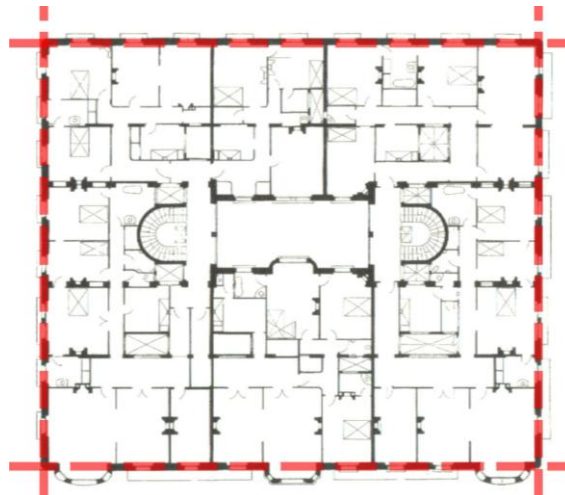


Fig. 52 : Régularité du plan (immeuble du 37 rue Larbi Ben M'hidi) [Kanoun Y., 2000].

Autant de dispositifs qui offrent, sismiquement parlant, la possibilité :

- D'obtenir des formes simples ;
- De confondre le centre de géométrie du bâtiment avec son centre de rigidité ;

- De renforcer les angles en ayant recours à l'angle droit ;
- De minimiser l'importance des saillies et des retraits.

Symétrie : Le désir de régularité a entraîné, par extension, la recherche de symétrie : « *Il n'en demeure pas moins que la symétrie est depuis longtemps une « valeur » intangible pour qui vise une qualité architecturale* » [Lucan J., 2010, P51].

Une symétrie qui a été remise au goût du jour à la renaissance, et se matérialise grâce à un axe médian qui souvent marque l'entrée du projet. Elle devait en premier lieu, apparaître en plan avant de se matérialiser en élévation dans un désir fondamental de rationaliser la création architecturale [Davidson Cragoe C., 2011] (Fig.53).

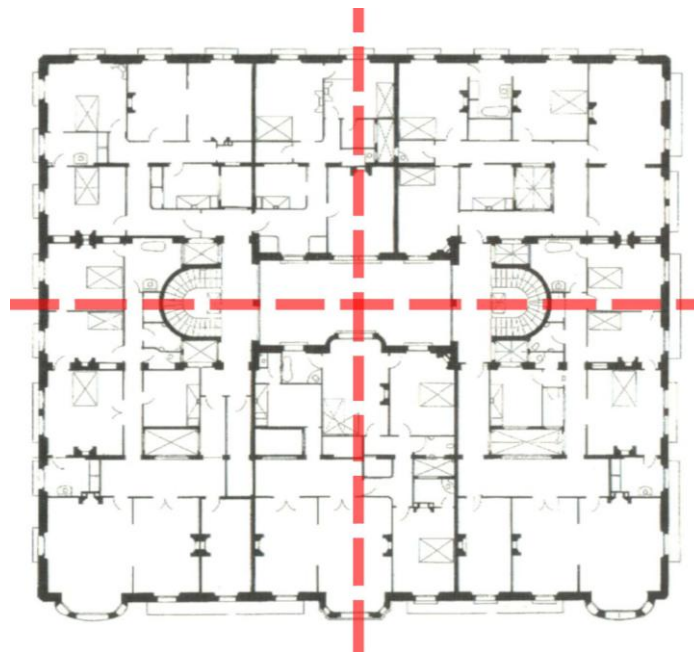


Fig. 53 : Symétrie de l'immeuble du 37 rue Larbi Ben M'hidi [Kanoun Y., 2000].

S'agissant du comportement sismique, le recours à la symétrie permet :

- D'avoir des formes équilibrées ;
- De confondre le centre de rigidité avec le centre géométrique du bâtiment ;
- De disposer de manière équilibrée les éléments porteurs ainsi que les trémies et éléments rigides.

Régularité des travées : Durant la période qui a précédé la renaissance, la position des ouvertures était en fonction des besoins en lumière des différents espaces. Ceci a entraîné des largeurs inégales dans la dimension des trumeaux.

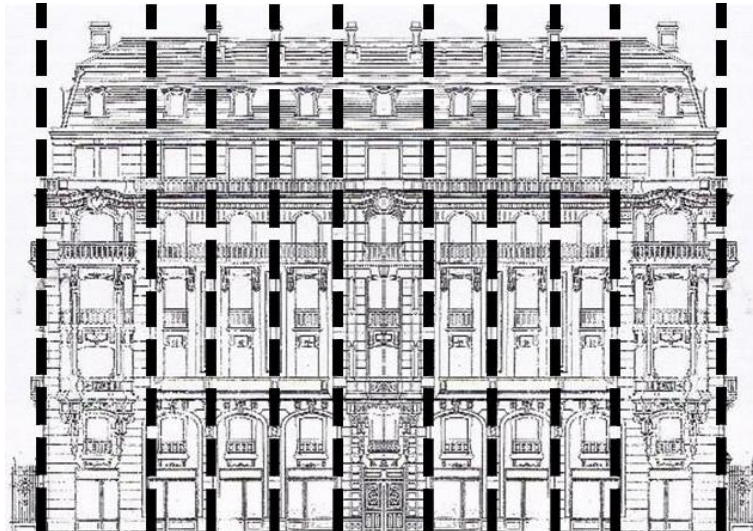


Fig. 54 : Régularité des travées [Kanoun Y., 2000].

A partir de la renaissance, il y a eu un retour vers la recherche d'une esthétique de façade qui tend vers l'harmonie du tout et la régularité des choses (Fig.54).

Ainsi, la régularité du rythme des ouvertures de la façade devient une règle obligatoire [Jestaz B., 2000].

Une régularité qui profite totalement au comportement d'un bâtiment lors d'un séisme, car ceci permet :

- Une distribution équilibrée et régulière des éléments participant au contreventement ;
- Une superposition des ouvertures, évitant le risque d'avoir des rigidités différentes au sein d'un même mur.

Les proportions : C'est le désir de retrouver des dimensions harmonieuses entre les différents côtés du projet, afin que ce dernier puisse s'inscrire dans les canons de la beauté classique.

Parmi les architectes qui ont le plus cherché à retrouver les proportions harmonieuses dans leurs projets, on peut citer Palladio qui avait souvent recours aux rapports $1/3$, $2/3$ et $1/2$ [Wittkower R., 1996].

L'inscription dans ces règles d'harmonie offre, sismiquement parlant, la possibilité :

- D'obtenir des constructions ramassées et compactes ;

- De réduire l'élancement des bâtiments, ce qui rabaisse le niveau du centre de gravité mais aussi réduit le risque de perte de résistance du mur en maçonnerie.

3.4.3 Les règles régissant la façade, la rue et l'alignement

Les premiers plans produits par l'administration coloniale, ont inscrit la ville dans une logique de recherche d'alignement avec des possibilités d'extension futures du tissu urbain. Cette démarche, s'inscrivait dans la droite ligne de la démarche globale promue à Paris par le baron Haussmann⁷² et qu'on ne faisait que transposer à Alger, et aux autres villes algériennes [Almi S., 2002].

Ainsi, les immeubles et les formes urbaines produits à Alger durant la période allant de 1830 à 1930 partage énormément avec le registre de composition et de création du modèle dit « Haussmannien ».

Plus précisément, les caractéristiques de l'immeuble haussmannien sont directement issues des tendances architecturales de la fin de la monarchie de juillet qui ont été appliquées, voire aussi mises en place par d'autres préfets avant Haussmann, tel que le préfet Rambuteau [Labordière J. M., 2006].

Ces différents partages renvoient vers des questions inhérentes aux : « *modèles de composition urbaine, types de distribution des bâtiments, dispositifs réglementaires, cultures professionnelles, systèmes constructifs, répertoires décoratifs, etc.* » [Minneart J-B, 2005, P10].

Des caractéristiques qui ont déterminé la forme globale des immeubles tels que la hauteur, les saillies, le retrait...etc.

Notons que ces différents immeubles ont des trait de caractères communs, il n'empêche que la qualité des traitements a tendance à se réduire quand on s'éloigne des beaux quartiers. Ainsi, la hauteur décroît, les balcons sont éliminés, l'ornementation se simplifie...etc : « *Les grands balcons ne sont autorisés que sur les façades des rues de plus de 10 m de large, et à une hauteur de chaussée de plus de 6 m.* » [Cantelli M., 1998, P116].

Ordonnancement : C'est l'une des caractéristiques les plus importantes de ces bâtiments qui repose essentiellement sur la régularité de la façade (Fig.55). Elle n'est

⁷² Le centre actuel des villes du sud de la méditerranée est principalement composé selon les principes dits haussmanniens [Minneart J-B, 2005, P10].

d'ailleurs que l'extension du système néo-classique et de sa hiérarchie. Ainsi, comme nous le rappelle Eleb M. les percements au niveau de la façade, ne sont plus obtenus en fonction des dimensions et de l'usage des espaces à éclairer, mais en fonction d'une certaine image de l'immeuble et de son rôle au sein de la composition urbaine générale [Des Cars J., 2005] (Fig.56 & 57).

Ce désir d'ordonnement, a été définitivement et strictement réglementé au niveau du règlement du cadre bâti du 27 juillet 1859 et qui tend à valoriser la continuité en interdisant l'individualisation des bâtiments.



Fig. 55 : la règle de l'ordonnement (Crédit photo : Bekkal M.).

Dans les années 1850, l'immeuble est considéré comme transparent, comme dans les immeubles du style de la Restauration et de Louis Philippe. Mais à partir des années 1860, le rapport plein/vide s'inversa avec l'agrandissement des trumeaux. Ce qui offrit des surfaces en plus pour la décoration de la façade [Larbodière J. M., 2006].

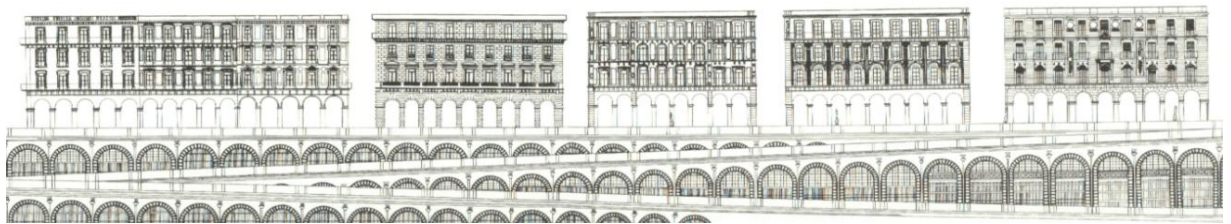


Fig. 56 : Ordonnement des façades sur le boulevard Cheguevara à Alger [Kanoun Y., 2000].

Le principe de l'ordonnement, permet du point de vue de la matérialisation des principes de l'architecture parasismique:

- L'obtention de formes régulières du fait de la répétition horizontalement, que verticalement des éléments à un rythme régulier ;
- L'équilibre et la symétrie des formes ;
- L'amélioration du contreventement grâce à l'obtention dans la façade d'un rapport plein/vide important, par la répétition alternée entre des

pan de murs ouverts et des pans de murs aveugles plus large que les premiers ;

- La présence de trumeaux importants et continue sur toute la hauteur de l'immeuble ;
- La distribution de manière régulière et équilibrée de la structure ;
- Une transition horizontale et verticale régulière ou graduelle entre les éléments composant l'édifice, évitant de la sorte le changement brusque entre la rigidité des composants, ce qui permet de prévenir les effets néfastes d'un étage souple.



Fig. 57 : Vue en perspective de l'ordonnement des façades sur le boulevard Cheguevara à Alger. (Crédit photo : Souami M.A.)

Continuité des perspectives : C'était une des plus importantes obsessions du baron Haussmann. Il cherchait à travers les grandes percées et la réalisation des grands boulevards à la mise en valeur des sites prestigieux. Il y arriva en ménageant de grandes perspectives sur des places importantes, des monuments remarquables, des ponts, et surtout les gares [Larbodière J.M., 2012].

Afin d'y parvenir, on imposa la recherche de continuité entre les différents immeubles voisins par le développement des lignes horizontales en corniche ou en bandeau (Fig.58). Ceci n'a pu être réalisé qu'en obligeant l'ensemble des bâtiments à avoir la même hauteur aussi bien dans les étages courants, les étages en retrait qu'au niveau des corniches : « *Concernant l'aspect des façades des nouvelles constructions, les immeubles mitoyens doivent avoir, les mêmes hauteurs d'étage, et les mêmes lignes principales de façade.* » [Renault C., 2011, P163].

Un dispositif que l'on est arrivé à imposer grâce aux clauses des formulaires types utilisés pour les ventes de terrains par la ville : « *Dans chaque îlot, les maisons auront les mêmes hauteurs d'étage et les mêmes lignes principales de façade et les propriétaires, en cas de dissentiment entre eux, seront tenu de s'en rapporter à la*

décision de M. le préfet de la Seine. Dans le cas où, par suite de circonstances particulières, M. le préfet reconnaîtrait l'impossibilité de raccorder les lignes horizontales de la façade, les corniches, balcons et autres saillies devraient être arrêtées ou supportées à leurs extrémités par des pilastres ou consoles, établis en dehors du mur mitoyen de manière à laisser entièrement libre l'épaisseur de ce mur. [...] Les maisons devront d'ailleurs être élevées toute à la hauteur permise par les règlements. » Ces clauses sont ici tirées du contrat du 22 avril 1863 portant vente à la compagnie immobilière. » [Térade A., 1998, P41].



Fig. 58 : Continuité des lignes de perspective grâce à l'alignement des planchers. (Crédit photo : Souami M.A.)

Selon M. Eleb, l'immeuble dit Haussmannien présente une façade régularisée accentuée par un bandeau horizontal à chaque étage et raccordé à l'immeuble voisin. Cet effet peut aussi être accentué par la présence de balcon filant au premier, voire aussi un autre au 3^{ème} étage, mais qui sera traité de manière moins importante afin de respecter la hiérarchie sociale [Larbodière J. M., 2006].

Cette organisation de la façade était définie par le règlement de 1859. Un texte qui s'inscrivait dans la continuité direct des règlements régissant la voirie de 1776, 1783, 1784 et 1823 en ce qui concerne les proportions entre hauteur et largeur des voies, et les dimensions et positions des saillies [Cantelli M., 1998].

L'immeuble n'est pas un objet architectural autonome, mais un élément de l'espace urbain. Ces façades sans encorbellements ni saillies importants⁷³ permettent de percevoir sans obstacle les lignes de fuites [Des Cars J., 2005].

⁷³ Les saillies étaient régies par l'ordonnance de 1823 qui limitait à 80 cm la profondeur des grands balcons et à 22 celles des petits balcons [Bonier L., 1902].

Ce principe, permet de passer de l'échelle de la parcelle à celle du quartier dans un dispositif continu de bout en bout. Au niveau de l'immeuble dit haussmannien, cela se matérialisa par une régularisation totale du rythme avec une superposition des percements, même au niveau des combles en ayant recours aux lucarnes comme nous le rappelle F. Loyer : « désormais, le seul décor possible sera celui, qui saillant sur la façade, sera perceptible en profil et dont la rythmique individuelle ne perturbera en aucune manière l'effort général vers l'unité. Aussi cet effort tend-il à dissoudre totalement l'originalité des façades, à les réduire à leur modeste rôle de module-participant d'une structure plus générale qui est celle de l'ordonnement urbain – ordonnement monumental par excellence et profondément anonyme. » [Loyer F., 1994, P194].

Victime de son succès, le modèle haussmannien conduit à la généralisation d'un modèle de bâtiment qu'on a voulu répéter à l'infini, chose encore plus facilitée grâce à l'émergence d'une nouvelle société industrialisée. Ce qui a fini par conduire à l'émergence, à partir des années 1860, d'une nouvelle génération d'architectes totalement révoltés contre ce modèle.

Ce qu'il faut retenir par rapport à cette révolte, c'est qu'elle chercha à rompre avec le principe qui interdisait l'individualisation des bâtiments par l'accentuation des lignes horizontales. En aucun cas, cette révolte n'a concerné la régularité et l'équilibre de la façade (Fig.59).

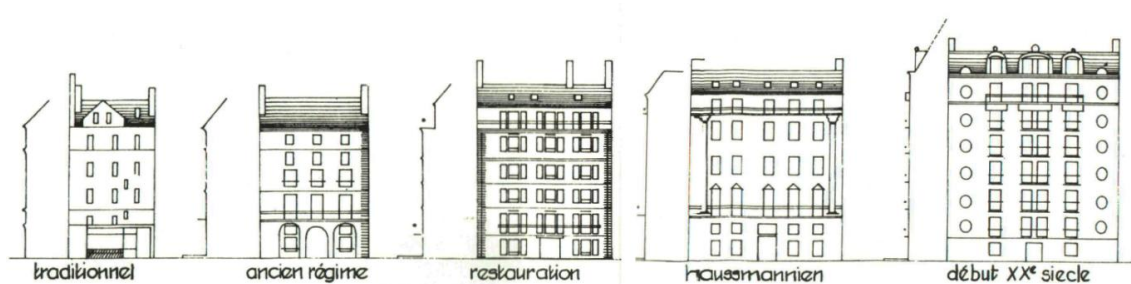


Fig. 59 : Evolution de la façade durant le 19ème siècle à Paris [Loyer F., 1994].

On nota ainsi, l'introduction de nouveaux éléments de composition de la façade, mais ceci dans un respect absolu de la régularité du rythme, des percements et de la symétrie des bâtiments à quelques exceptions au niveau de certaines parcelles étroites ou dont la position topologique était spécifique (Fig.60).

Même dans le cas où la régularité du rythme était brisée, cela se faisait soit au centre du bâtiment pour le marquage de l'entrée, soit dans les angles pour marquer les transitions. Mais dans les deux cas, cela se faisait toujours par graduation et par symétrie parfaite. Ce qui en fin de compte, ne remettait pas en cause le principe

général de l'organisation de la façade urbaine et sa participation à l'accentuation de la perspective.

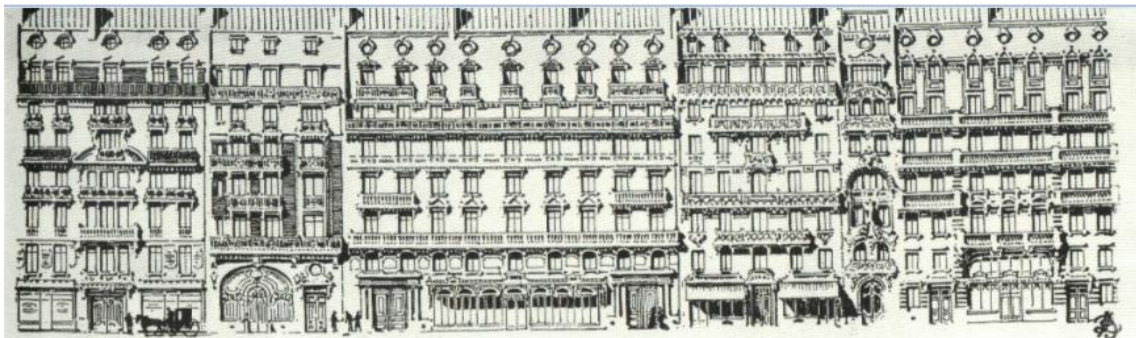


FIG. II. — Partie de rue de 20 mètres ; largeur de la rue de Châteaudun ; conforme au Décret du 22 juillet 1882.



FIG. III. — Partie de rue de 20 mètres de largeur, avec les millies de windows tolérées actuellement et contrairement au Décret de 1882.

Fig. 60 : Aucune différence de fond entre l'ordre existant (1884) et projeté (1902), [Loyer F., 1994].

Finalement, les règlements postérieurs à Haussmann -et dont l'aboutissement le plus important est celui de 1902- ne contestent en aucun cas la physionomie d'avant, avec le maintien des lignes de fuites et la préservation des mêmes hauteurs de niveau. Ils ne font principalement qu'en critiquer la platitude des façades, par la modification des composants tels que le recours au bow-window [Bonnier L., 1903].

Même l'avènement de l'art nouveau et le recours par certains architectes à des sculpteurs pour le traitement des façades, ne remet pas en cause l'ordonnement et le principe d'organisation de l'immeuble dit haussmannien.

Certes, ils transforment la dynamique des enveloppes des bâtiments, mais maintiennent en contrepartie l'équilibre global du bâtiment et la cohérence de l'ordonnement de la façade urbaine.

Ceci conduit Loyer F. à dire que l'immeuble post-haussmannien, s'il est sorti de son contexte il devient hétérogène, mais s'il est inscrit dans de vastes opérations, il crée des paysages impressionnants par sa puissance et son « unité ».

Ce principe de continuité des perspectives, permet par rapport au séisme de :

- Minimiser le risque d'entrechoquement par l'alignement continu des planchers des bâtiments juxtaposés ;
- Contrecarrer l'effet de poteau-court vu qu'on a évité la juxtaposition d'un côté d'un plancher rigide avec les éléments porteurs verticaux moins rigides de l'autre côté ;
- Constituer une sorte de chaînage horizontale, réduisant le risque d'effondrement des murs dus à une absence ou mauvaise liaison entre les planchers et les murs porteurs ;
- Réduire le risque de décollement de la façade.

Hiérarchie des voies : Au niveau des angles, le principe de l'ordonnement change de rythme afin de respecter un autre principe tout aussi cher à Haussmann à savoir le respect de la hiérarchie des voies. Ceci était obtenu grâce aux dispositifs suivant (Fig.61):

- Affaiblissement de la norme d'ordonnement ;
- Changement de rythme des fenêtres à savoir plus de plein que de vide ;
- Éléments de lecture de profil plus simples en silhouette des balcons ;
- Diminution du nombre ou retrait du 2^{ème} balcon ;
- Changement du matériau en plus massif ;
- Appauvrissement des décors architectonique.



Fig. 61 : Traitement des angles afin de ressortir la hiérarchie des rues. (Crédit photo : Bekkal M.)

Toutes ces recommandations ont abouti du point de vue sismique :

- Au renforcement constructif de l'angle par la réduction du vide et des éléments fragilisant la structure ;

- A l'amélioration du contreventement en ayant des pans de murs aveugles et plus grands à l'angle des bâtiments ;
- A la réduction du risque de décollement entre les façades.

Individualisation des bâtiments : La révolte de 1860 contre l'uniformité, la rigidité et la monotonie des alignements s'attaqua d'abord aux gabarits, puis à l'inversion de la dominance du rythme horizontal par l'introduction de composants verticaux.

Le règlement de 1884 fût la première escarmouche lancée contre l'ordre établi. Il sera par la suite finalisé par le règlement de Luis Bonnier en 1902. Ce règlement s'attaque fondamentalement, aux combles au-dessus de la ligne de corniche en passant de l'obligation de s'inscrire à l'intérieur d'un oblique de 45°, à celui de s'inscrire dans un arc de cercle de 6 mètres, ce qui valorise le comble en y rajoutant un niveau [Loyer F., 1994] et [Bonnier L., 1902].

L'immeuble tend par-là, à son individualisation grâce entre autre à l'imposition au niveau des cahiers charges de pilastres limitant latéralement la façade. Mais aussi, par l'accentuation de la verticalité afin de contrecarrer à la dominance des lignes horizontales qui prévalaient avant le recours à une grande variété de polychromie [Pinon P., 2005].

Une verticalité qui a été obtenue par la multiplication, vers les années 1890, des portes-fenêtres à balconnets en remplacement des fenêtres habituelles [Loyer F., 1994].



Fig. 62 : Projection des bow-windows dans les façades. (Crédit photo : Souami M.A.)

Parmi les dispositifs qui ont participé à l'individualisation des bâtiments au niveau des façades, on peut aussi citer le bow-window (Fig.62). Au niveau du

règlement de 1882, il est mentionné que les bow-windows doivent se cantonner entre le balcon du 1er et celui du retiré tout en étant autorisé à avoir des saillies de 40 cm sur la façade, avec une surface totale des bow-windows qui ne dépasse pas le quart de la surface de la façade et surtout, que ces derniers doivent être démontables [Loyer F., 1994]⁷⁴.

Il faudra attendre le règlement de 1893, afin de voir le bow-window autorisé à être réalisé en dur et de passer d'une saillie de 40cm à 120cm. Ce qui permet de ce fait d'en finir avec les façades plates linéaires, et de passer à des enveloppes qui ont du volume [Labordière J. M., 2006].

L'individualisation des bâtiments participe à la matérialisation de plusieurs principes de l'architecture parasismique :

- Le renforcement des angles par le recours au refend d'angle ;
- Le recours à des balcons avec des porte-à-faux de profondeurs très limitées ;
- Un nombre de saillies et de retraits limités avec des dimensions très limitées ;
- L'amélioration du contreventement par le recours à des pans de murs plus importants aux angles ;
- Minimiser le risque d'effondrement dû à une absence ou mauvaise liaison ;
- La réduction de la fragilisation des angles des ouvertures grâce à l'accentuation des lignes verticales obtenues par réduction de la largeur des ouvertures et l'encadrement de ces dernières.

Hiérarchisation verticale : L'immeuble dit haussmannien, est composé en générale de 4 à 5 étages et dont la façade veille par sa composition et son traitement au respect de l'expression de la hiérarchie social, avec un RDC public, plusieurs niveaux –généralement 3- destinés aux bourgeois et enfin un dernier niveau pour les bonnes et serviteurs.

Cette hiérarchisation, conduit au marquage de manière assez nette la transition entre les trois parties, mais aussi la transition entre chaque niveau.

⁷⁴ Selon Chemetov et Marrey la saillie autorisée par le décret de 1882 et de 80cm. [Chemetov P. 1985].

Le balcon constitue un des dispositifs les plus utilisés afin de permettre cette transition et ce marquage. D'une manière générale, la façade est composée d'un balcon filant ou deux. Dans le cas où 3 étages se suivent sans la présence de balcon, on relève la présence d'un bandeau fillant entre deux niveaux [Larbodière J. M., 2006].

La hiérarchie verticale se manifestait aussi par la réduction des hauteurs des niveaux du bas vers le haut, comme fixées par la réglementation de 1902 :

- Hauteur du rez-de-chaussée minimum 2.80 mètres
- Hauteur des étages minimum 2.60 mètres
- Hauteur du dernier niveau en comble minimum 2.00 mètres



Fig. 63 : les hauteurs d'étage de l'immeuble Milk bar, se réduisent du bas vers le haut. (Crédit photo : Souami M.A.)

Cette hiérarchisation verticale implique, que les niveaux supérieurs ont des hauteurs de niveaux moins importantes que les niveaux inférieurs (Fig.63). Une caractéristique, qui implique que les niveaux inférieurs sont plus lourds que les autres. Une particularité qui conduit du point de vu sismique :

- A rabaisser le centre de gravité de l'immeuble ;
- A éviter la surcharge des planchers supérieurs et donc de minimiser le risque d'effondrement de ces derniers.

3.4.4 Typologie des îlots et découpage parcellaire

Dans le cadre de la mission de restructuration et d'embellissement de la ville de Paris, l'intervention du Baron Haussmann ne se limita pas seulement à la

réglementation et l'organisation de la façade et de l'immeuble, mais elle toucha aussi le parcellaire et son tracé.

Cette intervention s'est matérialisée par une insertion dans le tissu ancien de tout un réseau d'îlots continu dans un maillage à cadre régulier, et dont le plan d'ensemble était d'une rigueur exceptionnelle.

Une rigueur qui imposait des règles de composition très précises, à répéter d'un immeuble à l'autre, puis d'un îlot à l'autre pour les immeubles et les îlots se trouvant dans la même rue [Labordière J. M., 2006].

Cette rigueur a permis la création d'un ensemble de constructions régulières. Ce qui du point de vue sismique, permettait d'avoir des formes régulières plus favorables à un bon comportement sous charges sismiques.

Valorisation de la cour intérieure : Avant l'avènement du baron d'Hausmann en tant que préfet de Paris, l'îlot était en général divisé en deux parties, une bordure et un intérieur.

La partie en bordure donnant sur la rue était traitée de manière éloquente, avec un grand souci de composition et d'esthétique. Alors que la partie intérieure de l'îlot, était considérée comme une sorte d'arrière-boutique sans obligation d'être aussi bien considérée et traitée que celle donnant sur la rue.

L'avènement des moyens de transport rendit la rue plus bruyante, conduisant à déplacer les espaces nobles, telles que les chambres vers la partie intérieure. Ce geste a permis d'anoblir l'espace de la cour [Barey A., 1980], avec comme conséquence, une amélioration significative dans la qualité des traitements de ses façades(Fig.64).



Fig. 64 : Façade de la cour intérieure, Alger. (Crédit photo : Souami M.A.)

Ainsi, les principes de composition des façades sur rue ont été repris au niveau des cours intérieures avec la reprise de l'ordonnancement, de la hiérarchie verticale...etc.

Une valorisation de la cour qui est bénéfique pour le bâtiment en cas de séisme car elle permet:

- De simplifier la forme des bâtiments avec des formes de cours plus simples ;
- D'affirmer ou d'accentuer la symétrie des immeubles, par la position centrale ou axiale de la cour ;
- De favoriser la superposition du centre de rigidité avec le centre géométrique de l'immeuble.

Régularité de l'îlot : La disparité entre les deux parties de l'îlot à savoir, la partie sur rue et celle sur cour intérieure allait petit à petit s'estomper avec l'arrivée d'Hausmann. L'une des plus importantes modifications subie par l'îlot, sera de rendre la bande d'épaisseur de l'îlot -à savoir la profondeur les parcelles- de mêmes dimensions.

A partir de ce moment, les cours d'immeubles font partie des éléments codifiés et régularisés. Ainsi, leurs emplacements et dimensions sont précisés et annexés à l'acte de vente et non pas laissés au libre arbitre des acquéreurs ou des architectes [Pinon P., 2005].

D'une manière générale, les cours au niveau des îlots sont communes à trois ou quatre parcelles et à cheval sur la limite de ces dernières. La régularité de leur dimensionnement et de leur distribution est telle, qu'elle laisserait penser que l'îlot n'est pas le résultat de la juxtaposition de plusieurs immeubles, mais plutôt celui d'un seul bâtiment réalisé en tant qu'objet monolithique dans lequel on a procédé à des évidements pour créer des cours [Panerei Ph. 2009].

Concernant les villes coloniales en Algérie, ces dernières ont été dessinées par le génie militaire français avec comme mots d'ordres : rigueur et simplicité : « *La régularité est utilisée comme une solution technique simple et rapide à mettre en œuvre et permettant d'accueillir avec facilité des programmes complexes : La juxtaposition d'équipements militaires et civils, et la construction sur le même espace d'immeubles urbains comme de maisons rurales. La transformation des villes anciennes comme la création des villes nouvelles respectent quelques règles communes. La première règle, pour les ingénieurs du Génie, est de se rapprocher le plus possible d'une*

figure régulière pour tracer le périmètre de la ville. Ce choix doit permettre de donner à l'assiette de la ville, au tracé des rues, et ainsi aux plans des maisons, la même régularité. Une figure géométrique régulière offre un ratio correct entre la surface et le périmètre d'enceinte. De même, les ingénieurs du Génie ont constamment le souci de limiter la longueur des rues, d'offrir des lots de forme simple facile à construire et de proposer des parcelles dont la façade à clore soit modérée. » [Malverti X., 1994, P235].

Tout ceci étant bien sûr bénéfique du point de vue sismique car permettant :

- La simplification des formes des constructions ;
- De confondre le centre de rigidité avec le centre géométrique par le recours aux formes les plus régulières, mais aussi les plus symétriques ;
- L'équilibre dans la disposition des éléments porteurs.

Proportions de l'îlot : Le lotissement Haussmannien est un lotissement linéaire, avec un terrain dont la surface est en général inférieure ou à peine supérieure à la voie qui le dessert. L'objectif premier de cet îlot, reste la création de circulation entre les points névralgiques de la ville [Pinon P., 2005].

Selon P. Pinon, l'idée de ville nouvelle, avec des tracés réguliers, planifiés, n'est possible que dans les nouvelles villes coloniales évoquées, entre autre, par Landry en 1850, dans sa présentation d'un projet de ville pour la « Colonisation de l'Algérie ».

Ainsi, les villes coloniales sont structurées selon un ordre de planification et de régularité qui ne concerne pas la France métropolitaine. Car il s'agit là de régularisation, par la mise en relation et la valorisation de certains monuments névralgiques assez éloignés les uns des autres -telles que les gares de trains qui sont considérées comme les nouvelles portes de la ville-, alors que dans des villes comme Alger, il s'agit plutôt de nouvelles planifications.

L'îlot réalisé à Paris durant le XIXe siècle est plus, le fruit des percements et la création de nouveaux boulevards assez longs, ce qui a conduit à obtenir de ce fait des îlots tout aussi long avec des proportions assez allongées.

Par contre, en ce qui concerne l'îlot algérois, ce dernier est le fruit du génie militaire et de son pragmatisme. Un pragmatisme qui se matérialise avec une recherche de la régularité et l'adaptation aux différentes configurations des sites [Malverti X., 1994]. Une approche qui a abouti à ce que l'îlot algérois, durant le premier siècle de la colonisation française, semble se diriger vers deux formules [Chantier, 1934]:

- Ilot de forme sensiblement carré qui ne se distingue de l'îlot de commerce que par ses dimensions un peu plus importantes (Fig.65).
- Lotissements par bandes. On les rencontre à chaque fois que les pentes de la ville s'accroissent fortement. Les immeubles se superposent selon des bandes parallèles qui épousent les reliefs du sol.

Ainsi, du point de vue sismique, les différents îlots qui ne sont pas réalisés sur des pentes, possèdent non seulement des formes simples, mais surtout ils sont compacts et non allongés.

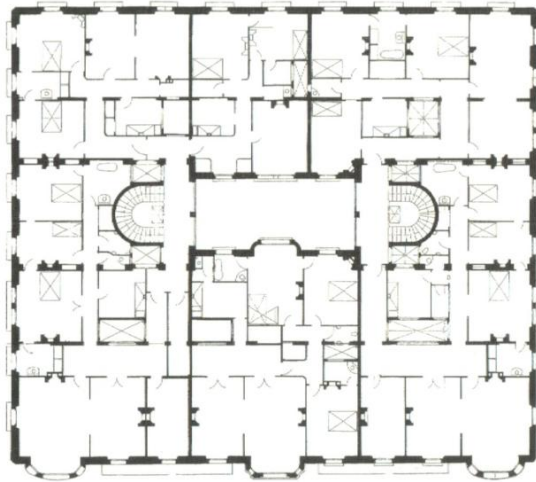


Fig. 65 : Un îlot régulier et ramassé, Alger [Kanoun Y., 2000]

Caractéristiques de la parcelle : Concernant le découpage de l'îlot en parcelles, ce dernier obéit à une somme de principes récurrents [Panerai Ph. 2009] que l'on peut résumer comme suit :

- Chaque parcelle est tracée rigoureusement à la perpendiculaire de la rue ;
- Dans le cas des îlots triangulaires, la ligne de partage à l'intérieur de l'îlot est la bissectrice de l'angle des rues ;
- Les proportions moyennes des parcelles excluent aussi bien les parcelles en profondeur que les parcelles étirées en façade le long de la rue.

Cet ensemble de règles, conduisent à la création d'un ensemble de parcelles de tailles et de formes assez régulières⁷⁵.

⁷⁵ Xavier Malverti relève qu'entre 1830 et 1870 les villes algériennes étaient dessinées par le génie militaire qui veillait à la composition d'un découpage parcellaire régulier [Malverti X., 1994, P241].

Autant de caractéristiques qui, sur le plan sismique nous offre la possibilité d'avoir :

- Des formes simples grâce au traçage perpendiculaire à la rue ;
- Des formes symétriques ;
- Une superposition du centre de rigidité avec le centre de géométrie, vu que la composition se fait à partir des bissectrices ;
- Une régularité et un équilibre dans la distribution des éléments porteurs.

3.5 Conclusion chapitre II

A travers ce chapitre, nous avons cherché à identifier –du moins théoriquement- le potentiel sismo-résistant du patrimoine architectural algérois 1830-1930.

Notre démarche a consisté à mettre en corrélation d'un coté, les caractéristiques de l'architecture algéroise 1830-1930 et de l'autre, les principes d'une bonne architecture parasismique. Cette corrélation vise à mettre en évidence en quoi les caractéristiques de cette architecture peuvent aussi bien améliorer le comportement sismique de ce patrimoine, mais aussi à contrecarrer les différentes pathologies des constructions en maçonnerie identifiées au chapitre précédent [Souami M.A., 2012A].

Les résultats obtenus montrent –du moins théoriquement- que le corpus d'étude possède un potentiel sismo-résistant intéressant.

Effectivement, la lecture du tableau récapitulatif (Tab.4), nous permet de faire ressortir à quel point, les caractéristiques intrinsèques des édifices du patrimoine architectural algérois de 1830-1930 participent aussi bien, à la concrétisation des facteurs participant à une bonne conception architecturale parasismique, mais aussi à contrecarrer différentes pathologies des structures en maçonnerie dues au séisme.

Sur les 13 facteurs composant les bonnes règles de la conception architecturale parasismique, et les 9 types de dommages que risque de subir une structure en maçonnerie, nous avons identifié en moyenne 4 caractéristiques stylistiques et urbaines de ces édifices -allant parfois jusqu'à 7 caractéristiques-, qui participent positivement à l'amélioration du comportement de ces bâtiments.

Il est ainsi clair qu'en faisant un comparatif entre, d'un côté les règles de l'architecture parasismique et les dommages que risque de subir un édifice en

maçonnerie, et de l'autre les caractéristiques stylistiques, urbanistiques et des formes urbaines de l'époque étudiée, il s'avère que les édifices sont prédisposés à bien répondre aux impératifs liés à la bonne tenue sismique.

| | | Caractéristiques stylistiques | | | | | les règles régissant la façade la rue et l'alignement | | | | | La typologie des îlots | | | |
|--|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------------|------------------------------|
| | | <i>La taxis</i> | <i>La tripartie</i> | <i>Le plan régulier</i> | <i>Symétrie</i> | <i>La régularité des travées</i> | <i>Les proportions</i> | <i>Ordonnancement</i> | <i>Continuité des perspectives</i> | <i>Hierarchie des voies</i> | <i>Individualisation des bâtiments</i> | <i>Hierarchisation verticale</i> | <i>Valorisation de la cour intérieure</i> | <i>Régularité de l'îlot</i> | <i>Proportions de l'îlot</i> |
| CONCEPTION ARCHITECTURALE PARASISMIQUE | <i>Simplicité des formes</i> | | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | <i>Symétrie</i> | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | | | ✓ |
| | <i>Rabaisser le centre de gravité</i> | | ✓ | | | | | | | | ✓ | | ✓ | | |
| | <i>Centre de géométrie confondu avec le centre de rigidité</i> | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | | | ✓ |
| | <i>Renforcement des angles</i> | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | | |
| | <i>Porte-à-faux</i> | | | | | | | | | | ✓ | | | | |
| | <i>Saillie et retrait</i> | | | ✓ | | | | | | | ✓ | | | | |
| | <i>Proportions et élancement</i> | | | | | | ✓ | | | | | | | ✓ | |
| | <i>Contreventement</i> | | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | |
| | <i>Trémies et éléments rigides</i> | ✓ | | | ✓ | | | | | | | | | | |
| | <i>Élément porteur</i> | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ |
| | <i>Niveau souple</i> | ✓ | | | | | | ✓ | | | | | | | |
| <i>Poteau-court</i> | | | | | | | | ✓ | | | | | | | |
| RISQUES ET TYPES DE DOMMAGES DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE | <i>Absence/mauvaise liaison</i> | | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | | | | |
| | <i>Absence de poutre perpendiculaire</i> | | ✓ | | | | | | | | | | | | |
| | <i>Fissure angle d'ouverture</i> | | | | | | | | | ✓ | | | | | |
| | <i>Petit trumeau non continu</i> | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | |
| | <i>Surcharge de plancher</i> | | ✓ | | | | | | | | | | | | |
| | <i>Interaction avec l'environnement</i> | | | | | | | ✓ | | | | | | | |
| | <i>Élancement important</i> | | | | | | ✓ | | | | | | | | |
| | <i>Vulnérabilité des angles</i> | | | | | | | | ✓ | ✓ | | | | | |
| | <i>Décollement de la façade</i> | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | | | | | |

Tab. 4 : Corrélation des données.

Il est important à partir de cette corrélation, de veiller à la vérification de la véracité de ces premières conclusions.

Cela se fera au niveau du prochain chapitre en deux moments :

- 1.** Une enquête sur terrain sur notre corpus d'étude afin de vérifier si ce dernier possède les différentes caractéristiques identifiées dans ce chapitre ;
- 2.** Des simulations numériques pour évaluer l'impact des différentes caractéristiques identifiées sur le comportement de notre corpus lors d'un séisme.

4. CHAPITRE III : IMMEUBLE D'ALGER 1830-1930 ET SIMULATIONS EXPÉRIMENTALES

4.1 Introduction :

Ce chapitre se fixe comme objectif la démonstration du bien fondé de nos hypothèses, par la vérification de l'impact des propriétés stylistiques et urbaines du patrimoine architectural algérois 1830-1930 -identifiées dans le chapitre précédent-, dans le comportement de ce dernier lors d'un séisme.

Dans un premier temps, nous allons vérifier à travers une enquête sur terrain, si les bâtiments de notre corpus vérifient la présence des caractéristiques énumérées au niveau de la conclusion du chapitre précédent⁷⁶.

La deuxième étape, vise à travers les simulations numériques paramétriques⁷⁷, la vérification du comportement dynamique des édifices étudiés lors d'un séisme.

Ces différentes simulations sont divisées en deux catégories. La première, concerne deux types d'exemples simplifiés. Le premier exemple consiste en des modèles de constructions basiques de forme cubique qui se multiplie à l'horizontale et à la verticale. Le deuxième exemple, concerne la simulation d'une série de parois obtenues à partir d'un exemple existant et dont on a varié, à chaque fois, un paramètre bien déterminé.

La deuxième catégorie de simulation, est réalisée sur la base d'un immeuble significatif des édifices étudiés et que nous avons identifiés lors de l'enquête sur terrain. Différents modèles ont été réalisés à partir du modèle source avec, à chaque fois, la possibilité de vérifier l'impact d'une seule caractéristique sur le comportement dynamique du bâtiment lors d'un séisme.

Vu que le corpus d'étude se trouve à Alger, les simulations⁷⁸ ont été réalisées en utilisant les recommandations du règlement parasismique algérien⁷⁹.

⁷⁶ Voir Tab. 4 P125.

⁷⁷ La simulation paramétrique, consiste en la simulation à partir d'un modèle de référence de différents paramètres. Il s'agit pour chaque modèle d'introduire dans le modèle de référence la caractéristique à expérimenter et d'en relever l'impact [Cherfaoui A. & Afra H., 1996].

⁷⁸ Les différentes simulations ont été réalisées sur le logiciel d'engineering ETABS 2013, dans sa version d'évaluation 13.0.0. Ce logiciel, créé par la société CSI permet le calcul des structures des bâtiments et la simulation de l'action sismique sur les édifices. Pour plus de précisions voir : <http://www.csiberkeley.com/etabs2013>

⁷⁹ Les spectres de réponse et les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour les simulations numériques ont été obtenus en prenant en considération les prescriptions de la réglementation parasismique algérienne, et les paramètres utilisés par le CGS lors de l'étude de vulnérabilité au séisme du bâtiment de la wilaya d'Alger [CGS, 1995].

Il est important de préciser, qu'il ne s'agit pas à travers ces simulations de vérifier la satisfaction ou non des règles de sécurité des modèles simulés par rapport à la réglementation. Il est plutôt question, de vérifier l'impact de certaines caractéristiques de ce patrimoine sur l'amélioration du comportement d'un bâtiment lors d'un séisme.

4.2 Enquête sur le corpus d'étude

Cette enquête a comme objectif, la vérification de la présence des traits de caractères censés améliorer le comportement parasismique du bâtiment face au séisme au niveau de notre corpus d'étude. Elle pourra par la suite, servir de base à la mise en place d'une fiche de diagnostic, permettant d'obtenir une évaluation visuelle simplifiée de la vulnérabilité u patrimoine bâti⁸⁰.

La formulation de notre fiche d'enquête ne pouvait pas se baser uniquement sur les fiches d'évaluations post-sismiques établies par le CGS et le CTC pour l'évaluation de la vulnérabilité du vieux bâti. Ces deux fiches se basent fondamentalement sur les systèmes structurels et constructifs et non pas sur les caractéristiques architecturales des bâtiments.

Ceci est à notre sens assez réducteur, car la dimension constructive est loin de permettre d'expliquer exclusivement la bonne tenue ou la défaillance des bâtiments face au séisme.

C'est pour cette raison, que nous avons confectionné une fiche de relevé sur la base des fiches d'évaluation de la vulnérabilité du bâti, mais aussi en fonction de nos objectifs par rapport aux traits de caractères à identifier.

Les traits de caractères ont été identifiés par rapport à leur l'état d'origine, et non pas en fonction des modifications qui ont eu lieu dans le temps. Ce qui nous intéresse, c'est l'identification du potentiel sismo-résistant dans l'absolu et non pas l'identification de la vulnérabilité au séisme d'un édifice bien spécifique⁸¹.

⁸⁰ Cette démarche est recommandée car plus pragmatique. Elle permet d'établir une première évaluation avant d'entamer des vérifications et des évaluations plus lourdes. Elle permet de mieux répondre aux conditions économiques et logistiques de chaque contexte [Palermo G., 1993] et [OFEG, 2006].

⁸¹ Dans le cas par contre d'une opération de réhabilitation d'un bâtiment, l'action à mener devra tenir compte aussi bien des spécificités sismo-résistantes de ce patrimoine, mais aussi des autres paramètres intervenant dans la bonne tenue parasismique. Ceci impliquera un relevé exacte des édifices à réhabiliter avec toutes les modifications apportées par les différents usagers.

4.2.1 Justification de la zone d'étude

Notre choix du corpus d'étude s'est porté sur le quartier de Larbi Ben M'Hidi au centre d'Alger (Fig.66). Outre sa position stratégique en plein centre-ville, ce choix se justifie par différentes raisons en rapport avec les différents enjeux qui entourent ce quartier.



Fig. 66 : Vu aérienne de la zone d'étude (Image googleearth).

- **Situation stratégique :**

Situé en plein centre-ville, le quartier Larbi Ben M'hidi profite d'une situation stratégique grâce, à sa position, entre la place de la grande poste ex-porte d'Isly et le square Port-Saïd.

Ces deux places, constituent deux pôles de regroupement importants à l'échelle d'Alger, en raison de leur proximité de différents modes de transport tels que la gare terminale du train, la station de métro, les arrêts de bus, ...etc. Sans oublier leur proximité à des quartiers emblématiques du centre-ville tels que le quartier de Soustara et de la Casbah. Cette position lui permet de jouir d'un statut de pôle commercial fortement fréquenté au sein de la ville.

Cette importante fréquentation à travers principalement des axes structurants, tels que la rue Larbi Ben M'Hidi, Rue Abane Ramdane, Boulevard Zirout Youcef...etc. impose la prise en charge et la valorisation

de ce quartier, afin de lui permettre de jouer pleinement et en toute sécurité son rôle stratégique au sein de la ville d'Alger.

- **Inscription au plan blanc :**

L'importance du quartier Larbi Ben M'Hidi, a conduit la wilaya d'Alger à l'inscrire dans les priorités des actions à mener dans le cadre du plan blanc pour la valorisation du patrimoine architectural et urbain de la ville d'Alger.

Ainsi, sur les 14 axes et promenades sélectionnés par la wilaya d'Alger pour servir d'opérations pilotes pour la réhabilitation du patrimoine, plusieurs sont situés soit sur le quartier Larbi Ben M'Hidi (Rue Larbi Ben M'hidi, Boulevard Zirout Youcef,... etc.), soit à proximité de ce dernier (Rue Ourida Medad, Boulevard Che Guevara, Boulevard Khemisti...etc.) [Abdou M. K., 2012].

D'ailleurs, une importance toute particulière est accordée à la réhabilitation de l'axe Larbi Ben M'Hidi. L'objectif étant d'en faire un pôle touristique, en accentuant sa vocation commerciale, par la requalification de son espace public et son bâti. Le but, étant d'en faire une opération pilote dans le traitement qualitatif de l'espace urbain.

D'après les responsables, ces opérations visent à d'atteindre les standards internationaux en termes de réhabilitation. Ceci passe par la réfection des réseaux en sous-sol, l'aménagement des espaces publics, la réhabilitation des façades et bien sûr le confortement des bâtiments [Abdou M. K., 2012].

Il ressort de cette stratégie, une importance accordée au renforcement des bâtisses composant l'environnement du quartier Larbi Ben M'Hidi afin qu'ils puissent réduire leurs vulnérabilité vis-à-vis du risque sismique.

- **Valeur architecturale et esthétique :**

L'importance accordée au quartier Larbi Ben M'Hidi, tient aussi de la pluralité et de la qualité des formes urbaines, architecturales ainsi que de la variété des styles et vocabulaires architecturaux présents dans ce quartier : *« La valeur esthétique tout autant qu'historique de certains immeubles de la zone tient aussi à la beauté et à la qualité des ornements des façades qui reflètent un art du décor architectural poussé parfois à l'exubérance et qui présente une grande diversité de matériaux de forme*

et de motifs dans un répertoire de formes décoratives très éclectiques. Les portes d'entrées des immeubles, véritables œuvres d'art, offrent un large répertoire de formes, de matières et de styles. » [Baba-Ahmed T., 2013, P37].

Cette richesse de style, allant du néo-classique au néo-mauresque en passant par l'art nouveau, s'inscrit dans la droite ligne des mouvements florissants dans toute l'Europe avec sa vague d'éclectisme [Benevolo L., 1998].

En bref, ce quartier constitue un vrai musée à ciel ouvert de l'architecture fin du XIX^{ème} début du XX^{ème} siècle.

Un musée, qui peut constituer une valeur ajoutée et un plus économique grâce à son attractivité sur les touristes [Guerroudj T., 2000].

- **Stratification historique :**

Le rôle joué par le quartier Larbi Ben M'Hidi dans l'histoire urbaine et architecturale d'Alger, va bien au-delà du fait qu'il soit le premier quartier européen.

Durant la période 1830-1930, le quartier Larbi Ben M'Hidi a subi assez régulièrement des renouvellements de certaines parties qui le composent [Bennai M., 2010].

Ainsi, on y retrouve des parties qui datent de la première implantation de 1846, mais aussi des immeubles appartenant à d'autres périodes, tels que le boulevard front de mer de Zirout Youcef, ou La rue Larbi Ben M'Hidi dont une bonne partie des immeubles a été réalisée au début du XX^{ème} siècle.

C'est fondamentalement cette raison qui nous a poussée à choisir ce quartier, et plus exactement sa partie comprise entre la place l'Emir Abdelkader et le square Port-Saïd. Effectivement, vu les différents renouvellements qu'a subi ce quartier, il concentre en son sein différentes typologies de formes urbaines et architecturales qu'on retrouve dans la ville d'Alger : « *Le sens de formation et de croissance de ce premier noyau de ville française est perceptible sur l'axe Ben M'Hidi lui-même qui affiche une antériorité de la zone nord par rapport au sud. Cette tendance d'évolution historique générale est cependant à nuancer car des dépouillements préliminaires de dossiers de permis de construire*

d'immeuble élevés sur la rue Ben M'Hidi (conservés aux archives du CPVA d'Alger) indiquent l'existence à son extrémité sud d'immeubles anciens, élevés en 1901 et 1904, et à l'opposé, sur sa section nord, d'immeubles plus récents (milieu du XXe siècle). Cette situation illustre la complexité dans l'évaluation du cadre bâti de toute la zone Ben M'Hidi qui a subi en vertu de son statut de premier segment de ville française, plusieurs mutations et transformations à travers des opérations de démolitions, reconstruction et de densification progressives. » [Baba-Ahmed T., 2013, P21-22].

Enfin, précisons que dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons opté pour limiter l'échantillon d'enquête aux seuls bâtiments résidentiels. Ce choix repose sur le désir de minimiser les risques de fausser les résultats de notre recherche. Effectivement, les équipements sont en général des constructions avec des caractéristiques constructives différentes. Ceci implique un comportement dynamique sous charges sismiques différent par rapport aux immeubles résidentiels dit « standard ».

En tenant compte de ces différents paramètres, et en éliminant les immeubles en état de ruine, notre enquête a été effectuée sur un ensemble de 35 îlots composés de 190 immeubles résidentiels datant de la période 1830-1930.

4.2.2 Présentation de la fiche de relevé

L'objectif de notre fiche, est non pas d'établir des relevés détaillés de chaque immeuble, mais de permettre d'identifier les différents traits de caractères du patrimoine architectural algérois 1830-1930, en rapport avec la conception architecturale parasismique.

Le maître mot pour la formulation de la fiche est la simplicité. Cette fiche doit obligatoirement être simple aussi bien pour la remplir que pour l'exploiter.

Les informations relevées devront être :

- Facilement accessibles, à travers l'enquête sur terrain ou l'exploitation de documents ;
- Pertinents et observables directement afin que la présomption de vulnérabilité des bâtiments puisse être établie facilement et sans complication [Martin C., 2002].

Plus tard, nous espérons que cette fiche pourra –en s'appuyant sur les résultats obtenus grâce à l'enquête et l'expérimentation- servir comme base pour la formulation des fiches d'évaluation sommaire pour la réalisation de rapport préliminaire pour la réhabilitation : « *La première phase d'évaluation, assez sommaire, donne lieu à un rapport préliminaire destiné au maître d'ouvrage...[...] Le rapport préliminaire peut être d'autant plus précis dans l'évaluation des capacités parasismiques du bâtiment et dans le chiffrage des solutions de renforcement, que la collecte d'informations aura été pertinente et que l'étendue des stratégies envisagées aura été ouverte...[...] Il peut être prévu d'envisager d'abord des sous-phases de diagnostic qualitatif, ensuite des extensions de collecte d'informations dépendant du résultat des premières constatations.* » [AFPS-CSTB, (2013), P13].

C'est pour cette raison, qu'on se limite à relever les critères pouvant être appréhendés par un simple constat visuel du bâtiment. De ce fait, certaines données difficilement accessibles, telles que le relevé des trémies ou de la disposition des éléments de structures au sein des espaces intérieurs, ne seront pas pris en charge dans le cadre de notre travail d'enquête.

Suite à cette enquête nous allons pouvoir identifier un certain nombre de critères représentatifs ou plus exactement significatifs qui serviront comme point de départ pour des études plus approfondies à travers le recours à la simulation numérique voir même l'expérimentation sur table vibrante.

Cette démarche, s'inscrit dans la droite ligne du processus proposé par la communauté européenne pour la conservation du patrimoine culturel bâti. Ce processus consiste en une première évaluation de l'état du bâti sur la base d'une enquête préliminaire, qui permet de prescrire des actions de prévention contre les pathologies les plus connues. [Comité européen de la normalisation, 2012].

Les différents critères que nous avons retenus pour notre fiche d'enquête sont sélectionnés sur la base :

- Des principes de l'architecture parasismique (simplicité des formes, proportions des bâtiments, renforcements des angles...etc.) ;
- Des règles justifiant la régularité en plan et en élévation des édifices selon la réglementation parasismique algérienne ;

- des pathologies des constructions en maçonnerie sous effort sismique (fissures à l'angle des ouvertures, décollement de la façade dans les parties supérieures...etc.).

Il est ainsi question, de chercher à identifier si les constructions du corpus d'étude possèdent les caractéristiques d'une architecture parasismique, mais aussi, de vérifier si elles ont des dispositifs qui leurs permettent de contrecarrer les pathologies récurrentes des constructions lors d'un séisme.

Concrètement, la fiche de renseignement est composée de quatre types d'informations :

- Des informations générales sur le bâtiment tels que l'adresse, l'époque, sa vocation, le nombre de niveau, sa position,...etc. ;
- Des caractéristiques globales sur le volume par rapport à ses proportions, ses retraits en plan et en élévation...etc. ;
- Sa configuration en plan ;
- Les différents composants de son enveloppe tels que la présence de saillies, la régularité des travées...etc., avec une attention particulière accordée au traitement des extrémités.

4.2.3 Lecture et analyses des résultats de l'enquête

- **Taxis et symétrie** : l'enquête sur terrain, nous a permis de relever une grande régularité dans la taxis au niveau des élévations étudiées. En effet, 98,62% des cas étudiés sont composés d'une taxis répartie de manière régulière et harmonieuse sur l'ensemble de la hauteur du bâtiment.

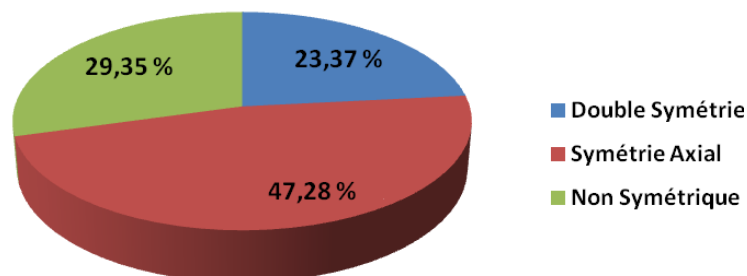


Fig. 67 : symétrie en plan des immeubles.

Concernant la symétrie en plan, 70,65 % des immeubles étudiés sont symétriques avec 23,37 % qui possèdent une double symétrie sur les deux axes (Fig.67).

Cette situation, semble être favorisée par la position des cages d'escaliers et des cours intérieures soit au centre, soit sur les axes soit de manière symétrique dans le cas de la présence de plusieurs cages d'escaliers ou cours (Fig.68).

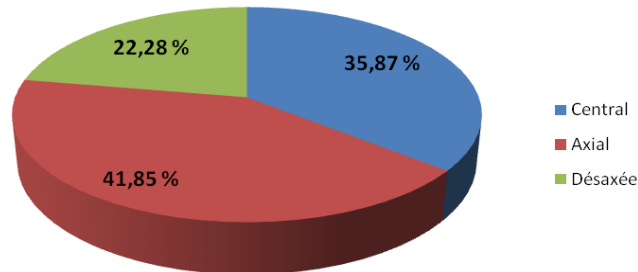


Fig. 68 : Positions des cages d'escalier et des cours intérieures des immeubles.

Concernant les élévations, l'enquête a révélé que les enveloppes sont totalement symétriques dans 63,3% des cas, avec seulement 15,6% des cas ou elles ne l'étaient pas (Fig.69).

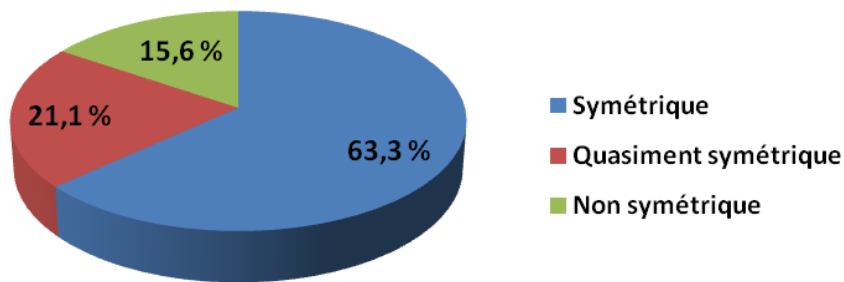


Fig. 69: Symétrie des enveloppes des immeubles.

Enfin, 78,95% des cas ne possèdent aucun retrait ou saillie en plan. Seul 7,37% ont une saillie en plan qui dépasse les 20% de la dimension en plan du bâtiment dans la même direction⁸² (Fig.70).

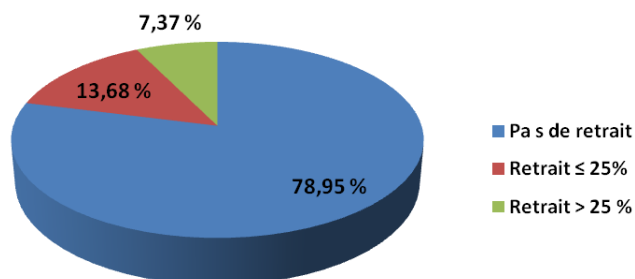


Fig. 70 : Retrait et saillie en plan des immeubles.

⁸² Les 20 % correspondent à la dimension de saillie ou retrait limite autorisés par la réglementation parasismique algérienne afin de considérer le projet comme état régulier en plan.

- **Tripartite** : Concernant la tripartite horizontale, les résultats de l'enquête montrent que seules 43,92 % des travées d'extrémité bénéficient d'une grandeur plus importante, avec 45,99% des cas où le rapport plein/vide, de la dernière travée est plus grand que ceux des autres (Fig.71 & 72).

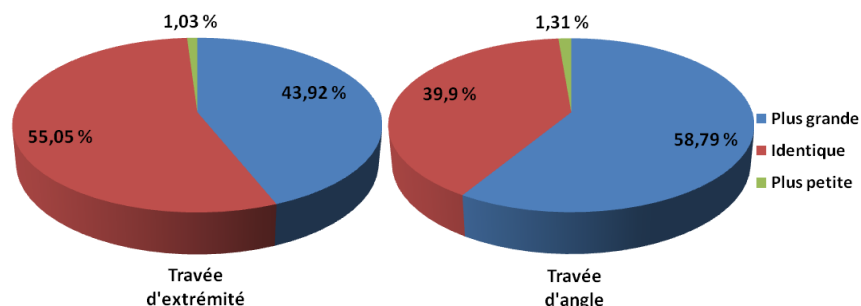


Fig. 71 : Grandeur des travées extrêmes et d'angle par rapport aux autres.

Il est important de noter, l'absence de joint entre deux bâtiments juxtaposés réalisés entre 1830-1930⁸³, avec partage de ces bâtiments du même mur mitoyen⁸⁴. Cela nous conduit, à supposer que c'est l'ensemble de l'îlot qui constitue une unité constructive.

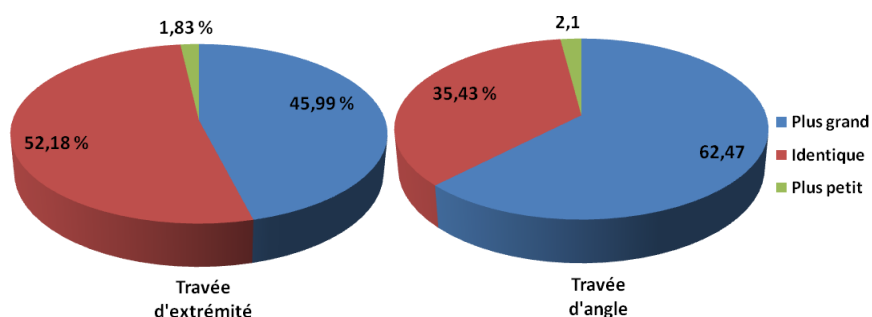


Fig. 72 : Rapport plein vide des travées extrêmes et d'angle par rapport aux autres.

Dans ce cas, il est bien plus pertinent, en ce qui concerne la question du renforcement des angles et du contreventement de s'intéresser, non pas aux dernières travées de tous les immeubles, mais plutôt aux dernières travées situées au coin d'un immeuble d'angle.

La prise en compte seulement de ces travées, révèle que le pourcentage des dernières travées qui sont plus grandes que les autres, augmente

⁸³ Dans les rares cas où on relève la présence d'un joint sur notre zone d'étude, ce dernier se trouve entre un ancien bâtiment et un édifice réalisé récemment.

⁸⁴ Cette constatation du partage du même mur de refond entre deux bâtiments de la période 1830-1930, est souvent observée suite à la destruction d'un bâtiment appartenant à cette période.

rapidement à 58,79% des cas étudiés, et passe à 62,47% pour ce qui est de la taille du rapport plein/vide (Fig.71 & 72).

Il en est de même, quand il s'agit de la présence de refend d'angle pour le renforcement de ces derniers. Pour l'ensemble des cas étudiés, la présence de refend d'angle dans la dernière travée se vérifie dans 32,11% des cas. Mais si on ne considère que la travée de l'immeuble d'angle, ce pourcentage passe à 40,94% des cas (Fig.73).

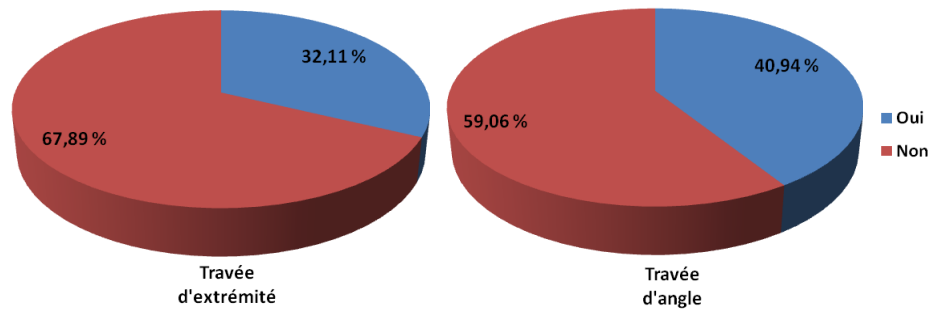


Fig. 73 : Présence de refend d'angle au niveau des travées extrêmes par rapport aux autres et plus particulièrement des travées d'angles des immeubles.

Concernant la tripartite verticale, cette dernière est matérialisée grâce au marquage par des saillies à 94,75% des cas pour la transition entre le soubassement et le corps, et dans 95,89% des cas pour la transition entre le corps et le couronnement.

- **Ordonnement** : 98,17% des élévations étudiées possèdent des élévations avec des travées à rythme régulier. Pour ce qui est des ouvertures, ces dernières sont dans 97,94% des cas superposées les unes sur les autres.

Il est important de noter, que l'importance des pans opaques a permis de voir que dans 83,49% des immeubles étudiés, les façades ont un rapport plein/vide supérieur au 2/3 de la surface totale de l'élévation. Seuls dans 1,38% des cas étudiés ce rapport est inférieur à 50% (Fig.74).

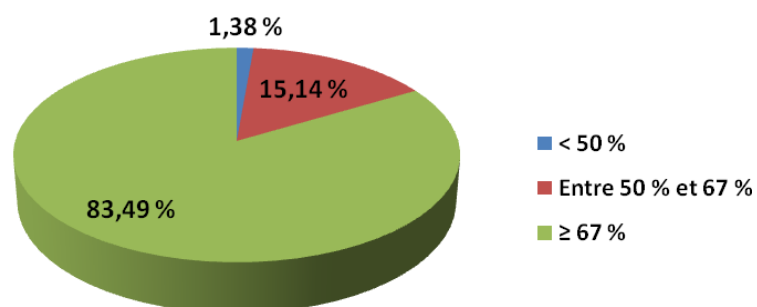


Fig. 74 : Rapport plein vide des enveloppes des immeubles.

- **Continuité des perspectives :** Dans la majorité des cas étudiés, nous relevons la présence de lignes horizontales, matérialisées par des saillies de profondeur inférieure à 1 mètre au niveau des planchers sous forme de bandeau, de balcon ou de bow-window.

Dans 91,05 % des cas étudiés, le pourcentage de saillie filante dépasse les 75 % de la longueur cumulée des différents niveaux. Avec même 71,1 % des cas étudiés où le pourcentage des saillies filantes atteint 100 % de la longueur des planchers (Fig.75).

Seul dans 3,44 % des cas étudiés on relève une absence totale de saillie (Fig.75).

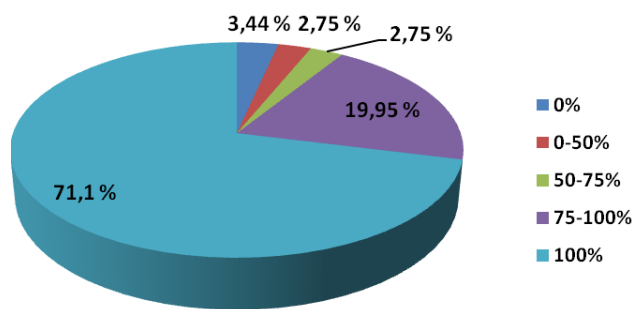


Fig. 75 : Pourcentage de la présence des saillies toute forme confondue (bandeau, balcon ou bow-window) au sein des immeubles.

Mais malgré la présence de ces lignes horizontales, la continuité de ses lignes entre deux immeubles juxtaposés n'est que moyennement assurée.

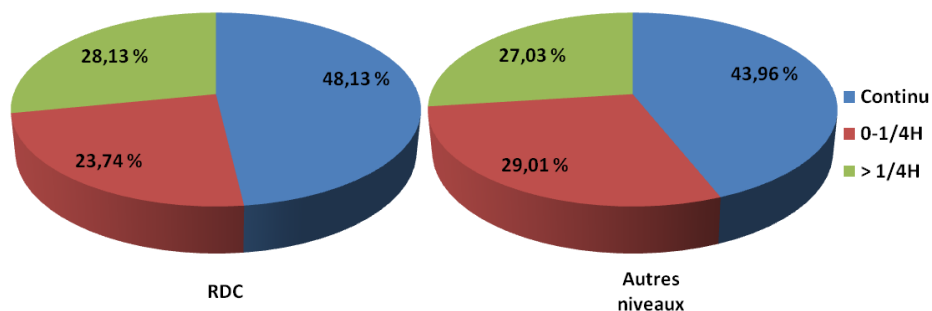


Fig. 76 : Continuité entre les hauteurs des planchers des immeubles juxtaposés.

Seuls 48,13 % des immeubles juxtaposés ont des plafonds du rez-de-chaussée continus. Ce pourcentage tombe à 43,96 % pour les planchers des autres niveaux. Une différence de hauteur qui peut atteindre plus du quart de la hauteur du niveau dans plus de 25 % des cas étudiés (Fig.76).

- **Hiérarchie des voies :** Comme déjà explicité, 62,47% des dernières travées situées au coin des bâtiments d'angles possèdent un rapport plein/vide bien plus important que les autres travées du bâtiment.

Ces travées sont doublées dans 40,94% des cas par des refends d'angles qui viennent marquer ces derniers.

On peut aussi noter, que 93,51 % de ces travées possèdent des saillies filantes au sein de leurs planchers qui entourent l'angle du bâtiment. Ses dernières, se présentent sous formes de bandeaux, de balcons ou de bow-windows principalement situés dans les planchers supérieurs.

- **Individualisation des bâtiments :** Outre la présence, dans quelques bâtiments de refend d'angle aux extrémités, l'individualisation des immeubles est obtenue grâce aux décrochements en façade, et la présence d'éléments en porte-à-faux.

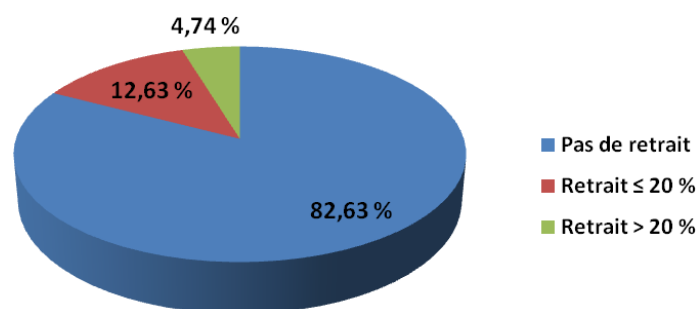


Fig. 77 : Retrait et saillie en élévation des immeubles.

Pour ce qui est des décrochements en élévation, 82,63% ne possèdent ni retraits ni saillies, et seulement 4,74% des cas étudiés possèdent un retrait ou une saillie entre deux étages successifs qui dépasse les 20% de la dimension en plan (Fig.77). Enfin, sur l'ensemble des édifices possédant des décrochements, seuls 18,18 % d'entre eux ont un rapport entre la dimension du plus petit niveau/plus grand niveau inférieur à 67%⁸⁵.

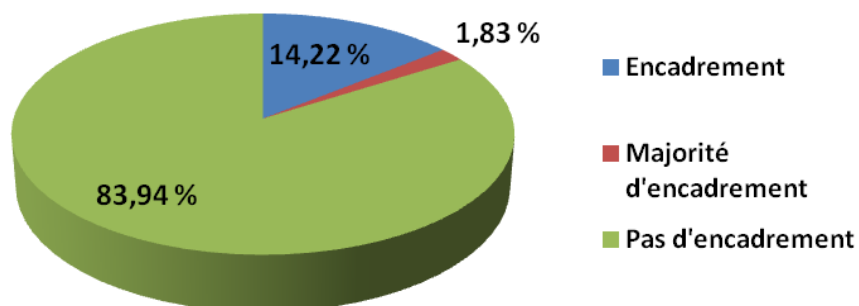


Fig. 78 : Encadrement des ouvertures des immeubles.

⁸⁵ Le décrochement entre deux étages, ne doit pas selon le RPA dépasser en plan les 20% afin de considérer l'édifice comme régulier en élévation, à la condition aussi que le rapport de dimension du plus petit niveau par rapport au plus grand dans la même direction ne soit pas inférieur à 67%.

Concernant le porte-à-faux des éléments en saillie, sur l'ensemble des 190 immeubles étudiés, seul 3 possèdent des porte-à-faux (en balcon ou en bow-window) qui dépassent les 1 mètre de profondeur.

Enfin, 16,06% des élévations étudiées sont composées avec des ouvertures possédant un encadrement qui accentue l'effet de la verticalité (Fig.78).

- **Hiérarchisation verticale :** Notre travail d'enquête nous a permis de relever que, 76,84 % des immeubles possèdent une hauteur de rez-de-chaussée supérieure à celle des autres niveaux, avec dans 35,26% des cas où la hauteur du rez-de-chaussée dépasse de 1/5 la hauteur des niveaux supérieurs (Fig.79).

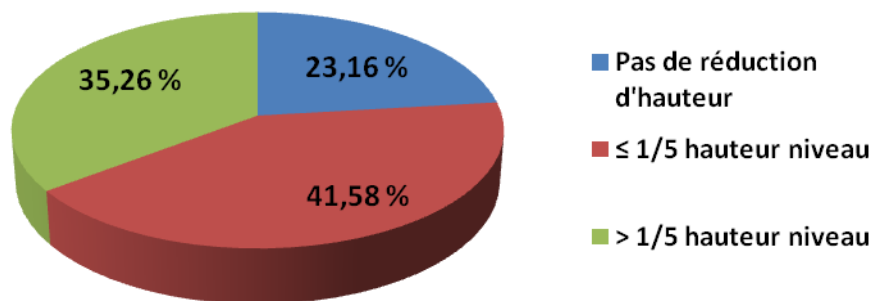


Fig. 79 : Réduction de hauteur entre le rez-de-chaussée et les autres niveaux des immeubles.

- **Valorisation de la cour intérieure :** Dans 75,39% des cas étudiés, la cour intérieure est située soit au centre de l'édifice soit sur un des deux axes, participant de ce fait à la régularité de la forme de l'immeuble (Fig.80).

Notons aussi, que les façades sur cour que nous avons pu observer sont symétriques et respectent les principes et règles de la régularité de la travée et de la taxis à plus de 90% des cas.

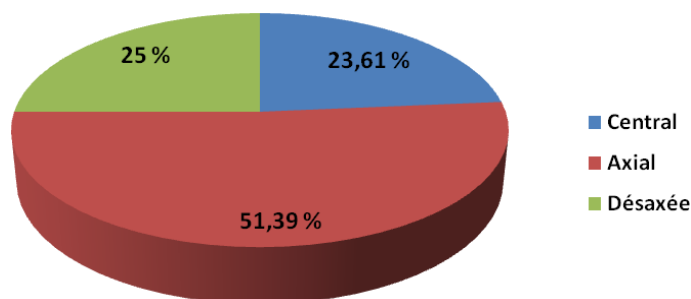


Fig. 80 : Positions des cages d'escalier et des cours intérieures des immeubles.

- **Régularité de l'îlot :** De manière générale, les îlots étudiés présentent une certaine régularité pour différentes raisons.

Par exemple, dans 98,42% -soit 187/190 cas- les immeubles étudiés sont alignés sur rue.

Aussi, 61,18% des cas ne présentent aucune différence de hauteur entre deux immeubles juxtaposés. Seul dans 5,48%, cette différence de hauteur commence à devenir importante en dépassant les 2 niveaux (Fig.81).

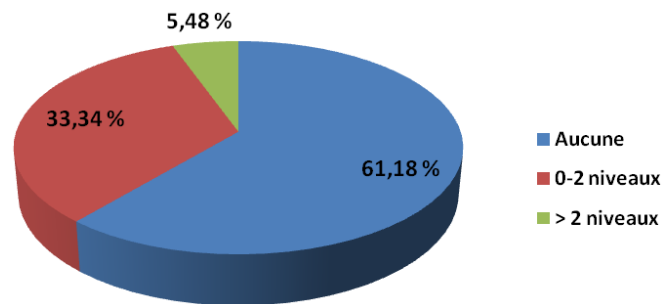


Fig. 81 : Différence de niveau entre deux bâtiments juxtaposés au sein d'un même îlot.

Cet esprit d'unité, est accentué par la présence importante des lignes horizontales au niveau des planchers obtenue grâce aux différentes saillies. Des saillies qui dans, 91,05 % des immeubles étudiés couvrent plus de 75% de la longueur des planchers.

Malheureusement, cet effet de continuité est freiné du fait de la différence de hauteur de niveau entre deux immeubles juxtaposés dans plus de 50% des cas étudiés.

Enfin, en ce qui concerne les cours intérieures, nous avons relevé que dans 68,42 % des cas étudiés, ces dernières ont une position centrale ou axiale (Fig.82).

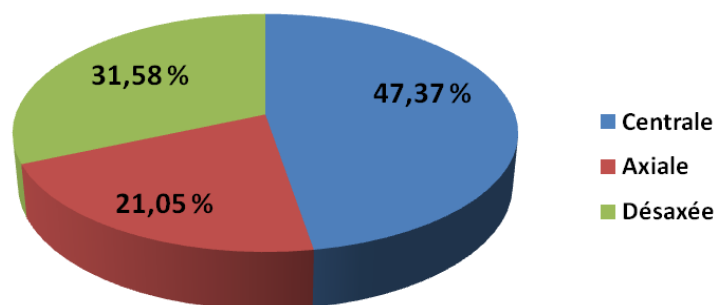


Fig. 82 : Position des cours au sein des îlots du corpus d'étude.

- **Proportions de l'îlot** : D'une manière générale, les îlots étudiés sont assez ramassés puisque dans 89,89 % des cas, ils ont des proportions en plan inférieures à $\frac{1}{4}$ (Fig.83).

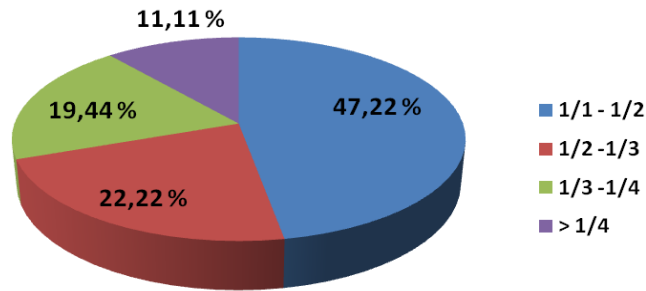


Fig. 83 : Proportions en plan des îlots.

Concernant la profondeur des immeubles composant un îlot, cette dernière est continue dans 57,14 % des cas. Seul dans 11,43 % des cas étudiés cette épaisseur est totalement différente (Fig.84).

Par contre, en ce qui concerne leur forme, seul un tiers des îlots étudiés ont une forme parfaitement régulière, et 27,78 % possèdent des formes totalement irrégulières et non compact.

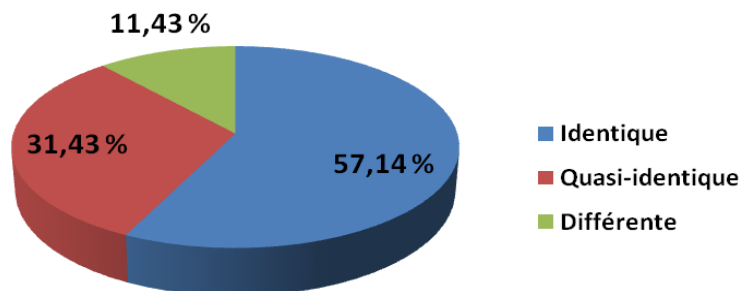


Fig. 84 : Profondeur des immeubles au sein des îlots.

- Caractéristique de la parcelle :** D'une manière générale, la forme des immeubles est régulière avec des proportions ramassées. Une information qui, combinée avec la modeste proportion des immeubles ayant un retrait important, fait ressortir que 92,61 % des édifices étudiés sont considérés comme étant compacts.

L'enquête sur le terrain a permis d'identifier que, 75,26 % du corpus d'études est composé d'immeubles de forme régulière, à savoir carrée, rectangle ou triangulaire (Fig.85).

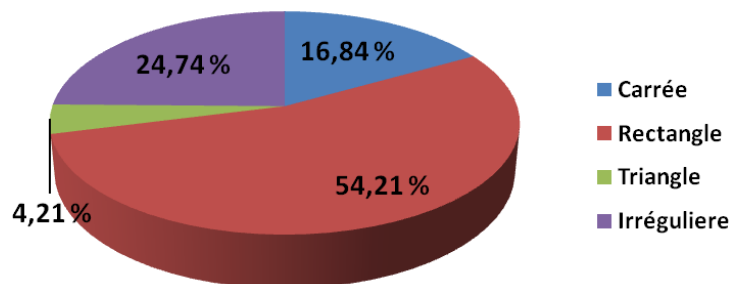


Fig. 85 : Régularité des formes des immeubles.

En plus, presque la quasi-totalité des immeubles étudiés, possèdent des proportions en plan inférieures au rapport de $1/4$ ⁸⁶, seul 1,05% dépassent ce rapport (Fig.86).

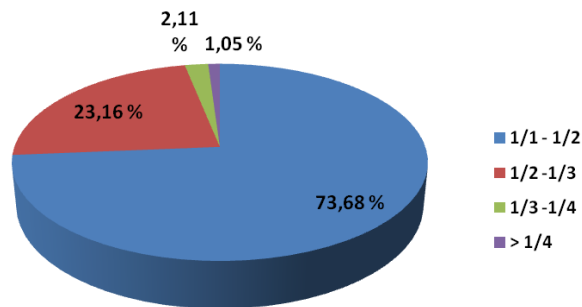


Fig. 86 : Proportion en plan des immeubles.

4.2.4 Conclusion de l'enquête

L'enquête sur terrain, nous a permis de confirmer que le corpus d'étude possède de manière assez importante, les différentes caractéristiques que nous avons identifiées comme participant à l'amélioration du comportement sismique des immeubles de notre corpus d'étude.

Ainsi, on peut supposer que ces différents éléments liés aux règles de composition architecturales et urbaines, sont des mesures parasismiques inconscientes qui peuvent participer à améliorer le comportement des immeubles de notre corpus d'étude lors d'un séisme.

Cependant, il est important de relever l'effet contradictoire que peut engendrer un trait de caractère par rapport à des principes parasismiques différents.

Par exemple, certes le fait que la hauteur du rez-de-chaussée soit plus importante que celle des autres niveaux, permet d'alourdir ce dernier, et donc de rabaisser le barycentre du bâtiment. Malheureusement, cette différence de hauteur s'accompagne aussi par une différence de rigidité entre le rez-de-chaussée et les autres niveaux. Une différence qui risque d'engendrer le phénomène d'étage souple. Un risque qui est encore plus accentué, pour les immeubles se trouvant au niveau des artères commerciales car possédant des vitrines commerciales très larges.

⁸⁶ $1/4$, est la proportion en plan conseillée par la réglementation parasismique algérienne afin de considérer le bâtiment comme ayant une régularité en plan.

Notre enquête nous a permis aussi, d'identifier certains critères comme étant les plus prépondérants sur la définition des spécificités architecturales de notre corpus d'étude par rapport à la question parasismique. A savoir, la position au sein de la ville de l'îlot et de l'immeuble par rapport au statut de la voie et de la topographie du terrain, ainsi que la position de l'immeuble dans l'îlot

- **Position de l'îlot :** Nous avons relevé une régularité assez importante de la forme des immeubles et des îlots quand ces derniers sont situés sur les axes importants tels que, celui de Larbi Ben M'Hidi, Zirout Youcef ou Abane Ramdane.

Une régularité qui est due à l'urbanisation des villes de l'époque coloniale en Algérie, qui suit la même logique du damier orthogonal. Mais ces formes devenaient assez irrégulières quand on se retrouve en second plan par rapport aux axes importants [Baba-Ahmed T., 2013].

Cette irrégularité ne se justifie pas seulement du fait de la position ou non sur les axes importants, elle s'explique pour la plupart des cas par une configuration du site assez accidenté, qui conduit l'îlot –et donc la parcelle- à se déformer afin de reprendre la configuration accidentée du site auquel elle appartient.

On passe ainsi, de formes d'îlots carrées et rectangulaires, à des formes d'îlots triangulaires voire même trapézoïdales.

- **Position de l'immeuble dans l'îlot :** D'une manière générale, nous avons relevé que les immeubles situés à l'angle⁸⁷ possèdent un traitement spécifique :
 - La dernière travée située à l'angle est plus importante que les autres avec un rapport plein vide plus important, et la présence de saillies qui enveloppent les deux cotés de l'angle du bâtiment ;
 - Des saillies au niveau des planchers filant au premier et dernier niveau ;
 - Des refends d'angles avec des épaisseurs plus importantes.

⁸⁷ La position à l'angle sismiquement parlant est spécifique, du fait que c'est l'endroit le plus sollicité lors d'un séisme.

Un principe de renforcement de l'angle qui semble selon Foufa, avoir été déjà utilisé dans l'architecture de la Casbah, ou la maison de rive semble reprendre les efforts sismiques de l'unité constructive qui est l'îlot : « *Les maisons de rive contreventent celles situées au milieu par adossement, ce qui permet la stabilité des bâtiments lors des sollicitations sismiques. En effet, les charges sismiques sont transmises latéralement d'un bloc à un autre, ce qui tend à réduire les dommages car l'énergie se dissipe le long de son trajet jusqu'au dernier bloc. Depuis le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003, le code RPA prévoit le renforcement des poteaux de rive pour un meilleur contreventement de la structure.* » [Foufa-Abdessemed A.A., 2007, P194].⁸⁸

4.3 Simulation numérique

4.3.1 Modèle est simulation

Le recours à la vérification par simulation numérique, passe par la formulation de modèles à simuler.

Afin de maximaliser les chances de réussite il est important de réduire les risques d'écarts entre les résultats du modèle simulé et la réalité du terrain :

Ceci suppose de suivre une procédure qui respecte un certain nombre de règles inhérentes à la formulation de modèle [Malfroy S., 1986] :

- Le modèle est une représentation simplifiée d'un objet complexe ;
- Le modèle repose sur des opérations de sélection. Seuls les aspects de l'objet, dont l'étude cherche à rendre compte, sont retenus ;
- Le modèle est une construction relative et provisoire, dépendant de l'état des connaissances de l'objet à un moment donné. Il est susceptible d'être remis en question au cours des procédures de vérifications ;
- L'intérêt du modèle tient essentiellement à sa fonction heuristique, c'est-à-dire à son rôle de stimulation pour la découverte de nouveaux aspects de l'objet pris en considération ;

⁸⁸ Voir aussi le RPA99/version 2003.

- En combinant des informations reconnues comme fiables et des déductions logiques, il permet de systématiser un domaine de connaissances malgré les lacunes qu'il contient encore.

L'approche par modélisation, permet une interprétation hypothétique des phénomènes, que les expérimentations ou l'observation du cadre réel permet de confirmer. Dans notre cas, l'expérimentation peut être l'objet d'essais sur tables vibrantes, et l'observation de la réalité des différentes enquêtes post-sismiques⁸⁹.

Le recours à la modélisation à partir d'application mathématique bijective, consiste en une opération où il est question de faire correspondre à chaque élément (**A**) du phénomène étudié un seul élément (**A**) à l'intérieur du modèle mis en place. Cette approche - par la mise en place du modèle - est, d'autant plus intéressante, du fait qu'elle nous donne la possibilité de faire émerger des propriétés, non évidentes au premier abord, et ceci en isolant tels ou tels paramètres [Souami M.A., 2005].

4.3.2 Simulation du comportement d'une construction basique

L'objet de ces simulations⁹⁰, est de mettre en avant le rôle joué par les proportions architecturales des bâtiments, afin d'explicitier d'une manière générale l'impact des ratios géométriques dans le comportement des immeubles algérois de la période 1830-1930 face aux mouvements sismiques.

Plus précisément, nous nous intéresserons à l'impact des proportions en plan et en élévation des immeubles sur l'estimation de la période propre du bâtiment.

Effectivement, la période fondamentale constitue l'une des caractéristiques les plus importantes pour l'identification du comportement dynamique d'un édifice lors d'un mouvement sismique : *« La fréquence fondamentale est un des paramètres déterminant de la réponse sismique. Lors d'une analyse sismique, il est important d'estimer sa valeur de manière réaliste. Il faut donc tenir compte de tous les éléments qui peuvent influencer sa valeur. »* [Lestuzzi P., 2013B, P80].

⁸⁹ Le recours à la simulation numérique se justifie du fait que les expérimentations sur table vibrante sont excessivement coûteuses. Ce qui implique qu'on ne peut y avoir recours sans avoir au préalable justifié d'un minimum de résultats cohérents.

⁹⁰ Cette série de simulation sur le logiciel ETABS a été réalisé par l'ingénieur en génie civil Hamoud Nordinne.

La valeur de la période propre permet d'influer directement sur la valeur de la flèche au sommet du bâtiment⁹¹.

Afin de vérifier l'impact des proportions en plan et en élévation concernant la valeur de la période propre du bâtiment, nous avons choisi de simuler numériquement deux typologies structurelles⁹² :

- Une typologie correspondant au système structurel dominant au niveau de notre corpus d'étude⁹³ à savoir, une structure de nature rigide en murs porteurs en maçonnerie ;
- Une typologie de nature flexible à savoir, une structure poteaux-poutres en béton armé sans remplissage.

A. Période fondamentale et vulnérabilité sismique :

L'importance de l'évaluation de la période fondamentale d'un bâtiment dans la détermination de sa vulnérabilité face aux risques sismiques est liée à deux raisons :

- Premièrement, les différentes études post-sismiques ont observé que l'une des causes les plus importantes de dommages pendant un tremblement de terre est le martellement entre les bâtiments. Un phénomène causé par de grands déplacements entre les bâtiments⁹⁴.

Selon la formule de Rayleigh dans sa version simplifiée, la période d'un bâtiment est égale à : $T = 2\sqrt{\delta_N}$ avec "δN" est le déplacement horizontal au dernier niveau du bâtiment. **Ainsi, le déplacement d'un bâtiment est directement dépendant de la valeur de la période fondamentale. Elle est égale à $\delta_N = T^2/4$.**

⁹¹ Selon la version simplifiée de la formule de Rayleigh, la période **T** est égale à $T = 2\sqrt{\delta_N}$ avec δ_N étant la flèche horizontale au sommet du bâtiment, ce qui nous donne que la flèche $\delta_N = T^2/4$ [RPA99/Version 2003, 2004].

⁹² Le recours à une deuxième typologie structurelle autre que celle qui est dominante dans notre corpus, se justifie par notre désir de mieux asseoir nos conclusions par la comparaison entre le comportement de deux typologies différentes.

⁹³ Dans son travail de recherche en magistère sur le quartier de Bab El-Oued, Ait-Meziane a fait ressortir le système constructif majoritaire de ce corpus à savoir un système en murs porteurs en maçonnerie de pierre, et des planchers en voûtains en majorité [Ait-Meziane Y., 2002, P92]. Voir aussi [Benouar D., 2008] et [CTC Chlef, 2001].

⁹⁴ Pour plus d'informations, voir le travail de Belazougui M. [Belazougui M., 2003] et [Belazougui M. 1990] et de Davidovici V. [Davidovici V., 2003B].

- Deuxièmement, selon Ankik, la valeur de l'effort sismique dépend de la valeur de la période fondamentale de l'édifice, avec ce type de relations : si la valeur de la période est élevée, la valeur de l'effort sismique sera basse [Ankik D., 2013].

En fin de compte, la période fondamentale de la construction a un effet contradictoire. Si elle est élevée, elle permet de réduire l'effort sismique, mais en même temps elle va augmenter le risque de martellement. Dans le cas contraire, -période faible- ceci augmentera la valeur de l'effort sismique, mais réduira le risque de martellement.

Ainsi, cela implique que la réduction de la vulnérabilité des bâtiments consiste à trouver la bonne valeur de la période de construction. Pas très haute afin d'éviter le risque de martellement, et pas trop basse afin d'éviter d'avoir un effort sismique plus important.

B. Description des modèles de référence :

A.1. Poteaux-poutres : Le modèle de référence est une construction basique de forme cubique de dimension « D ». Le plan est composé de trois travées de 3,5 mètres. Verticalement ce modèle de référence est composé de trois niveaux de 3,5 mètres de hauteur chacun.

Le système constructif en poteaux-poutres sans remplissage est composé de :

- Poteaux de dimensions 35cm x 35cm ;
- Poutres de 30cm de largeur et 35cm de hauteur ;
- Plancher en corps creux avec une charge permanente de 540 kg/m² et une charge d'exploitation de 150 kg/m².
- Une surcharge de 750 kg/ml a été rajoutée sur la périphérie des constructions, correspondant au poids d'un mur en double parois en maçonnerie non rigide.

A.2. Murs porteurs en maçonnerie : Le modèle de référence est une construction basique de forme cubique de dimension «D». Le plan est composé de trois travées de 3,5 mètres. Verticalement ce modèle de référence est composé de trois niveaux de 3,5 mètres de hauteur chacun. Le système constructif est composé :

- De murs porteurs en maçonnerie de 70 cm d'épaisseur sur toute la hauteur de la bâtisse avec une densité de 2,7 t/m³ ;

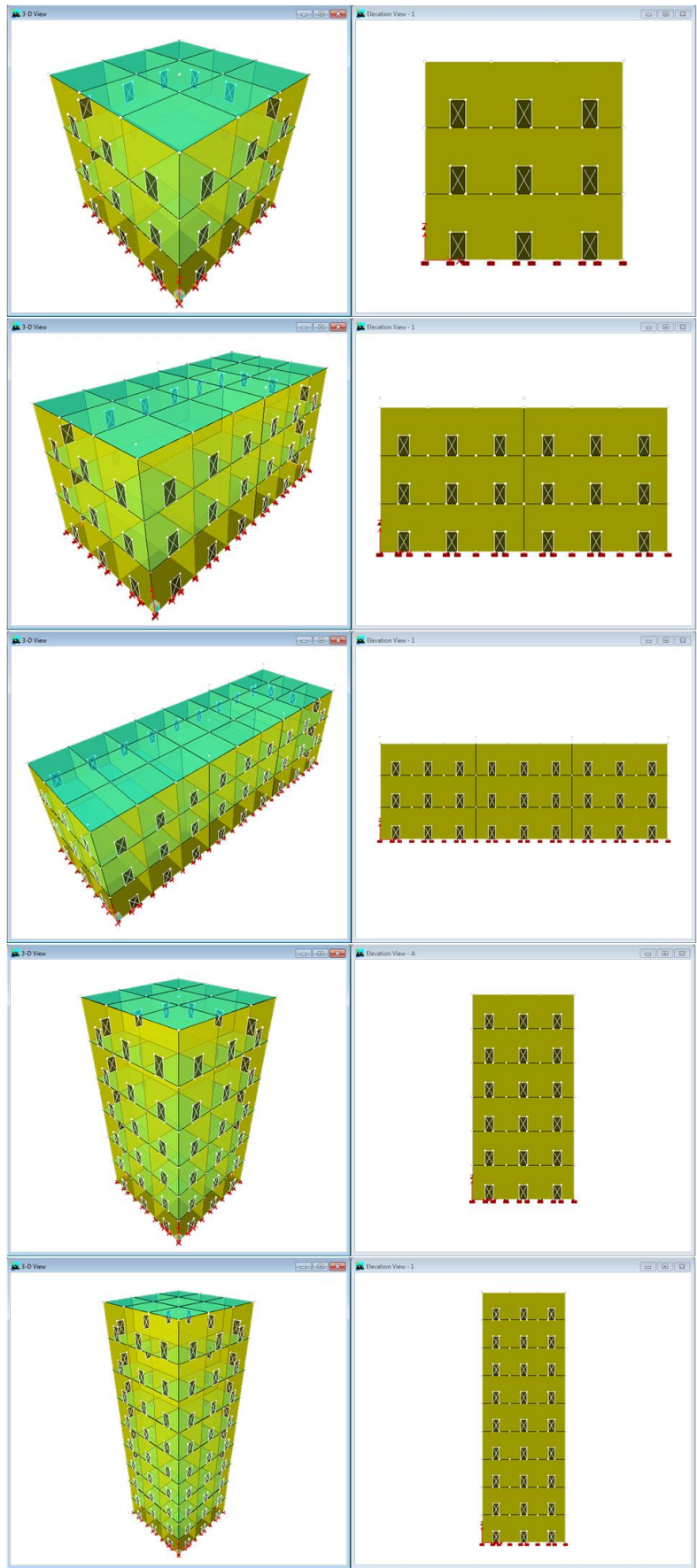


Fig. 87 : les cinq modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie. (Crédit photo : Hamoud N.)

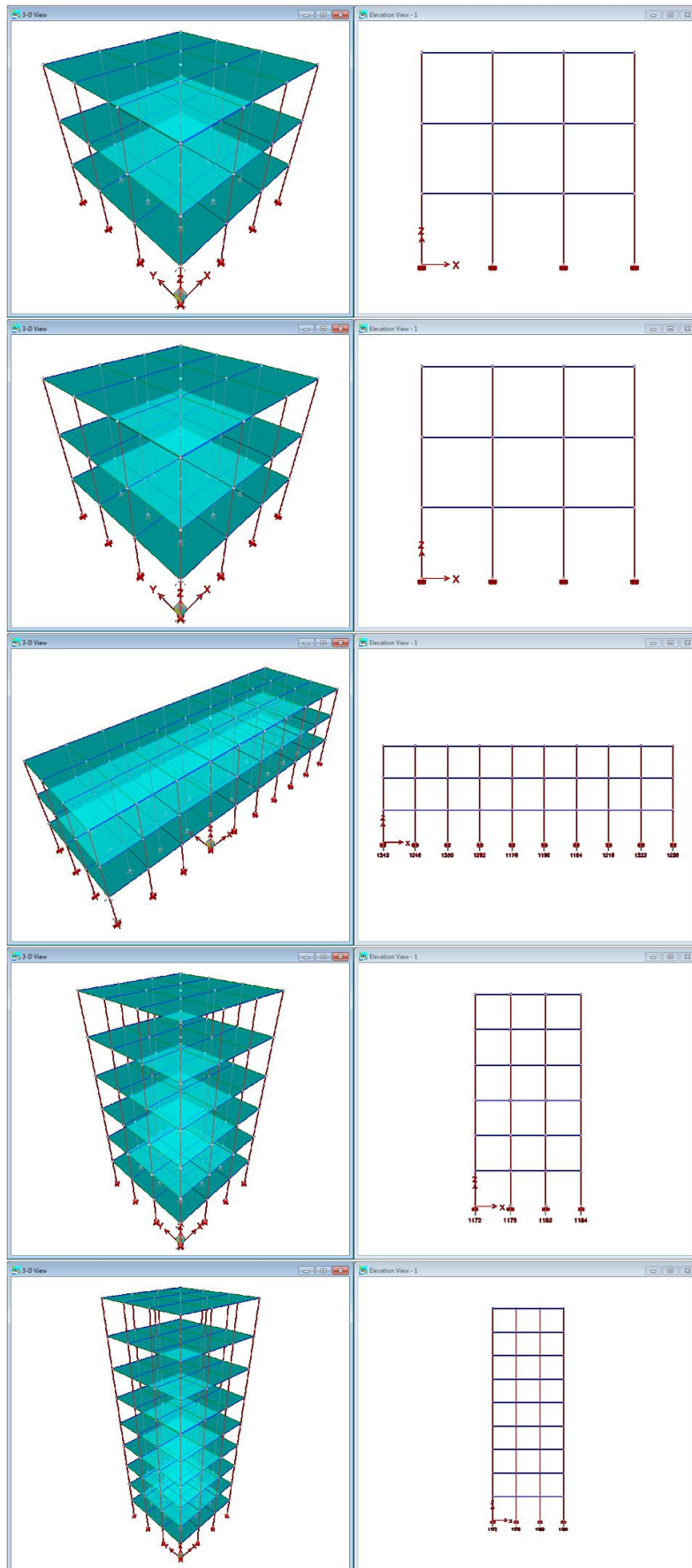


Fig. 88 : Modèles simulés en structure poteaux-poutres en béton armé sans remplissage. (Crédit photo : Hamoud N.)

- D'un plancher en voutain en maçonnerie avec IPN, une charge permanente de 550kg/m² et une charge d'exploitation de 150kg/m².
- Les façades, respectent le principe d'ordonnement, avec des portes-fenêtres superposées de dimension 80cm x 210cm.

C. Multiplication des modèles de référence :

Pour chaque typologie structurelle sélectionnée, nous avons considéré cinq modèles. Ces modèles sont obtenus en multipliant le modèle de base par un facteur multiplicateur de 2 et 3 une fois à l'horizontale et une fois à la verticale (Tab.5) (Fig.87 & 88):

- Modèle deux et trois : multiplication du modèle de référence par un facteur multiplicateur de 2 et 3 à l'horizontale.
- Modèle quatre et cinq : multiplication du modèle de référence par un facteur multiplicateur de 2 et 3 à la verticale.

| | Nbre de travée en largeur | Nbre de travée en longueur | Nbre d'étage | Largeur (l) en mètre | Longueur (L) en mètre | Hauteur (H) en mètre | Proportions (l x L x H) |
|----|---------------------------|----------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| M1 | 3 | 3 | 3 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | D x D x D |
| M2 | 3 | 6 | 3 | 10,5 | 21 | 10,5 | D x 2D x D |
| M3 | 3 | 9 | 3 | 10,5 | 31,5 | 10,5 | D x 3D x D |
| M4 | 3 | 3 | 6 | 10,5 | 10,5 | 21 | D x D x 2D |
| M5 | 3 | 3 | 9 | 10,5 | 10,5 | 31,5 | D x D x 3D |

Tab. 5 : Caractéristiques géométriques des modèles à simuler.

D. Estimation de la période fondamentale selon la réglementation parasismique algérienne :

Selon la réglementation parasismique algérienne, l'estimation de la période fondamentale d'une structure est obtenue selon deux approches. Une empirique, et une analytique ou numérique par modélisation de la structure.

- Approche empirique : Cette approche propose deux formules pour l'estimation de la période fondamentale appelée (T) :

$$1) T = C_T h^{3/4} \quad (1)$$

«h» hauteur totale du bâtiment, et «C_T» un coefficient dépendant du système de contreventement et de son remplissage donné par la réglementation.

$$2) T = 0,09h/\sqrt{D} \quad (2)$$

« h » hauteur totale du bâtiment, et « D » est la dimension dans la direction de calcul considérée.

La formule (1) est à utiliser quel que soit le mode de contreventement et de son remplissage. Par contre, dans le cas du mode de contreventement en portiques auto-stables en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie ou de contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en béton armé, des palées triangulées et des murs en maçonnerie on doit utiliser les formules (1) et (2).

Dans ce deuxième cas, on doit retenir la plus petite des deux valeurs obtenues par les deux formules (1) et (2).

- Approche analytique ou numérique : L'estimation de la période avec cette approche peut se faire de deux manières :

1) La première fait appel à la formule de Rayleigh (3) ou à sa version simplifiée (4).

$$T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_i^n W_i \delta_i \right) / g \left(\sum_i^n f_i \delta_i \right)} \quad (3)$$

« W_i » est le poids sismique au niveau i , « f_i » étant la force horizontale appliquée au niveau i , « δ_i » étant la flèche horizontale au niveau i due à la force horizontale f_i .

$$T = 2 \sqrt{\delta_N} \quad (4)$$

δ_N étant la flèche horizontale au niveau de sommet du bâtiment.

2) La deuxième est obtenue par modélisation numérique⁹⁵.

L'estimation de la période avec l'approche numérique ou analytique, repose fondamentalement sur l'estimation de la flèche horizontale du bâtiment soumis à des charges sismiques. Comme on peut d'ailleurs le remarquer au niveau de la version simplifiée de la formule de Rayleigh.

La valeur de la flèche d'un bâtiment soumis aux charges sismiques, est obtenue par la formule : $\delta = F/K$. Avec « F » la force horizontale

⁹⁵ Les différents modèles numériques ont été réalisés avec le logiciel ETABS par M. Hamoude Nouredine, ingénieur praticien en génie civil.

appliquée au niveau du calcul de la flèche, et « K » la valeur de la raideur de l'immeuble.

La détermination de la raideur est fonction de plusieurs paramètres [Balandier P., 2001] :

- 1) La nature des liaisons entre les éléments structuraux (Encastrement, articulation...).
- 2) L'inertie de la structure du bâtiment dans le sens de la sollicitation.
- 3) Le module de Young (ou de déformation).
- 4) La hauteur du niveau étudié.

E. Résultats des simulations :

Suite aux simulations des dix modèles considérés (cinq par typologie structurelle), nous avons obtenu les valeurs de la période fondamentale (Tab 6, 7, 8 et 9).

| Facteur multiplicateur | Période numérique (Pn) en sec | Période empirique (Pe) en sec | Croissance de Pn (%) | Croissance de Pe (%) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 ⁹⁶ | 0,137 | 0,292 | 100,00 | 100,00 |
| 2 | 0,139 | 0,206 | 101,43 | 70,55 |
| 3 | 0,141 | 0,168 | 102,58 | 57,53 |

Tab. 6 : Tableau de synthèse de l'estimation des périodes des modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie en multiplication horizontale.

| Facteur multiplicateur | Période numérique (Pn) en sec | Période empirique (Pe) en sec | Croissance de Pn (%) | Croissance de Pe (%) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 ⁹⁷ | 0,137 | 0,292 | 100,00 | 100,00 |
| 2 | 0,365 | 0,490 | 265,58 | 167,81 |
| 3 | 0,722 | 0,665 | 525,04 | 227,74 |

Tab. 7 : Tableau de synthèse de l'estimation des périodes des modèles simulés en structure murs porteurs en maçonnerie en multiplication verticale.

| Facteur multiplicateur | Période numérique (Pn) en sec | Période empirique (Pe) en sec | Croissance de Pn (%) | Croissance de Pe (%) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 ⁹⁷ | 0,664 | 0,437 | 100,00 | 100,00 |
| 2 | 0,720 | 0,437 | 108,36 | 100,00 |
| 3 | 0,744 | 0,437 | 111,97 | 100,00 |

Tab. 8 : Estimation des périodes des modèles simulés en poteaux-poutres béton armé sans remplissage en multiplication horizontale.

⁹⁶ Le modèle affecté du facteur multiplicateur numéro 1, représente à chaque fois le modèle de référence.

| Facteur multiplicateur | Période numérique (Pn) en sec | Période empirique (Pe) en sec | Croissance de Pn (%) | Croissance de Pe (%) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 ⁹⁶ | 0,664 | 0,437 | 100,00 | 100,00 |
| 2 | 1,334 | 0,736 | 200,85 | 168,42 |
| 3 | 1,972 | 0,997 | 296,89 | 228,15 |

Tab. 9 : Estimation des périodes des modèles simulés en poteaux-poutres béton armé sans remplissage en multiplication verticale.

A partir de ces tableaux de synthèse, nous avons obtenu un ensemble de graphes qui nous ont permis d'établir certaines comparaisons.

- Graphe 1 : Comparaison entre l'évolution de la période empirique pour les deux typologies structurelles en fonction de la multiplication verticale et horizontale du modèle de référence (Fig.89).

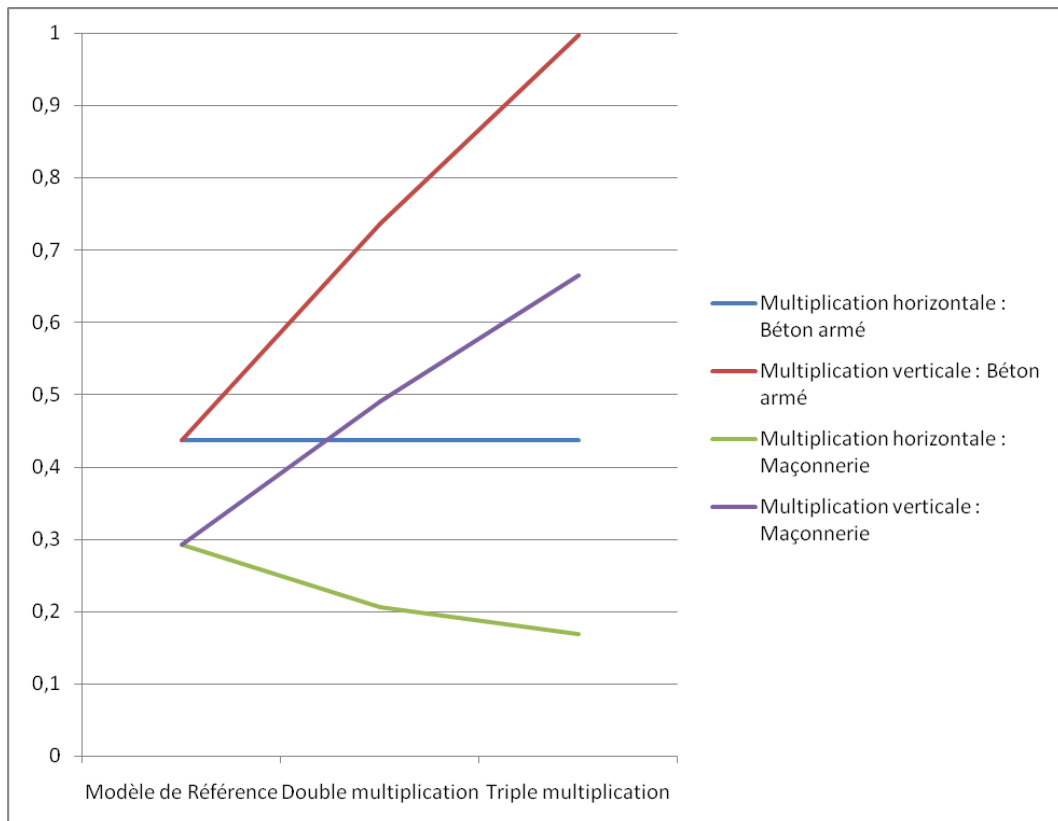


Fig. 89 : Evolution de la période propre du bâtiment en seconde, estimée empiriquement pour les deux typologies structurelles.

- Graphe 2 : Comparaison entre l'évolution de la période numérique pour les deux typologies structurelles en fonction de la multiplication verticale et horizontale du modèle de référence (Fig.90).

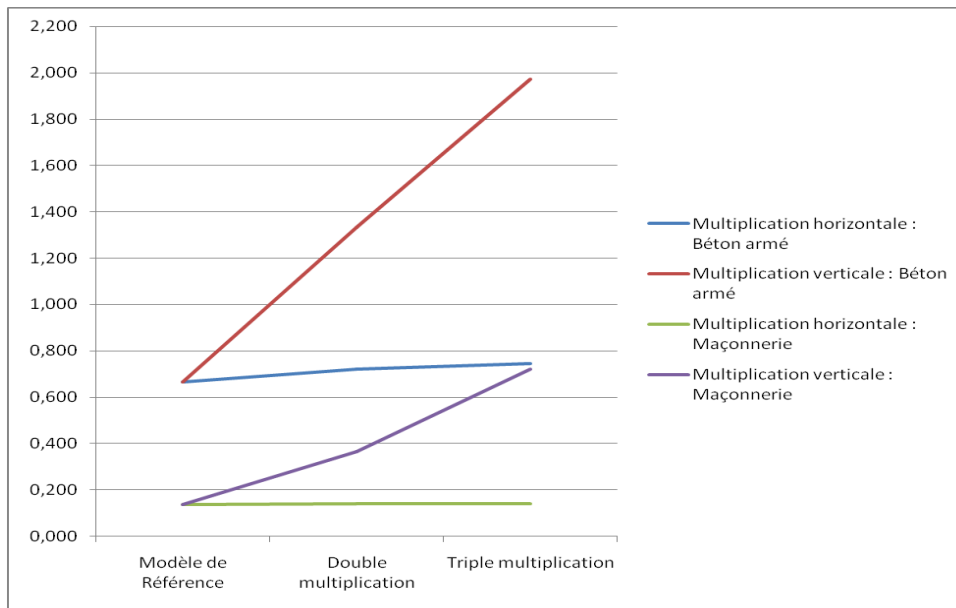


Fig. 90 : Evolution de la période propre du bâtiment en seconde estimée numériquement pour les deux typologies structurelles.

- Graphe 3 : Comparaison entre le rythme de croissance de l'évolution des périodes propres par rapport au modèle de référence pour chaque typologie structurelle en fonction de la multiplication verticale et horizontale⁹⁷ (Fig.91 & 92).

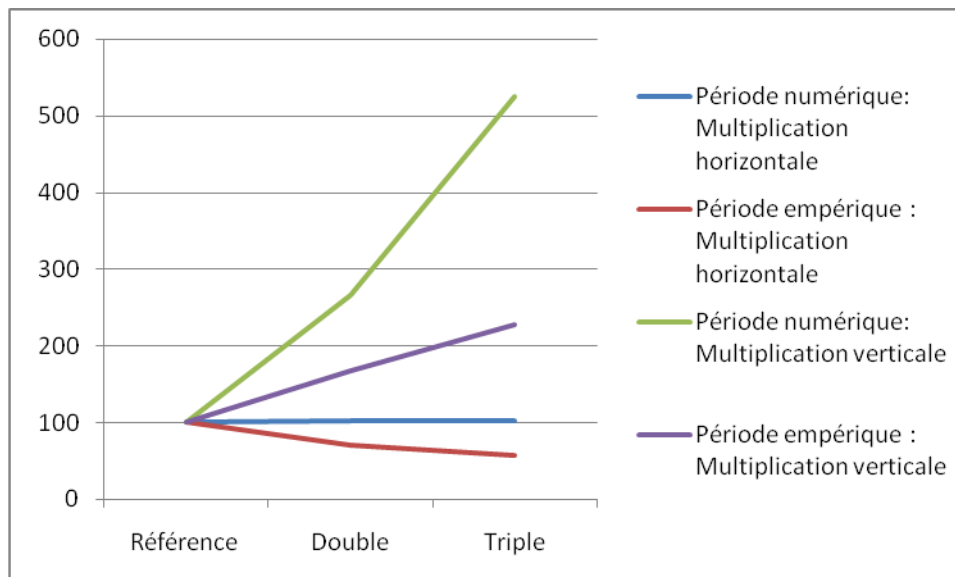


Fig. 91 : Rythme de croissance des périodes numériques et empiriques en pourcentage (%) pour les modèles en murs porteurs en maçonnerie en fonction des deux types de multiplication verticale et horizontale.

⁹⁷ Les valeurs de la croissance des périodes ont été obtenus en calculant le rapport entre la valeur de la période du modèle considéré par celui de la valeur de la période du modèle de référence.

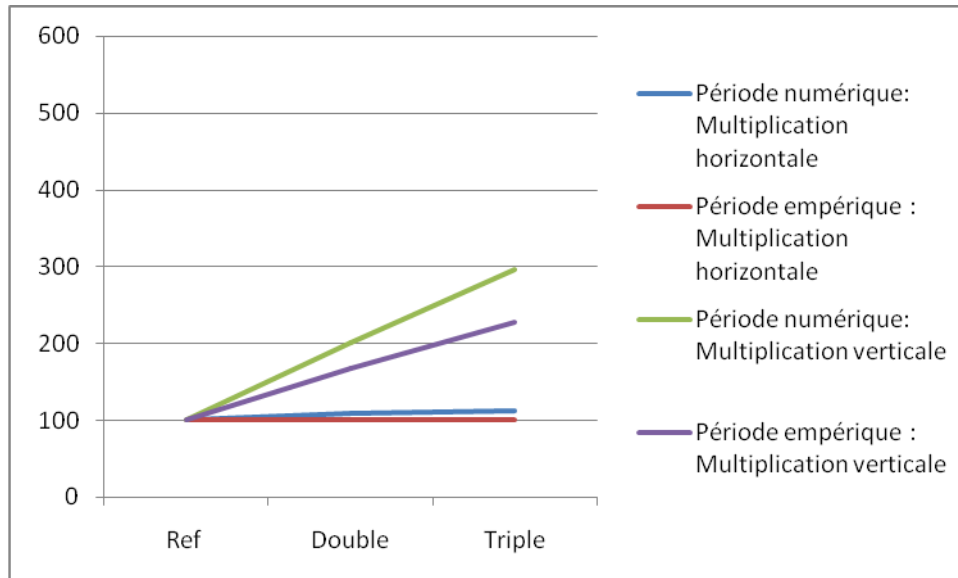


Fig. 92 : Rythme de croissance des périodes numériques et empiriques en pourcentage (%) pour les modèles en poteaux-poutres en béton armé sans remplissage en fonction des deux types de multiplication verticale et horizontale.

La lecture des résultats nous a permis de faire ressortir les constats suivants que l'on peut résumer comme suit :

- Pour la multiplication en plan, les périodes fondamentales estimées empiriquement ont tendance soit à se réduire pour les modèles en murs porteurs en maçonnerie, soit à rester identiques pour les modèles en structure poteaux-poutres en béton armé.
- La période propre, estimée empiriquement, a tendance à augmenter avec la multiplication du modèle de base en élévation.
- La période propre, estimée numériquement pour les deux typologies structurelles augmente de manière significative avec la multiplication du modèle de base à la verticale.
- La période propre, estimée numériquement pour les deux typologies structurelles augmente de manière insignifiante dans le cas des multiplications dans le sens horizontal.
- Pour les dédoublements horizontaux, le rythme de croissance de la période reste presque constant pour les deux types de structure. Par contre en ce qui concerne les dédoublements verticaux, le rythme de croissance est régulier à l'exception de la série des modèles en structure murs porteurs en maçonnerie qui a une croissance exponentielle pour l'estimation de la période numérique.

F. Analyse des résultats :

1. Même valeur de la période estimée empiriquement malgré les multiplications en plan du modèle en structure poteaux-poutres en béton armé sans remplissage :

Selon la réglementation parasismique algérienne, l'estimation de la période propre avec l'approche empirique pour des structures avec contreventement en portiques poteaux-poutres en béton armé sans remplissage est obtenue avec la formule(1).

Cette formule est composée de deux paramètres :

- Un coefficient « C_T » donné par le règlement parasismique et dépendant de la densité de remplissage. $C_T = 0,075$.
- La hauteur du bâtiment, qui dans ce cas en multiplication horizontale reste identique (10,5 mètres).

Vu que les deux paramètres intervenant dans le calcul empirique de la période restent les mêmes pour cette série de modèle, il est tout à fait logique que la valeur de la période calculée pour les trois modèles reste constante, malgré le facteur multiplicateur par 2 et par 3.

2. Chute de la valeur de la période fondamentale estimée empiriquement avec la multiplication horizontale de la typologie en structure murs porteurs en maçonnerie :

Selon la réglementation parasismique algérienne, l'estimation de la période propre avec l'approche empirique pour des structures avec contreventement en murs en maçonnerie, est obtenue avec deux formules (1) et (2), avec comme condition de retenir la plus petite des deux valeurs.

Pour les deux formules, la valeur de la période « T » est proportionnelle à la hauteur « h » du bâtiment. Mais en ce qui concerne la deuxième formule, elle est inversement proportionnelle à la racine carrée de la longueur du bâtiment, « C_T » ayant une valeur fixe de 0,05 pour les structures en murs porteurs en maçonnerie.

Ainsi, pour le cas de la multiplication horizontale du modèle de base, les valeurs des périodes obtenues avec la première formule sont les mêmes, puisque la hauteur du bâtiment est identique pour les trois cas.

Par contre, les valeurs de période obtenue avec la deuxième formule diminuent de plus en plus avec la multiplication du modèle de base dans le sens horizontal.

Une démonstration mathématique va nous permettre, de comprendre pourquoi justement ce sont les valeurs de la deuxième formule qui sont retenues.

- Le modèle de référence étant un cube de dimension d'arrête $D = 10,5$ mètres, l'estimation de sa période propre avec les deux formules donne une valeur quasi-identique à $T1 = 0,292$ seconde.
- Pour le modèle avec une double et une triple multiplication horizontale, la valeur de la période reste constante pour les trois modèles $T1 = T2 = T3 = 0,292$ seconde.

| Modèle | Longueur | Hauteur |
|-----------------------|-----------|----------|
| Modèle de base | $D1 = D$ | $H1 = D$ |
| Double multiplication | $D2 = 2D$ | $H2 = D$ |
| Triple multiplication | $D3 = 3D$ | $H3 = D$ |

Tab. 10 : Dimensions des bâtiments en fonction de la multiplication en plan du modèle de base.

Par contre, ce résultat diminuera avec la formule 2 de manière proportionnelle (Tab.11).

Ceci donne pour une période $T1$ pour le modèle de référence de :

$$T1 = 0,09 \frac{H1}{\sqrt{D1}} = 0,09 \frac{D}{\sqrt{D}} = 0,09 \sqrt{D} \quad \mathbf{T1 = 0,09 \sqrt{D}}$$

Pour le modèle avec une double multiplication en plan $T2$:

$$T2 = 0,09 \frac{H2}{\sqrt{D2}} = 0,09 \frac{D}{\sqrt{2D}} = 0,09 \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{2}} \quad \mathbf{T2 = T1 / \sqrt{2}}$$

Pour le modèle avec une triple multiplication en plan $T3$:

$$T3 = 0,09 \frac{H3}{\sqrt{D3}} = 0,09 \frac{D}{\sqrt{3D}} = 0,09 \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{3}} \quad \mathbf{T3 = T1 / \sqrt{3}}$$

| Facteur de multiplication | Période avec formule 1 | Période avec formule 2 |
|---------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | $T1 = 0,292$ seconde | $T1 = 0,292$ seconde |
| 2 | $T2 = 0,292$ seconde | $T2 = 0,206$ seconde |
| 3 | $T3 = 0,292$ seconde | $T3 = 0,168$ seconde |

Tab. 11 : Valeurs des périodes propres de la série des immeubles multipliés horizontalement estimées avec l'approche empirique.

En conclusion, pour les cas modélisés avec multiplication horizontale du modèle de base :

- C'est la valeur de la période propre obtenue avec la deuxième formule qui est à retenir. Vu qu'elle donne les valeurs les moins importantes pour la période ;
- La valeur de la période ainsi obtenue est inversement proportionnelle à la racine carrée de la valeur du facteur de multiplication en plan du modèle de référence.

3. Augmentation de la valeur de la période fondamentale estimée empiriquement avec la multiplication verticale pour les modèles avec structure poteaux-poutres en béton armé sans remplissage :

Comme déjà explicité, la 1^{er} formule est fonction d'un coefficient C_T qui est fixe, et de la hauteur. Dans cette série de modèle, la valeur de la hauteur est multipliée par le facteur de multiplication à la verticale du modèle de référence.

Ainsi, la valeur de la période empirique pour cette série de modèle aura tendance à augmenter de manière proportionnelle de $X^{3/2}$, X étant le facteur de multiplication du modèle de référence.

4. Augmentation de la valeur de la période fondamentale estimée empiriquement avec la multiplication verticale pour les modèles de structure en murs porteurs en maçonnerie :

Dans cette série de simulation, la largeur des modèles reste identique (D), alors que leur hauteur est multipliée par le facteur de multiplication 2 et 3 (Tab.12). Etant donné que pour les deux formules proposées par le RPA pour l'estimation empirique de la période fondamentale, la période est proportionnelle à la hauteur du bâtiment, ceci implique que quelle que soit la formule utilisée la valeur de la période va augmenter. Reste juste à savoir selon quelle proportion ?

| Modèle | Longueur | Hauteur |
|-----------------------|----------|---------|
| Modèle de base | D1 = D | H1 = D |
| Double multiplication | D2 = D | H2 = 2D |
| Triple multiplication | D3 = D | H3 = 3D |

Tab. 12 : Dimensions des bâtiments en fonction de la multiplication en élévation du modèle de base.

- Dans le cas de la 1^{er} formule, nous obtiendrons les rapports suivants :

La période T1 pour le modèle de base :

$$T1 = 0,05 H1^{3/4} = 0,05 D^{3/4} \quad \mathbf{T1 = 0,05 D^{3/4}}$$

Pour le modèle avec une double multiplication en élévation T2 :

$$T2 = 0,05 H2^{3/4} = 0,05 (2D)^{3/4} = 0,05 2^{3/4} D^{3/4} = 2^{3/4} (0,05 D^{3/4}) \quad \mathbf{T2 = 2^{3/4} T1}$$

Pour le modèle avec une triple multiplication en plan T3 :

$$T2 = 0,05 H3^{3/4} = 0,05 (3D)^{3/4} = 0,05 3^{3/4} D^{3/4} = 3^{3/4} (0,05 D^{3/4}) \quad \mathbf{T3 = 3^{3/4} T1}$$

- Dans le cas de la deuxième formule nous obtiendrons les rapports suivants :

La période T1 pour le modèle de base :

$$T1 = 0,09 H1 / \sqrt{D1} = 0,09D / \sqrt{D} = 0,09 \sqrt{D} \quad \mathbf{T1 = 0,09 \sqrt{D}}$$

Pour le modèle avec une double multiplication en plan T2 :

$$T2 = 0,09 H2 / \sqrt{D2} = 0,09(2D) / \sqrt{D} = 2(0,09 \sqrt{D}) \quad \mathbf{T2 = 2T1}$$

Pour le modèle avec une triple multiplication en plan T3 :

$$T3 = 0,09 H3 / \sqrt{D3} = 0,09(3D) / \sqrt{D} = 3(0,09 \sqrt{D}) \quad \mathbf{T2 = 3T1}$$

Selon la formule (1), la valeur de la période obtenue est directement proportionnelle à la puissance $3/4$ du facteur de multiplication verticale. Pour ce qui de la deuxième formule, la valeur de la période obtenue est directement proportionnelle au facteur de multiplication verticale.

Ainsi, dans le cas de la multiplication verticale du modèle de référence, la valeur de la période propre augmente au fur et à mesure de l'augmentation du facteur de multiplication dans les deux cas (Tab.13).

| Modèle | Période avec formule 1 | Période avec formule 2 |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Modèle de base | T1 = 0,292 seconde | T1 = 0,292 seconde |
| Double multiplication | T2 = 0,49 seconde | T2 = 0,584 seconde |
| Triple multiplication | T3 = 0,665 seconde | T3 = 0,876 seconde |

Tab. 13 : Valeurs des périodes propres de la série des immeubles multipliés verticalement estimées avec l'approche empirique.

Mais des deux formules, c'est les valeurs obtenues avec la formule (1) qui sont retenues car c'est celle qui produit les plus petites valeurs de la période propre. Effectivement, la multiplication par une valeur X et plus grande que sa multiplication avec la même valeur à la puissance $\frac{3}{4}$. ($X > X^{\frac{3}{4}}$)

5. Variation insignifiante de la valeur de la période propre estimée numériquement pour les multiplications horizontales, et de manière significative pour les multiplications verticales :

Afin de nous permettre d'explicitier ce résultat, nous allons utiliser la version simplifiée de la formule Rayleigh pour l'estimation de la période « T ».

La valeur de la période estimée en utilisant la version simplifiée de Rayleigh égal à $T = 2\sqrt{\delta}$, avec la flèche δ égale à F/K avec :

- F étant la force appliquée au dernier niveau.
- K étant la raideur de l'immeuble qui est égale à $K = nEI/H^3$. Avec n facteur dépendant de la nature des liaisons des éléments structuraux, E le module de déformation ou de Young, I l'inertie de la structure et H la hauteur au plancher étudié.

La flèche est égale à $\delta = FH^3/nEI$.

- **Cas des multiplications horizontales :** En ce qui concerne les différents modèles obtenus par multiplication horizontale, ces derniers ont une valeur de la période estimée numériquement qui ne varie que légèrement par rapport à la valeur du modèle de base.

Dans le cas de la multiplication horizontale par 2 ou 3 du modèle de base, les valeurs de n, E et H restent identiques.

Cependant, en ce qui concerne la force, sa valeur est multipliée par 2 et 3 quand le modèle de référence est multiplié par deux et par trois.

Le même raisonnement peut se faire en ce qui concerne l'inertie, car elle représente la somme de l'inertie de l'ensemble des éléments de structure de la construction. Cela signifie que la

multiplication de la construction conduit à la multiplication proportionnelle de ses composants structurels, et donc son inertie. Ainsi, la valeur de l'inertie et du poids augmentent de manière proportionnelle et conduit à l'annulation de l'effet réciproque de ces deux multiplications, étant donné que le déplacement est directement proportionnel au poids, et inversement proportionnel à l'inertie.

Voilà pourquoi, la valeur de la période fondamentale reste quasiment inchangée avec la multiplication horizontale.

- **Cas des multiplications verticales :** Dans ce cas, les valeurs de "n", "I" et "E" ne changent pas. La valeur de "F" change, mais pas avec une valeur significative.

Dans ce cas, cependant, la valeur de la hauteur se multiplie. Le déplacement est proportionnel au cube de la hauteur. Cela implique que la valeur de la période augmente rapidement avec la multiplication verticale.

Voilà pourquoi, la valeur de la période augmente assez rapidement avec la multiplication verticale.

Il faut noter, que les valeurs des périodes obtenues bien qu'elles soient dans l'ensemble cohérentes avec la démonstration théorique, ces valeurs obtenues par les modèles numériques sont un peu différentes. Ceci est lié à la difficulté d'évaluer avec exactitude la rigidité des modèles lors de leur modélisation informatique.

A ce titre, rappelons que le calcul de la période basé sur la formule de Rayleigh, n'est pas absolu non plus. Car il ne représente qu'une méthode pour approcher le plus possible l'estimation de la période des bâtiments.

C'est la raison pour laquelle, le règlement parasismique algérien prévoit des garde-fous pour minimiser le risque d'écart entre la période estimée numériquement et la période réelle du bâtiment. Ce dispositif consiste en la limitation de la valeur de la période estimée numériquement à 30% supérieure à celle estimée par l'approche empirique.

Notre choix de se baser sur cette approche plutôt qu'une autre, repose sur le fait que :

- Premièrement, des spécialistes relèvent que les résultats obtenus avec la formule de Rayleigh correspondent avec ceux obtenus avec une analyse dynamique [Demagh K., 2003] ;
 - Deuxièmement, le règlement parasismique algérien a recours à cette approche pour définir la valeur de la période à considérer pour le calcul parasismique.
6. Absence de croissance de la période des modèles en dédoublement horizontale, et croissance régulière de la période des modèles en dédoublement verticale, avec une croissance exponentielle de la série en structure en murs porteurs en maçonnerie pour la période estimée numériquement.

Ceci peut s'expliquer par le fait que d'une manière générale, la valeur de la période d'une construction est assez sensible à la variation de la masse des derniers niveaux que de leur rigidité [Chalah F., 1996]. Ainsi l'augmentation de la masse dans les parties hautes conduit à l'augmentation de manière assez sensiblement la valeur de la période et inversement.

- **Cas des multiplications horizontales** : La valeur de la période est proportionnelle à la racine carrée de sa masse, et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa rigidité. Donc, dans ce cas, l'impact de la masse sera annulé par l'effet de la rigidité. Voilà pourquoi le changement de la valeur de la période sera minime.
- **Cas des multiplications verticales** : nous avons ici deux séries de modèles avec des caractéristiques complètement différentes quant à leur masse. En effet, les modèles en poteau-poutre sont considérés comme des structures légères. Contrairement aux modèles en murs porteurs en maçonnerie qui sont considérés comme des structures massives.

Ainsi, la série de modèles en poteau-poutre, a un taux de croissance constant, alors que pour la série avec murs porteurs en maçonnerie, le taux de croissance s'accélère. Cela est dû à l'importance de la masse de leur dernier niveau.

G. Synthèse des résultats :

En ce qui concerne la valeur de la période fondamentale, ces différents résultats, nous permettent d'identifier l'impact des proportions des édifices sur les deux typologies de structures simulées (Tab.14).

D'une manière générale, l'allongement des proportions en plan n'a pas d'incidence sur l'estimation de la période, sauf pour le cas de la structure en murs porteurs en maçonnerie pour la période calculée empiriquement⁹⁸.

Selon l'approche de Rayleigh, ceci s'explique par le fait que la période est directement proportionnelle à la masse, mais en même temps indirectement proportionnelle à l'inertie. Ce qui fait qu'en cas de dédoublement horizontal de l'immeuble, les deux facteurs la masse et l'inertie s'annulent mutuellement.

Par contre, l'élancement en élévation a un impact direct sur l'estimation de la période sous ces deux formes empirique et numérique et ceci pour les deux typologies des structures étudiées. L'impact est plus important pour les constructions lourdes et rigides comme dans le cas des bâtiments appartenant à notre corpus d'étude.

| Type de période | Type de structure | Type de multiplication | Valeur de la période | Influence |
|-------------------------------|--|------------------------|----------------------|--------------|
| Période estimée empiriquement | Murs porteurs en maçonnerie | Horizontale | Diminue | Impact |
| | | Verticale | Augmente | Impact |
| | Poteaux-poutres en béton armé sans remplissage | Horizontale | Ne change pas | Pas d'impact |
| | | Verticale | Augmente | Impact |
| Période estimée numériquement | Murs porteurs en maçonnerie | Horizontale | Insignifiant | Pas d'impact |
| | | Verticale | Augmente | Impact |
| | Poteaux-poutres en béton armé sans remplissage | Horizontale | insignifiant | Pas d'impact |
| | | Verticale | Augmente | Impact |

Tab. 14 : Tableau de synthèse de l'impact des proportions en plan et en élévation sur la valeur de la période estimée empiriquement ou numériquement.

Concrètement, cet impact a une incidence sur quoi ?

Comme nous l'avons déjà explicité, la valeur de la période fondamentale a un impact direct sur la valeur de la flèche du bâtiment. La valeur de la flèche est

⁹⁸ Le calcul de la période de manière empirique, ne considère que les dimensions géométriques du bâtiment. Ce qui dans le cas du dédoublement d'un bâtiment conduit à la variation d'une de ses dimension et donc de sa période.

directement proportionnelle au carré de la valeur de la période comme on peut le déduire de la version simplifiée de la formule de Rayleigh ($\delta N = T^2/4$).

Ainsi, le désir de maîtrise de la réduction de la valeur de la flèche passe entre autres, par la maîtrise de la réduction de la période. Ce qui implique que, toute augmentation de la période devient problématique pour la prise en compte de la flèche du bâtiment (Tab.15).

| Type de structure | Type de multiplication | Valeur de la période | Flèche |
|--|------------------------|----------------------|--------------|
| Murs porteurs en maçonnerie | Horizontale | Diminue | Pas d'impact |
| | Verticale | Augmente | Augmente |
| Poteaux-poutres en béton armé sans remplissage | Horizontale | Ne change pas | Pas d'impact |
| | Verticale | Augmente | Augmente |

Tab. 15 : Tableau de synthèse de l'impact des changements des proportions du bâtiment en plan et en élévation sur les valeurs de la flèche.

A ce titre, Ankik précise que le règlement parasismique algérien (RPA99/Version2003) conduit à un dimensionnement plus sécuritaire par rapport au code parasismique européen (Eurocode 8) et le code américain (ASCE 7-05) [Ankik D., 2013]. Selon le même auteur, cette marge de sécurité plus importante est dûe probablement à la qualité de la réalisation des constructions, qui en Algérie est bien inférieure à celle produite en Europe et aux États-Unis.

Cette démarche sécurisante conduit toujours à retenir les cas les plus défavorables pour le calcul parasismique. C'est pour cette raison qu'un certain nombre de garde-fous ont été introduit au niveau de la réglementation parasismique algérienne, telle que la valeur de la période numérique obtenue numériquement ne doit pas dépasser 30% celle estimée empiriquement, ou la force sismique obtenue numériquement ne doit pas être inférieure à 80% de celle calculée par la méthode statique équivalente...etc.

En ce qui concerne notre corpus d'étude, l'enquête sur site a révélé que les bâtiments étudiés ne sont pas allongés (98,95% des bâtiments ont une proportion en plan inférieure à 4), mais surtout elle a fait ressortir que 87,90% de ces bâtiments ont des proportions en élévation comprises entre 1/1 et 1/3, seuls 8,42% des cas étudiés possèdent un élancement vertical important avec un rapport hauteur largeur qui dépasse 1/3, et seulement 3,68% ont des proportions d'élévation inférieures à 1/1.

Ceci les prédispose à minimiser l'importance de leur période, et de ce fait minimise l'importance de leur flèche, leur permettant au final, de minimiser le risque d'entrechoquement entre les immeubles.

D'un autre côté, nous avons très peu de bâtiments qui ont un petit élancement (inférieur à 1/1). Cela réduit les chances d'avoir des bâtiments avec une faible valeur de la période fondamentale, ce qui permet de réduire l'importance de l'effort sismique que le bâtiment risque de subir.

Ainsi, le patrimoine architectural Algérois 1830-1930 possède grâce à ses proportions, de bonnes prédispositions pour réduire sa vulnérabilité sismique. Elles lui permettent d'avoir de bonnes valeurs de période fondamentale. **Ni trop élevée, afin d'éviter les grands déplacements et le risque de martellement, ni trop basse, pour éviter d'avoir des efforts sismiques importants.**

Cette prédisposition est certes, une bonne nouvelle qui peut expliquer les raisons qui font que ce patrimoine est encore exploitable aujourd'hui, mais c'est loin d'être suffisant pour éliminer définitivement sa vulnérabilité sismique.

D'autres facteurs peuvent malheureusement entraîner sa destruction, comme le vieillissement des matériaux, le manque d'entretien,...etc.

Sans oublier le fait que, les résultats obtenus ne sont valables que pour des immeubles avec une distribution équilibrée des masses en plan et en élévation. Chose qui n'est pas toujours vérifiable en réalité.

4.3.3 Vérification du comportement d'un mur

Afin de démontrer le rôle des caractéristiques stylistiques et urbaines dans le comportement des bâtiments lors d'un séisme, nous avons réalisé des simulations⁹⁹ informatiques sur des exemples simplifiés.

Les différents modèles sont obtenus à partir d'un modèle représentatif du corpus étudié ¹⁰⁰ (Fig.93). Chaque modèle, mettra en avant une seule caractéristique bien spécifique des bâtiments étudiés.

Ainsi, nos simulations consisteront en une variation à chaque fois sur un mur de façade représentatif de notre corpus d'étude, d'une caractéristique stylistique ou urbanistique, et de relever l'importance des déplacements subis par ce mur niveau par niveau et des déplacements relatifs entre les niveaux sous

⁹⁹ Cette série de simulation sur le logiciel ETABS a été réalisé par l'ingénieur en génie civil Jugurtha Talmatkadi.

¹⁰⁰ Voir titre 4.2 « Enquête sur le corpus d'étude » page 129-146.

charges sismiques¹⁰¹. Puis de comparer les résultats obtenus entre les différents modèles simulés.

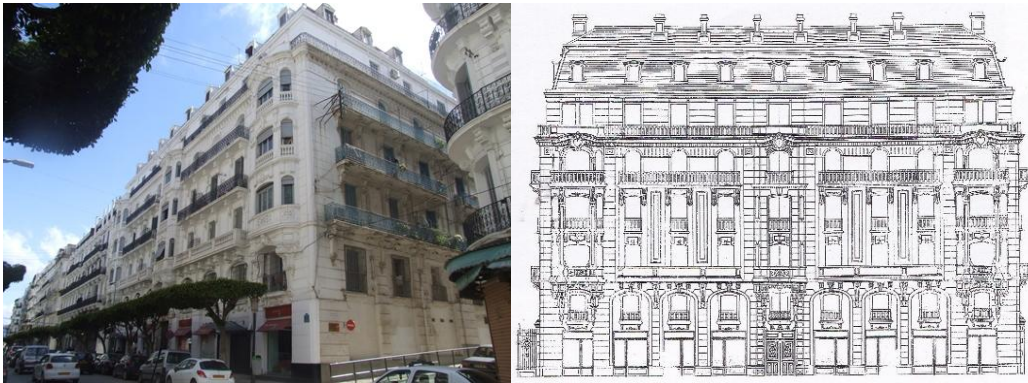


Fig. 93 : Patrimoine architectural algérois 1830-1930. (Crédit photo : Souami M.A., [Kanoun Y., 2000])

Il s'agit finalement, de s'inscrire dans une approche comparative grâce à la réalisation de simulations paramétriques. Les résultats obtenus, seront comparés principalement par rapport à un modèle de référence simplifié qui selon le RPA devrait avoir le meilleur comportement sous charge sismique [Souami M.A., 2013].

A. Présentation des modèles :

- Modèle N° 01 : Il constitue notre modèle de référence car il est censé illustrer le cas le plus favorable si on suit les recommandations de la réglementation algérienne. A savoir régularité des éléments aussi bien à la verticale qu'à l'horizontale, absence de porte-à-faux et d'éléments en retrait, hauteur de niveau identique (Fig.94).

Les différentes caractéristiques de ce mur sont :

- dimensions largeur x hauteur : 36,8 x 29,3 mètres ;
- nombre de niveaux 8 ;
- hauteur 1er niveau : 4,1 mètres ;
- hauteur des autres niveaux : 3,6 mètres ;
- module de la trame : 3,85 mètres ;
- nombre de travée : 09 ;

¹⁰¹ L'intérêt envers les déplacements inter-étage est dû à l'importance de ce paramètre pour l'identification des dommages causés par le séisme aux constructions [Cherfaoui A. & Afra H., 1996, P309].

- dimensions des ouvertures : 2,4 x 3,5 mètres pour le premier niveau et 1,2 x 2,1 mètres pour les autres.

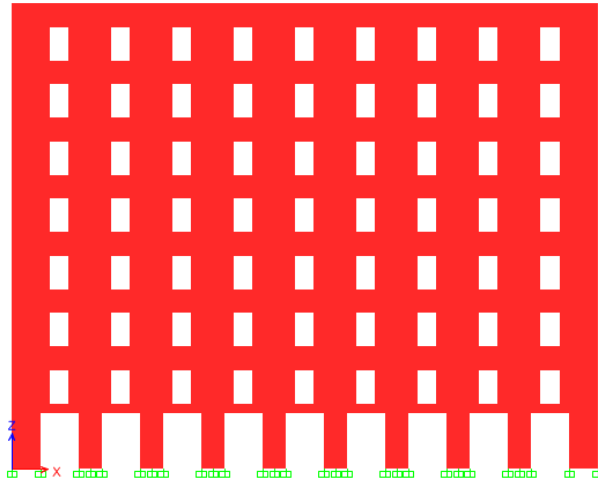


Fig. 94 : Modèle 01 (crédit photo : Talmatkadi J.).

- Modèle N°2 : Il s'agit de vérifier l'impact de l'une des formes de matérialisation de la tripartite verticale, à savoir le retrait des niveaux supérieurs. Ce modèle possède les mêmes caractéristiques que le modèle de référence avec des retraits de part et d'autre de la paroi entre le 5^{ème} et 8^{ème} niveau (Fig.95).

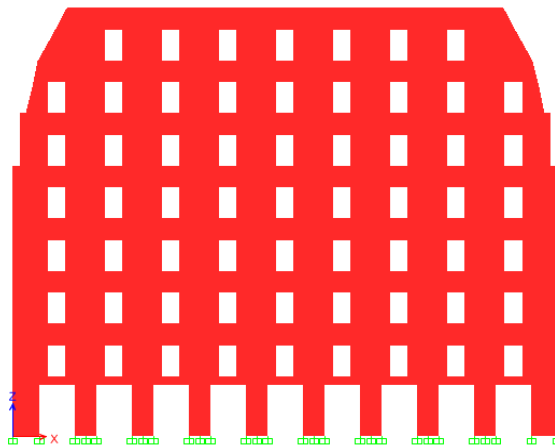


Fig. 95 : Modèle 02. (crédit photo : Talmatkadi J.).

- Modèle 03 : A ce niveau, il est question de vérifier l'impact aussi bien de la tripartite verticale que de la hiérarchisation verticale (Fig.96).

Ce modèle est à ce titre, Identique au modèle de référence avec une variation de la hauteur des deux derniers niveaux qui passent de 3,60m à 2,60m. Les ouvertures des deux derniers niveaux sont aussi réduites afin de passer à de 1,2x2,1m à 1,2x1,2m.

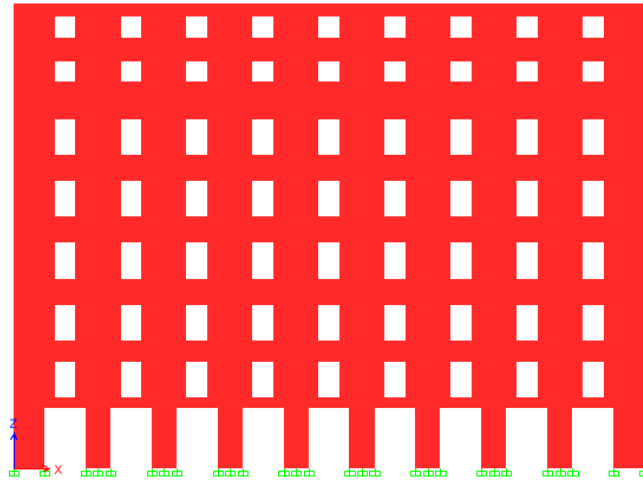


Fig. 96 : Modèle 03. (crédit photo : Talmatkadi J.).

- Modèle N° 04 : Ce modèle offre la possibilité de vérifier l'impact de la taxis et de l'ordonnancement à travers la formalisation d'un mur qui possède des dimensions de travées différentes les unes des autres. La dimension de ces travées varie entre 3,05m à 5,3m (Fig.97).

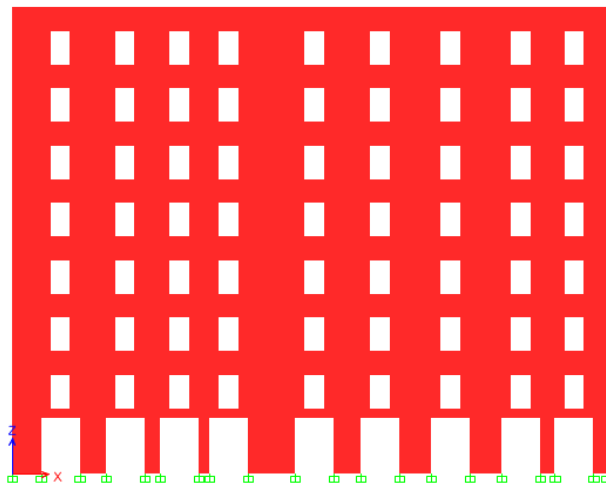


Fig. 97 : Modèle 04. (crédit photo : Talmatkadi J.).

- Modèle N° 05 : Ce cas nous offre la possibilité de vérifier l'impact de l'ordonnancement et de l'individualisation des immeubles en brisant le dispositif de la superposition obligatoire des ouvertures. Ainsi, les ouvertures sont organisées en quinconce, ce qui nous fait passer de 9 travées dans le modèle de référence à 19 travées dans ce modèle (Fig.98).

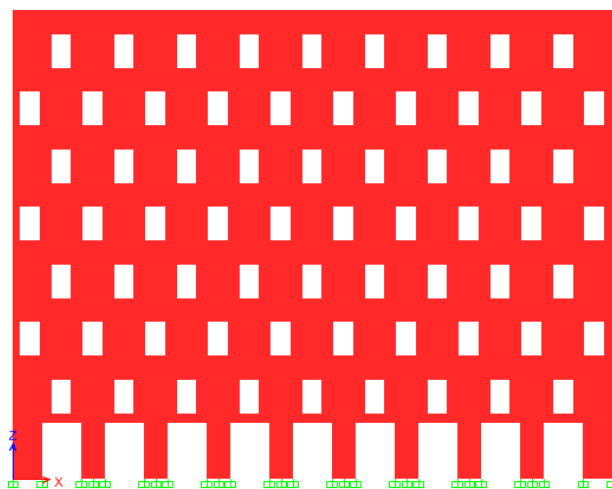


Fig. 98 : Modèle 05. (crédit photo : Talmatkadi J.).

B. Résultats des simulations :

Après chaque simulation, nous avons pu avoir en millimètres les valeurs de déplacement dans l'absolu, ce qui nous a permis par la suite de calculer la valeur des déplacements relatifs inter-étage pour chaque modèle (Tab. 16 & 17).

| Déplacement | NIV | M1 Référence | M2 Retrait | M3 Hauteur | M4 Irrégulier | M5 Quinconce |
|-------------|------|--------------|------------|------------|---------------|--------------|
| | Niv1 | 3,26 | 3,15 | 3,05 | 3,01 | 3,21 |
| | Niv2 | 5,04 | 4,87 | 4,62 | 4,73 | 4,86 |
| | Niv3 | 6,72 | 6,46 | 6,13 | 6,34 | 6,39 |
| | Niv4 | 8,27 | 7,93 | 7,49 | 7,88 | 7,83 |
| | Niv5 | 9,71 | 9,25 | 8,71 | 9,34 | 9,22 |
| | Niv6 | 11,01 | 10,44 | 9,76 | 10,69 | 10,47 |
| | Niv7 | 12,16 | 11,47 | 10,44 | 11,92 | 11,59 |
| | Niv8 | 13,21 | 12,32 | 11,08 | 13,05 | 12,64 |

Tab. 16 : Valeur des déplacements en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau.

| Déplacement inter-étage | NIV | M1 Référence | M2 Retrait | M3 Hauteur | M4 Irrégulier | M5 Quinconce |
|-------------------------|------|--------------|------------|------------|---------------|--------------|
| | Niv1 | 8,15 | 7,88 | 7,62 | 7,52 | 8,01 |
| | Niv2 | 4,46 | 4,28 | 3,95 | 4,31 | 4,13 |
| | Niv3 | 4,18 | 3,98 | 3,77 | 4,02 | 3,83 |
| | Niv4 | 3,89 | 3,67 | 3,41 | 3,84 | 3,62 |
| | Niv5 | 3,6 | 3,31 | 3,04 | 3,67 | 3,46 |
| | Niv6 | 3,24 | 2,97 | 2,62 | 3,37 | 3,12 |
| | Niv7 | 2,87 | 2,57 | 1,7 | 3,06 | 2,81 |
| | Niv8 | 2,64 | 2,15 | 1,61 | 2,83 | 2,62 |

Tab. 17 : Valeur en millimètre des déplacements relatifs inter-étage pour chaque modèle niveau par niveau.

A partir de ces résultats, nous avons pu produire des graphes, qui nous ont servi de base pour la réalisation des comparaisons entre les modèles simulés, et donc identifier l'impact des traits de caractères sélectionnés.

- Graphe 1 : Comparaison entre l'évolution des déplacements niveau par niveau des cinq modèles simulés (Fig.99).

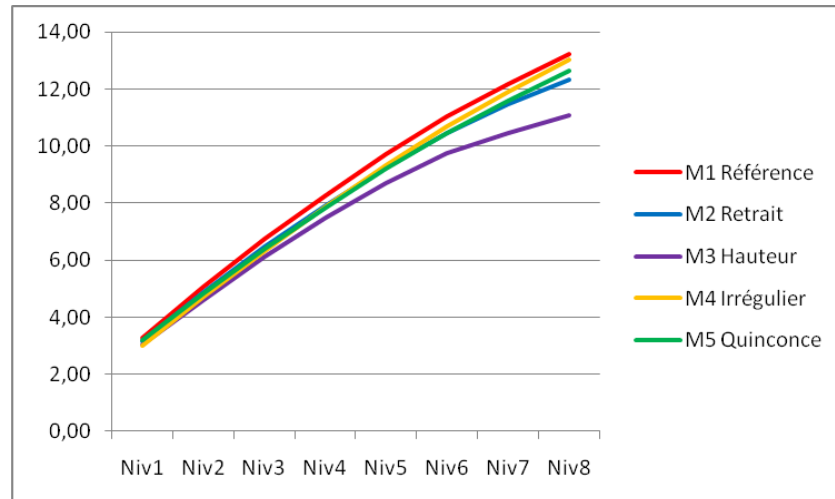


Fig. 99 : Evolution des déplacements en millimètre.

- Graphe 2 : Comparaison entre l'évolution des déplacements relatifs inter-étages niveau par niveau pour les cinq modèles simulés (Fig.100).

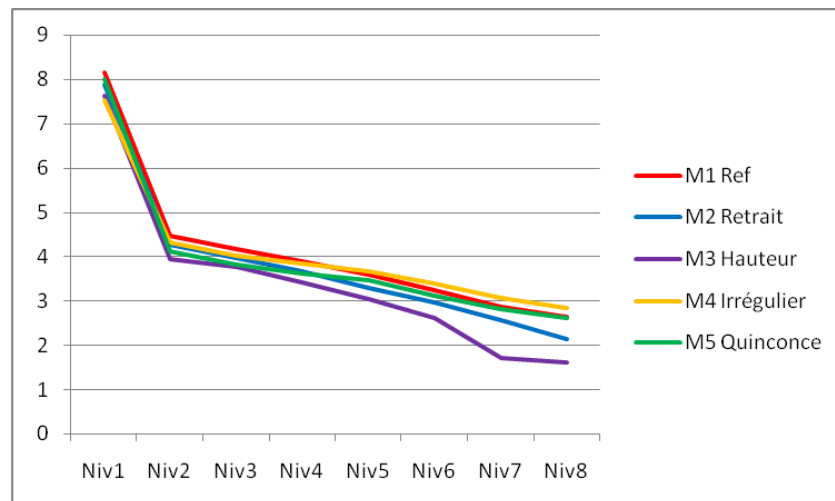


Fig. 100 : Evolution des déplacements relatifs inter-étages en millimètre.

La lecture des différents résultats, nous a permis de faire ressortir un certain nombre de constats que l'on peut résumer comme suit :

- L'ordre de classement des déplacements des modèles -absolus ou relatifs- n'est pas identique sur l'ensemble des niveaux (Tab. 18 & 19).

| Niv1 | Niv2 | Niv3 | Niv4 | Niv5 | Niv6 | Niv7 | Niv8 |
|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 3,01 | 4,62 | 6,13 | 7,49 | 8,71 | 9,76 | 10,44 | 11,08 |
| 3,05 | 4,73 | 6,34 | 7,83 | 9,22 | 10,44 | 11,47 | 12,32 |
| 3,15 | 4,86 | 6,39 | 7,88 | 9,25 | 10,47 | 11,59 | 12,64 |
| 3,21 | 4,87 | 6,46 | 7,93 | 9,34 | 10,69 | 11,92 | 13,05 |
| 3,26 | 5,04 | 6,72 | 8,27 | 9,71 | 11,01 | 12,16 | 13,21 |

| | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|-----------------|
| M1 Référence | M2 Retrait | M3 Hauteur | M4 Irrégulier | M5 Quinconce |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|-----------------|

Tab. 18 : Classement des valeurs des déplacements absolus de la plus petite à la plus grande, niveau par niveau.

| Niv1 | Niv2 | Niv3 | Niv4 | Niv5 | Niv6 | Niv7 | Niv8 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 7,52 | 3,95 | 3,77 | 3,41 | 3,04 | 2,62 | 1,70 | 1,61 |
| 7,62 | 4,13 | 3,83 | 3,62 | 3,31 | 2,97 | 2,57 | 2,15 |
| 7,88 | 4,28 | 3,98 | 3,67 | 3,46 | 3,12 | 2,81 | 2,62 |
| 8,01 | 4,31 | 4,02 | 3,84 | 3,60 | 3,24 | 2,87 | 2,64 |
| 8,15 | 4,46 | 4,18 | 3,89 | 3,67 | 3,37 | 3,06 | 2,83 |

| | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|-----------------|
| M1 Référence | M2 Retrait | M3 Hauteur | M4 Irrégulier | M5 Quinconce |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|-----------------|

Tab. 19 : Classement des valeurs des déplacements relatifs, de la plus petite à la plus grande, niveau par niveau.

Ainsi, à l'exception du modèle avec réduction de hauteur qui est quasiment toujours classé premier, et le modèle de référence qui est presque toujours classé dernier, le classement des autres modèles varie entre les niveaux bas et les niveaux supérieurs.

Par exemple, les modèles irréguliers et en quinconce, ont un meilleur classement dans les niveaux bas par rapport aux niveaux supérieurs. Alors que pour le modèle en retrait c'est l'inverse.

- Le modèle de référence censé être le cas le plus favorable, est classé toujours en dernière position pour la valeur des déplacements absolus, et en dernière ou avant dernière position pour la valeur des déplacements relatifs.

C. Analyse des résultats :

A ce niveau, nous allons expliquer les différents résultats obtenus en nous basant sur le fait que les déplacements sont directement proportionnels à la force et donc au poids, et inversement proportionnels à la raideur¹⁰².

¹⁰² Pour plus d'explications voir page 162.

1. Meilleur comportement du modèle irrégulier pour les niveaux bas et inversement pour les niveaux supérieurs.

Le bon comportement est lié au fait que la raideur d'une structure est directement proportionnelle à son inertie¹⁰³.

L'inertie d'une structure est égale, à la somme des inerties des différents éléments qui la composent. Dans notre cas, elle sera égale à la somme des inerties des différents pans de murs qui composent notre mur.

Bien que le modèle de référence et le modèle irrégulier possèdent le même nombre de pans de murs, ces derniers ne produisent pas la même inertie.

Effectivement, vu que l'inertie est exponentielle à la puissance 3 de la longueur¹⁰⁴, cela implique que le modèle irrégulier, avec certains pans de murs bien plus longs que ceux des autres modèles, possède une inertie plus importante. C'est ce qui explique son bon comportement dans les niveaux inférieurs.

Par contre, en ce qui concerne les niveaux supérieurs, ce qui prime ce n'est pas la rigidité, mais le poids [Chalah F., 1996]. La réduction de la hauteur, le retrait, et l'augmentation du nombre de fenêtre conduisent à réduire le poids des différents modèles dans les niveaux supérieurs par rapport au modèle irrégulier. Ce qui explique leur meilleur comportement par rapport au modèle irrégulier.

2. Meilleur comportement du modèle en quinconce que le modèle de référence.

La rigidité d'un mur augmente avec le nombre de travée qu'il possède. Ainsi dans le cas de référence, nous avons 9 travées, par contre en ayant placé les travées en quinconce avec des ouvertures qui se superposent un niveau sur deux, ceci a conduit à augmenter le nombre de travées à 19. Ceci a permis de rigidifier le mur et peut ainsi expliquer la réduction de ses déplacements.

3. Meilleur comportement des modèles en retrait et hauteur plus réduite que le modèle de référence.

Ce comportement est dû à un poids moins important dans ces deux modèles comparativement au modèle de référence.

¹⁰³ Idem.

¹⁰⁴ L'inertie = $bh^3/12$, avec dans notre cas «b» épaisseur du mur, et «h» longueur du pan de mur.

D. Synthèse des résultats :

D'après les résultats obtenus dans cette série de simulations, il semblerait que les caractéristiques stylistiques et urbaines que nous avons sélectionnés ont un impact sur le comportement de notre corpus d'étude lors d'un séisme.

A titre d'exemple, la valeur des déplacements absolus au 1^{er} niveau varie de 3,01mm à 3,26mm, ce qui nous donne une variation de l'ordre de 8,34%. Pour le dernier niveau, elle varie de 11,08mm à 13,21mm soit une progression de l'ordre de 19,22%.

Il en est de même, en ce qui concerne les déplacements relatifs inter-étages. La valeur des déplacements relatifs entre le 1^{er} et le 2^{ème} niveau varie de 7,52mm à 8,15mm, à savoir une variation de 8,38%. Pour ce qui est du dernier niveau, elle varie de 1,61mm à 2,83mm, donc une progression de 75,78%.

- L'exemple simulé, a montré l'impact positif que peut avoir la hiérarchisation verticale des bâtiments grâce à la réduction des hauteurs des niveaux supérieurs et aussi à leur retrait.

Malheureusement, l'enquête que nous avons menée sur terrain a montré la rareté aussi bien des cas de retrait que des cas avec réduction de la hauteur des niveaux supérieurs. Ainsi, le corpus d'étude ne profite pas de ces dispositifs pour réduire sa vulnérabilité vis-à-vis du séisme.

- Concernant la présence d'un nombre de pans de mur plus important, ce dernier, certes réduit les déplacements dans les niveaux inférieurs, mais son comportement est moins intéressant que les modèles réguliers surtout en ce qui concerne le déplacement relatif inter-étages. Un facteur assez important car du point de vue de la vulnérabilité, il permet de minimiser les risques d'effondrement des planchers.

Pour ce qui est de notre corpus d'études, l'enquête a relevé que 98,17% des élévations étudiées, possèdent justement une régularité dans la répétition de leur travée.

- Ces simulations ont fait ressortir l'impact positif de la multiplication du nombre de travées dans l'amélioration du comportement d'une structure.

Malheureusement, l'enquête sur terrain a fait ressortir une moyenne assez faible du nombre de travées par élévation, à savoir 4,77 travées.

Par contre, si l'on considère l'absence de joint entre les différents immeubles étudiés, et donc la possibilité de considérer l'ensemble de l'îlot comme unité constructif, alors cette moyenne augmente considérablement pour passer à 10,76 travées par élévation.

4.3.4 Vérification du comportement parasismique d'une typologie spécifique de l'architecture 1830-1930 à Alger

Cette dernière série de simulation¹⁰⁵ cherche à identifier l'impact de différentes caractéristiques architecturales et urbaines sur un exemple d'immeubles tiré de notre corpus d'étude.

Notre démarche est identique à celle des deux premières séries de simulation, à savoir la modélisation paramétrique. Ainsi, à partir d'un modèle source, nous avons réalisé une série de modèles simplifiés dont chacun met en avant l'impact d'une caractéristique unique du corpus étudié.

Les critères d'évaluation sont les déplacements absolus du bâtiment dans les deux sens, ainsi que les déplacements relatifs inter-étages et ceci pour l'ensemble des niveaux.

Les résultats obtenus pour chaque caractéristique sont comparés entre eux mais aussi évalués par rapport à deux modèles. Le premier étant le modèle source comportant l'ensemble des traits de caractères étudiés, et le deuxième un modèle simplifié censé avoir le meilleur comportement sous charge sismique car répondant aux différentes recommandations du RPA.

A. Choix de l'immeuble îlot à galerie

La nature du risque en général et le risque sismique en particulier, fait que le nombre des paramètres intervenant dans l'explication du comportement soit assez important est très difficile à appréhender dans leur globalité [Mathieu H., 2000].

Le corpus d'étude est constitué d'un tissu assez dense avec une absence de joint entre les immeubles d'un même îlot à l'exception, des îlots comportant de nouvelles constructions réalisées en général suite à l'effondrement d'anciens

¹⁰⁵ Cette série de simulation sur le logiciel ETABS a été réalisé par l'ingénieur en génie civil Jugurtha Talmatadi.

bâtiments. Sans oublier le fait qu'il est difficile d'établir, si le mur mitoyen entre les immeubles est un mur commun aux deux immeubles, ou s'il existe un mur mitoyen différent pour chacun des deux immeubles.

Cette absence de mitoyenneté, avec partage d'un même mur de refend entre deux immeubles juxtaposés est assez souvent observée lors de démolition ou d'effondrement d'anciens immeubles¹⁰⁶ (Fig.101).



Fig. 101 : Partage du même mur de refend entre deux immeubles mitoyens. Cas de l'immeuble de la parisienne Alger. (Crédit photo : Souami M.A).

Cette densité additionnée à l'absence de joint sismique conduit lors d'un séisme à une interaction assez importante entre les différents immeubles constituant un îlot.

Ceci implique, qu'une simulation des effets du séisme sur un immeuble ne peut pas se faire par rapport à un seul immeuble de l'îlot. Mais plutôt de considérer de préférence tout l'îlot comme une seule entité constructive. Permettant de la sorte d'analyser le comportement global vis-à-vis du séisme et de minimiser les risques d'écart avec la réalité.

Effectivement, il ne faut pas confondre entre le statut juridique d'un immeuble et le fait qu'il appartienne à la même unité constructive constituée en général de l'ensemble des immeubles de l'îlot. De ce fait, simuler un seul immeuble de l'îlot par rapport à son comportement face au séisme, c'est prendre le risque de ne pas tenir compte des facteurs d'interactions de l'immeuble avec

¹⁰⁶ Une situation qui conduit à détériorer la résistance et augmenter la vulnérabilité des immeubles mitoyens face au séisme car l'immeuble qui s'est effondré n'est pas une entité autonome, mais une partie de la même entité constructive. Pire encore, en cas de remplacement de la partie effondrée par une nouvelle construction qui ne tient pas compte de cette interdépendance et qui risque de ce fait d'accroître la vulnérabilité des constructions. [AFPS, 2004A, P26]

son environnement, ce qui est un non-sens. D'autant plus que ces interactions peuvent être déterminantes lors d'un séisme.

Ce sont ces différentes raisons, qui nous ont guidés dans le cadre de cette étude prospective vers le choix d'un immeuble en configuration isolée, à savoir l'immeuble îlot (Fig.102).

Mais des différentes configurations des immeubles à îlot, nous avons opté pour l'immeuble avec galerie. Un choix qui se justifie par le désir d'observer l'impact de cette caractéristique sur le comportement de l'immeuble même si d'un point de vue de la représentativité, ce n'est pas le bâtiment le plus courant.

Notre choix du modèle source à simuler ne repose pas sur la représentativité, mais plutôt sur la significativité. Il était question pour nous de choisir non pas un modèle récurrent, mais plutôt un modèle qui nous permet de nous éclairer le plus possible sur l'impact des différents traits de caractères de ce patrimoine architectural sur son comportement face au séisme¹⁰⁷.



Fig. 102 : L'immeuble îlot avec galerie. (Crédit photo : Bekkal M.).

Notre modèle source est constitué d'une galerie sur le côté, qui certes apporte une qualité architecturale et urbaine, mais elle est censée constituer une vulnérabilité vis-à-vis du comportement sismique du bâtiment.

¹⁰⁷ Dans ses différents travaux de recherche, le mathématicien René Thom, explique l'importance du recours à la signification des choses. Selon lui, il y a plus de choses à apprendre sur les phénomènes étudiés au niveau de leurs singularités. Les singularités sont justement des disfonctionnements qui permettent de mettre à l'épreuve le phénomène étudié, et donc permettent de le révéler. Pour en savoir plus, voir : [Thom R., 1980], [Thom R., 1988], [Thom R., 1989] et [Thom R., 1993].

La comparaison entre le comportement de notre modèle source et les autres modèles, nous permettra de relever non seulement, le dysfonctionnement que produit la galerie lors d'un séisme, mais de voir aussi l'impact des autres caractéristiques qui pourraient contre carrer cette anomalie.

Outre le choix d'avoir recours à l'immeuble îlot comme modèle source, notre désir de minimiser les risques de fausser les résultats de nos simulations par rapport a nos objectifs, nous a mené à simplifier certaines caractéristiques constructives de ce modèle.

Effectivement, un certain nombre de ces bâtiments ont des particularités, qui, du point de vue de la statique et du calcul parasismique, semblent constituer des facteurs de vulnérabilité. Des anomalies, qui pour certaines d'entre elles, peuvent totalement fausser les résultats de nos simulations, du fait qu'elles deviendront prépondérantes dans la détermination du comportement des modèles.

Parmi ces anomalies on peut citer :

- l'absence de continuité des éléments constructifs entre les niveaux avec des reprises grâce à des poteaux implantés ;
- ou le changement du système constructif entre les niveaux en passant du mur porteur en maçonnerie au poteau métallique (Fig.103).



Fig. 103 : Exemple d'une poutre de reprise métallique pour la reprise des murs porteurs en maçonnerie. (Crédit photo : Souami M.A.)

Ainsi, le système constructif retenu est constitué d'un réseau régulier de murs porteurs en maçonnerie, continu sur la totalité de la hauteur du bâtiment.

B. Descriptif et caractéristiques des modèles à simuler



Fig. 104 : Modèle source. (Crédit photo : Bekkal M.).

B.1 Modèle source : Il est inspiré de l'immeuble îlot situé au 6 et 8 Rue Hamani Cherif (Fig.104). Il constitue le modèle de base qui comporte l'ensemble des 08 caractéristiques dont nous voulons vérifier l'impact sur le comportement sismique des bâtiments de notre corpus d'étude.

Concrètement, le modèle source possède des dimensions en plan de 56,85m par 29,65m et, est constitué (Fig.105):

- d'un sous-sol de 4,05m de haut¹⁰⁸
- d'une cour intérieure qui commence à partir du premier niveau ;
- de 4 cages d'escaliers, considérées comme 4 trémies positionnées symétriquement par rapport aux deux axes du bâtiment ;
- d'un système constructif composé d'un réseau régulier de murs porteurs en maçonnerie dans les deux directions du bâtiment ;
- de cinq niveaux, à part le sous-sol avec des hauteurs différentes, à savoir un rez-de-chaussée de 4,8m, d'une mezzanine de 4,05m et de 3 autres niveaux de 3,6m chacun ;
- d'une galerie en arcades située sur un seul côté qui se développe en hauteur sur deux niveaux (le rez-de-chaussée et la mezzanine) ;

¹⁰⁸ Pour nos simulations, le sous-sol est considéré comme étant un caisson rigide à l'instar de l'hypothèse utilisée par le CGS lors de l'étude de la vulnérabilité du bâtiment de la wilaya d'Alger [CGS, 1995].

- de 15 travées sur le côté le plus long, avec une dimension de 3,70m, sauf pour les travées aux extrémités qui sont plus grandes de 20cm. De 09 travées sur le petit côté de dimension 3,15m, sauf pour les travées aux extrémités qui sont plus grandes de 30cm ;
- de façades composées d'ouvertures parfaitement superposées de dimensions 2,60x4,00m au rez-de-chaussée, et de 1,40x2,50m pour les autres niveaux ;

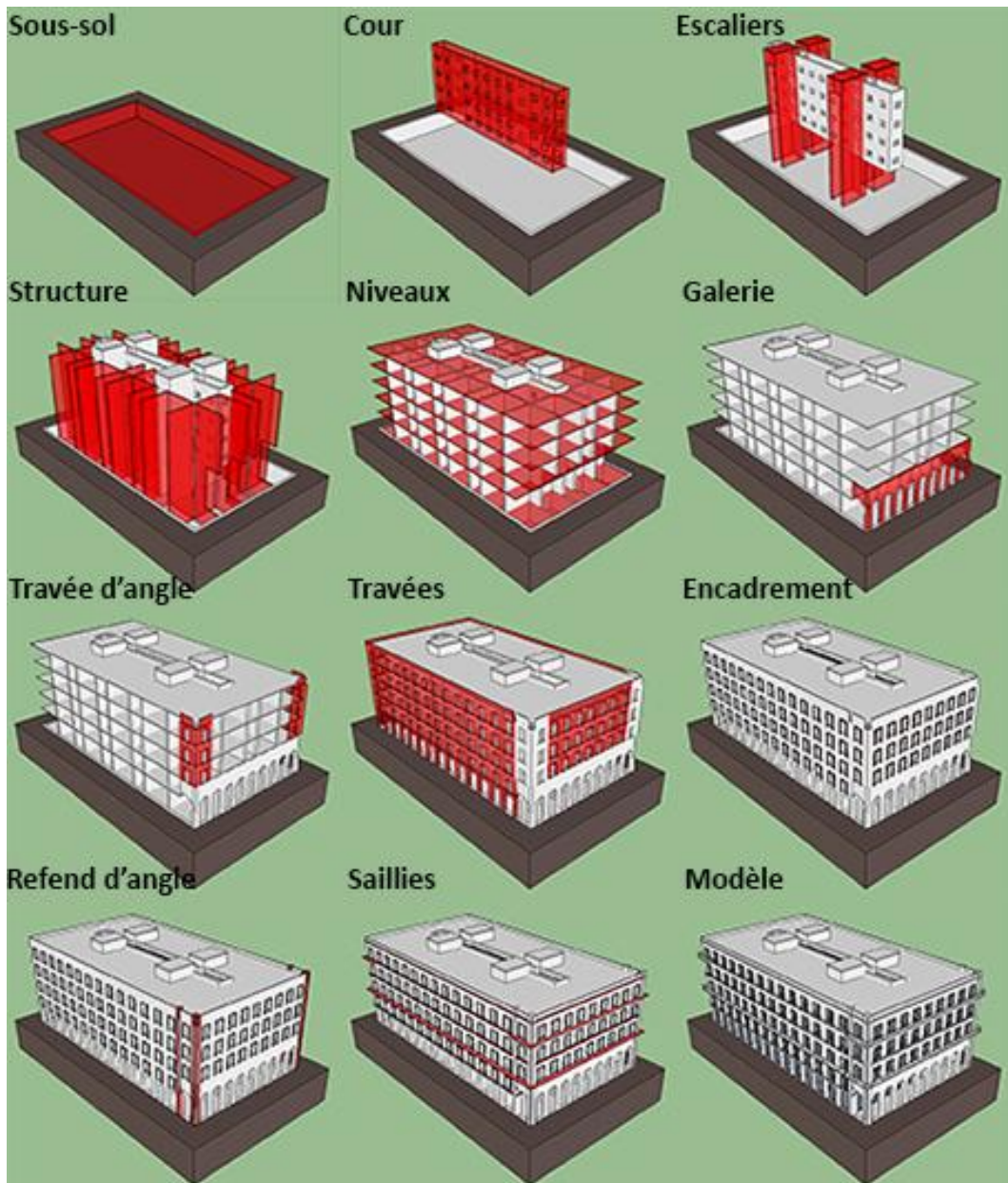


Fig. 105 : Caractéristiques du modèle source. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

- d'encadrement entourant la totalité des ouvertures des niveaux allant de la mezzanine au dernier niveau ;
- de refend d'angle encadrant la travée de la galerie côté latéral ;

- de saillies enveloppant la totalité de l'immeuble au niveau des planchers, avec des porte-à-faux d'un mètre maximum de profondeur.

B.2 Modèle référence : Ce modèle est obtenu en simplifiant le modèle source(Fig.106), ceci consiste:

- Premièrement en la régularisation de l'ensemble des composants à savoir des hauteurs d'étages identiques, des travées de dimension semblables ainsi que de la répétition de la même unité de porte fenêtre à tous les niveaux et sur toutes les travées.

- Deuxièmement, en éliminant tout élément pouvant constituer une anomalie à savoir les porte-à-faux, les encadrements, la cour intérieure, le refend d'angle et la galerie.

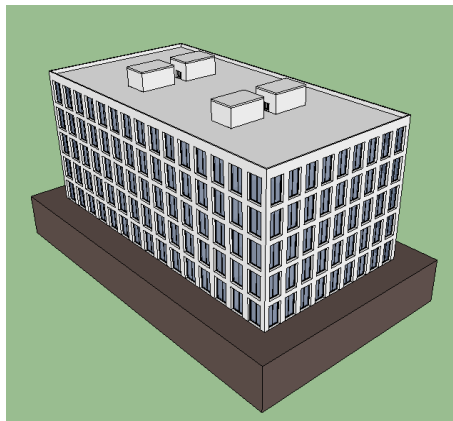


Fig. 106 : Modèle référence. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

Vu l'absence de tout dysfonctionnement, ce modèle est censé constituer le modèle le plus favorable sous charges sismiques, car répondant aux recommandations de la réglementation parasismique algérienne.

B.3 Cour intérieure : Ce modèle consiste en l'introduction d'une cour intérieure à partir du niveau de la mezzanine (Fig.107).

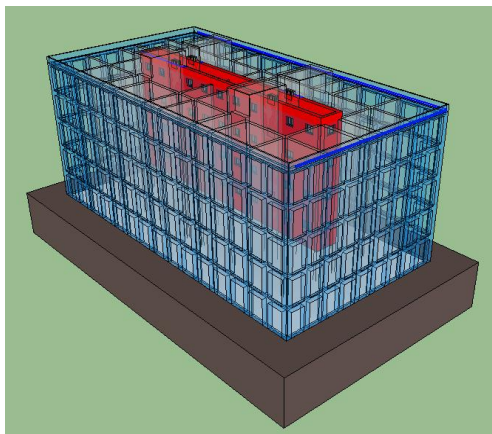


Fig. 107 : Modèle cours. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.4 Encadrement : Il est question grâce à ce modèle de vérifier l'impact de l'individualisation des bâtiments par l'accentuation de la verticalité, grâce à l'encadrement des ouvertures (Fig.108).

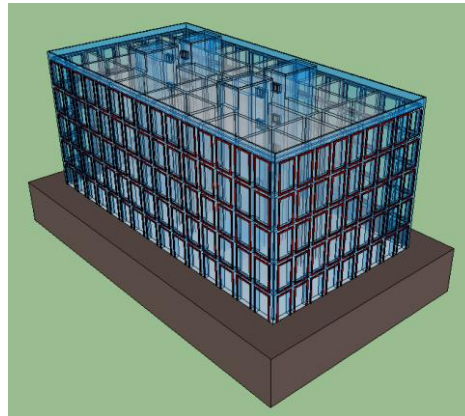


Fig. 108 : Modèle encadrement. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.5 Saillie : identification du rôle de l'accentuation des perspectives, obtenue grâce aux différents saillies à tous les niveaux (Fig.109).

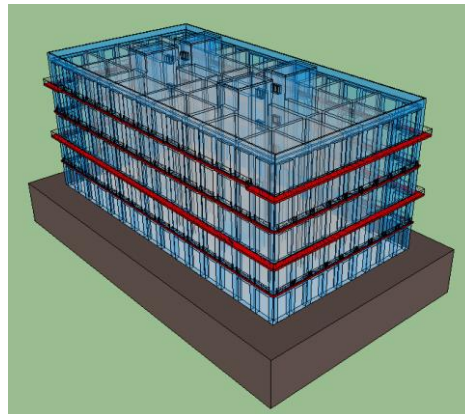


Fig. 109 : Modèle saillie. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.6 Dernière travée : Vérification de l'impact de la tripartite horizontale et de la hiérarchisation des voies par l'intermédiaire de l'agrandissement de la dernière travée (Fig.110).

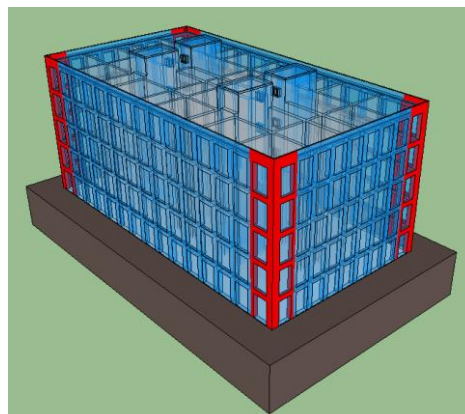


Fig. 110 : Modèle dernière travée. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.7 Refend d'angle : Vérification de l'apport de la tripartie horizontale et de la hiérarchisation des voies, grâce au refend d'angle (Fig.111).

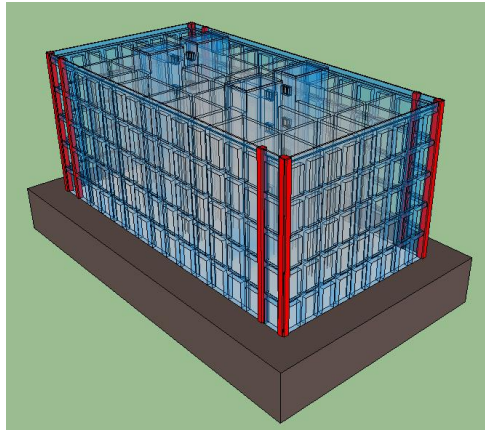


Fig. 111 : Modèle refend d'angle. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.8 Rapport plein/vide : C'est la vérification de l'impact du changement du rapport plein/vide entre le rez-de-chaussée et les autres niveaux, afin de marquer la tripartie verticale, et l'ordonnancement (Fig.112).

Les ouvertures des niveaux au-dessus du rez-de-chaussée auront des dimensions réduites par rapport à ceux du rez-de-chaussée, passant de 2,60x4,00m au rez-de-chaussée à 1,40x4,00m pour les autres niveaux .

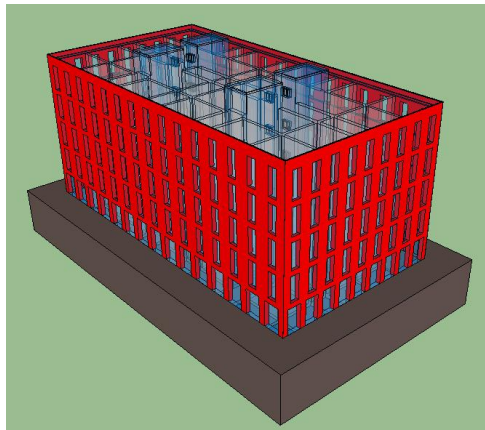


Fig. 112 : Modèle rapport plein/vide. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.9 Hauteur d'étage : La variation ici touchera la hauteur des niveaux, avec un rez-de-chaussée à 4,8m, d'une mezzanine à 3,25m et 4,05 m pour les 3 derniers niveaux. Un autre dispositif pour vérifier l'impact de la tripartite verticale sur le comportement sismique (Fig.113).

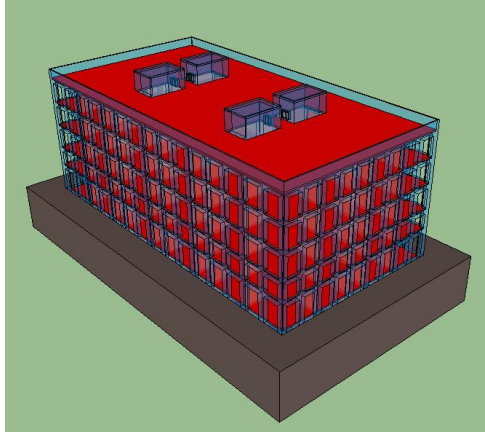


Fig. 113 : Modèle Hauteur d'étage. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

B.10 Galerie : La présence de la galerie est censée constituer une vulnérabilité vis-à-vis du comportement sismique d'un bâtiment. Ce modèle nous donnera la possibilité d'apprécier plus objectivement son impact lors d'un séisme (Fig.114).

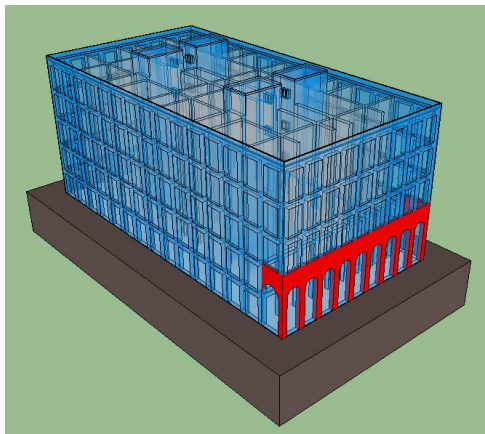


Fig. 114 : Modèle galerie. (Crédit photo : Djennane W. & Souami M.A.).

C. Résultat des simulations :

Suite aux simulations, nous avons obtenu en millimètres les valeurs des déplacements absolus. Ces derniers nous ont permis par la suite, de calculer la valeur des déplacements relatifs inter-étages pour chaque modèle (Tab. 20, 21, 22 et 23).

A partir de ces résultats, nous avons pu produire des graphes, qui nous ont servi de base pour la réalisation des comparaisons entre les modèles simulés et identifier l'impact de chacun de ces traits de caractère.

Afin de permettre une appréhension pertinente et efficace des résultats, nous avons décidé de présenter pour chaque catégorie de mesures effectuées, non pas un seul graphe qui regroupe l'ensemble des modèles, mais plusieurs où

à chaque fois on aura la possibilité d'apprécier l'impact d'un paramètre par rapport au modèle de référence et le modèle source.

| Déplacement X | NIV | M1 Source | M2 Référence | M3 Cour | M4 Encadrement | M5 Saillie | M6 Dernière travée | M7 Refend d'angle | M8 Rapport plein/vide | M9 Hauteur | M10 Galerie |
|---------------|------|--------------|-----------------|------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | NIV1 | 2,75 | 2,31 | 2,20 | 2,37 | 2,31 | 2,36 | 2,27 | 2,63 | 2,10 | 2,60 |
| | NIV2 | 3,86 | 4,88 | 4,80 | 5,00 | 4,85 | 4,97 | 4,80 | 5,13 | 3,57 | 5,40 |
| | NIV3 | 5,39 | 7,16 | 7,17 | 7,34 | 7,08 | 7,29 | 7,01 | 7,35 | 5,23 | 7,78 |
| | NIV4 | 6,52 | 8,96 | 9,04 | 9,17 | 8,77 | 9,11 | 8,71 | 9,07 | 6,51 | 9,65 |
| | NIV5 | 7,22 | 10,10 | 10,25 | 10,33 | 9,78 | 10,26 | 10,05 | 10,14 | 7,30 | 10,83 |

Tab. 20 : Valeurs des déplacements absolus dans le sens X en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau.

| Déplacement Y | NIV | M1 Source | M2 Référence | M3 Cour | M4 Encadrement | M5 Saillie | M6 Dernière travée | M7 Refend d'angle | M8 Rapport plein/vide | M9 Hauteur | M10 Galerie |
|---------------|------|--------------|-----------------|------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | NIV1 | 3,31 | 2,32 | 2,53 | 2,39 | 2,31 | 2,32 | 2,22 | 2,51 | 2,06 | 2,37 |
| | NIV2 | 4,69 | 5,07 | 5,97 | 5,17 | 5,02 | 5,07 | 4,87 | 5,36 | 3,58 | 5,18 |
| | NIV3 | 7,16 | 7,78 | 9,65 | 7,92 | 7,65 | 7,76 | 7,41 | 8,09 | 5,40 | 7,95 |
| | NIV4 | 9,27 | 10,15 | 13,14 | 10,33 | 9,90 | 10,10 | 9,57 | 10,42 | 6,94 | 10,39 |
| | NIV5 | 10,93 | 11,97 | 16,15 | 12,18 | 11,57 | 11,90 | 11,20 | 12,17 | 8,06 | 12,24 |

Tab. 21 : Valeurs des déplacements absolus dans le sens Y en millimètre pour chaque modèle niveau par niveau.

| Déplacement relatif X | NIV | M1 Source | M2 Référence | M3 Cour | M4 Encadrement | M5 Saillie | M6 Dernière travée | M7 Refend d'angle | M8 Rapport plein/vide | M9 Hauteur | M10 Galerie |
|-----------------------|------|--------------|-----------------|------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | NIV1 | 6,88 | 5,78 | 5,49 | 5,92 | 5,78 | 5,9 | 5,67 | 6,57 | 5,24 | 6,49 |
| | NIV2 | 2,78 | 6,41 | 6,52 | 6,57 | 6,34 | 6,52 | 6,33 | 6,25 | 3,69 | 7 |
| | NIV3 | 3,81 | 5,72 | 5,91 | 5,85 | 5,56 | 5,81 | 5,53 | 5,55 | 4,14 | 5,95 |
| | NIV4 | 2,82 | 4,49 | 4,68 | 4,58 | 4,24 | 4,54 | 4,25 | 4,3 | 3,2 | 4,67 |
| | NIV5 | 1,76 | 2,85 | 3,03 | 2,9 | 2,52 | 2,88 | 3,35 | 2,68 | 1,99 | 2,97 |

Tab. 22 : Valeurs en millimètre des déplacements relatifs inter-étage dans le sens X pour chaque modèle niveau par niveau.

| Déplacement relatif Y | NIV | M1 Source | M2 Référence | M3 Cour | M4 Encadrement | M5 Saillie | M6 Dernière travée | M7 Refend d'angle | M8 Rapport plein/vide | M9 Hauteur | M10 Galerie |
|-----------------------|------|--------------|-----------------|------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|----------------|
| | NIV1 | 8,27 | 5,79 | 6,33 | 5,98 | 5,77 | 5,8 | 5,54 | 6,27 | 5,14 | 5,92 |
| | NIV2 | 3,47 | 6,89 | 8,59 | 6,95 | 6,79 | 6,87 | 6,62 | 7,12 | 3,8 | 7,02 |
| | NIV3 | 6,16 | 6,76 | 9,21 | 6,88 | 6,57 | 6,72 | 6,36 | 6,82 | 4,56 | 6,94 |
| | NIV4 | 5,29 | 5,93 | 8,73 | 6,03 | 5,63 | 5,86 | 5,4 | 5,84 | 3,84 | 6,08 |
| | NIV5 | 4,15 | 4,55 | 7,51 | 4,63 | 4,16 | 4,49 | 4,08 | 4,36 | 2,81 | 4,64 |

Tab. 23 : Valeurs en millimètre des déplacements relatifs inter-étage dans le sens Y pour chaque modèle niveau par niveau.

Ainsi, chaque graphe représentera les résultats d'un trait de caractère en comparaison avec les résultats du modèle de référence et du modèle source.

- Série de graphe 1 : Comparaison entre l'évolution des déplacements absolus dans les sens des X, niveau par niveau pour chaque paramètre simulé en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence (Fig.115).

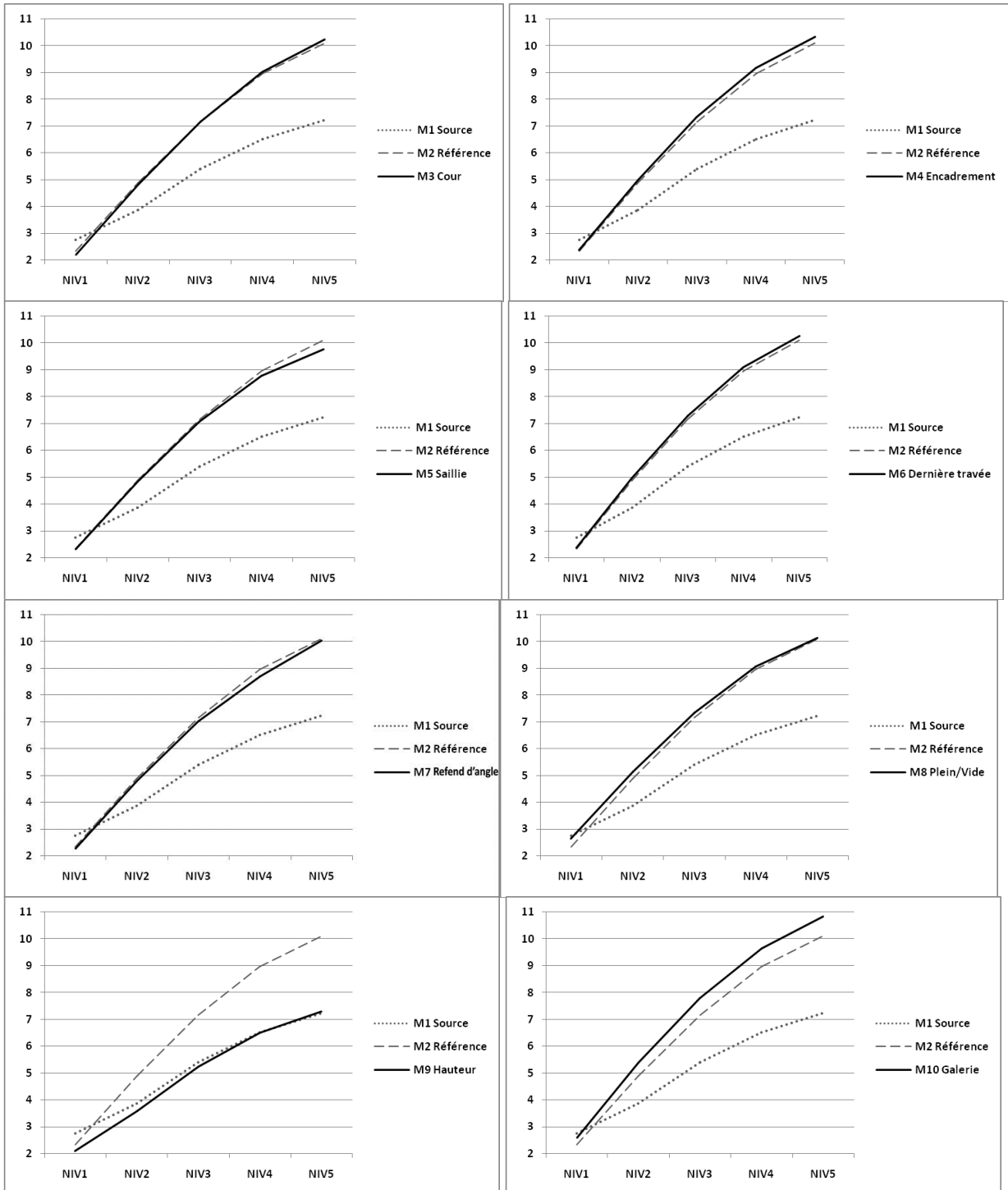


Fig. 115 : Evolution des déplacements absolus en millimètre dans le sens des X des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence.

- Série de graphes 2 : Comparaison entre l'évolution des déplacements absolus dans les sens des Y, niveau par niveau pour chaque paramètre simulé en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence (Fig.116).

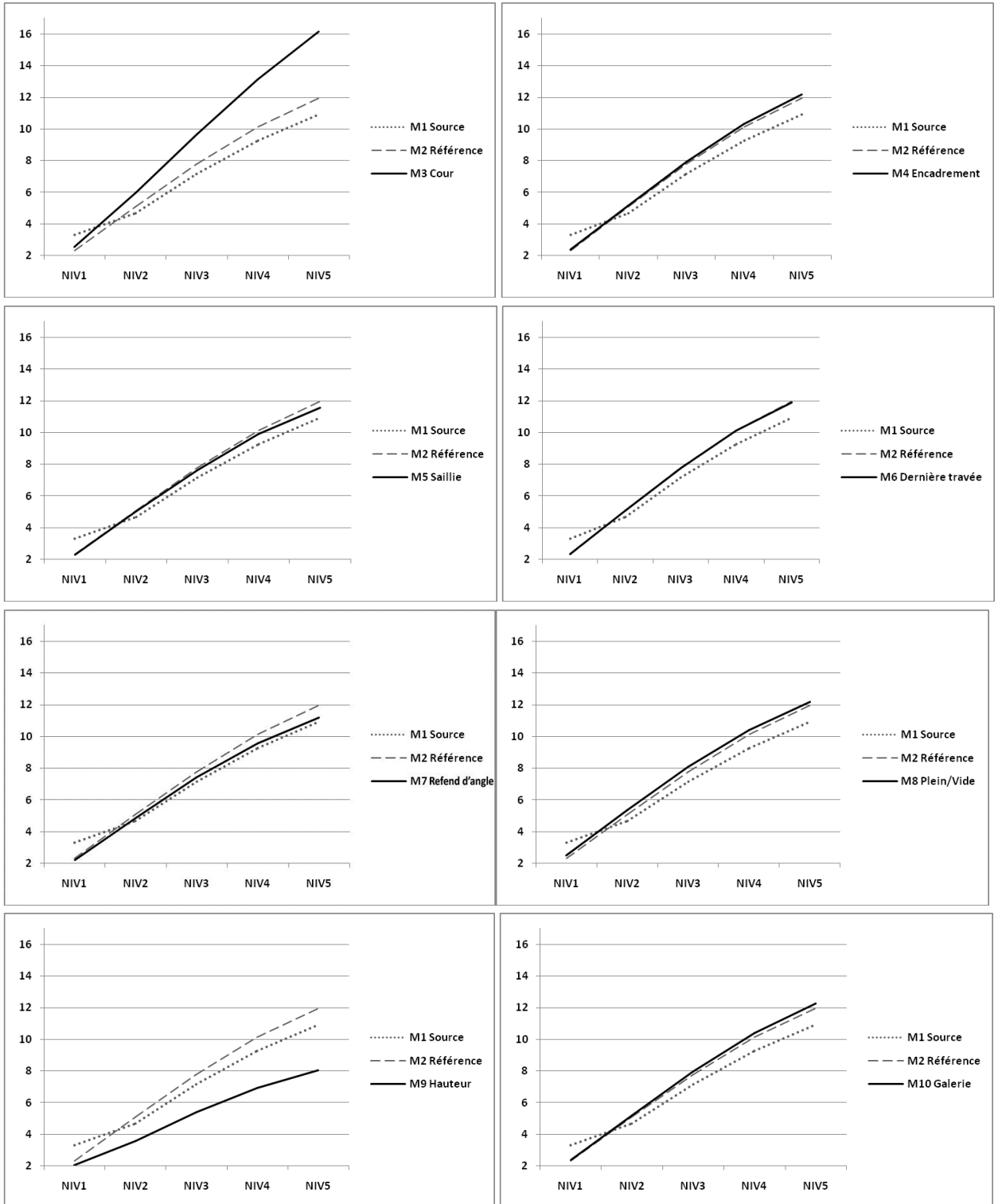


Fig. 116 : Evolution des déplacements absolus dans le sens des Y en millimètre des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle référence.

- Série de graphes 3 : Comparaison entre l'évolution des déplacements relatifs dans les sens des X, niveau par niveau pour chaque paramètre simulé en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence (Fig.117).

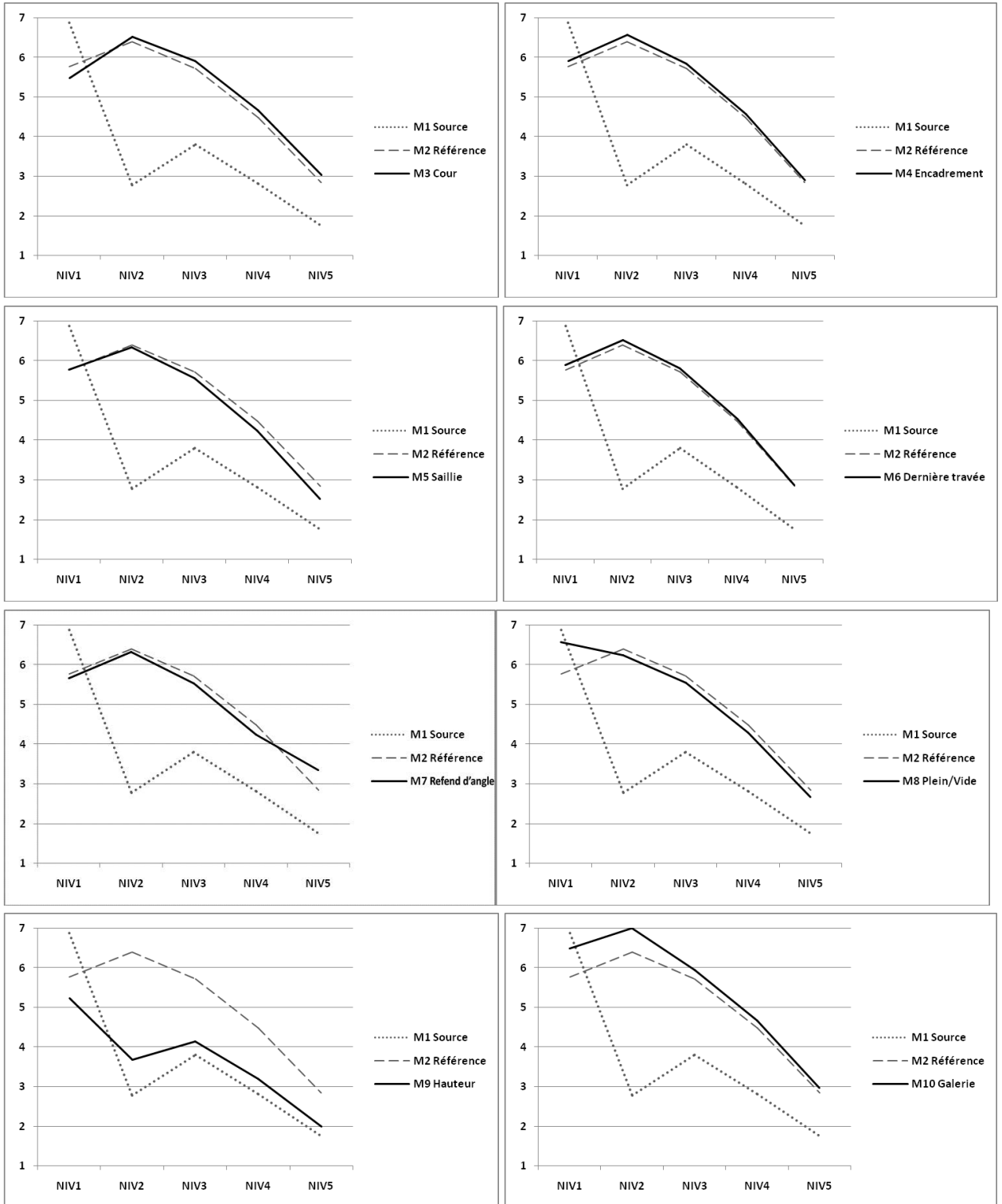


Fig. 117 : Evolution des déplacements relatifs en millimètre dans le sens des X des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence.

- Série de graphes 4 : Comparaison entre l'évolution des déplacements relatifs dans les sens des Y, niveau par niveau pour chaque paramètre simulé en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence (Fig.118).

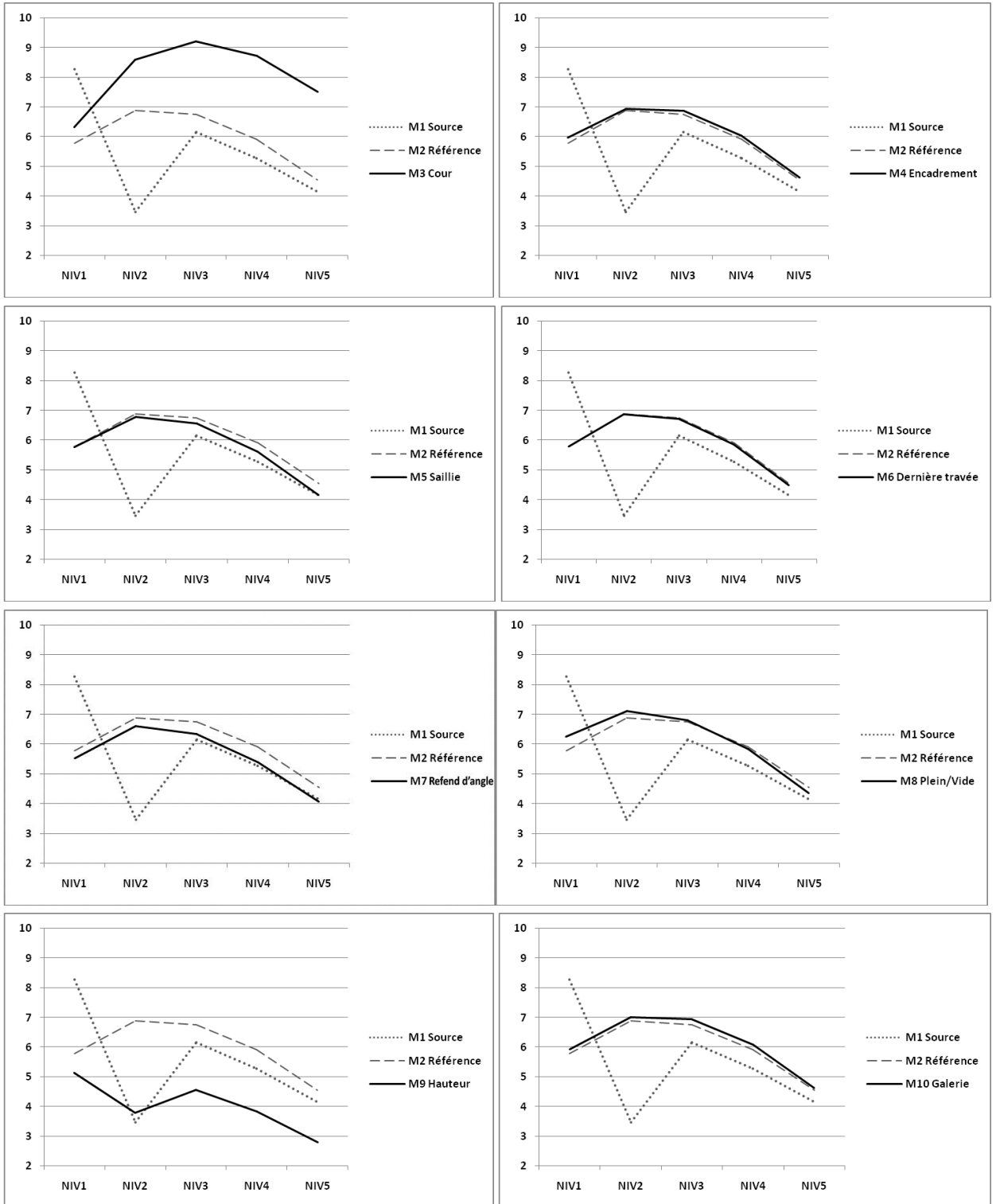


Fig. 118 : Evolution des déplacements relatifs en millimètre dans le sens des Y des différents modèles en comparaison avec le modèle source et le modèle de référence.

Suite à ces résultats, nous avons relevé l'impact des différents traits de caractère retenus, par rapport au comportement du modèle simulé lors d'un séisme en ce qui concerne les déplacements absolus et les déplacements relatifs.

- Le modèle de référence n'est pas classé en première position aussi bien pour les déplacements absolus que relatifs.

Les modèles avec saillies, refends d'angles, et de hauteurs d'étages différentes sont mieux classés que le modèle référence concernant le déplacement absolu.

Pour ce qui est du déplacement relatif, les modèles avec saillies, refends d'angles, hauteurs d'étages différentes, et un rapport plein/vide des façades d'étages plus important, sont mieux classés que le modèle de référence.

- A l'exception du modèle avec hauteurs d'étages différents, le modèle source est toujours le mieux classé et ceci malgré la présence de la galerie et de la cour intérieure. Deux dispositifs dont les simulations ont montré leurs impacts négatifs vu qu'ils sont toujours les moins bien classés avec des valeurs bien plus importantes aussi bien en déplacements absolus que relatifs.

D. Analyse des résultats :

Les différentes simulations à partir de notre modèle source, nous ont offert la possibilité de confirmer l'impact positif de quelques traits de caractère du patrimoine architectural algérois 1830-1930, mais aussi d'identifier l'impact négatif que pourrait avoir d'autres traits de caractère.

1. Augmentation des déplacements :

- **Cour intérieure :** La présence d'une cour intérieure offre l'avantage de la réduction du poids du projet, -aussi bien en charges permanentes qu'en charges d'exploitation- ce qui permet de réduire la valeur de l'effort sismique.

En contre partie, malheureusement ceci réduit de manière beaucoup plus importante, la valeur de la raideur du fait de la réduction de l'inertie. Effectivement, le déplacement est proportionnel au poids de la construction, mais il est inversement proportionnel à l'inertie. Or dans notre cas, la présence d'une cour

implique la réduction des surfaces participantes à l'inertie, surtout que cette dernière est exponentielle à la puissance 3 de la dimension de notre cour dans le sens des calculs.

- **Encadrement des ouvertures** : Bien que ce dispositif permet de renforcer les angles des ouvertures assez fragiles lors des séismes, il augmente sensiblement la valeur des déplacements de l'immeuble. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du poids de l'immeuble avec le rajout des encadrements.
- **Dernière travée plus grande** : L'agrandissement de la taille de la dernière travée conduit à augmenter le poids du bâtiment. Ce qui finalement, augmente la valeur de ses déplacements.
- **Rapport plein vide plus important** : La réduction de la taille des ouvertures et donc l'augmentation de la masse des murs en maçonnerie, a conduit à l'augmentation des déplacements du modèle.
- **Galerie** : La présence de la galerie sur une double hauteur, implique l'élimination de tout un pan de plancher au niveau du 1^{er} étage. Ceci, a conduit à la réduction de l'inertie par la réduction de la surface du plancher, engendrant de la sorte des déplacements plus importants rapport au modèle source.

2. Réduction des déplacements :

- **Saillies** : La présence des différentes saillies sur l'ensemble des niveaux, semble avoir largement favorisé la réduction des déplacements du modèle. Selon nous, il est possible de l'expliquer de deux façons :
 - Premièrement, ces différentes saillies peuvent avoir joué le rôle d'un chaînage horizontal.
 - Deuxièmement, l'augmentation des surfaces de plancher participe directement à l'augmentation de l'inertie. Ceci conduit à augmenter la rigidité de l'immeuble, réduisant de la sorte la taille des déplacements.
- **Refend d'angle** : Le dispositif refend d'angle, qui consiste en un renforcement de l'angle avec une épaisseur plus importante, semble être un des dispositifs les plus satisfaisants afin de réduire les déplacements absolus et relatifs de notre modèle d'étude.

Ceci peut s'expliquer, par l'augmentation de l'inertie qu'il apporte avec l'augmentation de la surface des éléments rigides, sans pour autant augmenter de manière significative le poids de la structure. Sa position aussi à l'angle est importante, car il est situé dans l'une des zones les plus sensibles par rapport au séisme. Il agit ainsi comme un chaînage vertical, qui participe à raidir cette zone.

- **Différentes hauteurs d'étages** : C'est le modèle qui a produit les plus faibles déplacements par rapport aux autres modèles. Ceci peut s'expliquer, par une hauteur et un poids moins importants. Deux facteurs qui sont directement proportionnels à la valeur des déplacements d'un édifice.

Toutefois, il est important de noter, que ce modèle et le seul avec le modèle source à produire une courbe des déplacements relatifs brisée et non continue.

Ceci est dû à des valeurs de déplacement assez distinctes entre les étages ayant des hauteurs différentes.

4.4 Conclusion Chapitre III

A travers ce chapitre, nous avons tenté grâce à l'enquête sur terrain et les simulations numériques, de vérifier :

- Premièrement, que notre corpus d'étude possède les caractéristiques architecturales le prédisposant à un bon comportement sismique ;
- Deuxièmement, que ces caractéristiques ont un impact positif sur le comportement sismique de notre corpus d'étude.

Notre approche méthodologique au niveau de cette thèse, s'est appuyée sur l'identification d'une typologie significative, -identifiée lors de notre enquête sur terrain-, et de procéder à des simulations paramétriques.

Bien que cette approche par recours à l'identification de typologies significatives, nous a offert la possibilité d'avoir une première idée sur le potentiel de comportement du patrimoine architectural algérois étudié, il n'empêche que cette dernière possède ses propres limites.

Effectivement, le comportement d'une typologie architecturale n'est pas absolu, car il est aussi dépendant de facteurs que l'on pourrait qualifier de locaux tels

que l'effet d'îlot, l'interaction sol/structure, la pente du terrain, le risque de glissement ou de liquéfaction...etc. [Amir-Mazaheri D., 2010].

C'est justement un de ces critères qui nous a conduit à opter dans les simulations numériques au choix de la typologie de l'immeuble îlot, afin de minimiser le risque d'interférence qui pourraient fausser nos résultats.

Malgré cet état de fait, le travail sur terrain et les simulations, nous ont permis d'obtenir des résultats appréciables par rapport à l'impact que peuvent avoir les caractéristiques architecturales du corpus d'étude sur son comportement et sa vulnérabilité face au séisme. Des résultats que l'on peut synthétiser comme suit :

- L'ensemble des îlots étudiés se caractérise par une absence totale de joint entre deux immeubles mitoyens de la période 1830-1930. Cette absence est dûe soit au partage des deux immeubles du même mur de refond, soit à la séparation des deux immeubles par un joint sec.

Cette constatation, doit conduire lors d'opération de réhabilitation et d'amélioration du comportement du vieux bâti face à l'action sismique, de veiller à ne pas réhabiliter le bâtiment tout seul, mais de proposer une stratégie qui intègre l'ensemble des immeubles de l'îlot.

- La nature constructive de notre corpus d'étude en maçonnerie, fait que ces bâtiments sont considérés comme étant des structures lourdes. Des structures qui ne sont pas conseillées pour des bâtiments trop élancés verticalement. Elles conduiraient à augmenter la valeur de la période fondamentale, et de là, celle de la flèche du bâtiment de manière assez conséquente, ce qui serait préjudiciable à la bonne tenue du bâtiment.

Or, l'enquête sur terrain a révélé que notre corpus d'étude est principalement constitué de bâtiments compacts et non-élancés, nous conduisant à émettre l'hypothèse que pour le patrimoine architectural algérois 1830-1930, la réduction de son élancement participe entre autres à sa préservation face au séisme.

Effectivement, la réduction de son élancement -et donc de sa période- conduit à la réduction de la flèche des bâtiments,

conduisant de ce fait à minimiser le risque de martellement en cas de séisme. Un phénomène qui est, comme nous avons pu l'observer dans les enquêtes post-sismiques, assez destructeur.

De plus, l'enquête à fait ressortir la présence d'un nombre assez réduit de bâtiments tassés (élancement inférieur à 1/1). Une caractéristique qui permet d'éviter d'avoir des périodes fondamentales très réduites et donc des efforts sismiques importants.

Une bonne tenue qui peut aussi s'expliquer par une meilleure capacité d'absorption et de dissipation de l'énergie sismique. Effectivement, selon Mme. Ait-Meziane, des bâtiments avec des valeurs de périodes courtes possèdent de meilleures capacités d'absorption et de dissipation de l'énergie produit par un séisme [Ait-Meizane Y., 2002].

Il en ressort, tout l'intérêt de la maîtrise de la période d'un édifice dans la réduction de sa vulnérabilité face au séisme. Ceci peut être obtenu par une mise en relation cohérente et pertinente entre les systèmes constructifs et les dimensions du bâtiment. Plus exactement, il est question d'assurer une mise en relation intelligente entre les trois paramètres : la **Masse**, la **Rigidité** et les **Proportions** du bâtiment.

- Concernant les déplacements absolus et relatifs, certains dispositifs tels que le refend d'angle, les saillies de faible profondeur, la réduction de la hauteur d'étage, ont montré leur capacité à réduire les déplacements.

On a ainsi, pu constater l'impact de ces traits de caractère pour réduire les déplacements de notre modèle source, malgré le fait qu'il soit doté d'une cour intérieure et d'une galerie. Deux dispositifs qui affaiblissent le comportement sismique d'un bâtiment par rapport aux déplacements.

Toutefois, il est important d'attirer l'attention sur les risques de la réduction des hauteurs de niveau. Un trait de caractère, qui certes réduit la valeur des déplacements, mais qui peut présenter un degré de vulnérabilité en cas de séisme.

Effectivement, le changement brusque de rigidité entre deux niveaux peut provoquer un effet d'étage souple. Or, c'est justement ce qui risque d'arriver en cas de changement brusque de hauteur de niveau.

Dans des cas pareils, il faut veiller à rééquilibrer la variation de la rigidité en agissant sur d'autres facteurs.

En guise de conclusion à ce chapitre, et suite aux résultats obtenus, il est important d'identifier de nouvelles stratégies et d'approches vis-à-vis du séisme quand il s'agit d'entreprendre une politique de réhabilitation des constructions en général et du vieux bâti en particulier. Des stratégies qui ne devraient pas se résumer en une recherche de rigidification plus importante des bâtiments existants.

Ceci n'assure pas obligatoirement un meilleur comportement sismique. Ce qu'il faut, c'est non seulement augmenter la capacité de résistance des bâtiments, mais c'est surtout chercher à soustraire les bâtiments des efforts sismiques.

Une telle démarche vise un équilibre entre les différents paramètres de sécurité que doit assurer un bâtiment, dans le but d'obtenir le comportement dynamique le plus adéquat.

De ce fait, les politiques de réhabilitation devraient tenir compte aussi bien, de toute la complexité du phénomène sismique, mais aussi du potentiel sismo-résistant de l'immeuble à réhabiliter, qui parfois peuvent agir de manière contradictoire.

Effectivement, certains traits de caractère de notre corpus d'étude, peuvent participer à contrecarrer des vulnérabilités, mais en même temps ils risquent aussi d'en accentuer d'autres.

A titre d'exemple :

- les encadrements d'ouvertures, préviennent l'apparition de fissures à 45°, mais en même temps, accentuent les déplacements du bâtiment ;
- l'agrandissement des travées aux extrémités, renforce l'angle, mais provoque une accentuation des déplacements, avec augmentation du poids et donc de l'effort sismique ;

- la réduction des hauteurs d'étage, réduit l'effort sismique par réduction de son poids avec réduction de ses déplacements, mais en même temps, risque de provoquer le phénomène d'étage souple par changement brusque de rigidité.

Vu la complexité du phénomène sismique, la pluralité des justifications de sécurité que doit vérifier un bâtiment, et l'effet contradictoire de certains composants, il est important de ne pas isoler les résultats de ce travail de recherche, mais de les lier aux autres paramètres intervenant dans le domaine parasismique.

Les différentes caractéristiques architecturales que nous avons identifiées, jouent un rôle important dans la détermination du comportement de ces édifices lors d'un séisme, mais ce rôle n'est pas exclusif. Ceci est loin d'être suffisant pour déclarer ces bâtiments non vulnérables face au séisme.

Tout ceci, ouvre un champ de possibilité bien plus important en termes de stratégies de réhabilitation du patrimoine architectural en général, et du patrimoine architectural algérois 1830-1930 en particulier. Des stratégies qui devraient rechercher la mise en valeur des traits de caractère identifiés, sans passer obligatoirement ou uniquement par la case du renforcement structurel.

A titre d'exemple, il est possible de réduire la flèche d'un bâtiment en réduisant la valeur de sa période, soit par :

- La réduction de sa masse ;
- L'augmentation de sa rigidité par la réduction de la hauteur du bâtiment, l'augmentation de son inertie, la multiplication des nœuds rigides de sa structure, le rajout de saillie ou de refend d'angle ...
- La réduction de son élancement vertical avec la réduction de ses proportions verticales ;
- ...

Enfin, n'oublions pas toutes les autres justifications de sécurité qu'un bâtiment doit vérifier tels que la ductilité, la grandeur de l'effort tranchant estimé numériquement par rapport à celui estimé empiriquement, les dispositifs constructifs...etc. En bref, il faut nous inscrire dans une démarche globale et non partielle.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE

« Tout projet de construction débute obligatoirement par une phase de conception dans laquelle des choix décisifs quant aux caractéristiques principales de l'ouvrage sont arrêtés. Une bonne conception requiert une vue d'ensemble de la problématique, plus basée sur une solide expérience et le savoir-faire que sur des calculs élaborés. »

Lestuzzi P. & Badoux M.

A travers cette recherche, nous avons tenté d'identifier le potentiel sismo-résistant du patrimoine architectural algérois 1930-1830, dans le but de participer à sa réhabilitation face à l'aléa sismique.

Situé dans une zone à forte sismicité et construit principalement en structure en maçonnerie sans règlement parasismique, ce patrimoine est considéré comme étant assez vulnérable face au risque sismique.

Or la mise en conformité de ce patrimoine par rapport au règlement parasismique actuel, est considérée par les experts comme étant impossible et non souhaitable. Impossible, car cela exigerait des moyens humains et financiers considérables et non souhaitables, au risque de dénaturer l'identité et l'intégrité même de ce patrimoine.

D'un autre côté, il est tout à fait impensable de ne pas agir et de laisser ce patrimoine à son sort. Un patrimoine qui, faut-il le rappeler constitue en nombre, l'un des parcs immobiliers les plus importants de l'Algérie.

C'est pour cette raison, que nous nous sommes inscrits dans la philosophie de réhabilitation du vieux bâti, qui consiste à chercher jusqu'à quel niveau peut-on réduire les exigences de sécurité sans pour autant, remettre en cause la sécurité des personnes et des enjeux liés à la préservation patrimoniale.

C'est dans cet esprit, que notre travail de recherche s'est inscrit, c'est-à-dire chercher à réduire la vulnérabilité du patrimoine architectural algérois 1830-1930 face à l'aléa sismique en se basant sur l'impact de ses caractéristiques architecturales et urbaines.

Un travail de recherche qui s'intéresse à un domaine qui à priori, est dominé par le monde de l'engineering, mais qui est abordé sous l'angle de l'architecture et de son apport à la réduction de la vulnérabilité de notre corpus d'étude.

Afin d'y parvenir, nous avons identifié les différents principes d'une bonne architecture parasismique, ainsi que les différentes pathologies que risque de subir une construction en maçonnerie face au séisme.

Ces différents éléments ont été par la suite mis en adéquation avec les caractéristiques architecturales de notre corpus d'étude. Ceci nous a permis, dans un premier temps d'identifier –théoriquement du moins- en quoi les caractéristiques architecturales de ce patrimoine pouvaient participer à

matérialiser les principes de l'architecture parasismiques, et/ou à contrecarrer les pathologies dues au séisme.

En se basant sur les résultats positifs de cette étape, nous avons cherché à valider nos hypothèses par le recours premièrement, à l'enquête sur terrain et deuxièmement, aux simulations numériques.

Grâce à l'enquête sur terrain sur 190 immeubles, nous avons pu relever que le corpus d'étude possède un nombre important de traits de caractères architecturaux et urbanistiques qui peuvent participer à sa bonne tenue face au séisme.

Les simulations à leur tour, nous ont révélé l'avantage que peut apporter certains des traits de caractères de l'architecture algéroise 1830-1930, dans la réduction des déplacements absolu et inter-étage, tels que les saillies et les refends d'angles.

On peut aussi voir à quel point les proportions en plan, mais surtout en élévation de notre corpus d'étude sont intéressantes. Des proportions qui ne sont ni trop élancées, ce qui évite d'avoir des périodes fondamentales importantes minimisant le risque d'entrechoquement et de balancement, ni trop ramassées, évitant d'avoir des périodes fondamentales trop basses, permettant la réduction de l'effort sismique auquel sera soumis le bâtiment.

D'un autre côté, nous avons relevé aussi, les points faibles que peuvent constituer la présence de certaines caractéristiques telles que la cour intérieure et la galerie.

Ces deux éléments apportent, certes, une qualité de vie à l'échelle urbaine et architecturale, mais en contrepartie, provoquent des déplacements assez importants qui risquent d'être assez dangereux en cas de séisme.

Notons quand même, que les méfaits que risquent de provoquer la présence de la galerie, peuvent être contrecarrés grâce à d'autres dispositifs permettant de réduire le risque de déplacement du bâtiment, tels que les saillies ou le refend d'angle.

Il est important de relever, les effets contradictoires que peuvent avoir certaines caractéristiques architecturales de notre corpus vis-à-vis du séisme, telle que la présence des encadrements de fenêtre qui permettent de prévenir la présence de fissures inclinées à 45° à l'angle des ouvertures, mais qui en même temps, risquent de provoquer des déplacements plus importants.

En bref, afin de mieux considérer les résultats de ce travail de recherche, il est important de ne jamais perdre de vue le caractère complexe aussi bien du séisme, mais aussi de son impact sur le cadre bâti. A ce titre, il ne faut jamais isoler un résultat obtenu, mais chercher toujours à l'inscrire dans une vision globale qui tienne compte des autres effets que ce dernier peut avoir sur le bâtiment par rapport au séisme.

L'un des plus importants enseignements de cette recherche est, à notre humble avis, de ne pas condamner précipitamment le patrimoine architectural 1830-1930 d'un point de vue sismique sur la base de son inadéquation avec la réglementation parasismique algérienne datant de 2003.

Car même si, selon les experts, le patrimoine architectural de cette période ne répond pas aux impératifs réglementaires parasismiques, et que les structures en maçonnerie sont vulnérables aux efforts sismiques, il n'en est pas pour autant dépourvu de tout potentiel sismo-résistant.

Le condamner de la sorte, c'est avoir une approche scientifique contradictoire, car on voudrait disposer des réponses sans avoir au préalable compris comment les problèmes sont posés [Malfroy S., 1986].

Le vrai danger ne vient pas de la fragilité et de la vulnérabilité réelle du patrimoine architectural algérois 1830-1930, mais vient du décalage qui s'installe entre le niveau de connaissance sur le comportement sismique de ce patrimoine et la réalité de son comportement, à savoir l'observation des phénomènes suite à chaque séisme.

Effectivement, notre recherche nous a permis d'identifier le rôle positif que peut jouer certaines caractéristiques aussi bien, dans l'amélioration du comportement dynamique des édifices de notre corpus d'étude face au séisme, que leurs capacités à palier aux pathologies récurrentes du bâti en maçonnerie lors des séismes.

Mais ce qui est le plus surprenant et le plus intéressant en même temps, c'est le fait que ces différentes prédispositions ne sont pas le fruit de restrictions réglementaires sismiques et structurelles émanant d'organismes techniques chargés du contrôle de la structure et de la mise à niveau des édifices du point de vue de la résistance sismique. Elles sont le résultat d'un choix stylistique et d'un règlement urbain sur la rue et la façade et dont l'objectif est la qualité de la vie urbaine et de l'espace public.

Ainsi, aller au-delà des systèmes structurels et constructifs ne peut être qu'intéressant et triplement bénéfique.

Premièrement, cette meilleure connaissance du potentiel sismo-résistant des édifices de la période étudiée permettra de mieux participer à l'amélioration de son comportement face au séisme.

Deuxièmement, cette approche permettra de mieux accompagner les opérations de restauration et de réhabilitation de ces édifices, car les opérations d'actions s'établiront en partant des caractéristiques de ces édifices et non pas par l'imposition de caractéristiques liées à des systèmes constructifs radicalement différents.

Troisièmement, en agissant à l'échelle de la réglementation urbaine et de l'espace public, nous aurons l'occasion de participer à améliorer le cadre bâti tout en offrant de meilleures conditions de sécurité pour les citoyens.

En fin de compte, agir de la sorte inscrira la problématique de la sauvegarde et les stratégies de mise en valeur dans une vision globale qui tiendra compte de l'ensemble de ses composants.

Une vision qui participera activement à la préservation de l'intégrité architecturale de ce patrimoine car partant de ce qui compose son authenticité architecturale, et non pas à partir d'orientations techniques et constructives qui sont établies en totale négation par rapport à ses caractéristiques.

Mais les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche ne devront pas être considérés comme une fin en soi, mais plutôt comme une première étape d'un long parcours de réflexion sur la prise en charge et l'intervention sur le vieux bâti par rapport au risque sismique.

Il est ainsi important de valider définitivement les résultats obtenus par simulation numérique en ayant recours à l'expérimentation grâce aux essais sur tables vibrantes.

Cette expérimentation est nécessaire afin de réduire l'écart entre la simulation numérique et la réalité. Elle l'est aussi afin de nous permettre de prendre conscience de l'impact de facteurs déterminants dans le comportement sismique d'un bâtiment, et dont il est difficile de les simuler numériquement [Sageau J-F, 2000].

De ce fait, il est normal, avant d'engager des crédits importants pour la réhabilitation avec éventuellement des conséquences assez lourdes, de

comparer nos résultats avec l'expérimentations. Car la solution la plus adéquate à apporter ne peut être que le résultat d'un processus qui fait suite à un nombre important d'essais et de corrections : « *A cause de la complexité des phénomènes mis en jeu dans le comportement sismique des structures, une approche expérimentale est indispensable.* » [Lestuzzi P., 2013B, P88].

Nous espérons que ce travail de recherche puisse engendrer de nouvelles stratégies de sauvegarde du patrimoine architectural algérois 1830-1930 du point de vue sismique.

Des stratégies, qui fixeront des priorités de renforcement ou plus exactement, d'amélioration du comportement des édifices vis-à-vis de l'action sismique, en fonction du potentiel sismo-résistant du patrimoine architectural 1830-1930.

Ceci commencera par la mise à jour, des bases de données recueillies à partir de nouvelles fiches d'évaluation plus complètes et plus pratiques¹⁰⁹. Ces dernières pourront fournir aux différents utilisateurs à savoir architectes, ingénieurs, entrepreneurs, décideurs...etc. des descriptifs mieux détaillés et plus compréhensibles sur le vieux bâti.

Il ne s'agira pas dans ces nouvelles approches de réhabilitation, d'éliminer des facteurs et de les remplacer par d'autres facteurs. Il s'agit plutôt, d'enrichir la démarche avec de nouveaux critères permettant de mieux cerner le fait sismique et son action sur le vieux bâti. Une démarche globale qui aidera à la prise de décision pour la sauvegarde et la réhabilitation du vieux bâti¹¹⁰.

Ainsi, aux facteurs classiques intervenants dans l'établissement d'une stratégie de renforcement habituel¹¹¹, nous proposons d'en rajouter un : le potentiel sismo-résistant de ce patrimoine, à savoir son comportement dynamique face aux séismes, ainsi que la prise en charge des pathologies des structures en murs porteurs en maçonnerie face au séisme.

¹⁰⁹ Une démarche qui peut s'inscrire dans la continuité du souhait de certains responsables pour la prise en charge du vieux bâti [Azem N, 2014], tel que la mise à jour des fiches d'évaluations des dommages post-sismiques afin de compléter les informations manquantes, d'en faciliter la saisie, et d'en faire un vrai outil d'action pour les stratégies d'intervention et de réhabilitation [Farsi, N, 2003].

¹¹⁰ Ceci constituera comme nous le rappelle J-P. Stephant l'occasion de mettre le cadre législatif à jour par rapport à l'évolution des connaissances dans ce domaine [Stephant J-P, 2007]

¹¹¹ Parmi ces facteurs on peut citer : L'existence d'une étude de vulnérabilité, Le niveau du risque sismique du site, Le niveau de protection exigé, Le type et l'âge du bâtiment, Les exigences architecturales,..etc. [Davidovici V., 2003A].

De plus, les résultats de ce travail de recherche— de préférence après confirmation par expérimentations— peuvent servir comme données complémentaires pour la formulation de courbes de fragilités du vieux bâti algérois.

Effectivement, la prise en compte de ces données dans la formulation des courbes de fragilités, permettra de se rapprocher encore plus de la réalité du comportement de ce bâti face au risque sismique. Ceci grâce à la prise en compte de plus de paramètres qui ont une influence directe sur le comportement des édifices lors d'un séisme.

Nous espérons aussi qu'à travers cette recherche, la question de la prise en charge du patrimoine bâti existant à travers de nouvelles mises à jour des règlements parasismiques algériens, puisse donner lieu à un chapitre à part entière. En effet, selon W. Jalil l'impossibilité de trouver dans les règlements parasismiques les dispositions parasismiques adéquates pour l'ancien, constitue l'une des raisons les plus importantes en ce qui concerne l'absence ou la rareté d'opération de renforcement du vieux bâti [Jalil W.,2003].

Le code du bâtiment historique devra décrire les objectifs généraux de performance qui doivent être respectés, plutôt que de procédures ou de systèmes de constructions prescriptives¹¹². Les solutions spécifiques sont laissées aux concepteurs.

Car un code aux normes internationales qui s'applique aux bâtiments neufs ou vieux, ne parviendra pas à couvrir l'ensemble des besoins spécifiques des différents types de bâtiments historiques qui varient d'une région à une autre. Ce qui est pratique et performant dans un lieu, ne l'est pas obligatoirement ailleurs.

L'objectif de ce code destiné au vieux bâti est de proposer, de conserver les traits de caractère identitaire de ce patrimoine¹¹³, tout en garantissant une meilleure sécurité et une réduction de sa vulnérabilité face au risque sismique.

¹¹² La perte ou l'absence de maîtrise d'une société sur un phénomène, conduit cette dernière à multiplier les normes standards afin de circonscrire le phénomène. Mais l'expérience a montré que ceci ne marche pas car il y avait des actions partielles et hétérogènes sans compréhension globale et synthétique [Malfroy S., 1986].

¹¹³ Cette recommandation est d'autant plus importante pour une ville soumise au risque sismique comme Alger. Une ville qui s'inscrit dans une politique de renouvellement urbain et dont l'un des enjeux principaux est la préservation de son patrimoine comme facteur d'attractivité.

On insistera aussi sur l'importance -aussi bien au niveau de la conception architecturale que de la réhabilitation d'un patrimoine architectural soumis au risque sismique-, de s'inscrire dans une approche transdisciplinaire et plurielle qui fait appel aux différents domaines et compétences intervenants dans le champs parasismiques.

Ceci devra aussi, nous amener à revoir l'enseignement de la dimension parasismique dans nos écoles d'architecture. Un enseignement basé sur l'impact des choix architecturaux fait par l'architecte et non pas sur le calcul exclusive de l'ingénieur.

Sensibiliser les architectes au danger que peut constituer le séisme sur leur conception architecturale est aussi nécessaire. Ceci à travers les incidences que peuvent avoir nos choix dans la conception architecturale sur le bon ou le mauvais comportement des immeubles lors d'un séisme. Un danger qui, selon Foufa, est malheureusement assez mal connu par les architectes [Foufa A., 2001].

D'ailleurs, il serait tout aussi intéressant de mettre en place des formations spécialisées post-diplômes pour les différents intervenants du domaine du bâtiment orientées dans l'évaluation et la réhabilitation parasismique [Coburn A., 2002].

Une démarche de mise à niveau et de sensibilisation qui est recommandée par des pays soumis au risques sismiques telle que la France, et dont le risque face au séisme et ses répercussions sont bien moins importants que ceux de l'Algérie¹¹⁴ : « *Légiférer ou réglementer n'est jamais qu'émettre un souhait, si cette prise de conscience n'est pas créée, et si ne sont pas mis en place – à chaque étape du processus de construction- des dispositifs de nature à imposer l'application de règles de constructions strictes : la chaîne de construction doit s'auto-contrôler.* » [IGE, 2004, P30].

A ce titre, notons que la réglementation est là pour veiller, grâce aux retours d'expérience, à éviter de reproduire les grandes erreurs observées dans les différents séismes précédents. Ceci, par la mise à jour des recommandations et des démarches à suivre. D'où l'importance et la nécessité de formation de mise à niveau perpétuelle des acteurs agissant dans ce cadre.

¹¹⁴ A en croire des ingénieurs comme M. Milat impliqués dans le domaine du diagnostic de la vulnérabilité du vieux bâti, les études en graduation, même ceux des ingénieurs ne préparent pas les futurs diplômés par rapport à la problématique du bâti ancien face aux risques sismiques.

Enfin comme le déclare Tewfik Guerroudj, chaque génération cherche à laisser des traces dans l'histoire. Et à ce titre, quoi de mieux que de profiter de l'opportunité offerte par le patrimoine. En ce qui nous concerne je dirai :

Quoi de mieux que de participer à travers cette recherche à préserver et valoriser un patrimoine architecturale qu'on a hérité et que l'on se doit de transmettre aux générations futures.

BIBLIOGRAPHIE

1. Architecture parasismique :

- 1.** Adam J-P & Frizot M. (1983), « Dégénération et restauration de l'architecture Pompéienne », Paris, éditions du centre national de la recherche scientifique, 1983, 112p.
- 2.** AFPS-CSTB, (2013), « Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme », Editions AFPS-CSTB, 2013, Paris, 77P.
- 3.** AFPS : Association Française du génie parasismique, (2011), « Dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie, Nouvelles édition conforme aux Eurocodes, Principes et schéma de détails. », Saint-Etienne, Presses des ponts, 2011, 385p.
- 4.** AFPS : Association Française du génie parasismique, (2011), « Dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie, Nouvelles édition conforme aux Eurocodes, Principes et schéma de détails. », Saint-Etienne, Presses des ponts, 2011, 385p.
- 5.** AFPS : Association française du génie parasismique (2011B), « Rapport de mission, séisme de Lorca (Espagne) du 11 mai 2011 », Paris, décembre 2011, 152P.
- 6.** AFPS : Association française du génie parasismique (2009), « Rapport de mission, séisme de l'Aquila (Italie) du 6 avril 2009 », Paris, septembre 2009, 183P.
- 7.** AFPS : Association française du génie parasismique (2004A), « Guide de la conception parasismique des bâtiments », Eyrolles, 2004, Paris, 158P.
- 8.** AFPS : Association française du génie parasismique (2004B), « Cahier technique n° spécial, Le séisme de Boumerdes (Algérie) du 21 mai 2003 », Paris, février 2008, 77P.
- 9.** AFPS, (2003), « Le séisme de Boumerdes (Algérie) du 21 mai 2003 », Paris, AFPS, 2003, 25p.
- 10.** Afra H., (2003), « Performance parasismique des systèmes structurels durant le séisme de Zemmouri. », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, 623-633p.

- 11.** Ait-Meziane Y. (2002), « Développement des fonctions de vulnérabilité pour le bâti de la ville d'Alger », Magister en génie civil spécialité construction, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2002, 157p.
- 12.** Allen D.E., (1999), Évaluation et protection parasismiques des bâtiments, Solutions constructives N°26, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, mai 1999.
- 13.** Ambrasey N. et J. Vogt (1991), Matériaux relatifs à la sismicité de l'Algérie occidentale au cours de la deuxième moitié du XIXe et au début du XXe siècle, in: Méditerranée, Tome 74, 4-1991. pp. 39-45.
http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_1991_num_74_4_2736
- 14.** Ambrasey N. et J. Vogt (1988), Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers, European Earthquake Engineering Journal, n°3, pp 1-23.
- 15.** Amir-Mazaheri D., Bisch P., Capra A., Chenaf M., Davidovici V., Delmotte P., Taillefer, (2010), « Guide technique, Renforcement parasismique des bâtiments : guide méthodologique pour le renforcement préventif du bâti existant. », Nancy, CSTB, 2010, 268p.
- 16.** Ankik D. (2013), « incidence des périodes fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques sur la performance sismique des bâtiments », Mémoire de Magistère, spécialité Génie civil option Structures et Matériaux, Université Mouloud Mammeri, faculté de génie de la construction, département de génie civil, Tizi-Ouzou, 2013, pp125.
- 17.** Arbabian H., (2000), « The role of Architects in Seismic Design », in international conference on the seismic performance of traditional buildings UNESCO-ICOMO, Istanbul, november 16-18 2000, 8p.
- 18.** Aysan, Y., A. Clayton, A. Cory, I. Davis et D. Sanderson (1995), Developing building for safety programmes : Guidelines for organizing safe building improvement programmes in disaster-prone areas, Intermediate Technology Publications, Londres, 1995.
- 19.** Azem N. (2014), http://www.leconews.com/fr/depeches/une-commission-d-experts-installee-pour-evaluer-les-dommages-causes-au-vieux-bati-04-08-2014-170935_312.php
- 20.** Bachmann H. (2002), « Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et

autorités », Directives de l'office fédérale des eaux et de la géologie (OFEG), Berne, septembre 2002, pp81.

21. Badoux M., Lestuzzi P. et Vogt R. (2003), Extrait de la documentation D 0182, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2003, P 79-90.

22. Balandier P. (2001), COURS DE CONSTRUCTION PARASISMIQUE – VOLUME 2 : CONCEPTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS (STRUCTURES)INTRODUCTION A LA DYNAMIQUE DES STRUCTURES, Direction départementale de l'équipement, Martinique, juillet 2001, 58p.

23. Belazougui M., Fraci N. et Remas A., (2003), « Zemmouri Earthquake of 21st of may, 2003 building damage assessment and causes », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, 653-659p.

24. Belazougui M. & Ameer B, (1993), « Comparaison entre les règlements RPA 88 et UBC 91», Alger, Acte du Vème séminaire maghrébin du génie parasismique, organisé par le groupe maghrébin du génie parasismique GMGS, Alger du 15 au 17 Février 1993 p331-336.

25. Belazougui M., (1990), « Pathologie de la construction liée au séisme du Chenoua du 29 octobre 1989 », Tipaza, Acte des journées d'études « Prévention et actions post-sismique », organisé par le centre de recherche appliquée en génie parasismique C.G.S, Tipaza du 5 au 6 Février 1990 3p.

26. Belkheir M. A. (2012), «influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des bâtiments. », Mémoire de Magister spécialité génie civil option structure et matériaux, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, faculté du génie de la construction, département génie civil, 02 juillet 2012, 105p.

27. Benedetti D. et all.(1992), « Seismic vulnerability index versus damage for unreinforced masonry buildings”.Proc.Of the international conference on reconstruction, restoration and urban planning of towns and regions in seismic prone areas. November 5-9 Skopje Macedonia, pp. 333-348.

28. Benedetti D. et all (1985), Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, in Earthquake engineering and structural dynamics. Vol 16, Milan, pp 183-201.

- 29.** Benouar D., Ait Meziane Y. (2008), Disaster Risk Reduction in Algiers, Algeria, in Disaster risk reduction: cases from urban Africa, Earthscan, 2008, P169-192.
- 30.** Benouar D. (2008B), « Scénario d'évaluation du risque sismique pour la ville d'Alger », Vies de Villes, N°10, novembre 2008, p66-69.
- 31.** Benouar D., (2006), Interview, Vie de ville, N° 04 février 2006, Alger, P30-34.
- 32.** Benouar D. (2004), Materials for the investigation of historical seismicity in Algeria from the records of past earthquakes, Annals OF GEOPHYSICS, VOL. 47, N. 2/3, April/June 2004, pp 555-560.
<http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3321/3367>
- 33.** Benouar D. (2001), « Architects and the earthquake risk reduction philosophy for sustainable architecture in the third millenium.», Alger, Acte du séminaire international « enseignement et pratique de l'architecture quelles perspectives ? » EPAU Alger du 23 au 26 avril 2001, 236-243p.
- 34.** Benouar D. (1994), Materials for the investigation of the seismicity of Algeria and adjacent regions during the twenty century, Annals OF GEOPHYSICS, VOL. 47, N. 2/3, April/June 2004, pp 555-560.
- 35.** Bensalah M. D., Modaressi A., Bensaïbi M. et Caballero F. L. (2011), Estimation des effets de la torsion dans les bâtiments soumis à l'action sismique, Acte 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août au 2 septembre 2011
- 36.** Benson C., Twigg J. et Rossetto R. (2007), Outils d'intégration de la réduction des risques de catastrophes. Notes d'orientation à l'intention des organisations de développement, Genève, Provention consortium, 2007, 196P.
- 37.** Berstein, D., Champetier J-P, Peiffer F., (1982), « La maçonnerie sans fard», Tours, Moniteur, 1982, 223p.
- 38.** Besacier G. (2003). La prise en compte du risque sismique dans les constructions,
http://www.prevention2000.org/cat_nat/risques/seisme/besacier/construction_parasismique.htm#intro
- 39.** Bothara J. & Brzev S. (2011), «A tutorial: Improving the seismic performance of stone masonry buildings », Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California, 2011, pp78.

- 40.** Boukri M. & Bensaïbi M., (2007), « Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger », in 7ème Colloque National AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris, AFPS, 2007, 7p.
- 41.** CENEAP & CTC Centre national d'études et d'analyses pour la population et de développement, Organisme national de contrôle technique du bâtiment centre (2007), rapport diagnostic technique et socio-economique de l'hypercentre urbain de la wilaya d'alger, Wilaya d'Alger, 2007, 100P.
- 42.** Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique CGS (2004), Document technique réglementaire DTR B-C 2-48, Règles parasismique algériennes RPA 99 / version 2003, 89P.
- 43.** Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique CGS (1999), Document technique réglementaire DTR B-C 2-48, Règles parasismique algériennes RPA 99.
- 44.** Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique CGS (1995), Rapport d'étude de vulnérabilité au séisme du bâtiment de la wilaya d'Alger « bloc Wali », septembre 1995.
- 45.** Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique CGS (1988), Document technique réglementaire DTR B-C 2-48, Règles parasismique algériennes RPA 88.
- 46.** Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique CGS (1983), Règles parasismiques algériennes 1981, RPA 1981 version 1983.
- 47.** Chaillou A. (2003), « Earthquake protection », West Sussex (England), WILEY, 2002, 420p.
- 48.** Chaker A.A, Slimani M. et Petrovski J., (1981), « Distribution des dommages », Alger, Acte des journées scientifiques sur le séisme d'El-Asnam, organisé par l'organisme national de la recherche scientifique, Alger du 15 au 16 juin 1981 p99-155.
- 49.** Chalah F., Falek K. et Si-Youcef Y., (1996), « Etude d'un voile à une fille d'ouverture », Acte du premier colloque national de génie parasismique, Association algérienne de génie parasismique, 04-06 juin 1996, Alger, P187-193.
- 50.** Charleson A., (2008), « Seismic design for architects outwitting the quake », Elsevier, 2008, Oxford, 281P.

- 51.** Cherfaoui A. & Afra H., (1996), « Influence des paramètres relatifs aux bâtiments sur leur degré d'endommagement sismique. », Acte du premier colloque national de génie parasismique, Association algérienne de génie parasismique, 04-06 juin 1996, Alger, p309-320.
- 52.** Chenef M., Martin P-O., Aribert J-M, (2011), « *Effet du séisme sur les structures métalliques d'après l'Eurocode. Calcul de la résistance au séisme des ossatures en acier.* », Paris, CSTB éditions, 2011, 211p.
- 53.** Coburn A. & Spence R. (2002), « Carnet de Voyage : Voyage en Sicile », 2003. <http://www.geoter.fr/APS/articles/article39.html>
- 54.** Collectif, (1955), « Six mois après le séisme d'Orléansville », In Chantier revue illustrée de la construction en Afrique du nord, N° 18 janvier-février-mars 1955, Alger, pp3-4.
- 55.** Combescure D. (2002), Eléments de bibliographie sur les méthodes d'estimation à grande échelle de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants. Groupe AFPS « Vulnérabilité du bâti existant : approche d'ensemble ». Rapport CEA/DM2S/SEMT/EMSI/RT/02-032A, 116 p.
- 56.** Comité européen de la normalisation (2012), Conservation des biens culturels – Evaluation et rapport sur l'état du patrimoine culturel bâti, Bruxelles, Août 2012, 24P.
- 57.** CRAAG : Centre de recherche en astronomie et astrophysique et géophysique : <http://www.craag.dz/> consulté le 05 mars 2016.
- 58.** Crocker E., (2000), « Earthen Architecture and Seismic Codes; Lessons From the Field », in international conference on the seismic performance of traditional buildings UNESCO-ICOMO, Istanbul, november 16-18 2000, 10p.
- 59.** (CBSC) California Building Standards Commission, (2013), California Historical Building Code, Published by International Code Council, Washigton DDC, 2013, 30P.
- 60.** CTC Chlef, (2001), « Rapport d'expertise technique de l'immeuble sis au 5 rue Ahmed Chaib –Alger- », CTC Chlef, Alger, décembre 2001, 7P.
- 61.** D'Ayala D, Speranza E. (2003). "Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings." In "Earthquake Spectra" vol. 19, N°3. pp. 479-509.

- 62.** Davidovici V. et all., (2014), « Vulnérabilité sismique des Monuments Historiques en Italie. Volume I : Retour d'expérience, Sismicité de l'Italie. » DYNAMIQUE CONCEPT, Juin 2014, Paris, 98P.
- 63.** Davidovici V., (2003A), « Confortement des bâtiments : pourquoi comment ? », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, 148-162p.
- 64.** Davidovici V., (2003B), « Rapport préliminaire sur le séisme du 21 mai 2003 », Dynamique concept, Paris, 56P.
- 65.** Davidovici V., Nguyen Khac Hieu P., Roi S., Tourneur C. (2000), Renforcement et réparation des ouvrages in Actes de colloque, « Risque et génie civil » actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.
- 66.** Davidovici V. (1999), « La construction en zone sismique », Evreux, Le Moniteur, 1999, 330p.
- 67.** Davis I. (2001), Location and operation of evacuation centres and temporary housing policies, Comité pour l'évaluation globale des contre-mesures en cas de séisme, préfecture de Hyogo, Division de la gestion des catastrophes de Kobe, Japon, 2001.
- 68.** Decanini L., De Sortis A., Goretti A. Langenbach L., Mollaioli F. & Rasulo A., (2010), « Performance of Masonry Buildings During the 2002 Molise, Italy, Earthquake », in Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Volume 20, No. S1, pp 191-220.
- 69.** Demagh K., Chabil H. et Turkia H., (2003), « Period of vibrations of framed structures approximate formulae and comparison », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, P600-611.
- 70.** Djaalali F., Bensaïbi M. et Elachachi M., (2003A), « Des courbes de vulnérabilité pour le bâti en maçonnerie de la ville d'Alger », Alger, Acte du

colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, p395-405.

71. Djaalali F., Boukri M. et Bensaïbi M., (2003B), « Vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, p406-415.

72. Elnashai A.S. & Di Sarno L. (2010), Fundamentals of earthquake engineering, Southern gate Chichester, Wiley, 2010, 335P.

73. Esposito E., Luongo G., Marturano A. et Pordido S. (1989), les effets du tremblement de terre historiques, in San Lorenzello, à la recherche des anomalies qui protègent, Ed Ferrigni, San Lorenzello, Italies, pp 57-60.

74. Farsi N., (2003), « Commentaire sur la fiche d'évaluation des dommages post-sismique », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, 669-673p.

75. Ferrigni F. (1990), Mais qu'entend-on par culture sismique locale, in San Lorenzello, à la recherche des anomalies qui protègent, Ed Ferrigni, San Lorenzello, Italies, pp 22-25.

76. Filiatrault A., (1996), « Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structure.», Canada, Editions de l'école polytechnique de Montréal, 1996, 478p.

77. Foufa-Abdessemed A.A., (2007) « Contribution pour la découverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis) adoptées durant le XVIIIème siècle », Thèse de doctorat en science, spécialité architecture et environnement, EPAU, 240P.

- 78.** Foufa A. (2001), « La vulnérabilité du patrimoine bâti et le futur urbain des grandes villes algériennes.», Alger, Acte du séminaire international « enseignement et pratique de l'architecture quelles perspectives ? » EPAU Alger du 23 au 26 avril 2001, 224-229p.
- 79.** Fuentes Albert (1998), « Bâtiments en zone sismique», Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 1998, 218p.
- 80.** Gülhan D. & İnci Özyörük Güney İ., (2000), « The behaviour of traditional building systems against earthquake and its comparision to reinforced concrete frame systems; experiences of marmara earthquake damage assesment studies in Kocaeli and Sakarya », in international conference on the seismic performance of traditional buildings UNESCO-ICOMO, Istambul, november 16-18 2000, 18p. <http://www.icomos.org/iawc/seismic/Gulhan.pdf>
- 81.** Hamane M., Bensafi M., Nedjar D., Djellouli F., Ramdane K-E, Hamada M., Koganei K., Meguro K., Miyajima M., Saito T. (2009), Dommages provoqués par le séisme de Boumerdes et recommandations pour la réduction du risque sismique, Acte 7ème colloque national, AFPS, Paris.
- 82.** Hamazi M., Rassoul I. et Hannachi N.E., (2008), « Conception et réalisation d'un système d'aide à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant», in Colloque National : Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Département de Génie Civil Université Mentouri Constantine, 25 et 26 Novembre 2008, 11p.
- 83.** Harbi A. (2005), Evaluation de l'aléa sismique en Algérie du nord par la modélisation de l'input sismique dans les zones urbaines et l'établissement d'un catalogue, Thèse de doctorat en géophysique, faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire , USTHB, Alger, 222 p.
- 84.** Houben H. & Guillaud H. coll. (Craterre) (2006), « Traité de construction en terre», Clamecy, Parenthèse, 2006, 355p.
- 85.** Ikhlef A. et al, (2000), « Résistance aux séismes des constructions traditionnelles en Algérie.», Alger, Acte du deuxième colloque national de génie parasismique, organisé par l'association algérienne de génie parasismique AGS Alger du 08 au 10 octobre 2000, 267-271p.
- 86.** IGE : Inspection générale de l'environnement du Ministre de l'Écologie et du Développement Durable et Le Ministre de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, (2004), « Rapport

d'évaluation de l'application de la réglementation parasismique dans les départements des Alpes Maritimes, Isère, Pyrénées Atlantiques et Hautes Pyrénées », Paris, Mars 2004, P36.

87. Jalil W., (2003), « Le bâti ancien : problématique de renforcement parasismique », Alger, Acte du colloque international « Risque, vulnérabilité & fiabilité dans la construction », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, P448-452.

88. JICA, M.H.U & C.G.S, Rapport final-Volume III (rapport résumé), décembre 2006, Oyo international Corp. Nippon Koei Co., Ltd

89. Kebaili B. et Redjel B. (2009), Analyse du séisme de Boumerdés juin 2003 et règles parasismiques algérienne, In Proceeding of SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing countries ENSET, Oran (Algeria) - October 12-14, 2009, P 159-166.

90. Koller M.G., Wenk T. et Bettens P.A. (1995), Le grand séisme u Hanshin du 17 janvier 1995, IAS N°8, 29 mars 1995, P 136-143.

91. Kovarik J-B. (2000), Mathieu H., Chaussin R., Kovarik J-B., Risque est réglementation in Actes de colloque (2000), « Risque et génie civil» actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.

92. Langenbach R. (2013), « Rubble Stone Walls and Reinforced Concrete Frames:Heritage Structures Reveal the Hidden Truth aboutRisk and Resilience during the Haiti Earthquake », Iscarsah newsletter n. 5, 2013, Earthquake Engineering Research Institute, pp 10-19.

93. Langenbach R. (2012), vidéo conférence « Was Haiti in 2010 the next Tangshan 1976? Heritage Structures Reveal The Hidden Truth about Risk and Resilience during the Haiti Earthquake”, International ICOMOS Symposium on “Reducing Risks to Cultural Heritage from Natural and Human-Caused Disasters” on 31 October 2012 in Beijing, China.
http://www.youtube.com/watch?v=C_qw1dUIW_I

94. Langenbach R. (2010A), « Rescuing the Baby from the Bathwater:Traditional Masonry as Earthquake-Resistant Construction», in 8th International Masonry Conference, Dresden, 2010, 17P.

95. Langenbach R. (2010B), « Earthquake Resistant Traditional Construction' is Not an Oxymoron*: The Resilience of Timber and Masonry Structures in the Himalayan Region and Beyond, and its Relevance to Heritage Preservation in Bhutan», in International Conference on Disaster Management and Cultural Heritage "Living in Harmony with the Four Elements", Bhutan, 12-14 december 2010, 17P.

96. Langenbach R. (2008A), vidéo conférence « CREATIVE DESTRUCTION: Timber and Masonry Earthquake Resistant Construction before the Age of Steel and Reinforced Concrete», conference in the Earthquake Science Center Seminars, Oaakland, USA, 19 novembre 2008, <http://earthquake.usgs.gov/regional/nca/seminars/2008-11-19/>

97. Langenbach R. (2008B), « Learning from the past to protect the future: Armature Crosswalls », Engineering structures 4 june 2008 2013, pp 2096-2100.

98. Langenbach R. (2005), « Performance of the Earthen Arg-e-Bam (Bam Citadel) during the 2003 Bam, Iran, Earthquake », Volume 21, No. S1, December 2005, Earthquake Engineering Research Institute, pp 345–374.

99. Langenbach R. (2003), Survivors amongst the rubble: Traditional Timber-laced Masonry Buildings that Survived the Great 1999 Earthquakes in Turkey and the 2001 Earthquake in India, While Modern Buildings Fell. In Proceeding of the international congress on construction history, Madrid, 20-24 january 2003, pp1257-1268.

<http://www.conservationtech.com/RL's%20resume&%20pub's/RL-publications/Eq-pubs/2003-Madrid-constructions/Langenbach-Survivors.pdf>

100. Langenbach R. (2000), Intuition from the Past: What We Can Learn from Traditional Construction in Seismic Areas, in first earthquake safe international conference, Istambul. <http://www.icomos.org/iawoc/seismic/Langenbach.pdf>

101. Langenbach R. (1995), Architectural issues in the seismic rehabilitation of masonry buildings. http://life.csu.edu.au/~dspennem/Disaster_SFO/SFO_Lang.html

102. Langenbach R. (1989), Bricks, Mortar, and Earthquakes, Historic Preservation vs. Earthquake Safety, APT Bulletin The journal of the association technology, Volume XXI, NO. 3&4, 1989, pp 30-44. http://www.conservationtech.com/rl's%20resume&%20pub's/RL-publications/Eq-pubs/1989-APT-Bulletin/APT_art.htm

- 103.** Lazzali F., Remas A.K., (2003), « Confortement des bâtiments : pourquoi comment ? », Alger, Acte du colloque international « Réhabilitation sismique des structures », organisé par GECOTEC - groupement des CTC, SGP « GENEST », CTC Chlef - CTC Est - CTC Ouest - CTC Sud, Laboratoire de génie sismique et de dynamique des structures (ENP Alger), Laboratoire de mécanique université de Marne la vallée (France), Alger du 11 au 12 octobre 2003, 170-179p.
- 104.** Lestuzzi P. (2013A), Vidéo : présentation du livre « Evaluation parasismique des constructions existantes, bâtiments en maçonnerie et en béton armée » durée 6:28, 2013.
- 105.** Lestuzzi P. & Badoux M., (2013B), « Evaluation parasismique des constructions existantes », polytechniques et universitaires romandes, 2013, Zurich, 224P.
- 106.** Lestuzzi P. (2009), « Génie civil Analyse et dimensionnement sismique », Condé-sur-Noireau, Ellipses, 2009, 214p.
- 107.** Lestuzzi P., (2008A), « Séisme et construction. Eléments pour non-spécialistes », Editions Presses polytechniques et universitaire romandes, 2008, Lausanne, 124P.
- 108.** Lestuzzi P. & Badoux M., (2008B), « Génie parasismique », Espagne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011, 327p.
- 109.** Levret A. (2003), Conséquences des séismes sur les centres historiques des villes : exemple de Manosque (Provence), 4èmes rencontres des Assises du Patrimoine du Grand-Ouest. Bordeaux 30 et 31 janvier 2003, <http://www.geoter.fr/APS/articles/article43.html>
- 110.** Levret A. (2002), Histoire et aléa sismique, 4èmes rencontres du groupe APS, 1- septembre 2002, P107-118, <http://www.geoter.fr/APS/articles/article12.html>
- 111.** Loi n° 04-20 (2004) du 13 Dhou El-Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, publiée dans le journal officiel N°43 du mercredi 17 Dhou el Kaada 1425 correspondant au 29 décembre 2004.
- 112.** Malfroy S. & Caniggia G. (1986), « L'approche morphologique de la ville et du territoire », Zurich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Architekturabteilung Geschichte des Städtebaus, 1986, 260p.

- 113.** Marichal R. (2002), Premiers éléments de recherche d'anomalies constructives et vulnérabilité sismique du bâti ancien à Perpignan, 4èmes rencontres du groupe APS, 1- septembre 2002, P151-163, <http://www.geoter.fr/APS/articles/article4.html>
- 114.** Martin C. (2002), Méthodologie d'évaluation du risque sismique applicable au bâti individuel des Antilles françaises, 4èmes rencontres du groupe APS, 1- septembre 2002, P107-118, <http://www.geoter.fr/APS/articles/article17.html>
- 115.** Martin M. & Pliskin L., Actes de colloque (2000), « Risque et génie civil» actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.
- 116.** Martin P. (2006), « Ces risques que l'on dit naturels», Marsat, EYROLLES, 2006, 506p.
- 117.** Mathieu H., Chaussin R., Kovarik J-B. (2000), Risque est réglementation in Actes de colloque : « Risque et génie civil» actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.
- 118.** Mebarki A., Genatios C., Lafuente M. (2008), « Risques naturels et technologiques», Paris, Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2008, 232p.
- 119.** Merazka S. (2012), « Développement des fonctions de vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie », Magister en génie civil spécialité structure, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2012, 110p.
- 120.** Mezghani S. (2002), Risque sismique relatif aux opérations de rénovation des bâtiments, 4èmes rencontres du groupe APS, 1- septembre 2002, P139-149, <http://www.geoter.fr/APS/articles/article18.html>
- 121.** Mezouar N. & Hadid M. (2003), « Séisme de Zémouri du 21 mai 2003 », rapport d'évaluation post-sismique, Alger, CGS, 2003, pp151.
- 122.** Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, (2010), « Informations transmises aux maires pour l'élaboration de leur document communal d'information sur les risques majeurs », Paris, 2010, 16p.

- 123.** Ministère des biens culturels italiens (1986), Circolare 1032 del 18/07/1986, Interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche: raccomandazioni.
http://www.architoscana.org/Normativa/ns_nazionale/anno_85-87/CIRC.1032-86.html
- 124.** Mohrane A., Ait Messaoud A., Sebai A., Ayadi A. et Bezzeghoud (1994), Les séisme en Algérie de 1365 à 1992, publication CRAAG, Alger, 277p.
- 125.** Nation unies (2005), Rapport de la Conférence mondiale sur la prévention des catastrophes, Kobe (Hyogo, Japon), 18-22 janvier 2005.
- 126.** Nollet M.-J., Karbassi A., Lefebvre K., Chaallal O. (2009), Développement de courbes de fragilité des bâtiments existants par la méthode des éléments appliqués, Montréal, 2009, 6p.
http://www.researchgate.net/publication/228696579_Dveloppement_de_courbes_de_fragilit_des_btiments_existants_par_la_mthode_des_lments_appliqu
- 127.** OFEG : Office fédérale des eaux et de la géologie, (2006), « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants Concept et directive pour l'étape 2 », Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen, Décembre 2006, pp40.
- 128.** OFEV : l'Office fédéral de l'environnement (2008), « Confortement parasismique de constructions. Stratégie et recueil d'exemple en Suisse », Berne, l'Office fédéral de l'environnement, 2008, 84p.
- 129.** Palermo G. (1993), « Cours de restauration », Rome, Centro Analisi Sociale Progetti, 1993, 115p.
- 130.** Podesta S. et Lemme A. (2002), The survey of damage and of seismic vulnerability in the churches of the Regions of Umbria and Marche : masonry typology as an indicator of vulnerability, in Actes des Ve Rencontres du Groupe APS, 2000, 79-89p. <http://www.geoter.fr/APS/articles/article11.html>
- 131.** Prat M. (2000), La modélisation face à son risque, in Actes de colloque : « Risque et génie civil » actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.
- 132.** Poursoulis G. (2002), « Archéosismicité et connaissance du risque sismique par les Minoens », Séminaire : De l'usage des catalogues de séismes

historiques. » Actes des Ve Rencontres du Groupe APS, septembre 2002, P11-38.
<http://www.geoter.fr/APS/articles/article10.html>

133. Quatre M. (2000), l'état face au risque, in Actes de colloque : « Risque et génie civil» actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.

134. Reitherman R. (2006), « EARTHQUAKES THAT HAVE INITIATED THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE ENGINEERING », in BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING, New Zealand, Vol. 39, No. 3, September 2006, pp 145-157.

135. Remki M. (2010), « Développement d'une méthodologie d'étude de l'endommagement et de la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie (diagnostic et renforcement) », Magister en génie civil spécialité construction, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2010, 132p.

136. Sageau J-F. (2000), Le suivi préventif des structures, in Actes de colloque : « Risque et génie civil» actes du colloque Paris Unesco 8-9 novembre 2000, Le Poiré-sur-vie (Vendée), Presse de l'école nationales des ponts et chaussées, 2000, 717p.

137. Saint-Martin J-M., Calgaro J-A (2005), « Les Eurocodes conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil.», Paris, Moniteur, 2005, 345p.

138. Sanpaolesi P. (1973), « La conservation et la restauration des monuments et bâtiments historiques », Paris, UNESCO, 1973, 288p.

139. Souami M.A. et Zerouala M.S. (2013) participates in XXIV International CIPA Symposium Strasbourg , Title of the paper : " Impact of stylistic features, architectural and urban rules of the Algiers architectural heritage dating between 1830 and 1930 on the strength of its buildings during the earthquake ", 2-6 September , 2013 Article online : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W2/605/2013/isprsarchives-XL-5-W2-605-2013.pdf>.

140. Souami M.A. (2012A), 3rd International participates in architectural conservation, Dubai. Title of the paper: " The potential of seismic - resistance of architectural heritage of Algiers (1830-1930) as a device for new conservation strategies.", December 2012.

141. Souami M.A., Zerouala M.S., Haumont B., Kacher S., Chennaoui Y., Thoma B., Maïza M. (2012B), rapport du projet de recherche universitaire intergouvernemental (Algero-français) : TASSILI- CMEP N° 09mdu77 :

«Architecture, patrimoine et risques». EPAU d'Alger et ENSA de Paris Val de Seine, (2009-2012).

142. Souami M.A., Zerouala M.S., Mme. Ferhat S. et Mme. Serradj F. (2011), rapport du projet de recherche universitaire CNEPRU code « B*04720080003 » : « Patrimoine et sismicité», , (2008-2011).

143. Souami M.A. (2005), « *Modélisation du FONCTIONNEMENT DU système compositionnel, essai d'intelligibilité* », Magister en architecture, école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis (ENAU), 2005, 171p.

144. Stephant J-P (2007), « La maintenance du patrimoine bâti optimiser la gestion technique des bâtiments publics», Voiron, territorial éditions, 2007, (Classeur).

145. Thom R. (1993), « Prédire n'est pas expliquer », Manchecourt, FLAMMARION, 1993, 175p.

146. Thom R. (1989), « Modèles mathématique de la morphogénèse », Condé-sur-l'Escaut, CHRISTIAN BOURGEOIS EDITEUR, 1989, 315p.

147. Thom R. (1988), « Esquisse d'une sémiophysique », Paris, InterEditions, 1988, 285p.

148. Thom R. (1980), « Paraboles et catastrophes », Milan, FLAMMARION, 1980, 189p.

149. Weliachew B., (2004), « Quelques bases initiatiques concernant les séismes au Japon », Rapport Annuel JST Science escope/MAE, avril 2004, P29-41.

150. Zacek M. (2008), Interview de Zacek M. professeur à l'ENSA Marseille, réalisé le 31 mars 2008, <http://www.planseisme.fr/Interview-de-Milan-Zacek.html>.

151. Zacek M. (2004), « Collection conception parasismique : conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie », Villefontaine, Ministère de l'écologie et du développement durable, volume 1, 2004, 89 p.

152. Zacek M. (2004), « Collection conception parasismique : Vulnérabilité et renforcement », Villefontaine, Ministère de l'écologie et du développement durable, volume 2, 2004, 59p.

153. Zacek M. (2004), « Collection conception parasismique : conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie », Villefontaine, Ministère de l'écologie et du développement durable, volume 2-a, 2004, 39p.

- 154.** Zacek M. (2004), « Collection conception parasismique : conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie », Villefontaine, Ministère de l'écologie et du développement durable, volume 3, 2004, 94 p.
- 155.** Zacek M. (2004), « Collection conception parasismique : conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie », Villefontaine, Ministère de l'écologie et du développement durable, volume 4, 2004, 141 p.
- 156.** Zacek M., (1997), « La résistance des ouvrages aux séismes : incidence des paramètres géométrique », Les cahiers de la recherche architecturale N°40 2ème trimestre 1997 « Imaginaire technique », Editions Parenthèse, 1997, Quercy, P85-90.
- 157.** Zacek M. (1996), « Construire parasismique », Marseille, Editions Parenthèses, 1996, 340p.
- 158.** Zeghichi L., Merzougui A. & Mezghiche B. (2005), Lecture dans le règlement parasismique algérien, Courrier du savoir, N°6 juin 2005, Biskra, P67-69.
- 159.** Zerbi S., (2011) Construction en pierre massive en Suisse, Thèse de doctorat ès sciences, spécialité architecture et environnement, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 480P.
- 160.** Zhang Z. (2000), « Traditional Chinese Buildings and Their Performance in Earthquake », Proceeding of the UNESCO-ICOMOS conference "earthquake-safe: Lessons to be learned from traditional construction", international conference on the seismic performance of traditional buildings, Istanbul, Turkey, November 16-18, 2000.

2. Architecture de la période coloniale :

- 161.** Abdou M. K. (2012), « entretien avec le wali d'Alger », N° hors-série Vie de ville, Juillet 2012, 14-23p.
- 162.** Almi S. (2002), « Urbanisme et colonisation, présence française en Algérie.», Sprimont, Mardaga, 2002, 160p.
- 163.** Baba-Amed T. Cherfi N. et all (2013), « Méthode de réhabilitation d'un centre historique. Diagnostic du quartier Ben M'Hidi, Alger.», Alger, Alternatives urbaines, 2013, 223p.
- 164.** Barey A. collectif (1980), « Déclaration de Bruxelles 1980 », Bruxelles, Editions des archives d'architecture moderne, 1980, 117p.
- 165.** Béguin F. collectif, (1983), « Arabisances décor architectural et tracé urbain en Afrique du nord 1830-1950», Nancy, Dunod, 1983, 170p.
- 166.** Benevolo L. (1998), « Histoire de l'architecture moderne T1 : Révolution industrielle », Nancy, Dunod, 1998, 281P.
- 167.** Bennai M. (2010), « Le processus d'intervention sur les quartiers anciens de l'époque coloniale à Alger : Approches – Démarches – Cadre d'action », Magister architecture et environnement, option architecture et technologie, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme (EPAU), Alger, 2010, 158p.
- 168.** Bonnier L., (1903), « Huitième conférence les réglementations de voirie », Archive IFA.
- 169.** Bonnier L., (1902), « I. Les décrets antérieurs ; les réglementations étrangères. II. Le décret du 13 août 1902 », Conférence faites dans l'hémicycle de l'école des beaux-arts les 22 et 29 octobre 1902 sur les règlements de voirie, Charles Schmid éditeur, 1902, Paris, 95P, document des archives de l'IFA.
- 170.** Bourde P. (1880), « A travers l'Algérie, Souvenirs de l'excursion parlementaire (septembre-octobre 1879) », G. CHARPENTIER, ÉDITEUR, 1880, 390P.
- 171.** Chantier auteur inconnue, (1934), « La trame des villes : II. Alger.», Alger, Chantiers, février 1934, 131-134p.
- 172.** Cantelli M., (1998), « Remarques sur l'ornement et la monumentalité, à Paris sous la troisième république », in « les Cahiers de l'Ipraus architecture, urbanistique, société », Editions Recherches / Ipraus, 1998, Paris, pp100-112.

- 173.** Çelik Z., (1997), *Urban forms and colonial confrontations, Algiers under French rule*, University of California Press Berkeley, USA
- 174.** Chemetov P. et Marrey B., (1985), « *Architecture à Paris 1848-1914.*», Nancy, Dunod, 1985, 206p.
- 175.** Cresti F., (2003), « *Une façade pour Alger : Le boulevard de l'impératrice* », in « *Alger, Paysage urbain et architecture 1800-2000* », Broché, 2003, pp64-87.
- 176.** Cresti F., (1993A), *Alger de la conquête française à la fin du Second Empire*, pp 94-137, in *Contribution à l'histoire d'Alger*, Centro Analist Sociale Progetti, Srl, Roma, 142 p
- 177.** Cresti F. (1993B), *Contribution à l'histoire d'Alger*, In collection du centro analisi sociale pour la formation universitaire de la post-graduation de l'EPAU, Alger, Ed centro analisi sociale Progetti, Rome, 103 p.
- 178.** Davidson Cragoe C., (2011), « *Comprendre l'architecture. Décoder les édifices et reconnaître les styles* », Larousse, 2011, Chine, 256P.
- 179.** Deluz J. J., (1988), *L'urbanisme et l'Architecture d'Alger, aperçu critique*, Mardaga, Bruxelles, OPU, Alger, 199 p
- 180.** Des Cars J. & Pinon P. (2005), « *Paris Haussmann*», Paris, A & J Picard, 2005, P 45.
- 181.** Djermoune N. et Oubouzar L. (2011), « *Architectures au Maghreb (XIXe-XXe siècles) réinvention du patrimoine* », Péronnas (France), Collection « *villes et territoires* » presses universitaires François-Rabelais, 2011, P245-262.
- 182.** Guerroudj T. (2000), « *La question du patrimoine urbain et architectural en Algérie* », *Insaniyat / إنسانيات* [En ligne], 12 | 2000, mis en ligne le 10 juillet 2012, consulté le 22 décembre 2014. URL : <http://insaniyat.revues.org/7892>
- 183.** Gresset P., (1985), « *Le classicisme : un style ? Architecture et pensée visuelle : Les architectures classiques à l'épreuve de leur fondement.* », In *Les cahiers de la recherche architecturale « Classicisme »*, Editions Parenthèses, N° 18 4e trimestre 1985, Cahors, pp 6-17.
- 184.** Hakimi Z. (2011), « *Alger Politiques urbaines 1846-1958*», Condé-sur-Noireau, Editions Bouchene, 2011, 259p.
- 185.** Jestaz B. (1995/2000), « *La renaissance de l'architecture de Brunelleschi à Palladio* », Italie, Gallimard, 2000, 160p.

- 186.** Kanoun Y. (2000), *Architecture Algérienne*, Stuttgart, éditions EPAU et SIAAL, 2000.
- 187.** Larbodière J. M., (2012), « Haussmann à Paris. », Paris, massin, 2012, 192p.
- 188.** Larbodière J. M. (2006), « Reconnaître les façades. », Paris, massin, 2006, 205p.
- 189.** Lespès R., Mars (1933), *L'évolution des idées sur l'urbanisme algérois de 1830 à nos jours*, in *Chantiers*, numéro spécial sur l'exposition d'urbanisme et d'architecture moderne d'Alger, Mars 1933, p 247-263
- 190.** Loyer F. (1994), *Paris XIXe siècle l'immeuble et la rue*, Paris, HAZAN, 1994, 478P.
- 191.** Lucan J., (2010), « Composition, non-composition. Architecture et théories, XIXe – XXe siècle », Editions Presses polytechniques et universitaire romandes, 2010, Lausanne, 607P.
- 192.** Malverti X., (1994). « Les officiers du Génie et le dessin de villes en Algérie (1830-1870) ». In: *Revue du monde musulman et de la Méditerranée*, N°73-74, 1994. pp. 229-244.
- 193.** Malverti X., (1992), « Alger, Méditerranée, soleil et modernité. », Liège, in « *Architecture française outre-mer* », Pierre Mardaga, 1992, pp29-63.
- 194.** Minnaert J-B. collectif (2005), « *histoires d'architectures en méditerranée écrire l'histoire d'un héritage bâti* », Paris, Editions de la villette, 2005, 400p.
- 195.** Panerai Ph. Castex J. Depaule J-Ch. (2009), *Formes urbaines de l'îlot à la barre*, Marseille, Editions Parenthèses, 2009, 195P.
- 196.** Petruccioli A. (2007), « After Amnesia learning from the islamic Mediterranean urban fabric » “The colonial tenement house in Algiers”, Bari, ICAR., 2007, 117-124p.
- 197.** Petruccioli A. (1993), « Alger 1830-1930 Pour une lecture typologique des immeubles d'habitation », in « *Algérie les signes de la permanence* », Centro Analist Sociale Progetti, Srl, Roma, 33-52p.
- 198.** Picard A. (1994), *Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962)*. In: *Revue du monde musulman et de la Méditerranée*, N°73-74, 1994. pp. 121-136.

- 199.** Pinon P. (2005), «Atlas du Paris Haussmannien», Espagne, Parigramme, 2005, P132.
- 200.** Quéré J-P., (1998), « La leçon d'urbanisme d'Hausmann », in « Paris - Haussmann » collectif sous la direction de Des Cars J. & Inon P., Editions Picard, 1991, Paris, pp220-225.
- 201.** Renault C., (2011), « Les styles de l'architecture », Editions Jean-Paul Gisserot, 2011, France, 189P.
- 202.** Téraade A., (1998), « Le boulevard Malesherbes, ou la longue durée d'un tracé « haussmannien » », in « les Cahiers de l'Ipraus architecture, urbanistique, société », Editions Recherches / Ipraus, 1998, Paris, pp28-44.
- 203.** Tzonis A., L. Lefaivre et D. Bilodeau (1985). Le classicisme en architecture la poétique de l'ordre, Nancy, Dunod, 1985, 224P.
- 204.** Wittkower R. traduit de l'anglais par Claire Fargeot (version anglaise 1949/1996), « Les principes de l'architecture à la Renaissance », Aubenas d'Ardèche France, Les éditions de la passion, 1996, 203p.

ANNEXE

Annexe 1 : Fiche d'évaluation de la vulnérabilité du bâti ancien établi par le CTC

FICHE DE DIAGNOSTIC TECHNIQUE

N°

IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION :

Adresse : Commune : C/A :
 Usage : Habitation, Scolaire, Santé, Administration/Bureaux, Commerce, Autres :
 Age approximatif : N° niveau : N° logt / Surface :
 Type de Structure : Mur en maçonnerie, Voile, Portique en BA, Portique en CM, Mixte, Autres :
 Terrain d'assise : En pente, Plat, Souterr. Vide sanitaire : Oui, Non, Sous Sol : Oui, Non
 Transformation/Aménagement : Extension, Surélévation, Suppression, Autres :
 Maintenance : Oui, Non, Mitoyenneté : Oui, Non

CONSTAT DES DESORDRES

ELEMENTS STRUCTURELS:

| Elément / Désordre | | Description / Localisation | Evaluation |
|---|-------------------------------|--|------------|
| <input type="checkbox"/> Mur / Voile | <input type="checkbox"/> Maç | Fissures <input type="checkbox"/> Eau <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> BA | Fissures <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| <input type="checkbox"/> Portique en BA | <input type="checkbox"/> Pot | Fissures <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> Pout | Fissures <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| <input type="checkbox"/> Portique en CM | <input type="checkbox"/> Pot | Corrosion <input type="checkbox"/> Assemblage <input type="checkbox"/> Autres <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> Pout | Corrosion <input type="checkbox"/> Assemblage <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| <input type="checkbox"/> Planchers | <input type="checkbox"/> BA | Fissures <input type="checkbox"/> Béton <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> Bois | Affai /Gondo <input type="checkbox"/> Etat Solive <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> C M | Affai /Gondo <input type="checkbox"/> Etat Solive <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| | <input type="checkbox"/> Vout | Affai /Gondo <input type="checkbox"/> Etat Solive <input type="checkbox"/> Autres : <input type="checkbox"/> | 1-2-3-4 |
| Autres | | | |

Fig. 119 : Fiche de diagnostic technique du vieux bâti d'Alger. Page 01 [CENEAP & CTC centre, 2007].

FICHE DE DIAGNOSTIC TECHNIQUE

N°

ELEMENTS SECONDAIRES :

| Elément | Désordres / Localisation | Evaluation |
|---|--------------------------|------------|
| Toiture inclinée Bois <input type="checkbox"/> CM <input type="checkbox"/> | | 1-2-3-4 |
| Etanchéité | | 1-2-3-4 |
| Escaliers | | 1-2-3-4 |
| Balcons | | 1-2-3-4 |
| Réseau Assainissement | | 1-2-3-4 |
| Réseau Eau Pluvial | | 1-2-3-4 |
| Cave – Sous Sol - VS | | 1-2-3-4 |
| Buanderie | | 1-2-3-4 |
| Autres : | | |

ELEMENTS ACCESSOIRES :

| | | | | | |
|----------------|---------|-----------|---------|--|---------|
| Faux- plafonds | 1-2-3-4 | Cloisons | 1-2-3-4 | | 1-2-3-4 |
| Cheminée | 1-2-3-4 | Coursives | 1-2-3-4 | | 1-2-3-4 |
| Acrotère | 1-2-3-4 | Corniche | 1-2-3-4 | | 1-2-3-4 |
| | 1-2-3-4 | | | | 1-2-3-4 |

Observations :

.....

.....

.....

.....

CLASSEMENT DE LA CONSTRUCTION :

| | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|
| Niveau des dommages | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|---|---|---|---|

L'ingénieur :

Fig. 120 : Fiche de diagnostic technique du vieux bâti d'Alger. Page 02 [CENEAP & CTC centre, 2007].

Annexe 2 : Fiche d'enquête.

| | | | | | |
|-------------------------|---|--|--|------------------|---|
| Code équipe de relevé : | | Date : | Adresse : | | Ilot : |
| Plans | Plan situation (ilot) | | | Plan schématique | |
| | | | | | |
| Divers | Type Haussmannien : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Nbre Niveau : | Nbre d'entrée : | Sous-sols : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non |
| | Vocation : <input type="checkbox"/> Résidentielle <input type="checkbox"/> Administrative <input type="checkbox"/> Autre : | | | | Galerie : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non |
| Topologie | Position : <input type="checkbox"/> Ilot <input type="checkbox"/> Angle <input type="checkbox"/> centrale <input type="checkbox"/> autre | | Alignement sur rue : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | |
| | Forme : <input type="checkbox"/> Carré <input type="checkbox"/> Rectangle <input type="checkbox"/> Triangle régulier <input type="checkbox"/> irrégulière | | | | |
| | Nbre de Façade libre : | Nbre de Mitoyenneté : | Joint mitoyen : <input type="checkbox"/> Absent <input type="checkbox"/> < 4 cm <input type="checkbox"/> ≥ 4cm | | |
| Config. | Retrait en plan : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | <input type="checkbox"/> Retrait ≤ 25% <input type="checkbox"/> Retrait > 25% | | |
| | Proportion : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | <input type="checkbox"/> Rapport ≤ 1/4 <input type="checkbox"/> Rapport > 1/4 | | |
| | Retrait en élévation : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Retrait niveaux : <input type="checkbox"/> ≤ 20% <input type="checkbox"/> > 20% | | Retrait global : <input type="checkbox"/> ≤ 33% <input type="checkbox"/> > 33% |
| | Réduction hauteur d'étage <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Réduction (H) <input type="checkbox"/> ≤ 20% <input type="checkbox"/> > 20% | | Elancement (H/L) <input type="checkbox"/> ≤ 1 <input type="checkbox"/> 1 - 3 <input type="checkbox"/> > 3 |
| Plan | <input type="checkbox"/> Double symétrie <input type="checkbox"/> Symétrie longitudinale <input type="checkbox"/> Symétrie transversale <input type="checkbox"/> Non symétrique | | | | |
| | Nbre d'escalier : | Position : <input type="checkbox"/> Centrale <input type="checkbox"/> Axiale <input type="checkbox"/> Désaxée <input type="checkbox"/> Symétrique ¹ | | | |
| | Nbre cour int. : | Position : <input type="checkbox"/> Centrale <input type="checkbox"/> Axiale <input type="checkbox"/> Désaxée <input type="checkbox"/> Symétrique ¹ | | | |
| | Nbre trémie ² : | Position : <input type="checkbox"/> Centrale <input type="checkbox"/> Axial <input type="checkbox"/> Désaxé <input type="checkbox"/> Symétrique ¹ | | | |
| Remarque : | | | | | |
| | | | | | |

¹ Dans le cas de présence de plusieurs cages d'escaliers, cours intérieures ou trémies. ² A part cage d'escalier et cour intérieure.

Fig. 121 : Fiche d'enquête proposée pour l'enquête sur le corpus d'études. Page 01.

| | | | | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|-------------------------------|--|
| Façade 1 | Symétrie : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> quasiment <input type="checkbox"/> Non | | Régularité Taxi : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Régularité travée : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | | | |
| | Nbre de travée : | | Accès : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Position de l'accès : <input type="checkbox"/> Centrale <input type="checkbox"/> Latérale <input type="checkbox"/> Désaxé | | | | |
| | Plein/Vide : <input type="checkbox"/> > 67% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> < 50% | | Plein/Vide Sb/Cp: <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/Vide Cp/Cr: <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | | | |
| | Epaisseur : <input type="checkbox"/> Sb <input type="checkbox"/> Cp <input type="checkbox"/> Cr | | Superposition ouverture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | | | | | |
| | Bandeau : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | Encadrement ouverture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | | | | | |
| | Balcon : <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> 25-50% <input type="checkbox"/> > 50% | | Saillie Balcon: <input type="checkbox"/> ≤ 1 m <input type="checkbox"/> > 1 m | | Garde-corps : <input type="checkbox"/> Leger <input type="checkbox"/> Lourd | | | | |
| | Bow-windows : <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> 25-50% <input type="checkbox"/> > 50% | | Saillie Bow-windows : <input type="checkbox"/> ≤ 1 mètre <input type="checkbox"/> > 1 mètre | | | | | | |
| | Séparation Sb/Cp <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Balcon <input type="checkbox"/> Bandeau <input type="checkbox"/> Retrait <input type="checkbox"/> Autre | | | | Sailli filant ¹ : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Nbre niveau <input type="checkbox"/> % ² : | | | | |
| | Séparation Cp/Cr <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Balcon <input type="checkbox"/> Bandeau <input type="checkbox"/> Retrait <input type="checkbox"/> Autre | | | | Rajout : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Nbre Niv: <input type="checkbox"/> En continuité | | | | |
| | Angle F1 | Droite | Travée : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/vidé : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Traitement d'angle : <input type="checkbox"/> 90° <input type="checkbox"/> Biseauté <input type="checkbox"/> Arrondi | | |
| Balcon(BW) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | | Balcon d'angle <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Pilastre <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Nbre de niv immeuble accolé : | | |
| Continuité plancher RDC : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25 % <input type="checkbox"/> >25 % | | | | Continuité plancher autres niveaux <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> >25 % | | | | | |
| Gauche | | Travée : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/vidé : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Traitement d'angle : <input type="checkbox"/> 90° <input type="checkbox"/> Biseauté <input type="checkbox"/> Arrondi | | | |
| | | Balcon(BW) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Balcon d'angle <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Pilastre <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Nbre de niv immeuble accolé : | |
| | | Continuité plancher RDC : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25 % <input type="checkbox"/> >25 % | | | | Continuité plancher autres niveaux <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> >25 % | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|-------------------------------|--|
| Façade 2 | Symétrie : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Quasiment <input type="checkbox"/> Non | | Régularité Taxi : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Régularité travée : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | | | |
| | Nbre de travée : | | Accès : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Position de l'accès : <input type="checkbox"/> Centrale <input type="checkbox"/> Latérale <input type="checkbox"/> Désaxé | | | | |
| | Plein/Vide : <input type="checkbox"/> > 67% <input type="checkbox"/> 50% <input type="checkbox"/> < 50% | | Plein/Vide Sb/Cp: <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/Vide Cp/Cr: <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | | | |
| | Epaisseur : <input type="checkbox"/> Sb <input type="checkbox"/> Cp <input type="checkbox"/> Cr | | Superposition ouverture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | | | | | |
| | Bandeau : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | Encadrement ouverture : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Majoritaire <input type="checkbox"/> Non | | | | | | |
| | Balcon : <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> 25-50% <input type="checkbox"/> > 50% | | Saillie Balcon: <input type="checkbox"/> ≤ 1 m <input type="checkbox"/> > 1 m | | Garde-corps : <input type="checkbox"/> Leger <input type="checkbox"/> Lourd | | | | |
| | Bow-windows : <input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> 25-50% <input type="checkbox"/> > 50% | | Saillie Bow-windows : <input type="checkbox"/> ≤ 1 mètre <input type="checkbox"/> > 1 mètre | | | | | | |
| | Séparation Sb/Cp <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Balcon <input type="checkbox"/> Bandeau <input type="checkbox"/> Retrait <input type="checkbox"/> Autre | | | | Sailli filant ¹ : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Nbre niveau <input type="checkbox"/> % ² : | | | | |
| | Séparation Cp/Cr <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Balcon <input type="checkbox"/> Bandeau <input type="checkbox"/> Retrait <input type="checkbox"/> Autre | | | | Rajout : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Nbre Niv: <input type="checkbox"/> En continuité | | | | |
| | Angle Façade 2 | Droite | Travée : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/vidé : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Traitement d'angle : <input type="checkbox"/> 90° <input type="checkbox"/> Biseauté <input type="checkbox"/> Arrondi | | |
| Balcon(BW) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | | Balcon d'angle <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Pilastre <input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/> Non | | Nbre de niv immeuble accolé : | | |
| Continuité plancher RDC : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25 % <input type="checkbox"/> >25 % | | | | Continuité plancher autres niveaux <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> >25 % | | | | | |
| Gauche | | Travée : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Plein/vidé : <input type="checkbox"/> < <input type="checkbox"/> = <input type="checkbox"/> > | | Traitement d'angle : <input type="checkbox"/> 90° <input type="checkbox"/> Biseauté <input type="checkbox"/> Arrondi | | | |
| | | Balcon(BW) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Balcon d'angle <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | Pilastre <input type="checkbox"/> O <input type="checkbox"/> Non | | Nbre de niv immeuble accolé : | |
| | | Continuité plancher RDC : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25 % <input type="checkbox"/> >25 % | | | | Continuité plancher autres niveaux <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> 0-25% <input type="checkbox"/> >25 % | | | |

¹ Balcon et bow-window.

² Pourcentage en linéaire de façade pour tous les niveaux, exception le RDC.

Fig. 122 : Fiche d'enquête proposée pour l'enquête sur le corpus d'études. Page 02.