

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saâd Dahleb Blida 1

Institut d'Architecture et d'Urbanisme

Laboratoire : Environnement et technologie pour l'architecture et le patrimoine ETAP



THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT D/LMD

Spécialité : Architecture, Patrimoine, Bâti et Environnement

Présentée par :

MOHAMMEDI Louiza

Sous la direction de :

ABDESSEMED FOUFA Amina

Co-Encadrée par :

CHEIKH ZOUAOUI Mustapha

TITRE

**ARCHITECTURE PARASISMIQUE DE
FERNAND POUILLON**

Devant le Jury composé de :

- Pr. KENAI Said, Président, Université Saâd Dahleb, Blida
- Pr. DJEBRI Boualem, Examineur, EPAU, Alger
- Dr. BELEBCHOUCHE Cherif, Examineur, Université Frère Mentouri, Constantine
- Dr. NAILI Mounir, Invité, Université Laurentienne Ontario, Canada
- Pr. ABDESSEMED FOUFA Amina, Rapporteur, Université Saâd Dahleb, Blida
- Pr. CHEIKH ZOUAOUI Mustapha, Co-rapporteur, Université Saâd Dahleb, Blida

Année universitaire : 2020/2021

RESUME

Cette thèse traite de l'évaluation de la réponse sismique des grands ensembles de Diar es Saada et Diar el Mahçoul, qui sont considérés parmi les projets architecturaux les plus remarquables réalisés en maçonnerie non renforcée (URM) en Algérie. Deux quartiers situés à Alger, une ville exposée à d'importants tremblements de terre (zone III), ont survécu jusqu'à présent sans dommage ni altération majeure. Ces bâtiments ont été conçus par l'architecte français Fernand Pouillon entre 1953 et 1955, avant l'apparition des recommandations parasismiques AS55. Ils ont été construits en utilisant un système structurel original et un procédé de construction innovant mis au point par cet architecte : Des murs porteurs en pierre et brique URM avec des planchers en béton armé.

L'étude menée comprend une approche multidisciplinaire. Tout d'abord, un diagnostic détaillé a été réalisé sur place afin d'évaluer l'état de conservation des bâtiments. Ensuite, le comportement sismique des bâtiments a été modélisé et analysé en utilisant la méthode d'analyse dynamique linéaire et statique non linéaire, dans les deux logiciels SAP2000 et TreMuri. En ce qui concerne la réglementation algérienne actuelle en matière de conception sismique, les résultats obtenus en termes de période, de fréquence, et de déplacements ont montré que ce type de structure peut être considérée comme parasismique, remplissant les conditions de sécurité structurelle requises.

À cet égard, les grands ensembles de Diar es Saada et Diar el Mahçoul méritent d'être classés patrimoine national. Le comportement structurel global satisfaisant vis-à-vis de la réglementation, confirme que l'architecte Fernand Pouillon possède également d'excellentes compétences en matière d'ingénierie de construction.

Ce travail a donné naissance à plusieurs participations à des événements scientifiques qui ont abouti à des publications d'articles de renommés comme indiqués dans la bibliographie.

Mots clés : Fernand Pouillon ; Bâtiment parasismique ; Modélisation numérique ; Systèmes constructifs ; Maçonnerie non renforcée (URM).

ABSTRACT

This thesis deals with the seismic response evaluation of the housing estates of Diar es Saada and Diar el Mahçoul, which are considered among the most remarkable architectural projects built in unreinforced masonry (URM) in Algeria. The two housing estates located in Algiers, a town exposed to important earthquakes (zonz III), has survived so far without major damage or alteration. These buildings were designed by the French architect Fernand Pouillon between 1953 and 1954, before the appearance of the AS55 seismic recommendations. They were built using an original structural system and an innovative construction processes developed by this architect: URM stone and brick load-bearing walls with reinforced concrete floors.

The study carried out consists of a multidisciplinary approach. First, a detailed diagnosis was performed on site to assess the state of conservation of the buildings. Then, the seismic behaviour was modelled and analysed by using both linear dynamic and non-linear static analysis in SAP2000 and TreMuri software. With regard to the current Algerian seismic design regulation, the results obtained in terms of time period, frequency, storey drifts and displacements showed that this type of structure can be considered as an earthquake-resistant building fulfilling the required structural safety conditions.

In this respect, the housing estates of Diar Es Saada and Diar el Mahçoul deserves to be classified as a national heritage and its satisfactory overall structural behaviour confirms that the architect Fernand Pouillon has also excellent skills in engineering construction.

This work gave birth to several participations in scientific events which resulted in the publication of renowned articles as indicated in the bibliography.

Key words: Fernand Pouillon; Earthquake resistant building; Numerical modeling; Building systems; Unreinforced masonry (URM).

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تقييم الاستجابة الزلزالية للمباني السكنية ديار السعادة وديار المحصول، والتي تعتبر من أبرز المشاريع المعمارية التي تم بناؤها من نوع البناء الغير مسلح (URM) في الجزائر. منطقتين سكنيتين تقعان في الجزائر العاصمة، وهي مدينة معرضة للزلازل (المنطقة III)، حتى الآن دون أضرار كبيرة أو تغيير. تم تصميم هذه المباني من قبل المهندس المعماري الفرنسي فرناند بويون بين عامي 1953 و 1954 قبل ظهور نظام البناء المقاوم للزلازل AS55. لقد تم بناؤها باستخدام هيكل هندسي أصلي وتقنيات بناء مبتكرة طورها هذا المهندس المعماري: الجدران من الحجر والطوب الغير مسلحة (URM) مع أرضيات من الخرسانة المسلحة.

تتكون الدراسة التي أجريت من نهج متعدد التخصصات. أولاً، تم إجراء تقييم مفصل في الموقع من أجل تشخيص حالة المباني. بعد ذلك، تم نمذجة وتحليل السلوك الزلزالي باستخدام كل من التحليل الديناميكي الخطي وغير الخطي الثابت في برنامجي SAP 2000 و TreMuri. فيما يتعلق بتنظيم التصميم الزلزالي الحالي في الجزائر، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هذا النوع من الهياكل يمكن اعتباره مبنى مقاومًا للزلازل يستوفي شروط السلامة الإنشائية المطلوبة.

في هذا الصدد، المشاريع المعمارية ديار السعادة وديار المحصول تستحق أن تصنف على أنها تراث وطني ويؤكد سلوكها الإنشائي الشامل المرضي أن المهندس المعماري فرناند بويون لديه أيضًا مهارات ممتازة في هندسة البناء.

وقدم هذا العمل ولادة إلى عدة مشاركات في المناسبات العلمية التي أسفرت عن نشر عدة مقالات في مجلات مرموقة كما هو مبين في قائمة المراجع.

الكلمات المفتاحية: فيرنان بويون ; المباني المضادة للزلازل ; النمذجة الرقمية ; البناء الغير مسلح(URM).

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes encadreurs Pr. Amina Abdessemed Foufa et Pr. Mustapha Cheikh-Zouaoui, pour la confiance qu'ils m'ont accordé, pour leur soutien constant, leur disponibilité, leur aide précieuse en améliorant la qualité de mes travaux de recherche et leurs précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

J'adresse tous mes sincères remerciements à Mme Catherine Sayen, présidente de l'association les Pierres sauvages de Belcastel dédiée à l'œuvre de Fernand Pouillon, pour son énorme contribution et ses orientations, choses qui m'ont permis de mener à terme ce travail, qu'elle trouve ici le témoignage de mes sincères gratitude.

J'exprime mes vifs remerciements au Pr. Giuseppina Uva, Professeur au département DICATECh de l'École Polytechnique de Bari (Italie), pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et m'avoir donné la chance de bénéficier d'une formation sur la modélisation des structures en maçonnerie.

Je remercie les personnes qui ont contribué scientifiquement à cette thèse, je cite tout particulièrement le personnel du Centre des Archives Nationales à Birkhadem et l'équipe de la société S.T.A. DATA 3Muri.

Je remercie également ma famille et tous mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans les moments difficiles, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

- A : Coefficient d'accélération de zone (%)
- C_T : Coefficient de période
- D : Facteur d'amplification dynamique moyen
- D_{max} : Demande de déplacement du séisme
- D_u : Déplacement offert de la structure
- d_{min} : Largeur minimale d'un joint sismique
- F : Forces horizontales
- F_i F_n : Forces horizontales appliquées aux niveaux «i» et «n»
- F_t : Partie de l'effort tranchant à la base, appliquée au niveau «n» en plus de F_n
- g : Accélération de la pesanteur
- G : Action des charges permanentes (kN)
- h_i, h_j, h_n : Hauteurs des niveaux «i», «j» et «n»
- Q : Facteur de qualité
- Q : Action des charges d'exploitation (kN) ;
- R : Coefficient de comportement
- S_a / g : Accélération spectrale
- S_i (i=1, 2, 3, 4) : Symboles désignant les différentes catégories de site
- T : Période fondamentale de la structure (sec)
- T_1 T_2 : Période caractéristiques associées à la catégorie de site (sec)
- V : Force sismique totale appliquée à la base de la structure (kN)
- V_k : Effort tranchant au niveau «k»
- V_t : Force sismique totale (combinaison des valeurs modales)
- W : poids total de la structure
- Δ_k : Déplacement horizontal relatif au niveau «k» par rapport au niveau «k-i» x, x i,
- β : Coefficient de pondération
- δ_{ek} : Déplacement horizontal dû aux forces F_i
- δ_N : Déplacement horizontal au sommet de la structure, niveau n
- η : Facteur de correction d'amortissement
- ξ : Pourcentage d'amortissement critique

AFNOR : Association Française de NORmalisation
AS55 : Recommandations Anti-Sismiques 1955
ATC : Conseil de Technologie Appliquée
CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique
CNR : Conseil National de Recherche de l'Italie
CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTC : Contrôle Technique de la Construction
DDL : Degré de Liberté
DTR : Document Technique Réglementaire
EMS : Echelle Macrosismique Européenne
FaMIVE : Failure Mechanisms Identification and Vulnerability Evaluation
FEMA : Federal Emergency Management Agency
GNDT : Groupe National de Défense contre les séismes
HBM : Habitation à bon marché
HBM : Habitations à Bon Marché
HLM : Habitation à Loyer Modéré
IMPGA : Institut Météorologique et de Physique du Globe de l'Algérie
MRU : Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme
Ms : Magnitude des ondes de surface
Mw : Magnitude du moment sismique
NTC : Norme Technique de Construction
OTUA : Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier
RiSEM : Rischio Sismico negli Edifici Monumentali
RPA : Règles Parasismique Algérienne
SOCOTEC : SOciété de COntôle TEChnique et d'expertise de la construction
URM : Maçonnerie non renforcée
VULNIRAP : VULNErabilité sismique à l'échelle d'une ville de Rhône-ALPes

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	4
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	5
TABLE DES MATIÈRES	7
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE	18
CHAPITRE 01	25
L'ARCHITECTURE ATYPIQUE DE FERNAND POUILLON	25
1. Introduction	25
2. Fernand Pouillon : le parcours d'un architecte visionnaire	25
2.1. Repères bibliographiques et dates clefs	25
2.2. Les quatre périodes d'une carrière	27
2.2.1. 1936-1953 : l'expérience marseillaise	27
2.2.2. 1953-1957 : l'expérience Algérienne et Iranienne	28
2.2.3. 1957-1962 : l'expérience parisienne	28
2.2.4. 1965-1984 : le retour en Algérie après l'indépendance	28
3. Formations et sources d'inspiration : les prémices d'une architecture « Pouillonienne » à travers les écrits	29
3.1. Histoire de l'architecture comme une source d'inspiration	29
3.2. Influence des architectes de son époque	31
3.3. Le rejet de l'architecture internationale	32
4. Inventaire de l'œuvre de Pouillon	34
4.1. L'industrialisation et son impact sur la production architecturale de Pouillon	45
4.1.1. Le contexte et les ressorts de l'innovation constructive	45
4.1.2. Les acteurs de la reconstruction	45
4.2. Les chantiers expérimentaux	46
4.2.1. L'intervention des organismes publics l'OTUA et l'MRU	46
4.2.2. Procédé de la préfabrication (lourde et légère)	47
4.2.3. Les premiers projets phares de la préfabrication	48
5. L'essor des nouveaux projets de la reconstruction	53
5.1. Fernand Pouillon face aux projets de la reconstruction	53
5.2. Innovation technologique et modernisation des systèmes constructifs traditionnels	55
5.2.1. La pierre préfabriquée	56

5.2.2. <i>La pierre banchée</i>	59
5.2.3. <i>Les cloisons en briques creuses porteuses "Pouillon"</i>	60
5.2.4. <i>Le système de planchers Pouillon</i>	60
5.2.5. <i>Les voûtes charpentes système Pouillon</i>	61
5.2.6. <i>La fusée céramique</i>	62
5.2.7. <i>Les systèmes des voûtes minces et croisée d'ogives</i>	63
5.2.8. <i>Le système FP Home ou maisons métalliques usinées</i>	64
5.2.9. <i>Le Toub banché</i>	65
5.2.10. <i>Les claustras en terre cuite</i>	66
5.2.11. <i>La brique fourrée</i>	67
5.2.12. <i>Le système vide à ordures</i>	67
6. Conclusion	68
CHAPITRE 02	70
CONSTRUCTION PARASISMIQUE ET PATRIMOINE BÂTI DE POUILLON	70
1. Introduction	70
2. Construction parasismique et patrimoine bâti : notions fondamentales	70
2.1. Définition du génie parasismique	70
2.2. Évolution du domaine du génie parasismique : bref historique	71
2.3. Conception parasismique	73
2.4. Patrimoine bâti	74
2.4.1. <i>Comportement des monuments historiques face au risque sismique</i>	75
2.4.2. <i>Exemples de monuments historiques parasismiques : leçons tirées du passé</i>	75
3. La sismicité en Algérie	83
3.1. Bref historique de l'évolution de la sismologie en Algérie	83
3.2. Importance du risque sismique en Algérie	84
3.3. Inventaire des séismes majeurs survenus depuis 419	86
3.4. Naissance du premier règlement parasismique Algérien	88
3.5. Lecture dans le contenu des recommandations parasismique AS55 et le règlement parasismique Algérien RPA99/2003	90
4. Détermination des cas d'études	94
4.1. Critères de choix des cas d'étude	94
4.2. Lecture dans les rapports et PV de chantier de l'Office Public D'habitation à Loyer Modéré de la ville d'Alger (OPHLM)	95
4.3. Extraits des les rapports et PV de chantier de l'Office Public d'Habitation à Loyer Modéré de la ville d'Alger	97

4.3.1. P.V. 73 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 7-02-1956	97
4.3.2. P.V. 76: chantier Climat de France, réunion de chantiers du 28-02-1956	98
4.3.3. P.V. 77 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 06-03-1956	98
4.3.4. P.V. 87 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 15-05-1956	100
4.3.5. Réunion de coordination : commission de coordination des chantiers, Climat de France (Réf : 31P), le 12-12-1955	101
4.4. Cas d'étude : les cités d'habitation d'Alger (Diar es Saada et Diar el Mahçoul)	101
5. Conclusion	102
CHAPITRE 03	103
CONCEPTION PARASISMIQUE DES GRANDS ENSEMBLES DIAR ES SAADA ET DIAR EL MAHÇOUL	103
1. Introduction	103
2. Diar es Saada et Diar el Mahçoul : des grands ensembles atypiques	104
2.1. Présentation des grands ensembles	104
2.2. Contexte de création des grands ensembles	105
2.2.1. <i>L'invention des grands ensembles</i>	105
2.2.2. <i>La politique de l'Habitat à Loyer Modéré HLM en Algérie</i>	106
2.2.3. <i>Contexte de réalisation des deux cités dans la ville d'Alger</i>	107
3. La lecture architecturale des grands ensembles d'habitations Diar es Saada et Diar el Mahçoul	109
3.1. L'architecture des cités d'habitation	109
3.2. Caractéristiques constructives générales des immeubles et des logements	110
3.2.1. <i>Les fondations</i>	111
3.2.2. <i>Les murs porteurs</i>	112
3.2.3. <i>Les planchers et les couvertures</i>	112
3.2.4. <i>Le chauffage central et le service d'eau chaude</i>	113
3.3. Choix du site d'implantation	113
3.4. Les variétés typologiques	114
3.5. La mixité fonctionnelle	116
3.6. Les espaces publics	118
3.7. Le traitement paysager	120
3.8. La qualité environnementale	121
3.9. La mixité sociale	122
4. Le diagnostic d'état de conservation des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul	123

4.1. Etat de l'art des études antérieures sur la réhabilitation des grands ensembles	123
4.2. Synthèse d'état des lieux : diagnostic de l'état de conservation des grands ensembles	126
4.3. Les modifications depuis 1953 à aujourd'hui : les opérations de réhabilitation	127
4.4. Les modifications apportées sur les espaces extérieurs	128
4.4.1. <i>Les modifications à l'intérieur des immeubles</i>	129
4.4.2. <i>Les opérations de ravalement des façades en pierre</i>	130
5. La conception architecturale parasismique des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul	131
5.1. Principes de conception parasismique	132
5.2. L'implantation du bâtiment	133
5.3. La forme en plan et en élévation	135
5.4. Le système de contreventement	136
5.5. L'insertion des éléments non-porteurs	136
6. La structure des immeubles et la réglementation parasismique algérienne	137
7. Conclusion	146
CHAPITRE 04	147
APPROCHES D'ANALYSES SISMIQUES ET EXEMPLES D'APPLICATION SUR DES BÂTIMENTS EXISTANTS	147
1. Introduction	147
2. Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants	147
2.1. La vulnérabilité sismique	147
2.2. Classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique	148
3. Approches d'analyse des structures en maçonnerie	150
3.1. Approche empirique	150
3.2. Approche expérimentale	157
4. Les méthodes d'analyse dans le code parasismique algérien RPA99/2003	162
5. Maçonnerie et vulnérabilité sismique : application des méthodes d'analyse sur le patrimoine bâti	163
5.1. Le projet de recherche italien RiSEM (2011-2013)	163
5.2. Expériences algériennes récentes dans la modélisation de comportement sismique du patrimoine bâti	168
6. Conclusion	173
CHAPITRE 05	174
MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA TOUR TOTEMS DE DIAR ES SAADA	174
1. Introduction	174

2. Critères de choix des cas d'étude	174
3. Méthodologie d'analyse	176
3.1. Présentation de la méthodologie d'analyse du cas d'étude	176
3.2. Modèles d'analyse numérique	178
4. Présentation du cas d'étude	179
4.1. Description géométrique et structurelle	179
4.2. Nature du sol d'implantation	180
4.3. Caractéristiques des murs de soutènement en béton armé au sous-sol	180
4.4. Caractéristiques des niveaux supérieurs et de la loggia	181
4.5. Systèmes structurels de la tour	183
5. Synthèse du diagnostic de l'état de conservation de la tour Totem	190
5.1. Désordres constatés	190
5.2. Les modifications apportées au plan initial de la tour	191
5.3. Les modes de détérioration des pierres de façade	193
6. Modélisation numérique de la tour	193
6.1. Analyse dynamique linéaire	194
6.2. Analyse statique non-linéaire	202
6.3. L'impact de la loggia sur le comportement sismique de la tour	209
7. Discussion des résultats des deux analyses	210
8. Conclusion	211
CHAPITRE 06	214
CONCEPTION ET PERFORMANCE SISMIQUE DES IMMEUBLES DE DIAR ES SAADA	214
1. Introduction	214
2. Critères de choix des cas d'étude	214
3. Méthodologie d'analyse	215
4. Bâtiment R	217
4.1. Description géométrique et structurelle	217
4.2. Caractéristiques des fondations de la structure	218
4.3. Caractéristiques des murs porteurs	219
4.4. Modélisation numérique	220
5. Bâtiment E	230
5.1. Description géométrique et structurelle	230
5.2. Caractéristiques des fondations de la structure	231

5.3. Caractéristiques des murs porteurs	232
5.4. Modélisation numérique	233
6. Bâtiment L 242	
6. 1. Description géométrique et structurelle	242
6.2. Caractéristiques des fondations de la structure	243
6.3. Caractéristiques des murs porteurs	243
6.4. Modélisation numérique	244
7. Résultats et discussion de l'analyse des bâtiments R, E et L	250
8. Conclusion	251
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	254
REFERENCES	258
ANNEXES	265
A. Le dossier graphique de la tour Totem avant l'ajout d'un étage (source : les archives de l'association Les Pierres Sauvages de Belcastel en France)	265
B. Extraits des rapports et P.V de chantier de l'Office Public d'Habitation à Loyer Modéré de la ville d'Alger	275

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1: ERIES un procédé lauréats du concours du ministère de la reconstruction et de l'urbanisme MRU, et le procédé constructif L.M.B breveté par la S.G.D.G [28]	48
Figure 1.2: Les HBM de Drancy en cours de construction [32]	49
Figure 1.3: Le groupe d'habitation HBM en cours de construction et vue du plancher à caissons [30]	50
Figure 1.4: Vues sur la façade principale et le plancher en cours de construction [31]	51
Figure 1. 5: Evolution de la réalisation de l'opération éclairée à Saint-Etienne-du-Rouvray : le premier et le dernier jour [22]	52
Figure 1.6: La machine à découper mécaniquement la pierre : (a) vue latérale et (b) vue arrière [37]	57
Figure 1. 7: Appareillage des moyens et gros blocs standards	59
Figure 1. 8: Principe de la pierre banchée de la façade de lycée Colbert avant la réhabilitation	60
Figure 1. 9: Les dimensions des cloisons en briques creuses	60
Figure 1. 10: Les caissons en terre cuite du Vieux Port de Marseille conçu par Jean Amado et fabriqué par la SGTM [41]	61
Figure 1. 11: Coupe transversale des 200 logements à Aix-en-Provence	62
Figure 1. 12: Construction d'une voûte en chaînette de fusées céramiques durant le chantier du camp de Grand Arénas en 1944-1945 par René Egger et Fernand Pouillon [42]	63
Figure 1.13: Le hameau des Sablettes (1953) [43], les galeries couvertes surmontées de voûtes en briques creuses ; les passages couverts des cités algériennes ou des Sablettes	64
Figure 1. 14: Les voûtes d'arêtes croisées de la place du marché Diar el Mahçoul et Diar es Saada [44]	64
Figure 1. 15: Maison métallique réalisée par Pouillon à Alger en 1970[19]	65
Figure 1. 16: L'hôtel Gourara à Timimoune[19]	66
Figure 1. 17: Les différents motifs des claustras en terre cuite	66
Figure 1. 18: La façade de la Cité universitaire des Gazelles [19] et les balcons de Diar el Mahçoul (Algérie)	67
Figure 1. 19: Vue en plan de la conduite d'évacuation d'un plan type et coupe transversale et longitudinale du dispositif	68
Figure 2. 1: Destruction complète de la ville de messine (Sicile) [50, 53]	73
Figure 2. 2: San francisco ravagé après le séisme « le Big One » en 1906 [53]	73
Figure 2. 3: Pagode du temple Hōryū-ji au Japon [3] et représentation des dispositifs de contrôle des vibrations de la pagode [60]	77
Figure 2. 4: Qasr al-Bint [72] et modèle 3D du temple[73]	79
Figure 2. 5: L'appareillage des blocs de pierre dans les constructions Machu Picchu, Pérou [74]	80
Figure 2. 6: Typologie constructive d'un mur chaîné avec des rondins de thuya [71]	82
Figure 2. 7: Chapiteau articulé et plancher en bois avec une superposition de deux rondins, la Casbah d'Alger [75]	82

Figure 2. 8: Gravure montrant la ville de Djedjelli avant et après le séisme des 21-22 Aout 1856 [79]	86
Figure 2. 9: L'effondrement des structures en béton armé, séisme de Chlef de 1954 [40]	86
Figure 2. 10: Effondrement des cités d'habitations suite au séisme de Boumerdes en 2003 [38]	87
Figure 2. 11: Bâtisses menacées d'effondrement, séisme de Mila, 2020 [38]	87
Figure 2. 12: Sismicité de l'Algérie en considérant les événements d'une magnitude $M \geq 5,0$. Les cercles noirs et gris représentent les événements de 1900 à 2013. Les carrés blancs représentent les événements de 1365 à 1900 [85]	88
Figure 2. 13: Cartes de zonage sismique AS55 et RPA 99/2003	94
Figure 2. 14: Image prise dans le chantier Climat de France, dans laquelle figure les poteaux parasismiques	96
Figure 3. 1: Vue aérienne des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul (simple confort et confort normal) [84, 94]	104
Figure 3. 2: Les projets d'habitat à loyer modéré HLM de la municipalité d'Alger : (a) Château-neuf, cité de la maison familiale par les architectes Guion, Vieilhescaze et Mercier, (b) Cité des fonctionnaires par l'architecte Lugan, (c) Cité La Concorde à Birmandre [93]	107
Figure 3. 3: Etat antérieur du site Diar el Mahçoul, côté simple confort (les bidonvilles de la cité Mahieddine)[106]	109
Figure 3. 4: Affiche publicitaire des pieux FRANKI [108]	111
Figure 3. 5: Site d'implantation de Diar es Saada, extrait de la revue « Alger », 1954 [106]	114
Figure 3. 6: Site d'implantation de Diar el Mahçoul, avec la villa des Arcades au premier plan [106]	114
Figure 3. 7: Plan et schéma de types d'immeubles de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul	116
Figure 3. 8: Plan représentatif des équipements publics de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul	118
Figure 3. 9: Plan représentatif des espaces publics de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul	120
Figure 3. 10: Carte de la ville d'Alger avec la localisation des éléments environnants	121
Figure 3.11: Vue en façade et en coupe du dispositif de ventilation spécial Pouillon	122
Figure 3. 12: Plan d'action du quartier de Diar el Mahçoul proposé par Behloul [114]	125
Figure 3. 13: Les différentes formes de dégradation et les pathologies apparentes identifiées	127
Figure 3. 14: Les modifications apportées aux deux cités « Diar es Saada et Diar el Mahçoul (photos prises en 1959 et juillet 2017)[69]	129
Figure 3. 15: Opérations de sablage des façades des grands ensembles : (a) Diar es Saada et (b, c) Diar el Mahçoul (photos prises en septembre 2018)	131
Figure 3. 16: Localisations et traces des surfaces inférées des failles [84]	133
Figure 3. 17: Plan des différentes plateformes d'implantation la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul	135
Figure 3. 18: Les critères de sélection des bâtiments de Diar es Saada	138

Figure 4. 1: Synthèse des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants [122]	149
Figure 4. 2: Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée [129]	151
Figure 4. 3: Classification des dommages pour les bâtiments en maçonnerie, d'après [EMS98]	152
Figure 4. 4: Forme typique des courbes de fragilité pour les dommages légers, modérés, étendus et complets (FEMA, 1999) [108]	156
Figure 4. 5: Principe de la méthode des forces de remplacement [138]	160
Figure 4. 6: Principe de la méthode Pushover [139]	161
Figure 4. 7: Principe de la méthode dynamique non-linéaire [132]	162
Figure 5. 1. Typologies des maçonneries (monolithique, blocs autostables, à trumeaux, mixte: murs et ossature)[147]	175
Figure 5. 3: Méthodologie d'évaluation de la performance sismique de la tour Totem	177
Figure 5. 4: Représentation des modèles A et B	179
Figure 5. 5: Configuration en plan et vue d'ensemble de la tour Totem	180
Figure 5. 6: Représentation du sous-sol en plan et en élévation	181
Figure 5. 7: Vues en plan et coupe verticale de la tour	182
Figure 5. 8: Vue en plan et détail des fondations	183
Figure 5. 9: Les systèmes constructifs de la tour	185
Figure 5. 10: La disposition et les dimensions de la brique spéciale Pouillon	186
Figure 5. 11: Détails du plancher spéciale Pouillon	187
Figure 5. 12: Les façades de la tour et l'appareillage de pierre pour un niveau	189
Figure 5. 13: Désordres constatés sur l'enveloppe de la tour	191
Figure 5. 14: Les modifications apportées à la façade de la tour	192
Figure 5. 15: Les modifications apportées à la terrasse de la tour	192
Figure 5. 16: Formes d'altération observées sur la pierre	193
Figure 5. 17 : Représentation du spectre de réponse élastique S_a/g	195
Figure 5. 18: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de chaque modèle A et B	198
Figure 5. 19: Les résultats de l'analyse des contraintes et des forces internes, comparant l'influence du sous-sol dans les modèles A et B	201
Figure 5. 20: Vue en plan et modèle A et B de la tour modélisé par TreMuri	204
Figure 5. 21: Représentation du spectre de réponse élastique S_a/g	205
Figure 5. 22: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de la tour avec le logiciel TreMuri	207
Figure 5. 23. Les résultats de l'analyse avec TreMuri	208
Figure 6. 1: Emplacement des bâtiments R, E et L de la cité de Diar es Saada	215
Figure 6. 2: Méthodologie d'évaluation de la performance sismique : bâtiments E, R et L	216
Figure 6. 3: Configuration en plan, en élévation et vue d'ensemble de bâtiment R	218
Figure 6. 4: Vue en plan, en coupe et 3D des fondations bâtiment R[19]	219
Figure 6. 5: Les systèmes constructifs de bâtiment R	219

Figure 6. 6: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment R (bloc 1 et 2)	222
Figure 6. 7: Les types de disposition des joints dans les immeubles de Pouillon	223
Figure 6. 8: Détails constructifs des joints, immeubles de Diar es Saada	224
Figure 6. 9: Justification de la largeur de joint sismique selon RPA99/2003	225
Figure 6. 10 : Vue en 3D de bâtiment R modélisé par TreMuri	226
Figure 6. 11: Courbe Pushover de bâtiment R, dans les directions principales (X et Y) avec le logiciel TreMuri	228
Figure 6. 12. Les résultats de l'analyse avec TreMuri	228
Figure 6. 13: Configuration en plan, en élévation et vue d'ensemble de bâtiment E	231
Figure 6. 14: Vue en plan et en coupe des fondations bâtiment E [19]	232
Figure 6. 15: Les systèmes constructifs de bâtiment E	232
Figure 6. 16: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment E (bloc 1 et 2)	235
Figure 6. 17: Vue en 3D de bâtiment E modélisé par TreMuri	237
Figure 6. 18: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de bâtiment E avec le logiciel TreMuri	239
Figure 6. 19. Les résultats de l'analyse avec TreMuri	240
Figure 6. 20: Configuration en plan et vue d'ensemble de bâtiment L	243
Figure 6. 21: Vue en plan et la 3D des fondations bâtiment L [19]	243
Figure 6. 22: Les systèmes constructifs de bâtiment L	244
Figure 6. 23: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment L	246
Figure 6. 24: Vue en 3D de bâtiment L modélisé par TreMuri	247
Figure 6. 25: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de bâtiment R avec le logiciel TreMuri[11]	248
Figure 6. 26. Les résultats de l'analyse avec TreMuri	249
Tableau 1. 1: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en France [3, 19]	35
Tableau 1. 2: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en Algérie [19]	40
Tableau 1. 3: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en Iran [19]	44
Tableau 2. 1: Liste des grands séismes historiques enregistrés dans l'Algérie depuis 419	86
Tableau 2. 2: Etude comparative entre les recommandations parasismiques AS55 et le règlement parasismique Algérien RPA99/2003	91
Tableau 3. 1: Etude comparative des techniques constructives adoptées dans les projets de Pouillon et le code parasismique algerien RPA 99/2003	139
Tableau 5. 1: Performances mécaniques de la pierre de Fontvieille et d'Estailade	185
Tableau 5. 2: Propriétés mécaniques des matériaux de construction	190
Tableau 5. 3: Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique	195
Tableau 5. 4: Les résultats des déplacements structurels pour le modèle A et B	200
Tableau 5. 5 : Caractéristique mécaniques pour différents types de maçonnerie	203

Tableau 5. 6 : Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique	204
Tableau 5. 7: Valeurs de D_{max} et D_u pour les modèles A et B	207
Tableau 5. 8: Les résultats des déplacements de la structure avec et sans la loggia	209
Tableau 6. 1: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment R.	223
Tableau 6. 2: Valeurs de D_{max} et D_u pour les blocs 1 et 2.	229
Tableau 6. 3: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment E.	236
Tableau 6. 4: Valeurs de D_{max} et D_u pour les blocs 1 et 2.	241
Tableau 6. 5: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment L.	247
Tableau 6. 6: Valeurs de D_{max} et D_u pour le batiment L.	250

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pendant la dernière décennie qui précède l'indépendance de l'Algérie, le paysage urbain de la ville d'Alger a été marqué par l'intervention de nombreux architectes et urbanistes français, qui ont essayé à travers leurs œuvres architecturales de produire de nouvelles formes d'habiter et de donner un nouvel élan à l'architecture. Dans un contexte de pénurie en matière de logements, la nécessité de reloger la communauté musulmane des bidonvilles et l'urgence de construire en quantité, vite et à moindre coût, sont des conditions à satisfaire dans l'immédiat.

Pour combler ces besoins et grâce à la volonté du maire d'Alger de cette époque Jacques Chevalier, l'architecte Fernand Pouillon a pu marquer le contexte algérien par de nombreuses œuvres architecturales. Effectivement, contrairement aux HLM de l'époque qui se construisaient cher et dans des longs délais, il a su maintenir non seulement les coûts et les délais, mais aussi la qualité et le confort des habitants.

Pouillon a réalisé pas moins d'une centaine de projets qui varient entre cités d'habitations, cités universitaires, hôtels, villas et complexes touristiques, s'étalant sur une grande partie du territoire algérien, dans la période qui date de 1953 jusqu'à 1985. En Algérie, son œuvre est immense ; des milliers de logements avant l'indépendance (1953-1957) et la plus grosse partie des complexes touristiques après l'indépendance (1965-1985).

Durant la période entre 1953 et 1957, il est surtout connu pour les immeubles et constructions avant-gardistes qu'il a construit à Alger, une ville qui a bénéficié d'un vaste programme de construction de logements sociaux. Parmi ces constructions, on peut mentionner notamment les ensembles : Diar es Saada (1953) et Diar el Mahçoul (1954). Ces derniers, malgré le manque d'entretien, sont toujours debout et témoignent jusqu'à nos jours de la puissance de son architecture monumentale.

Sa production se distingue à cette époque par son caractère expérimental, tant en matière de gestion de chantier que de création architecturale et d'innovations des techniques constructives, à la fois en avance et en retrait de son

temps, ceci dans le but d'assurer une protection parasismique et offrir une meilleure résistance aux constructions. Des immeubles avec des structures traditionnelles et révolutionnaires. Ils ne comportaient aucune ossature, seules la pierre et les briques porteuses les soutenaient.

Au moment où le béton était roi, Pouillon a choisi de construire avec la pierre, un matériau qui répond bien à ses exigences, à savoir construire vite, moins cher et avant tout offrir une meilleure qualité aux usagers. La pierre, un matériau omniprésent dans ses réalisations, utilisé dans ses différentes formes que ce soit monolithe ou banché. Selon lui, la pierre est le seul matériau qui vieillit correctement que d'autres matériaux modernes tels que le béton.

L'architecture de Fernand Pouillon en Algérie a déjà été explorée ces dernières années par de nombreux chercheurs. Ses œuvres ont fait objet de plusieurs articles et de thèses. Parmi les travaux ayant traité ce sujet, nous citons ci-après les plus représentatifs d'entre eux qui ont largement contribué à mener à bien cette étude : la thèse de Myriam Maachi Maiza en 2002, portant sur les œuvres de Pouillon situées dans le Sud-ouest algérien, suivi par la thèse de Belhloul Abdelhamid en 2008 sur la réhabilitation des grands ensembles de Diar el Mahçoul, puis celle de Rym Merzelkad en 2010 portant sur l'ensemble immobilier « climat de France », ses recherches traitent de la composition urbaine et architecturale, et récemment en 2018 la thèse de Mohamed Tehami intitulée « la qualité architecturale entre conception et construction : cas des cités d'habitation algériennes de Fernand Pouillon ». Pourtant, l'aspect technique (matériaux, structure, systèmes constructifs et résistance sismique), n'a pas davantage été abordé et reste inédit.

Le thème proposé dans ce travail de recherche a eu comme origine la déclaration de Pouillon[1]. En effet, il a déclaré dans une interview que ses bâtiments en murs et cloisons porteurs tiendront beaucoup plus le coup que les bâtiments en béton armé pendant les tremblements de terre[2]. Ceci est attesté par lui lorsqu'il affirme que le système de construction grâce à l'entrecroisement des blocs de pierres et des briques "spéciales Pouillon" favorise la stabilité de la structure monolithique formée par les murs et les cloisons en briques semi-porteuses disposées verticalement[2]. Ce système structurel a été employé dans

la réalisation des grands ensembles d'Alger ; et ceci bien avant l'évolution des techniques de conception parasismique et la création du centre national de la recherche appliquée en génie parasismique.

C'est ce qui a motivé, notre questionnement de départ, à savoir :

- Les techniques constructives utilisées par Fernand Pouillon ont-elles présenté une résistance face aux séismes ?
- Quel est l'état actuel de conservation de la structure, après 66 ans d'occupation par les habitants ?
- Peut-on qualifier l'architecture de Fernand Pouillon de parasismique ?

Ce travail porte sur une question d'actualité. En effet, avec la croissance et l'accélération des risques majeurs liés aux catastrophes naturelles en particulier le séisme, l'évaluation de la résistance sismique des constructions réalisées avant l'apparition du premier code parasismique algérien AS55 nous paraît importante. L'Algérie a de tout temps été soumise à une activité sismique modérée avec comme résultats des pertes humaines et matérielles relativement importantes. Le séisme du 10 octobre 1980 qui a dévasté la ville d'El Asnam et sa région, à peine 26 ans après celui qui, en 1954, avait frappé au même endroit, a fait sérieusement prendre conscience de l'importance du risque sismique en Algérie. La ville d'Alger quand a elle subi l'impact des séismes qui ont affectés les régions avoisinantes, telle que la Mitidja ou la région de Boumerdès.

Depuis l'événement du 10 octobre 1980, la recherche de la réduction des effets d'un séisme s'est inscrite dans les préoccupations scientifiques, politiques et gouvernementales. Des mesures d'organisation de législation de formation et d'information ont été prises. Un effort modeste mais significatif est fourni pour prendre en charge ce phénomène naturel. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question. Cela à travers des recherches effectuées par les ingénieurs et les techniciens, dont le but est d'évaluer la vulnérabilité des constructions et réduire le risque sismique.

Compte tenu de l'intérêt de l'évaluation sismique du patrimoine bâti, on assiste donc à une prise de conscience remarquable à ce sujet. En effet, on retrouve en Europe, particulièrement en Italie et en Suisse, de nombreuses études

sur la conservation des bâtiments historiques en maçonnerie et l'évaluation de leur vulnérabilité sismique, mais en Algérie, la recherche sur la résistance sismique des structures patrimoniales et en particulier des constructions en maçonnerie est relativement récente. Si les nouvelles structures répondent à des normes parasismiques, en vigueur dès 1955, la ville d'Alger est constituée d'un nombre important de bâtiments plus anciens, datant de la période coloniale mais aussi des périodes ottomane et médiévale.

C'est dans cette optique que vient s'inscrire notre travail de recherche en mettant en évidence l'architecture parasismique de Fernand Pouillon. Et cela, à travers l'évaluation de la résistance sismique des systèmes constructifs révolutionnaires employés par Pouillon dans la réalisation des grands ensembles d'Alger, notamment Diar es Saada et Diar el Mahçoul, qui sont réalisés avant l'apparition du premier règlement parasismique spécifique AS 55. La pierre banchée, les murs en bloc de pierre pré-taillée de Fontvieille et les cloisons porteuses en briques de terre cuite appareillée verticalement, un ensemble d'inventions mises au point pour parvenir à un prix bas, un délai aussi vite que possible avec une meilleure qualité.

Afin de répondre à la problématique posée, nous avons construit les hypothèses suivantes :

- Malgré les nombreuses conditions qu'il a fallu satisfaire durant la guerre de libération : l'urgence et le besoin de concevoir un immense programme de logements, procurer le meilleur confort pour les usagers, à des prix aussi bas que possible et à des délais de réalisation très courts, l'architecte français Fernand Pouillon a su maîtriser le domaine de l'engineering et mettre au point une architecture parasismique en Algérie.
- La résistance sismique dans les réalisations de Fernand Pouillon à Alger avant 1955, est assurée à travers l'intégration de certains matériaux et systèmes constructifs.
- Le système structurel employé favorise la stabilité de l'œuvre contre les efforts horizontaux, et ceci grâce à l'entrecroisement des blocs de pierres et des briques pour former les murs et les cloisons et le recours à des murs de refend connectés à la maçonnerie.

- Les cloisons porteuses en briques de terre cuite spéciales Pouillon appareillées verticalement accroissent la capacité à l'écrasement et procurent aux constructions une résistance face aux séismes.

De ce fait, les objectifs fixés par cette recherche se résument comme suit :

- Apporter de nouvelles connaissances sur l'architecture de Pouillon en Algérie.
- Redécouvrir les techniques constructives révolutionnaires spéciales Pouillon, qu'il a employé dans la réalisation des grands ensembles d'Alger.
- Vérifier le comportement sismique des techniques constructives des grands ensembles.
- Mettre en évidence l'architecture parasismique de Pouillon.

Compte tenu des objectifs auparavant fixés et afin de vérifier les hypothèses tracées par cette recherche, nous adopterons une approche logique et cohérente, qui regroupe trois phases principales : théorique, pratique et analytique. La première phase théorique sera consacrée aux recherches documentaires, à établir un état de l'art des connaissances, et à la consultation des fonds d'archives en Algérie et en France, pour cerner notre thème de recherche. La deuxième phase pratique, d'avantage de terrain sera destiné aux observations in-situ : la reconnaissance structurelle, le diagnostic, et l'expertise des bâtiments, afin d'établir un relevé détaillé des pathologies et désordres. La troisième phase analytique sera entièrement fondée sur l'usage des logiciels de calculs courant dans la modélisation numérique des structures en maçonnerie. Cette phase servira pour déterminer d'une manière plus précise le comportement des bâtiments sous l'effet d'une action sismique avec des modélisation utilisant le SAP2000 et 3MURI comme logiciels des stuctures.

Ce travail de thèse par la participation à des événements scientifiques a donné naissance à plusieurs publications dont les principales sont la publication d'un article de rang A selon la catégorisation DGRSDT 2020 publié dans le journal « Journal of Building Engineering » et deux autres de rang B actes de proceedings publiés dans « International Journal of Conservation Science IJCS et REHABEND 2018».

Le présent document se subdivise en six chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons d'abord passer en revue le parcours de l'architecte Fernand Pouillon et ses années de travail en France, en Algérie et en Iran. Pouillon demeure l'un des architectes français qui a le plus produit en termes de projet architecturale et le plus novateur en France et en Algérie. Par conséquent, il est important de mettre l'accent sur sa carrière. Ensuite, nous présentons dans la deuxième partie du chapitre, les différents matériaux et systèmes constructifs innovants employés dans la réalisation de la majorité de ses projets. Pour finir, nous ferons une lecture des rapports de chantier et la réglementation parasismique algérienne.

L'objet de ce chapitre n'étant pas de traiter toute la production architecturale de Pouillon, depuis 1935 jusqu'à 1982, vu la diversité et le nombre important des études effectuées sur ce sujet, mais plutôt d'avoir une vision globale sur l'ensemble de ses œuvres architecturales.

Le contenu du deuxième chapitre est structuré en trois parties. Tout d'abord, les événements majeurs ayant contribué à la croissance du génie parasismique jusqu'au jour d'aujourd'hui seront brièvement discutées. La section suivante portera sur l'activité sismique en Algérie. Elle comportera une liste sommaire des événements sismiques majeurs ayant affecté le pays, l'importance du risque sismique en Algérie, les faits récents et les progrès réalisés, ainsi qu'une brève discussion sur l'évolution de la réglementation parasismique. Dans la dernière partie, le choix du cas d'étude est déterminé, en se basant sur les dates d'apparition des premiers codes parasismiques Algériens.

Le chapitre trois est consacré à l'analyse de l'aspect architectural parasismique des grands ensembles d'Alger. D'abord, on commence par une présentation des cas d'étude et le contexte de réalisation. Ensuite, une analyse approfondie sera faite, suivie d'un diagnostic d'état de conservation de la structure. Pour terminer par une vérification de l'application des principes de la conception parasismique dans les bâtiments.

Différentes méthodes de modélisation et d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en maçonnerie seront présentées dans le

chapitre quatre. Préalablement, un état de l'art sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments, qui sont développés jusqu'à présent sera énuméré. Dans un second temps, une synthèse des modèles d'analyse sismique dynamique et statique dans les codes parasismiques algériens seront analysés. Enfin, nous concluons par les expériences algériennes et étrangères dans le domaine la modélisation numérique des structures en maçonnerie.

Le chapitre cinq quand à lui a été réservé à, l'analyse numérique détaillée d'un des plus importants immeubles de Pouillon. Sur la base des chapitres précédents (notamment le chapitre 4), une méthodologie d'analyse sera mise en place afin de comprendre le comportement sismique de la tour. Nous aborderons dans ce travail surtout l'aspect structurel, ainsi que l'évaluation de sa vulnérabilité, tout en utilisant deux méthodes de calcul différentes dynamique et statique. Ce chapitre abordera trois points principaux, résumés comme suit : présentation de la méthodologie d'analyse, description et modélisation de la tour Totem, et discussion des résultats et actions à entreprendre.

Le chapitre six se consacrera à l'analyse numérique détaillée des autres bâtiments de l'ensemble Diar es Saada, à savoir les bâtiments de petite, moyenne et grande hauteur, présentant une forme isolée, linéaire ou en L. ainsi, élargir notre champ d'études. Après la modélisation de l'immeuble tour « D », et en se basant sur la méthodologie d'analyse numérique détaillée dans le chapitre cinq, dans ce chapitre, nous allons tenter de vérifier le comportement sismique des bâtiments R, E, et L. Les points abordés seront la modélisation numérique, les résultats obtenus et la discussion des résultats et actions à entreprendre. Ce chapitre donnera une vision plus globale sur le comportement sismique des différentes typologies de l'ensemble des bâtiments en maçonnerie de Diar es Saada.

Pour conclure, il est important de rappeler que l'intérêt de cette recherche est d'arriver à répondre au questionnement initial, et ainsi confirmer ou infirmer la déclaration de Pouillon en se basant sur les différents outils de recherche.

CHAPITRE 01

L'ARCHITECTURE ATYPIQUE DE FERNAND POUILLON

1. Introduction

Connu pour son architecture avant-gardiste, l'architecte français Fernand Pouillon traça sa voie dans les années cinquante en concevant de nombreuses œuvres architecturales à travers le monde, notamment en Algérie. Le caractère expérimental, la gestion du chantier et l'innovation technologique, le particularisent des architectes de son temps. Sa maîtrise du domaine et sa production architecturale font de lui l'architecte le plus sollicité par le gouvernement français pendant et après la Seconde Guerre Mondiale. Les grands ensembles d'Alger en représentent un exemple remarquable.

Longtemps marginalisé, son héritage suscite aujourd'hui un intérêt particulier parmi les chercheurs scientifiques, et sa doctrine est de plus en plus enseignée dans les écoles d'architecture. Plusieurs de ses réalisations sont labellisées patrimoine remarquable du XXe siècle[3]. Et récemment cinq hôtels de sa production architecturale algérienne ont été classés patrimoine national. L'aspect architectural, urbain, paysager, social et constructif de ses œuvres fait l'objet d'innombrables études scientifiques. Ces dernières, témoignent largement de son génie constructif et création architecturale.

2. Fernand Pouillon : le parcours d'un architecte visionnaire

2.1. Repères bibliographiques et dates clefs

Cette liste bibliographique a été établie en se basant sur les données rapportées par Bernard Félix-Dubor [4] et le site web des éditions d'Architecture [5]. Brièvement, le parcours de Pouillon se résume comme suit :

- 1912 : Naissance de Pouillon à Cancon (Lot-et-Garonne) en France.
- 1929-1934 : Formation à l'école des Beaux-arts de Marseille, puis à l'école de Paris.
- 1934 : Réalisation du premier immeuble d'habitation à Aix-en-Provence, à l'âge de 22 ans.

- 1934 à 1942 : Obtention de diplôme d'architecte.
Réalisation de quelques villas privées.
Association avec l'architecte Eugène Beaudoin aux aménagements urbains de Marseille.
- 1944 à 1950 : Association avec René Egger ; Opération des immeubles d'habitation « La Tourette » à Marseille ; Réalisation des facultés, bibliothèques et résidences universitaires, des écoles et lycées, une consigne sanitaire, un stade, une cité administrative, l'aérogare de Marignane, un hôtel de police, l'usine Nestlé.
- 1950 à 1953 : Association avec Auguste Perret, et la reconstruction du vieux port de Marseille.
- 1953 : Architecte en chef de la ville d'Alger.
- 1953-1958 : Réalisation de 03 cités d'habitation à Alger. Diar es Saada (750 logements), Diar el Mahçoul (1800 logements), Climat de France (3500 logements).
- 1954-1961: Rencontre avec le Shah d'Iran ; Réalisation de l'état-major de l'empire Iranien et l'Institut ; Géographique à Téhéran ; Réalisation de deux gares ferroviaires, une à Machad et l'autre à Tabriz.
- 1957 à 1961 : Réalisation de quatre opérations d'habitation à Paris : la résidence Victor Hugo (282 logements) à Pantin, la résidence du stade Buffalo (466 logements) à Montrouge, le Point du Jour (2260 logements) à Boulogne-Billancourt, la résidence Le Parc (2635 logements) à Meudon-la-Forêt.
- 1961 : Scandale de l'affaire Pouillon/CNL et l'arrestation de Pouillon.
- 1966 à 1984 : Le retour en Algérie et la réalisation de 90% des projets du ministère du tourisme algérien.
Restauration du château de Belcastel en Aveyron en France.
- 1971 : Amnistié par Georges Pompidou.
- 1980 : Conseiller de l'Ordre des architectes à Paris.
- 1982 : Lauréat de la Biennale de Venise.
- 1984 à 1986 : Retour en France et la création de l'Agence Fernand Pouillon à Paris et atelier de dessin dans le château de Belcastel.
- 1985 : Nommé officier de la légion d'honneur par François Mitterrand.

- 1986 : Décès de Pouillon dans le château de Belcastel à Aveyron.

2.2. Les quatre périodes d'une carrière

Si on analyse profondément la carrière de Pouillon, on se rendra compte que chaque période de son parcours est confrontée à des problèmes spécifiques, et constitue un défi pour l'architecte. La carrière de Pouillon peut être répartie en quatre périodes : l'expérience marseillaise, Algérienne et Iranienne, parisienne et le retour en Algérie après l'indépendance.

Sur les quatre périodes que l'on a pu distinguer, le travail de Fernand Pouillon va être au niveau architectural et urbain, d'une très forte constance : de Marseille à Alger, d'Alger à Patin, Boulogne à Timimoune, nous retrouverons les mêmes principes, ainsi que les mêmes préoccupations.

2.2.1. 1936-1953 : l'expérience marseillaise

Une première période (1936-1953) est celle des travaux de réalisation des immeubles d'habitation dans la région d'Aix en Provence et Marseille avec comme principale œuvre, l'achèvement de la reconstruction du vieux port de Marseille sous les ordres de Beaudouin. Il s'agit de l'époque des chantiers de la reconstruction qui ont suivi la deuxième guerre mondiale.

Au-delà des problèmes liés à la réparation des dommages causés par la Deuxième Guerre mondiale, deux générations d'architectes se heurtent [4]: les anciens architectes qui ont longtemps occupé des fonctions académiques comme Roger Henri ou André Leconte, qui interviennent successivement pour la reconstruction du vieux port de Marseille (1947-1953), et l'architecte Pouillon récemment diplômé, qui n'a pas encore réalisé d'œuvres remarquables et qui ne veut certainement pas manquer l'occasion de s'affirmer devant ses aînés.

Cette période marseillaise s'achève en 1953 au moment même où Pouillon met fin à sa collaboration avec l'architecte René Egger, qui était son partenaire depuis 1944.

2.2.2. 1953-1957 : l'expérience Algérienne et Iranienne

Une deuxième période (1953-1957) est celle de ces travaux en Algérie, avec en particulier la réalisation des trois grands ensembles d'habitation d'Alger : Diar es Saada, Diar el Mahçoul et Climat de France. Parallèlement aux chantiers d'Alger, cette période de quatre ans a également connu la construction des gares de Tabriz et Mahad en Iran.

Il est important de rappeler, que Pouillon a été invité par le maire d'Alger de l'époque Jacques Chevallier suite à la réussite du projet de la reconstruction de la ville de Marseille. Il avait initialement pour mission de reloger les habitants des bidonvilles et aménager la ville d'Alger de façon exemplaire. Dans un contexte de pénurie en matière de logements, la nécessité de reloger la communauté musulmane des bidonvilles et l'urgence de construire en quantité, vite et à coût modéré, sont des conditions à satisfaire dans l'immédiat.

Contrairement à ces sites expérimentaux en Iran, ceux en Algérie lui ont permis d'atteindre son objectif et de développer à l'échelle urbaine les principes d'organisation et de rationalisation des chantiers, ainsi que les principes de construction et d'architecture qu'il avait déjà commencé à expérimenter à Aix-en-Provence et à Marseille.

2.2.3. 1957-1962 : l'expérience parisienne

Une troisième période (1957-1962) est celle des travaux de Pouillon dans la périphérie parisienne, à Patin, à Montrouge, à Boulogne, à Meudon la forêt. Ce fut aussi le moment du développement des activités de C. N. L (Comptoir National du Logement) dont les débuts étaient en 1954. Il va tenter à travers la création de ce comptoir de promouvoir et d'opérer à une échelle encore plus grande et à des coûts de plus en plus bas. Cette période, bien entendu, se terminera par l'arrestation de Fernand Pouillon le 5 mars 1961. La période parisienne sera courte mais intense en termes de production architecturale.

2.2.4. 1965-1984 : le retour en Algérie après l'indépendance

Une quatrième période (1965-1984), la plus longue, qui consiste à son retour en Algérie, après sa sortie de prison en 1964. C'est la période pendant laquelle il

travaille particulièrement en Algérie et supervise de nombreuses opérations de réalisation des complexes touristiques à la faveur du ministère du tourisme. Et travaille parallèlement au nord et au sud de l'Algérie. Son intervention s'inscrit dans une politique globale de développement des infrastructures du secteur du tourisme, dans l'Algérie post indépendance, pilotée par le président de la République Houari Boumédiène.

3. Formations et sources d'inspiration : les prémices d'une architecture « Pouillonienne » à travers les écrits

3.1. Histoire de l'architecture comme une source d'inspiration

Lorsqu'il s'agit d'aborder la question du patrimoine comme modèle, l'héritage architectural de Pouillon apparaît comme un exemple emblématique. Le caractère unique de ses œuvres réside dans la dualité entre l'architecture traditionnelle et moderne, qui caractérise son approche. Dans ses travaux, Pouillon s'inspire des modèles des époques antérieures qu'il interprète dans le contexte actuel, et il adopte entièrement le progrès technologique de son époque.

À cet égard, Zeynep Çelik [6] a décrit dans son étude sur le colonialisme et la forme urbaine dans la ville d'Alger, l'architecture de Pouillon comme « un hybride moderniste, a pris de l'héritage local et de l'antiquité classique ».

Parmi ses références dans l'architecture ancestrale, on retrouve au premier rang son admiration pour l'architecture médiévale, en particulier les monuments de la période romaine et cistercienne [7]. L'abbaye de Thoronet décrit dans son roman les pierres sauvages [8] est le meilleur modèle de l'époque.

L'architecture médiévale se revendique dans les projets de Pouillon par le respect de la tradition et la réinterprétation des méthodes de constructions anciennes dans le contexte de son époque moderne.

À cela, s'ajoute l'architecture classique, modèle qui a sans aucun doute inspiré l'architecte, et en particulier l'histoire de la ville d'Aix-en-Provence, qui a exposé dans son roman ordonnances [9]. Ce dernier est un recueil de relevés et dessins de la ville. L'esprit du classicisme est fortement présent dans les projets qu'il a réalisés dans cette ville, et se traduit dans l'utilisation de la pierre et des

éléments tels que ; les fontaines, arcades, places... dans la réalisation de la cité de 200 logements à Aix-en-Provence. Il montre également une grande admiration pour l'architecture de Claud-Nicolas Ledoux (1739-1806) [7]; un architecte visionnaire des années 1770 et l'un des principaux architectes du style néoclassique.

Après son arrivée en Algérie, l'architecture de la Casbah d'Alger s'est ajouté à son répertoire des villes historiques exemplaires. En effet, on retrouve une énorme ressemblance entre l'organisation spatiale de la Casbah et celle des grands ensembles de Diar es Saada et de Diar el Mahçoul.

« Alger historique, Alger de la Casbah, est une ville marquée par l'occupation turque et influencée par l'architecture sarrasine d'Espagne. Dès mon arrivée, je n'avais découvert en fait d'architecture traditionnelle, que les remparts édifiés par les deys de la Porte et, à l'intérieur de la vieille ville, la gentillesse baroque et chatoyante inspirée par les artistes omeyyades de Séville et de Grenade. C'est pour cela que les cités de Diar es Saada et de Diar el Mahçoul sont en partie constituées par les murailles monumentales des forts turcs tandis qu'à l'intérieur, les patios, les places et les jardins rappellent l'Espagne avec les céramiques, les portiques, les fontaines et les cascades. Les bougainvillées grimpent aux murs de pierre. » (mémoires d'un architecte).

Comme Pouillon l'explique dans son interview avec Hélène Roy, contrairement aux architectes de la même génération, tels que le Corbusier, il a su rester à l'écart de l'architecture des revues académiques, qui est le principal vecteur de leurs projets.

« Je n'ai pas trouvé mon inspiration dans les livres ni même dans des exemples d'architecture arabe, comme on le croit ; je l'ai trouvée très souvent dans la nature, dans le paysage algérien. » [10], Répond-t-il au questionnement d'Hélène Roy.

Ajoutant à cela, son entretien avec Petruccioli: *« Les architectures sages n'ont jamais d'époque » [11].*

Néanmoins, Pouillon a toujours été un lecteur assidu du livre « Histoire de l'architecture » d'Auguste Choisy (1841-1909) [12]. Il reprend de l'écrit, à titre

d'exemple, le principe que les Grecs utilisaient dans la disposition des bâtiments pour rompre la monotonie des alignements, et l'appliqua dans la conception de la bibliothèque universitaire Saint-Charles à Marseille.

3.2. Influence des architectes de son époque

Pouillon s'est également inspiré de l'architecture de son temps, et a emprunté les idées d'autres architectes. Contrairement à sa déception de son parcours académique, allant jusqu'à dire qu'il n'avait pas appris grandes choses durant son parcours académique à l'École des Beaux-Arts. Il a constamment mis en avant l'apport qu'avait représenté pour lui l'expérience apprise concrètement sur les chantiers de construction auprès de ses collaborateurs August Perret (1874-1954) et Eugène Beaudouin (1898-1983) [13-15], qui ont grandement contribué à sa carrière professionnelle.

– L'enseignement d'Eugène Beaudouin

Eugène Beaudouin est l'un des premiers architectes à avoir fortement influencé et marqué la carrière de Pouillon [7]. Ce dernier affirme dans ses mémoires que la grande leçon qu'il a appris de ce dernier c'est l'art de la composition d'ensembles urbains monumentaux. Il a toujours revendiqué l'importance de l'enseignement qu'il reçut de Beaudouin, lors de sa collaboration pour l'établissement du plan de Marseille, au début de sa carrière en 1942. Il y a une grande ressemblance entre les opérations de logements de Pouillon et œuvres de Beaudouin tels que ; la disposition des bâtiments, la centralité des espaces, le jeu sur les gabarits, alternance tours et bâtiments de plus bas gabarit, et la disposition des pleins et de vides sur les façades.

Fernand Pouillon témoigne dans son interview avec Petruccioli [11] de l'impacte qu'a eu Beaudouin sur sa carrière professionnelle. Ce dernier, est l'un des personnages-clefs de sa formation architecturale et urbaine. Et, il n'hésite pas dans ses mémoires de le décrire comme étant le seigneur de la profession.

« ...j'ai rencontré très fortuitement un architecte français qui a eu une grande influence sur moi et qui m'a embauché dans son équipe ; il s'appelait Eugène Beaudouin, un grand patron, excellent professeur ; c'est lui qui m'a fait un peu découvrir ce qu'était l'architecture, car n'étaient pas les architectes que j'avais

rencontrés jusque-là qui m'auraient fait comprendre quoi que ce soit. Avec lui, j'ai compris beaucoup de choses et je me souviens encore de son enseignement qui était hautain, détaché des choses matérielles ; ce n'était pas un praticien lui, alors que moi, j'étais déjà un praticien, mais j'avais besoin de connaître cela. Ce n'est peut-être pas grâce à lui que je suis devenu l'architecte que je suis aujourd'hui, mais c'est lui qui m'a fait découvrir des choses qui m'étaient complètement, étrangères. Je lui dois donc beaucoup de reconnaissance. Il est encore vivant actuellement, il est mon aîné de quelque quinze ans et je lui souhaite longue vie » [11].

« Seul Beaudouin de passage en Algérie, seigneur de la profession, maître incontesté, me fit l'honneur d'une visite. Jamais je n'éprouvai de plus grand plaisir qu'en recevant les louanges de celui auquel je devais tant » [16] , écrit l'architecte dans ses mémoires.

– L'enseignement d'Auguste Perret

En 1950, Pouillon s'associe avec Auguste Perret, l'un des premiers techniciens spécialistes du béton armé de l'époque, pour la reconstruction du vieux port de Marseille. Malgré leur divergence d'approche sur le rapport à l'histoire et à l'architecture régionale, la production des deux architectes présente de nombreuses similitudes, telles que ; les formes strictes du classicisme structurel, le rythme assuré par les pilastres, austérité des formes, la rigueur dans l'agencement des espaces, des technique et matériaux issus de l'industrialisation.

« J'ai travaillé avec des hommes comme Beaudoin, qui est un admirable architecte sur le plan de la composition, de l'aménagement des paysages, des jardins, etc., et puis, j'ai été associé à Perret pour certaines opérations, les hangars de Bobigny, par exemple. Je l'admirais beaucoup. Si l'on me cherche une filiation, ce sera celle de Beaudoin et de Perret. » [10]

3.3. Le rejet de l'architecture internationale

Pouillon a tracé sa voie et s'est créé son propre style architectural loin des tendances qui prônaient dans les années cinquantes. D'ailleurs, il a toujours qualifié à plusieurs reprises les architectes fidèles au mouvement moderne de copistes, et d'adaptateurs de l'architecture des revues et des projets du Corbusier.

Le manque d'innovation dérange énormément l'architecte. Ces critiques ont été mal prises par ses confrères qui n'hésitaient pas à le mettre à l'écart dans les événements dédiés à l'architecture. La preuve est la démission de célèbre architecte André Bloch fondateur de la revue Architecture d'aujourd'hui de son poste après la publication des projets de Pouillon dans la revue.

« Mes réalisations déconcertèrent et rendirent enragés les architectes formalistes de la revue de M. André Bloch, ce pisse-froid de l'architecture abstraite. Lui et sa clique s'indignèrent de cette pierre et de ces décors, alors que le triste « béton brut de décoffrage » et les plastiques frigides et misérabilistes étaient à la mode. Je me moquais bien de ces critiques pervers. Je n'ai jamais suivi les conseils des modélistes. »[16]

« Spinetta avait assisté au triomphe de Chevallier auquel fut offert le Grand Prix d'architecture au Cercle d'études architecturales, le plus important cénacle de l'architecture française. Le prix lui avait été décerné à lui, afin d'éviter de me mettre en avant. Ce jour-là, ma chaise demeura vide à gauche du président et je décidai de ne plus cotiser à cette noble et lâche congrégation dont j'avais été un des premiers piliers. Un autre donna sa démission : André Bloch, de la revue Architecture d'aujourd'hui, non pas à cause de mon absence, mais de ma présence trop flagrante, sous la forme de cinquante photographies géantes de mes réalisations que Chevallier avait tout spécialement fait expédier d'Alger et qui ornaient les murs du restaurant le doyen. »[16]

« Paul Herbé, le meilleur ami des architectes [...] le seul de sa profession qui eût osé répondre à d'insanes articles parus dans Architecture d'aujourd'hui , signés Bloch ou Vago (un ami que j'avais soutenu jadis) attaquant méchamment mon œuvre d'Alger, car mon mépris pour cette « chapelle » souvent perverse, toujours inutile pour la société, m'interdisait d'y répondre moi-même ; Paul Herbé l'artiste généreux, honnête, à la merveilleuse intelligence, le professeur écouté, l'homme lucide et sensible de la profession, celui qui avait édifié le « cœur » de la cathédrale d'Alger, Paul Herbé m'attaquait avec violence et habileté. » [16]

4. Inventaire de l'œuvre de Pouillon

Entre 1934 et 1986, Pouillon a réalisé plus de deux millions de mètres carrés de bâtiments qui constituent un énorme volume de production, principalement en France et en Algérie, mais malheureusement ses projets sont jusqu'à aujourd'hui peu connus. De nombreux immeubles d'habitation, des complexes touristiques [17, 18], des facultés, des bibliothèques et résidences universitaires, des écoles et lycées, des agences postales, des cinémas et des maisons individuelles.

Depuis la réalisation de son premier immeuble d'habitation en 1934 jusqu'à l'année de publication de ses mémoires en 1968, il a construit l'équivalent d'une ville de deux à trois cent mille habitants. « J'ai conçu et réalisé dans ma vie la masse et l'équipement d'une ville de deux à trois cent mille habitants. » [16], Écrit-il dans son ouvrage.

Les tableaux suivants regroupent l'ensemble des réalisations de l'architecte en France, Algérie et Iran [3, 19] :

Tableau 1. 1: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en France [3, 19]

Date	Projet architectural	Maître d'œuvre	Système constructif	Patrimonialisation	Images du projet
1935	Immeuble Palais Albert 1 ^{er} , Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône.	Fernand Pouillon, Henri Enjouvin	La structure poteaux - poutres en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1935-1936	Immeuble Palais Victor Hugo, Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône.	Fernand Pouillon, Henri Enjouvin	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1939-1941	Coopérative viticole à Le Thor, Vaucluse	Georges Salomon, Henri Enjouvin, Fernand Pouillon	Murs en béton recouvert de moellons de pierre + Charpente métallique	Label Patrimoine du XXe siècle	
1947	Station sanitaire, Marseille, Bouches-du-Rhône	Champollion, René Egger, Fernand Pouillon	La structure poteaux - poutres en béton armé + Toiture en voûtes minces en briquettes.	Label Patrimoine du XXe siècle	

1947-1953	Reconstruction du Vieux-Port de Marseille	André Lecomte, Auguste Perret, Fernand Pouillon, André DEVIN	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé		
1948-1953	Ensemble de logements La Tourette à Marseille, Bouches-du-Rhône	André Lecomte, René Egger, Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive ou pierre banchée + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1949-1952	Usine Nestlé à Marseille, Bouches-du-Rhône	René EGGER, Fernand Pouillon	Structures en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1950-1954	Bibliothèque de la faculté de droit à Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône	Fernand Pouillon, René Egger	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	

1950	Gymnase du CREPS à Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône	Fernand Pouillon, René Egger, Jean Prouve	Murs porteurs en brique + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1950-1953	Building Canebière à Marseille, Bouches-du-Rhône	Fernand Pouillon	Structure en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1950-1953	Hameau des Sablettes, station balnéaire à La Seyne-sur-Mer, Var	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé + Toiture en voûtes minces en briques		
1950-1958	Bibliothèque Saint-Charles à Marseille	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	

1951-1953	Immeuble les « 200 logements » à Aix-en-Provence	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé + Toiture en voûtes minces en briques	Label Patrimoine du XXe siècle	
1952-1953	École primaire publique Abbé de l'Épée à Marseille	René Egger, Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1952-1953	École élémentaire Saint-André-Condorcet à Marseille	René Egger, Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1952-1954	Lycée Colbert à Marseille	Fernand Pouillon, René Egger	Murs porteurs en pierre banchée + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1956	Plan d'aménagement et immeubles du Vieux-Port de Bastia				

1957-1963	Résidence Victor Hugo à Pantin (282 logements)	Fernand Pouillon, Roland Dubrulle	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1955-1958	Résidence du Stade Buffalo à Montrouge (466 logements)	Fernand Pouillon, Roland Dubrulle	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1957	Résidence du parc de Meudon-la-Forêt (2635 logements)	Fernand Pouillon, Robert Azuelle	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1959-1963	Ensemble du Point-du-Jour à Boulogne-Billancourt (2260 logements)	Fernand Pouillon, Jacques Henri-Labourdette	Murs porteurs en pierre banchée + Plancher en béton armé	Label Patrimoine du XXe siècle	
1961	Aérogare de l'Aéroport de Marseille Provence à Marignane	Fernand Pouillon, Atelier 9, ETA, Richard Rogers	Structure en béton précontraint	Label Patrimoine du XXe siècle	

1975-1982	Restauration du Château de Belcastel	Fernand Pouillon			
1985	Conservatoire municipal de musique Jacques Ibert à Paris	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		
1985	Logements sociaux 180 avenue Jean Jaurès à Paris	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		

Tableau 1. 2: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en Algérie [19]

Date	Projet architectural	Maître d'œuvre	Système constructif	Patrimonialisation	Images du projet
------	----------------------	----------------	---------------------	--------------------	------------------

1953-1954	Cité Diar es Saada à Alger	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé		
1953-1954	Cité Diar el Mahçoul à Alger	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé		
1954-1957	Cité Climat de France à Alger	Fernand Pouillon	Murs porteurs en pierre massive + Plancher en béton armé		
1967	Complexe touristique de Zeralda aux environs d'Alger	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		

1968	Complexe de Sidi-Fredj aux environs d'Alger	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		
1968	Complexes touristiques CET à Tipaza : Tipaza-Club, Tipaza la Corne d'Or, Tipaza Matarès	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		
1969	Hôtel El mountazah Seraidi à Annaba	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		
1970	Hôtel M'Zab (ex-Rostémides) à Ghardaïa	Fernand Pouillon			

1972	Hôtel Gourara à Timimoun en Algérie	Fernand Pouillon	Toub banché		
1981-1982	Hôtel Saint-Georges à Alger	Fernand Pouillon	Structure en béton armé		

Tableau 1. 3: Inventaire des projets architecturaux réalisés par Pouillon en Iran [19]

Date	Projet architectural	Maître d'œuvre	Système constructif	Patrimonialisation	Images du projet
1954-1964	Gares ferroviaires de Tabriz	Fernand Pouillon, Heydar Ghiai	Structure métallique préfabriqué en France		
1954-1964	Gares ferroviaires de Machhad	Fernand Pouillon, Heydar Ghiai	Structure métallique préfabriquée en France		

4.1. L'industrialisation et son impact sur la production architecturale de Pouillon

4.1.1. Le contexte et les ressorts de l'innovation constructive

Ces dernières années, la recherche, quelle qu'elle soit en architecture, en géographie, histoire, économie ou sociologie, sur les projets construits après la deuxième guerre mondiale a augmenté de façon remarquable. L'histoire contemporaine de monde du bâtiment, en particulier de la période de la reconstruction (1940-1980) [20] est relativement bien connue aujourd'hui. Ce regain d'intérêt, plus précisément de l'aspect technique (matériaux et procédé constructif), n'est pas le fruit de hasard, mais déclenché par les opérations de réhabilitation et rénovation entreprises sur le patrimoine bâti ancien.

Il est intéressant de souligner que les entreprises de fabrication ont fortement été encouragées par l'état français, à travers certains organismes publics qui, à l'instar du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme MRU [21] créé en novembre 1944 pour piloter les opérations de la reconstruction, l'Association française de normalisation AFNOR (habilité à délivrer la Marque NF), l'Office Technique pour l'Utilisation de l'acier OTUA, ou du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB créé à l'origine en 1947 pour inciter l'utilisation de nouvelles techniques de construction dans les projets de reconstruction. Ajoutant à cela, les chantiers expérimentaux et les concours qui ont constitué des pièces maîtresses dans la politique d'industrialisation du bâtiment menée par les pouvoirs publics français.

4.1.2. Les acteurs de la reconstruction

Comme le soulignent les experts de la période [22], les projets phares de la reconstruction sont le fruit d'une collaboration entre les architectes du CIAM et les ingénieurs des Ponts et Chaussées, dans le domaine de la construction. Malgré que l'implication de ces derniers soit importante, ils occupèrent peu le champ médiatique et font rarement objet de recherches.

Les ingénieurs ont bénéficié de positions cruciales pour devenir des dirigeants. Quel rôle jouèrent les ingénieurs dans la reconstruction ? Les principales études historiques publiées à ce jour sur cette période sont

principalement axées sur l'intervention des architectes dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, alors que les ingénieurs ont joué un rôle prépondérant dans la reconstruction, en particulier ceux des Ponts et Chaussées à partir de 1935 [22].

Qu'ils travaillent dans un bureau d'étude ou dans une entreprise, ils ont été les inventeurs des principales méthodes de préfabrication utilisées dans la construction des immeubles à l'époque, dont les principaux procédés tels que Camus, Barets, Cauvet, Coignet, ou ceux de Jean Prouvé.

Même si l'on dispose que de peu d'études à ce sujet, il est clair que les ingénieurs des Ponts et Chaussées ont occupé la majorité des postes de direction du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme MRU dirigé par l'ingénieur des Ponts et Chaussées Adrien Spinetta.

4.2. Les chantiers expérimentaux

4.2.1. L'intervention des organismes publics l'OTUA et l'MRU

Le bâtiment préfabriqué répond parfaitement aux besoins de la reconstruction en France, les principaux d'entre eux offrent : la possibilité de satisfaire des programmes accrus, la réduction de la main d'œuvre sur le chantier, la réduction du délai et du coût de la construction sans pour autant négliger la qualité. Face à l'énorme nécessité de construire en urgence, une solution unique s'impose, c'est l'emploi des méthodes industrielles et la préfabrication en atelier.

Dans cette optique, vient s'inscrire l'initiative de l'Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier OTUA et l'organisation du concours d'architecture en 1931 [23]. Ce dernier, a encouragé les architectes à développer, en collaboration avec les ingénieurs, des systèmes de bâtiments industrialisés avec des éléments préfabriqués (ossature, plancher, façade, toiture et cloison). L'OTUA exige l'emploi de l'acier pour la structure portante, et l'architecte a la liberté d'utiliser tout matériaux convenable et compatible pour les autres éléments.

Par la suite, cette initiative sera suivie des chantiers d'expérience mis au point par l'MRU et le lancement du concours pour la réalisation de 50 logements collectifs en 1947. Plus tard, la même politique sera adoptée après deux ans pour

la construction de 200 logements répartis sur quatre sites (Compiègne, Chartres, Créole et Villeneuve-St. George) [22]. Enfin, le concours de Strasbourg remporté par Eugène Beaudouin en 1951, marquera avec son programme de 800 logements l'apogée et la fin des chantiers expérimentaux pour entrer dans l'ère du logement de masse et des grands ensembles.

4.2.2. Procédé de la préfabrication (lourde et légère)

Pendant la période de la reconstruction, deux courants se sont retrouvés dans les solutions proposées, les uns (Roger Hummel, André Dubreuil, Pouillon...) privilégiant la préfabrication lourde et le recours aux matériaux pondéreux peu coûteux (pierre, sable, cailloux, ciment), les autres (Auguste Perret, Pol Abraham, Marcel Lods...) optants pour une rupture complète avec les modes de construction traditionnels, et favorisant une préfabrication légère utilisant des matériaux plus coûteux (acier, métaux inoxydables, bois, matières plastiques, métaux légers), qui sont usinés et entièrement façonnés en atelier. Mais la rareté des métaux a amplement contribué au triomphe de la préfabrication lourde. Des exemples de la préfabrication lourde et légère seront traités plus loin dans le chapitre.

Le directeur de la construction de MRU, Antoine Spinetta, déclare à ce sujet : *« Notre pays a besoin d'une industrie du béton léger et d'une industrie du panneau...Il faut faire simple et rustique. La simplicité des formes et des structures rend possible la rusticité des modes opératoires et postule les bons rendements »* [24].

Plusieurs systèmes de préfabrication (Figure 1.1) utilisés après la deuxième guerre mondiale sont désormais bien connus grâce aux travaux de recherche de Roger Lacroix sur Eugène Freyssinet [25] et d'Yvan Delemontey [26, 27] sur les formes et les figures de la préfabrication en France entre 1947-1952.

Entre 1945 et 1950, en seulement cinq ans, le comité d'agrément a examiné pas moins de 390 matériaux modernes et méthodes de construction non-traditionnelles. Il fournira 325 approbations provisoires pour 91 procédés de murs, et plus de 100 procédés, dont certains ont été développés entre les deux guerres [20]. Parmi les systèmes brevetés les plus remarquables, on retrouve le procédé

Cauvet et Barets inventé en 1946, et le procédé de préfabrication lourde mis au point par Raymond Camus en 1948.



Figure 1.1: ERIES un procédé lauréats du concours du ministère de la reconstruction et de l'urbanisme MRU, et le procédé constructif L.M.B breveté par la S.G.D.G [28].

4.2.3. Les premiers projets phares de la préfabrication

On ne peut prétendre établir un répertoire complet des projets de la reconstruction. Sujet vaste s'il en fut. Tel n'est pas notre but. Néanmoins, parmi d'innombrables exemples, quatre projets les plus représentatifs de l'industrialisation et la préfabrication en France ont été sélectionnés. Le premier est celui de la cité la Muette à Drancy (1931-1934) des architectes Eugène Beaudouin et Marcel Lods associés à l'ingénieur Eugène Mopin [29]. Le chantier de préfabrication le plus fameux de l'entre-deux guerre utilisant des éléments moulés en béton.

Il a largement inspiré Pouillon à ses débuts de carrière professionnelle. Le deuxième est le groupe d'habitations HBM à Maisons-Alfort par les architectes Roger Hummel et André Dubreuil en 1933 [30]. Le troisième est le chantier d'Orléans, l'un des vastes chantiers expérimentaux réalisé par l'architecte Pol Abraham en 1944 [31]. Le dernier est l'opération éclairé à Saint-Etienne-du-

Rouvray réalisé par l'entreprise Coignet en 1958. Un projet qui fut l'un des exemples qui répond le mieux aux besoins de la préfabrication.

– La Cité de la Muette à Drancy (1931-1934)

La Cité de la Muette à Drancy a été conçue par Eugène Beaudouin (Grand Prix de Rome), Marcel Lods (architecte diplômé par le gouvernement) en collaboration avec Eugène Mopin (ingénieur en génie civil S.I.C.F), dans le cadre d'une politique globale d'industrialisation du secteur du bâtiment. C'est un modèle représentatif de la préfabrication légère dans les années trente (Figure 1.2). Ces H.B.M. (habitations à bon marché) regroupent au total 1 200 logements, édifiés sur un terrain d'une superficie d'environ 11 hectares. Les 1200 logements sont accompagnés d'une église, d'un groupe scolaire, d'une école maternelle et d'une pouponnière.

L'ensemble des immeubles sont constitués par des pièces moulées en béton vibré, assemblées sur une charpente métallique faite en usine aux côtes demandées et montée rapidement sur place, suivant le procédé de construction par éléments standardisés en béton vibré breveté E. Mopin (S.G.D.G), choisie par les architectes. Grâce à la collaboration très harmonieuse dès le début de la conception du projet, de l'architecte et l'ingénieur, la solution adoptée s'est révélée satisfaisante, simple et économique. En effet, l'économie réalisée par la fabrication sur place et la suppression des transports d'éléments fabriqués venant de l'extérieur est très importante.

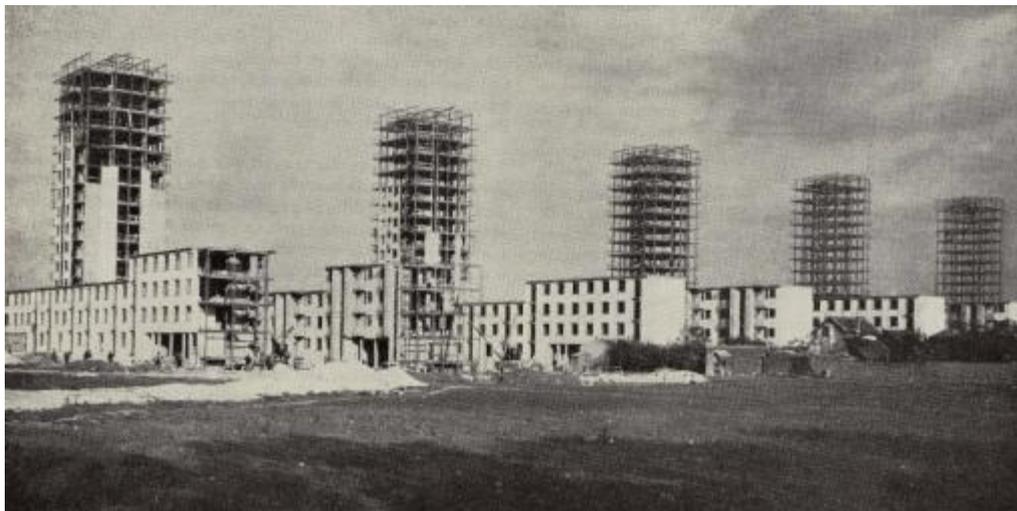


Figure 1.2: Les HBM de Drancy en cours de construction [32].

– Le groupe d’habitations HBM à Maisons-Alfort (1933)

Le groupe d’habitations HBM de 600 logements, est édifié en 1933 par les deux architectes Roger Hummel et André Dubreuil (prix de Rome), à Maisons-Alfort au lieu-dit « Vert de Maisons » sur un terrain d’environ 2.5 hectares de superficie. Contrairement à l’HBM de Drancy, celui-ci est un modèle représentatif de la préfabrication lourde. Sa particularité réside dans l’emploi de la brique rouge de parement, joint en creux, pour les façades, et des planchers en béton armé avec hourdis creux en terre cuite. Les cloisons intérieures sont en carreaux de plâtre ou en briquettes creuses (Figure 1.3). Malgré que, l’importance des besoins en logements exige le recours à des solutions industrialisées, l’architecte a su assurer le confort, la rapidité d’exécution et le prix le plus bas.



Figure 1.3: Le groupe d’habitation HBM en cours de construction et vue du plancher à caissons [30].

– Le chantier expérimental d’Orléans (1944)

La crise universelle du logement a engendré le lancement de deux chantiers expérimentaux sur une grande échelle : le chantier Orléans et le centre d’essais Noisy-le-Sec, par le Ministère de la Reconstruction et de l’Urbanisme M.R.U. Ce chantier expérimental a été piloté en 1944 par l’architecte Pol Abraham. La solution de la préfabrication est omniprésente dans l’ensemble des immeubles.

Il est irréalisable de faire face aux vastes programmes de construction d’habitation par les méthodes traditionnelles du bâtiment. Ces chantiers visent à bâtir des immeubles collectifs avec des éléments préfabriqués, et expérimenter de nouveaux procédés modèles susceptibles d’être généralisés et utilisés dans d’autres réalisations.

Le chantier d'expérience d'Orléans correspond à la première application du béton précontraint à l'échelle industrielle, due au grand ingénieur français Freyssinet, aux planchers d'habitation S.T.U.P. Les murs sont des panneaux en béton armé, procédé S.E.P.C.A, mis en place au moyen d'un dispositif métallique provisoire (Figure 1.4). Les plafonds flottants en plaque de plâtre expansé Samiex, suspendus par des ressorts.

Les chantiers d'essais d'Orléans présentent un intérêt non négligeable pour la reconstruction. Le projet a connu des échecs et des succès, qui ont permis l'évolution et l'amélioration du processus de préfabrication des procédés de construction. L'expérience acquise à Orléans prouve incontestablement la préfabrication.

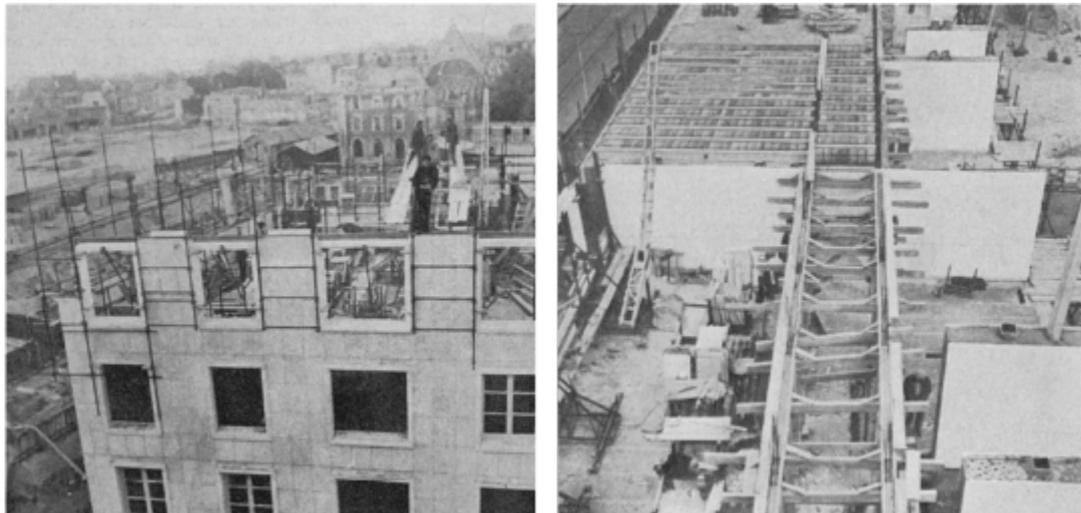


Figure 1.4: Vues sur la façade principale et le plancher en cours de construction [31].

– L'opération éclair à Saint-Étienne-du-Rouvray (1958)

L'opération éclair à Saint-Etienne-du-Rouvray (Rouen) a pour but le développement d'un prototype de bâtiment en série en utilisant un mode de construction par éléments standardisés cent-pour-cent produit en usine. Il s'agit d'un bâtiment constitué de 50 logements répartis sur cinq niveaux, réalisés par l'entreprise Coignet en 12 jours (Figure 1.5) : le début de chantier le 17 février 1958 et la réception de l'ouvrage le 01 mars 1958 (le bâtiment s'élève d'un étage chaque deux jours.).

L'ouvrage est composé de panneaux en béton précontraint fabriqués par l'usine de Sotteville, montés sur place à l'aide d'une grue et une équipe de 17 hommes. Les éléments murs et planchers viennent s'emboîter à sec les uns dans les autres, sans aucun mortier. Contrairement aux constructions habituelles, ce prototype vise essentiellement à supprimer les coffrages de poutres compliquées avec leur dépense (main d'œuvre, bois, clous...), ainsi que les différents revêtements en plâtre.

Comme la majorité des projets de la reconstruction, ce chantier a été destiné pour résoudre un problème immédiat. Ainsi, l'aspect architectural est largement négligé par les concepteurs. L'architecture monumentale laisse place à une architecture d'urgence industrialisée complètement dessinée par les besoins socioéconomiques (réduction de la main d'œuvre spécialisée, abaissement du prix de revient, amélioration de certaines caractéristiques d'habitabilité).



Figure 1. 5: Evolution de la réalisation de l'opération éclair à Saint-Etienne-du-Rouvray : le premier et le dernier jour [22].

5. L'essor des nouveaux projets de la reconstruction

Dès les années soixante-dix, l'avenir des logements de masse s'est imposé dans les propositions des réaménagements des villes françaises. La majorité du parc immobilier de la reconstruction a fait l'objet de rénovation à cause de leurs états de dégradation. Les logements de masses inadaptés et inadaptables à l'évolution des besoins des familles, ne répondent désormais plus aux façons d'habiter et aux normes de construction en vigueur.

Il faut également rappeler que les bâtiments préfabriqués sont conçus comme un produit de consommation [33] pour répondre d'urgence à une crise du logement à grande échelle. Des bâtiments initialement conçus à la base pour loger les citoyens pendant une période de 30 à 40 ans pour être démolis par la suite, une fois la crise passée.

Néanmoins, cette période avec ses échecs et ses succès, reste jusqu'à présent l'une des plus productives, durant laquelle le secteur du bâtiment a connu une énorme évolution dans les modes de construction. Les travaux architecturaux emblématiques d'Eugène Beaudouin et Fernand Pouillon en témoignent.

« Chaque génération des hommes n'existe que par sa devancière qui l'a préparée et à laquelle elle doit tout ce qu'elle en a reçu. Ne prépare-t-elle pas elle-même la génération qui suivra ? Il en résulte à travers les âges une merveilleuse continuité dans l'évolution et les progrès. Les révolutions ne sont toutes pas faites vers l'avenir en regardant en arrière. Nous sommes les fils d'un très grand passé, riche d'histoire et de beauté. Ce que nous avons, c'est à lui que nous le devons ; soyons donc des fils respectueux, qui aident et éclairent sa marche. » [34] , Écrit-il à ce sujet Jules Formige, président du conseil supérieur de l'ordre des architectes et inspecteur général des monuments historiques.

5.1. Fernand Pouillon face aux projets de la reconstruction

L'architecte Français Fernand Pouillon fut l'un des grands bâtisseurs de la période de la reconstruction. On lui doit de nombreux immeubles d'habitation, notamment en France et en Algérie. Il a réalisé, à lui seul, à côté de grandes figures de l'époque d'Eugène Beaudouin, René Egger et Auguste Perret, un parc immobilier comportant environ 13745 logements : la reconstruction du Vieux-Port

de Marseille, 700 appartements (1949-53) ; les Sablettes à Toulon, 150 appartements (1950) ; à Aix Construction en pierre massive, en Suisse 193, en-Provence, 159 appartements (1952) ; la Cité Buffalo à Montrouge, 466 appartements (1955-58) ; la Cité Victor Hugo à Pantin, 282 appartements (1955-57) ; la Résidence le Parc à Meudon-la-Forêt, 2635 appartements (1957-62) ; la Cité Point du Jour à Boulogne-Billancourt, 2260 appartements (1957-63). Et en Algérie : la Cité Diar es Saada à El Madania, 800 appartements (1953); la Cité Diar el Mahçoul à El Madania, 1800 appartements (1954) ; la Cité Climat de France à Alger, 3500 appartements (1955) ; la Cité de Valmy et la Cité Lescure à Oran, 800 appartements (1957).

Ses premiers chantiers d'expérience remontaient à l'essai de l'intégration de la pierre pré-taillée dans les projets préfabriqués, à travers la reconstruction de vieux port de Marseille (1949-1953). Puis vinrent les chantiers expérimentaux iraniens (1954-1958), au cours desquels il mena des expériences sur des structures métalliques qui ont été préfabriqués en France, puis transportés par bateau et assemblés sur le site en Iran. Cette expérience se poursuit dans les années soixante-dix par l'invention d'un procédé de construction de maisons métalliques [7], développé dans les chantiers de Saint-Brice-Courcelles (Reimes-Marne), Jonchery-sur-Veste (Marne) et Vandeuil (Marne) en France.

Tout au long de sa carrière, Pouillon s'est imposé à la préfabrication lourde par panneaux par le recours à des façades en pierre de Fontvieille. À cet égard, la cité La croix d'oiseaux (1955-1960) à Avignon, demeure l'un des échecs de la préfabrication. Ces 800 logements sociaux construits à partir d'éléments préfabriqués, notamment le procédé Camus, furent démolis en 1998, dans le cadre du projet de rénovation urbaine de la ville d'Avignon. Cette destruction faisait suite à l'état de dégradation des immeubles.

Pouillon a mentionné dans ses mémoires qu'il avait conçu cette cité avec l'entreprise SOCOTEC sans intervenir à aucun moment dans les plans. En effet, il n'était pas satisfait du mode de construction expérimenté dans ce projet, et qui coûte le double du prix des structures proposées par Pouillon. Il est inenvisageable d'utiliser la pierre de Provence à Alger et utiliser l'acier du Nord à Avignon, à 15 kilomètres de la carrière de Fontvieille.

« Il existe en France, mille, deux mille (Croix des Oiseaux) : les crimes du secteur industrialisé sont à présent innombrables... C'est pour le principe que je n'ai pas démissionné, pour ne pas perdre d'argent, pour assister à l'édification d'une ordure... Triste histoire, la plus triste de ma vie sans doute. J'avais perdu une bataille : ma défaite ruinait le bonheur de ceux qui habiteraient ces affreuses maisons, lesquelles abîmeraient définitivement un splendide paysage. » [16], Écrit Pouillon.

Le temps lui donna raison. Contrairement à la croix d'oiseaux, son architecture traverse des décennies sans prendre de ride. Les ensembles de Marseille, Paris et d'Alger en sont les témoins exemplaires.

5.2. Innovation technologique et modernisation des systèmes constructifs traditionnels

Construire moins cher, procurer aux occupants un confort supérieur à celui fourni par les anciennes formules, bâtir le plus grand nombre de logements avec des moyens mécaniques simples et une main-d'œuvre peu spécialisée, réduire les délais de réalisation, sont un ensemble de conditions à satisfaire, imposées par le ministère de la reconstruction et de l'urbanisme MRU, pour les maîtres d'œuvre. Dans ce contexte, afin de répondre à ces conditions, Pouillon a développé un ensemble de systèmes constructifs (murs, planchers, toiture) dans les réalisations en France, en Algérie et en Iran. Car on ne peut pas assurer l'économie dans l'industrie de bâtiment par un seul système, mais avec un ensemble de systèmes.

Les travaux architecturaux les années cinquante de Pouillon se caractérisent par l'utilisation à grande échelle de la pierre de Fontvieille, qu'on retrouve dans les façades des opérations immobilières. Malgré qu'il ait expérimenté les structures métalliques, la pierre reste toujours le matériau de prédilection. *« L'enduit et le béton vieillissent mal, prennent la crasse d'une façon irrégulière. L'architecture contemporaine n'a pas trouvé une peau qui soit supérieure à celle qu'offrent les matériaux naturels, toutes les pierres, tous les marbres, la brique... J'ai préféré conserver ces derniers en les rendant économiques. » [35]*

À une époque où l'acier et le béton, se furent rares et insuffisants pour concevoir d'énormes programmes de logement, les ambitions consentirent à ce que les procédés de la pierre pré-taillée intervinssent dans la reconstruction. Après avoir utilisé ce matériau pour réaliser de nombreux projets de qualité, il démontre que d'autres voies sont possibles dans l'architecture pour bâtir des structures peu coûteuses en un temps record. Parmi les procédés et systèmes constructifs usités par Pouillon, depuis 1936 jusqu'à 1986, on peut citer[36] : la pierre préfabriquée, la pierre banchée, les cloisons en briques creuses spéciales Pouillon, le système de planchers Pouillon, les claustras de Philippe Sourdivé, les voûtes charpentes système Pouillon, la fusée céramique, les systèmes des voûtes minces et croisées d'ogives, le système FP Homes ou maisons métalliques usinées.

5.2.1. La pierre préfabriquée

Le système de construction, associant des murs de façade porteurs en pierre de taille, des cloisons intérieures porteuses en briques appareillées debout, des voûtes équilibrées par des tirants métalliques, et les planchers à caissons en terre cuite, est mis au point pour la première fois dans le projet de La Tourette à Marseille, commencé en 1948. Une opération exemplaire et rapide où il réalise en dix-huit mois (18mois), deux cent logements tout équipés, à moitié prix de ceux des confrères. Ensuite, le projet des 200 logements d'Aix-en-Provence en 1951. Un projet d'habitation de 200 logements réalisé en 200 jours pour un budget de 200 millions de francs. Après les trois grandes cités d'Alger à partir de 1953.

Immeuble à la fois traditionnel et spécial (il ne comporte aucune ossature en métal ou en béton, seules la pierre de taille et les briques le soutenaient.).

– Paul Marcerou et l'industrialisation de la pierre

Les logements projetés par Pouillon sont sans aucun doute les exemples les plus célèbres de l'utilisation de la pierre pré-taillée, et témoignent, jusqu'à présent, de l'excellente durabilité du matériau employé. Cela est rendu possible grâce à l'invention de Paul Marcerou [16]. Cette invention a largement contribué dans le développement de l'industrie de la pierre dans le secteur du bâtiment. La pierre le

matériau noble le plus abondant dans la nature, son seul inconvénient est qu'elle ne se taillait à l'époque qu'à la main.

C'est dans cette optique, qu'intervient Marcerou par la fabrication d'une machine capable d'extraire et de tailler au millimètre près, des blocs de pierre dure et tendre des carrières de la région d'Arlès, à Fontvieille (Figure 1.6). Ainsi, la pierre préfabriquée à des prix désormais largement compétitifs est née.

Tout d'abord, le projet la Tourette avait commencé en 1948, une opération exemplaire et rapide où il réalise en dix-huit mois deux cent logements tout équipés, à moitié prix de ceux des confrères. Ensuite, la reconstruction du vieux port, à la demande du ministre Eugène Claudius-Petit. Après les trois grandes cités d'Alger.



Figure 1.6: La machine à découper mécaniquement la pierre : (a) vue latérale et (b) vue arrière [37].

– Le montage des murs

L'appareillage des blocs dans les œuvres de Pouillon est formé d'un croisement des pierres d'un rang à l'autre. Le dessin ainsi formé par les joints peut être l'objet d'une recherche esthétique par Pouillon. C'est ce qu'on appelle le calepinage des blocs, le fondement de l'architecture massive assurant toute la stabilité des murs, et donc du bâtiment. L'épaisseur des blocs de pierre varie entre 40 cm et 80 cm avec une hauteur de 70 cm, soit quatre rangés par chaque étage, comme l'illustre la figure 1.7.

Dans les grands ensembles d'Alger, après avoir envisagé l'emploi de diverses sortes de matériau pour lier les pierres, il est décidé, en accord avec le bureau SECURITAS que le plâtre de Paris [38] est un matériau convenant du point de vue résistance et rapidité de prise pour abreuver les joints des murs en pierre. Le jointement devant être exécuté au mortier de chaux grasse de France (la chaux aérienne) à l'extérieur et au mortier de ciment pour certains immeubles. La chaux hydraulique n'a pas été employée [39].

Le mortier à base de chaux de France n'assure aucun rôle dans la stabilité de l'ensemble de la structure, il sert uniquement de joint d'étanchéité à l'eau et à l'air. La stabilité des façades est assurée par le poids des pierres et les frottements engendrés entre les rangées. L'inertie des murs (80x80x70 cm et 80x40x70 cm) participe également à la stabilité de la structure.

Sur l'ensemble des façades des immeubles d'Alger, les linteaux en pierre de taille de grande portée sont exécutés en trois éléments permettant d'utiliser au maximum la longueur normale des pierres de taille. Les pierres constituant ces linteaux de portée considérable, à savoir 3m60, comportent des armatures de suspension accrochées dans les chaînages en béton armé, ces suspensions sont noyées dans l'épaisseur de la pierre.

Ainsi, chaque claveau indépendant est accroché dans le chaînage. Selon les PV de chantier de Diar es Saada [40], les scellements des armatures de suspension dans l'épaisseur de la pierre sont réalisés dans des trous de 3cm de diamètre, et de 25cm de profondeur. Pour assurer la pleine efficacité des scellements, les trous sont nettoyés dans un bain de mortier avant exécution des chaînages.

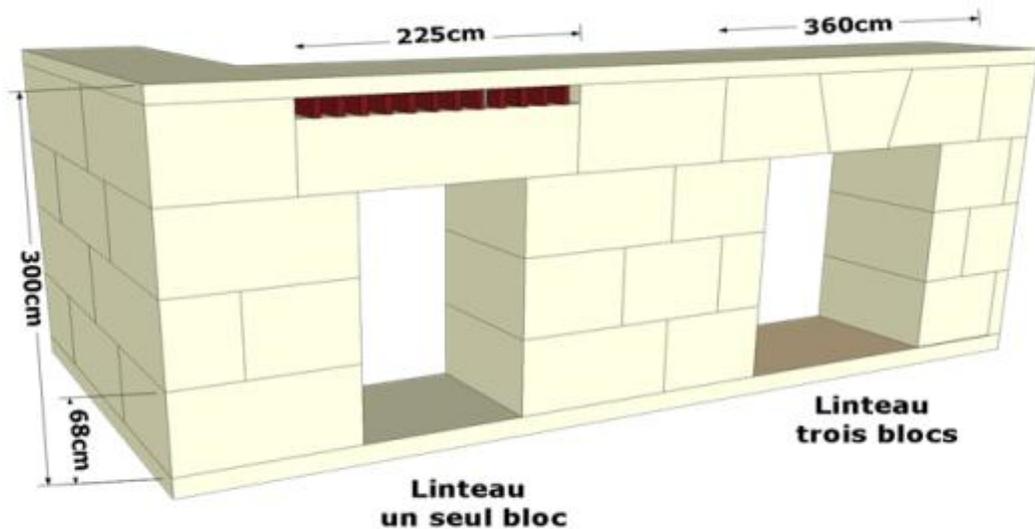


Figure 1. 7: Appareillage des moyens et gros blocs standards.

5.2.2. La pierre banchée

Il s'agit de plaques de pierres munies d'agrafes et réservées en fond de coffrage. Après le coulage du ciment armé et l'enlèvement des étais, ces pierres constituent une peau à l'édifice qui fonctionne comme un noble « coffrage perdu ». Par rapport aux méthodes traditionnelles, le système de la pierre banchée permet un gain de temps considérable et une économie significative grâce à la suppression des innombrables opérations de montage des coffrages en bois.

Le système de la pierre banchée est mis au point par Pouillon dans les façades de certain de ses projets architecturaux, tels qu'une partie de groupe de logements La Tourette et le lycée Colbert à Marseille (1952-1954). Les façades du bâtiment, situé en bord de mer de ce dernier, ont été réhabilitées en 2006 et la pierre de plaquage a dû être entièrement enlevée pour des raisons d'instabilité. Contrairement aux autres œuvres de Pouillon réalisées selon ce principe de pierre banchée, celui-ci a mal survécu face aux conditions environnantes. Selon le rapport établi par le conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur à propos du lycée Colbert, deux types de pierre ont été utilisés : la pierre de Cassis pour le soubassement et la pierre d'Estailade pour le reste de la façade. La figure ci-dessous montre un exemple de murs en pierre banchée (Figure 1.8).

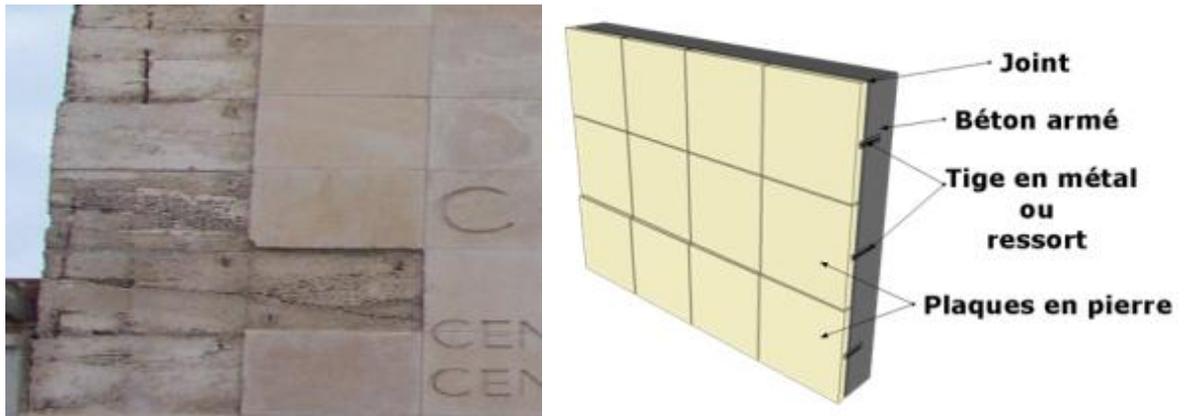


Figure 1. 8: Principe de la pierre banchée de la façade de lycée Colbert avant la réhabilitation.

5.2.3. Les cloisons en briques creuses porteuses "Pouillon"

Les cloisons intérieures dans les grands ensembles de Pouillon sont faites d'assemblage de brique creuse en terre cuite, couvert d'enduit de plâtre. Ces cloisons sont appareillées verticalement afin d'améliorer la résistance de la structure et de parer à l'écrasement. Le fait de remplir les creux de la brique de mortier ou de micro béton, on double à peu près la résistance à l'écrasement. Chaque niveau se compose de treize rangées de briques de 20 cm de hauteur pour éviter le découpage du matériau sur chantier (Figure 1.9).

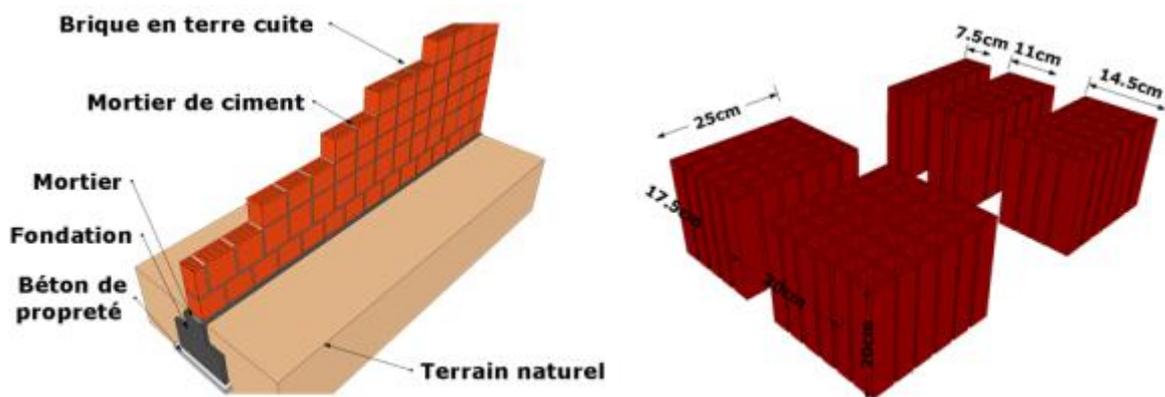


Figure 1. 9: Les dimensions des cloisons en briques creuses.

5.2.4. Le système de planchers Pouillon

Les planchers conçus par Pouillon suivant un procédé personnel sont formés par des moules carrés en staff [2] formant plafond dans lesquels sont coulés les solives suivant un quadrillage régulier dans les deux sens. Ils sont entièrement

recouverts du béton par le dessus. Les caissons en terre cuite ou en béton servent de coffrage perdu.

Le plancher à caissons en terre cuite spécial Pouillon assisté par Philippe Sourdive et Jean Amado a été expérimenté pour la première fois dans le chantier du vieux port de Marseille (Figure 1.10). L'aspect des caissons rappelle visuellement et structurellement la voûte en béton armé du hangar d'Orvieto, qui a été conçue par l'ingénieur italien Pier Luigi Nervi pendant la Seconde Guerre mondiale en 1935. Il rappelle aussi le plafond des galeries d'habitation HBM à Maisons-Alfort par les deux architectes Roger Hummel et André Dubreuil



Figure 1. 10: Les caissons en terre cuite du Vieux Port de Marseille conçu par Jean Amado et fabriqué par la SGTM [41].

5.2.5. Les voûtes charpentes système Pouillon

La toiture à charpente de la résidence des deux cents logements d'Aix-en-Provence est constituée d'une voûte mince en brique de terre cuite reposant aux extrémités sur des murs épais en bloc de pierre massive (Figure 1.11). La voûte est maintenue par des tirants d'acier et recouverte de tuiles rondes [7]. L'espace entre la voûte et la tuile est remplie de béton. A une époque où le bois coûte cher, la suppression de la charpente en bois réduit considérablement le coût de réalisation.

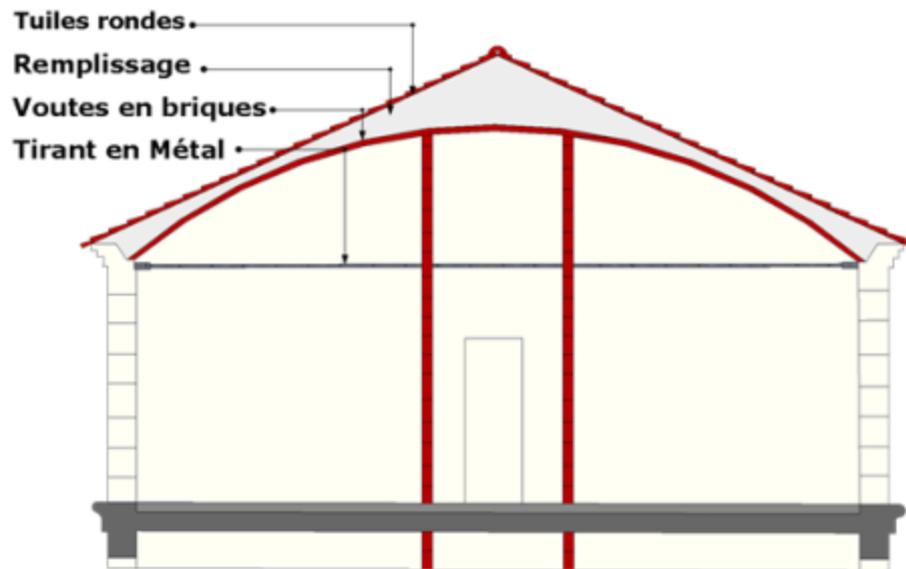


Figure 1. 11: Coupe transversale des 200 logements à Aix-en-Provence.

5.2.6. La fusée céramique

Pouillon a utilisé la fusée céramique dans l'édification de camp de prisonniers à Marseille, en 1945. Le seul matériau de construction disponible à ce moment, et inusité et abandonné dans les champs par les Allemands. La fusée céramique est purement une invention de Jacques Couëlle, fabriquée par la Société Générale de Tuilerie Marseillaise SGTM pendant la guerre. Il s'agit d'éléments préfabriqués en terre cuite sous forme de bouteilles dépourvues de fond, qui s'emboîtent les unes dans les autres de manière à former un arc de grande portée que l'on arme par des tiges métalliques.

Le mode d'assemblage de ces éléments avec la tige métallique permet de remodeler l'inclinaison des rangées de la fusée céramique pour concevoir la forme de l'arc. Par la suite, ces éléments préfabriqués sont entièrement recouverts par le dessus avec deux centimètres de ciment (Figure 1.12). Ce procédé offre la possibilité de décoffrage rapide, soit 24 heures après la pose, d'où économie dans les matériaux de coffrage, le délai de réalisation (un bâtiment en huit jours) et le nombre d'ouvriers sur site.

Le montage des voûtes en fusée céramique est décrit par Pouillon dans ses mémoires comme suit : « *Il est difficile d'expliquer en quelques mots comment devaient se construire les bâtiments : les cintres combinés en deux éléments*

seraient montés et assemblés par boulonnage et entretoises. Cette charpente, qui supportait le carton dur, était graissée abondamment avec de l'huile de vidange. Au fur et à mesure que l'on assemblait les fusées en beurrant les goulots, on projetait du ciment sur deux centimètres d'épaisseur. Les fusées-céramique ressemblaient exactement à des bouteilles de Bordeaux dépourvues de fond, dont une partie du goulot aurait été tronquée. Chaque rang de bouteilles était monté de part et d'autre du cintre et se rejoignait au sommet de la voûte. Naturellement, les joints étaient croisés : il fallait éviter une ligne de rencontre médiane, en prolongeant tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, le sens de la pose. Effectivement, cela ressemblait à des bambous mis en forme sur des cintres. La voûte était enrobée de mortier fin, très dosé, qui constituait l'enduit extérieur. Une peinture étanche était prévue pour protéger le tout. L'épaisseur totale était de neuf à dix centimètres. Le lendemain, on démontait les cintres, on les faisait basculer pour le décollage, on les replaçait sur des rouleaux et on recommençait l'opération. » [16]

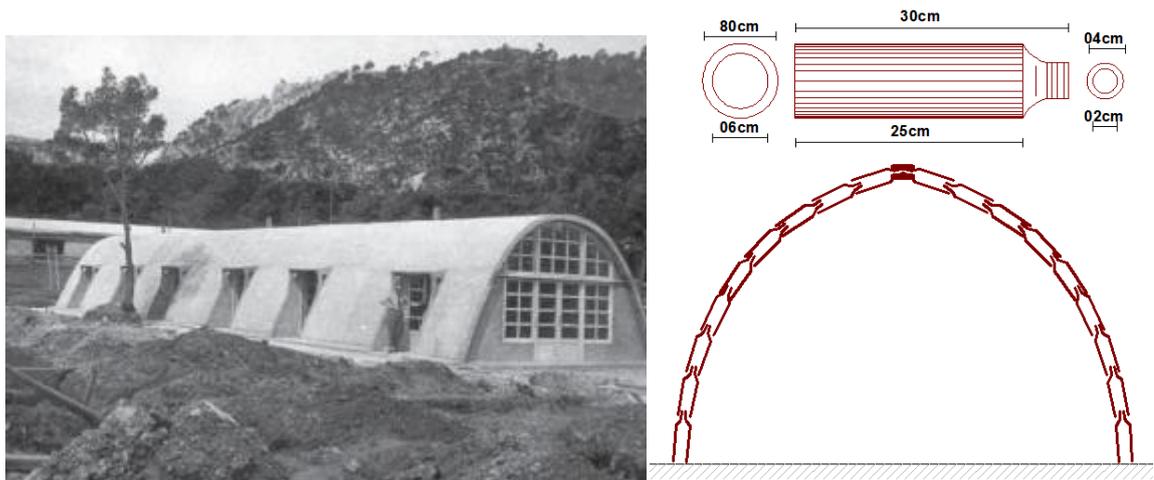


Figure 1. 12: Construction d'une voûte en chaînette de fusées céramiques durant le chantier du camp de Grand Arénas en 1944-1945 par René Egger et Fernand Pouillon [42].

5.2.7. Les systèmes des voûtes minces et croisée d'ogives

Les voûtes en briques sont omniprésentes dans les œuvres architecturales de Pouillon. Il a expérimenté de nouvelles techniques de mise en œuvre dont il va se servir sur tous ses chantiers. Il a donné naissance à d'innombrables typologies : charpentes en voûtes de briques, voûtes minces en briques pleines sur les piliers métalliques, voûtes croisées, voûtes d'arrêtes, voûtes d'ogives et

voûtes en berceau. On les retrouve dans les passages couverts et les galeries des cités d'habitation en France (Figure 1.13) et en Algérie (Figure 1.14). Ces voûtes témoignent d'un mélange de savoir-faire traditionnels et d'innovations techniques.



Figure 1.13: Le hameau des Sablettes (1953) [43], les galeries couvertes surmontées de voûtes en briques creuses ; les passages couverts des cités algériennes ou des Sablettes.



Figure 1. 14: Les voûtes d'arêtes croisées de la place du marché Diar el Mahçoul et Diar es Saada [44].

5.2.8. Le système FP Home ou maisons métalliques usinées

Il existe très peu de littérature sur le système FP Home ou les maisons métalliques préfabriquées inventé par Pouillon en 1970. Il y a très peu d'informations sur le sujet. Au total, trois prototypes de maisons métalliques [7] usinées appelés FP I, FP II et FP III. Aucun brevet n'a été délivré par les autorités en raison de la complexité du procédé FP homes possédant des filiales en France, en Suisse et en Algérie (Figure 1.15).

Le procédé FP Home porte le nom de l'entreprise d'ingénierie qui mène des recherches dans le domaine de l'habitat [45]. Elle est créée par l'architecte pour promouvoir la maison industrialisée. Selon les sources de l'association « les Pierres Sauvages de Belcastel », les prototypes de ces maisons métalliques se trouvent à Jonchery-sur-Vesle (Marne), Saint-Brice-Courcelles (Reims-Marne), Vandeuil (Marne), Liège (Belgique), Cheraga & El Biar (Alger)



Figure 1. 15: Maison métallique réalisée par Pouillon à Alger en 1970[19].

5.2.9. *Le Toub banché*

Le Toub banché est un procédé mis au point par Pouillon dans les complexes touristiques du sud de l'Algérie. Le même principe avec le béton banché, mais celui-ci avec du Toub. Un matériau local fabriqué à base d'une terre argileuse. Les murs de l'hôtel Gourara à Timimoune (Figure 1.16), construit dans les années 1970, sont entièrement en Toub banché. L'hôtel représente un très bel exemple d'adaptation d'un bâtiment dans son environnement.



Figure 1. 16: L'hôtel Gourara à Timimoune[19].

5.2.10. Les claustras en terre cuite

Dès 1952, Pouillon commence à employer dans le remplissage de baies les claustras en carreaux de céramique de Philippe Sourdive, fabriqués en série par l'usine des Milles [41]. Que ce soit de forme ronde, carrée ou rectangulaire, la collaboration entre Pouillon et Sourdive a donné lieu à plusieurs modèles avec différents matériaux (terre cuite, béton, bois). La figure 1.17 montre quelques schémas des claustras présents dans les projets de Pouillon.

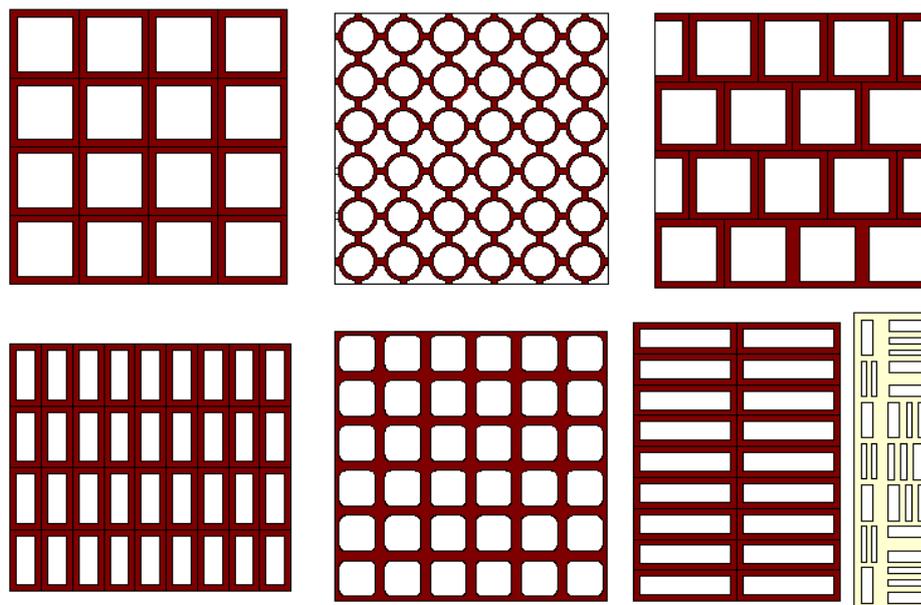


Figure 1. 17: Les différents motifs des claustras en terre cuite.

5.2.11. La brique fourrée

En plus des claustras en céramique, Pouillon utilisait la brique fourrée comme élément de décoration (Figure 1.18). Il s'agit d'une brique creuse fourrée par du béton ou de la chaux. Les cloisons de brique fourrée sont également utilisées pour le remplissage des baies, des balcons, dans les loggias et le décor des façades. La Cité universitaire des Gazelles à Aix en Provence (France) représente le meilleur exemple de l'emploi de la brique fourrée.



Figure 1. 18: La façade de la Cité universitaire des Gazelles [19] et les balcons de Diar el Mahçoul (Algérie).

5.2.12. Le système vide à ordures

Fernand Pouillon et Philippe Zoellner ont inventé en 1954 un vide à ordures ménagères à réceptacle sphérique tournant sur son axe (Figure 1.19). Il a été breveté par le Ministère de l'industrie et du commerce : service de la propriété industrielle en 1955 [46]. Ce système d'évacuation des ordures ménagères est constitué d'une sphère creuse en métal et d'un plateau support. La conduite verticale d'évacuation se termine au-dessus des poubelles situées dans un local au sous-sol de chaque immeuble.

Les principales caractéristiques du vide-ordures à réceptacle sphérique sont :

- La trappe métallique et le plateau support recevant la sphère qui empêche toute remontée d'air vicié dans la conduite d'évacuation.
- Le montage facile des éléments composant le vide-ordures.

- La forme sphérique et l'absence d'angle vif et droit facilitent le nettoyage de la conduite d'évacuation.
- La disposition horizontale et l'aspect esthétique de l'appareil permettent son installation dans des locaux d'habitation. Il est prévu pour être posé à proximité immédiate de l'évier de cuisine.

Le vide-ordure ce n'est pas une idée typiquement inventée par l'architecte Pouillon, et le dispositif existe bien avant sauf qu'il ait été amélioré et adapté aux besoins des habitants. L'invention du premier vide-ordure remonte à la fin du XIXe siècle, par le français Jean Baptiste André Godin, que l'on retrouve dans les immeubles de l'après Première Guerre mondiale.

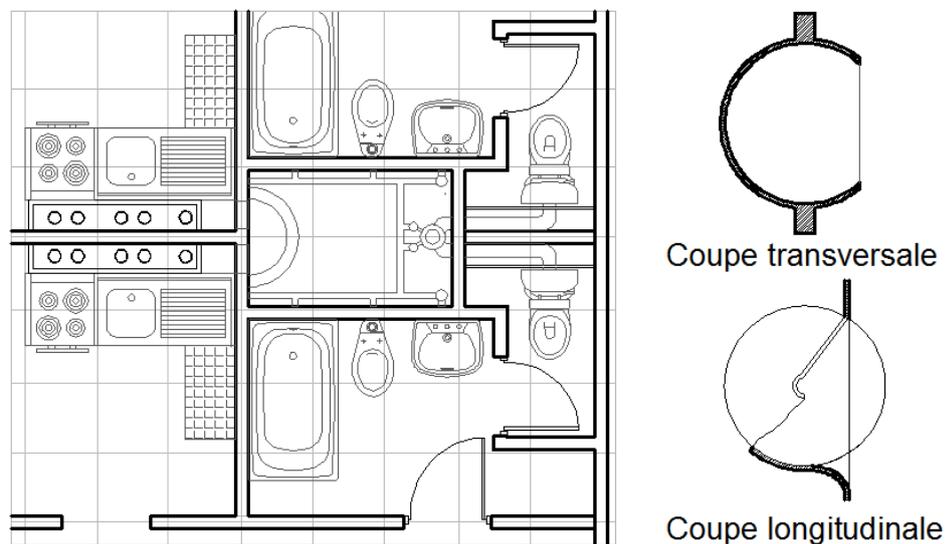


Figure 1. 19: Vue en plan de la conduite d'évacuation d'un plan type et coupe transversale et longitudinale du dispositif.

6. Conclusion

Fernand Pouillon est une figure marquante du XXe siècle, et ses travaux demeurent davantage aujourd'hui une exception en termes d'innovation. L'histoire montre que le contexte favorable d'industrialisation représente une dimension déterminante pour le développement du secteur du bâtiment, tant par les typologies du bâti qu'à travers le choix des matériaux et procédés constructifs mis en œuvre. Il convient de mentionner que le succès de Pouillon n'est pas cependant dû à la situation politique favorable, mais aussi sans doute grâce à son

talent, son expérimentation, son dévouement osé et à son savoir-faire incontestable.

L'enjeu de Pouillon est de développer une alternative au béton armé et à l'acier promu dans les projets de la préfabrication. Son but était de créer un procédé constructif, qui repose principalement sur l'utilisation à grande échelle de la pierre taillée, sous ses formes diverses (massive ou banchée), tant en termes d'ossature portante que d'expression architecturale. La combinaison de la pierre et la brique, des matériaux abondamment utilisés dans les époques ancestrales. Toutefois, les normes techniques sont quasiment inexistantes concernant ce type de structure. Et des études approfondies en termes de stabilité doivent être menées sur les réalisations en maçonnerie, présentant une particularité constructive.

CHAPITRE 02

CONSTRUCTION PARASISMIQUE ET PATRIMOINE BÂTI DE POUILLON

1. Introduction

À l'instar des pays méditerranéens, l'Algérie est située dans une zone sujette aux tremblements de terre. Sa situation géologique a montré de fortes caractéristiques sismiques, et ce, depuis très longtemps. En effet, l'activité sismique en Algérie est très ancienne. Les documents et les textes disponibles la remontent au Ve siècle, en citant qu'en 419 [47], Sétif a connu une forte secousse tellurique, d'autres ont évoqué le tremblement de terre dévastateur survenu à Alger, le 03 janvier 1365 [48]. Depuis, cette forte sismicité s'est traduite plusieurs fois par des séismes majeurs tels que le séisme d'El Asnam actuellement Chlef en 1954 et puis en 1980. Le dernier séisme majeur qu'a connu l'Algérie date du 21 Mai 2003 ayant sévèrement endommagé et sinistré la région de Boumerdes se trouvant au Nord-Est d'Alger.

De tout temps, ces séismes ont constitué une des plus graves menaces pour la vie humaine, et les constructions. Le tremblement de terre est à ce jour, la catastrophe naturelle, la plus meurtrière, qui résulte d'une rupture brutale des roches provoquant de nombreuses secousses. Ce phénomène entraîne des destructions importantes et occasionne des pertes considérables en vie humaine et dégâts conséquents.

2. Construction parasismique et patrimoine bâti : notions fondamentales

2.1. Définition du génie parasismique

Le génie parasismique se définit, comme étant, l'étude des fondations et des structures d'un bâtiment par rapport aux mouvements du sol engendrés par les séismes et la réduction de ces effets par la construction de bâtiments spécifiques. À partir de ces concepts de base, un ensemble de règles constituant le code parasismique est établi [4].

Le génie parasismique représente une branche de l'ingénierie qui relève de l'étude de l'impact des séismes sur les structures dans les zones sismiques. Bien que l'étude du comportement sismique réel des structures soit très complexe, de nombreuses solutions existent. Et aujourd'hui, la construction parasismique constitue le meilleur moyen pour réduire le risque sismique.

Cette science regroupe de nombreuses disciplines : sismologie, géotechnique, géologie, analyse de risques, géodynamique, simulations expérimentales, simulations numériques, dynamiques des structures [49]. Et, elle vise principalement à développer des méthodes pour réduire les dommages que peuvent provoquer les secousses sismiques. Cette science évolue en fonction des retours d'expérience après chaque événement sismique.

La construction dans les époques antérieures reposait principalement sur le savoir et le savoir faire du bâtisseur donc par empirisme. En raison de l'absence de normes et réglementations de construction bien détaillées, donne naissance à une architecture basée uniquement sur le retour d'expérience.

2.2. Évolution du domaine du génie parasismique : bref historique

D'après les documents disponibles, les fondements de cette science et de génie parasismique ont été développés à partir du XVIIIe siècle par des scientifiques britanniques, suite à la révolution industrielle anglaise entre 1700 et 1900. Si de nos jours, le maître d'œuvre dispose de méthodes permettant de garantir un comportement favorable des structures face aux séismes, ce n'était pas le cas il y a cent ans. L'histoire de l'apparition du génie parasismique est relativement récente et remonte au début du XXe siècle. De ce fait, il est ainsi difficile d'en présenter une revue historique valable avec si peu de recul sur le sujet.

Au tournant du siècle, trois séismes de forte intensité ont grandement contribué au développement des connaissances liées aux phénomènes sismiques. Il s'agit du séisme de Mino Avari au Japon (1891) [50], San Francisco aux États-Unis (1906) [51] et Messine en Italie (1908) [52]. Le séisme du 28 décembre 1908, en Italie, est l'un des séismes les plus meurtriers qu'a connu l'humanité, avec une estimation de 200 000 morts. Plus particulièrement, on

considère le séisme de l'Italie comme l'événement capital qui a donné naissance aux méthodes de construction parasismique et ainsi qu'à la science du génie parasismique.

Au lendemain de ce séisme, le gouvernement italien a créé un comité spécial composé d'ingénieurs, et lui donna comme mandat d'étudier ce séisme et d'apporter des recommandations [53]. C'est ce qui va donner, par la suite, naissance aux méthodes de construction parasismique et ainsi qu'à la science du génie parasismique.

Dans le rapport rédigé par ce comité, le professeur au département de mécanique appliquée de l'Université de Turin, Panetti [53], suggère pour la première fois de calculer et édifier les structures dans les zones sismiques en utilisant une charge latérale statique uniforme représentée par un coefficient sismique exprimé en fraction du poids de l'ouvrage. Il souligne également que l'impact des tremblements de terre sur les bâtiments est un véritable problème qui relève de la dynamique des structures. Cependant, ce problème est trop complexe pour les moyens de l'époque et l'on doit plutôt recourir à une approche statique équivalente pour la conception des structures parasismiques. La méthode de conception statique reste ancrée dans la pratique, jusqu'à l'émergence de l'outil informatique et l'exploitation des ordinateurs par les ingénieurs [54].

Par la suite, la conception statique a été adoptée dans les codes de construction, sans grande modification jusqu'au début des années 40. Après le séisme majeur de Tokyo (Figure 2.1), en 1923, le Japon opte, dans les normes parasismiques, pour un coefficient sismique égal à 10 %. De son côté, la ville de Los Angeles opte pour un coefficient sismique égal à 8 % après le séisme de Long Beach en 1933. Ce n'est qu'en 1943 qu'apparaissent les coefficients sismiques qui évoluent en fonction de la hauteur du bâtiment. La méthode de conception statique que l'on retrouve davantage dans nos codes du bâtiment modernes vient d'apparaître.

Malgré l'évolution spectaculaire dans le domaine de génie parasismique, depuis quelques années, les structures en maçonnerie restent à l'écart des progrès, à cause de la complexité des calculs dûs à l'hétérogénéité des matériaux. D'après les appréciations du service géologique des Etats Unis, lors du séisme de

San Francisco (Figure 2.2), les constructions en béton armé témoignent d'une certaine résistance face aux séismes, on citera [53]:

« Le béton, principalement le béton armé, à cause de sa grande résistance et de sa grande continuité, a prouvé qu'il était le plus satisfaisant des matériaux. Sa structure monolithique donne un matériel résistant merveilleusement aux secousses, car il se meut d'une seule pièce ; en outre, il offre à l'incendie le maximum de résistance. »

« Malheureusement, pour San Francisco, il n'y avait que peu de constructions en béton armé au moment de la catastrophe, mais elles se sont bien comportées pendant le tremblement de terre et le feu résultant. »



Figure 2. 1: Destruction complète de la ville de messine (Sicile) [50, 53].



Figure 2. 2: San francisco ravagé après le séisme « le Big One » en 1906 [53].

2.3. Conception parasismique

"Earthquakes Don't Kill People ; Buildings Do" [55] est une citation bien connue, utilisée dans de nombreux rapports d'étude pour montrer l'importance de la conception parasismique dans la sauvegarde des vies humaines.

Généralement, on qualifié de parasismique les bâtiments qui sont conformes à la réglementation parasismique en vigueur. En effet, l'expérience montre que l'application et le respect des normes sismiques réduit fortement l'étendue des dommages sismiques. Plusieurs bâtiments conçus en respectant la réglementation témoignent aujourd'hui. Les gratte-ciels de la ville Tokyo au Japon en est un très bon exemple, car ils n'ont subi aucun dommage structurel lors du séisme très destructeur du Japon en 2011, dont la magnitude égalait 8,8 [12].

Néanmoins, un bâtiment calculé en conformité avec les prescriptions des règles parasismiques ne garantit pas une résistance face aux séismes [56]. Si des progrès ont été réalisés dans l'étude des structures parasismiques, la plupart des bâtiments érigés dans la zone sismique n'ont pas été testés sous l'action d'un séisme majeur. L'enjeu des structures parasismiques est de construire de manière à ce que, même endommagés ils ne s'effondrent pas, et ainsi éviter les pertes humaines. Il convient aussi de rappeler qu'un bâtiment parasismique parfaitement conçu ne sera capable de résister aux séismes que s'il est correctement construit [57]. Les aspects sismiques de la structure doivent être pris en compte de la phase esquisse jusqu'à la réception du projet.

2.4. Patrimoine bâti

L'héritage architectural de l'humanité est un livre ouvert qui embellit et affirme les connaissances et les savoirs de chaque époque. Il révèle le génie de ces inventions sur lesquelles notre temps s'appuie. Bien que la conception parasismique soit récente, les premières tentatives de mesures parasismiques remontent au moins à l'époque de la Grèce antique [58] où des temples ont été construits sur une couche de sable, vraisemblablement pour isoler les édifices du sous-sol.

D'innombrables monuments historiques résistant aux séismes ont été bâties à travers le monde, à des époques antérieures aux codes sismiques telles que des fortifications, des églises, des temples, et bien d'autres édifices. À la base, ces derniers avaient été conçus sans préoccupations spéciales en vue de résister aux séismes. Une étude plus approfondie sur des exemples de patrimoine parasismique a été menée par Alain Billard dans ces deux ouvrages « Risque

sismique et patrimoine bâti, comment réduire la vulnérabilité ; savoirs et savoir-faire » [58], et « Confortement du patrimoine bâti : 13 études de cas sur le risque sismique » [59].

2.4.1. Comportement des monuments historiques face au risque sismique

Contrairement aux bâtiments neufs, les monuments historiques ne bénéficient pas d'un panel de règles à respecter. En effet, les mêmes règles de calcul des structures neuves (en béton armé ou en acier) s'appliquent dans la vérification du patrimoine bâti ancien. Les matériaux de construction sont destinés à résister au risque sismique, mais avec des succès inégaux. L'histoire nous en est témoin.

Certaines observations faites dans des zones traditionnellement sujettes aux séismes et ayant une certaines cultures du risque (Turquie, Pérou, Mexique...) montrent que tous les bâtiments ne se comportent pas de la même façon sous une charge sismique. Chaque bâtiment est conçu d'une manière particulière, tant sur le plan structurel qu'en termes d'intensité du séisme en question, se comporte différemment. En plus, plusieurs paramètres entrent en jeu : les types de la structure, les matériaux employés, la qualité d'exécution, les caractéristiques du site, la régularité géométrique de l'ouvrage, l'entretien de l'ouvrage, etc.

2.4.2. Exemples de monuments historiques parasismiques : leçons tirées du passé

Il existe de nombreux exemples typiques de bâtiments parasismiques, qui ont survécu pendant des siècles aux séismes de forte intensité. La majorité de ces structures sont faites de matériaux locaux, donnant naissance à d'innombrables techniques de construction que l'on retrouve dans l'architecture contemporaine.

Parmi les monuments historiques parasismiques, quatre exemples sont cités ci-dessous :

- La pagode, temple Hōryū-ji, Japon

Le Japon est également l'un des pays fortement touchés par les séismes les plus violents au monde. Parmi les bâtiments qui ont résisté, au tournant des

siècles, la pagode représente un exemple exceptionnel. Certaines techniques anciennes sont toujours utilisées. En effet, la conception parasismique de la pagode a largement inspiré l'architecte japonais Tadao Andō dans la réalisation de la tour Tokyo Skytree en 2008. La structure de celle-ci reprend les principes constructifs des temples anciens japonais (le savoir ancestral), associés avec des matériaux et techniques modernes.

Le temple Hōryū-ji est la plus ancienne structure en bois du monde, son édification remonte au VI^e siècle. En tant que matériau de construction, le bois a l'avantage d'absorber l'énergie sismique grâce à sa souplesse. Le temple est composé de cinq niveaux et présente une hauteur totale de 31.5 m, avec un diamètre de 77,8 cm à la base [3].

Le pilier central de la pagode est uniquement relié au dernier étage et séparé des niveaux inférieurs, afin d'assurer une certaine flexibilité dans le comportement de la structure (Figure 2.3). Sa structure est faite de troncs droits de cyprès japonais. Le pilier s'étend sur toute la longueur de la pagode, et fait saillie sur la partie supérieure, où il soutient la finale de la pagode. Les formes architecturales initiales comprenaient un pilier ancré profondément dans les fondations allant jusqu'à 3 m sous le niveau du sol [3].

Des études récentes [60] ont montré que : la jonction par emboîtement (montage sans clou), la flexibilité du pilier central, des avant-toits très larges, l'architecture avec le pilier central, la forme pyramidale, sont des dispositifs qui contribuent également à la stabilité inertielle de la pagode.

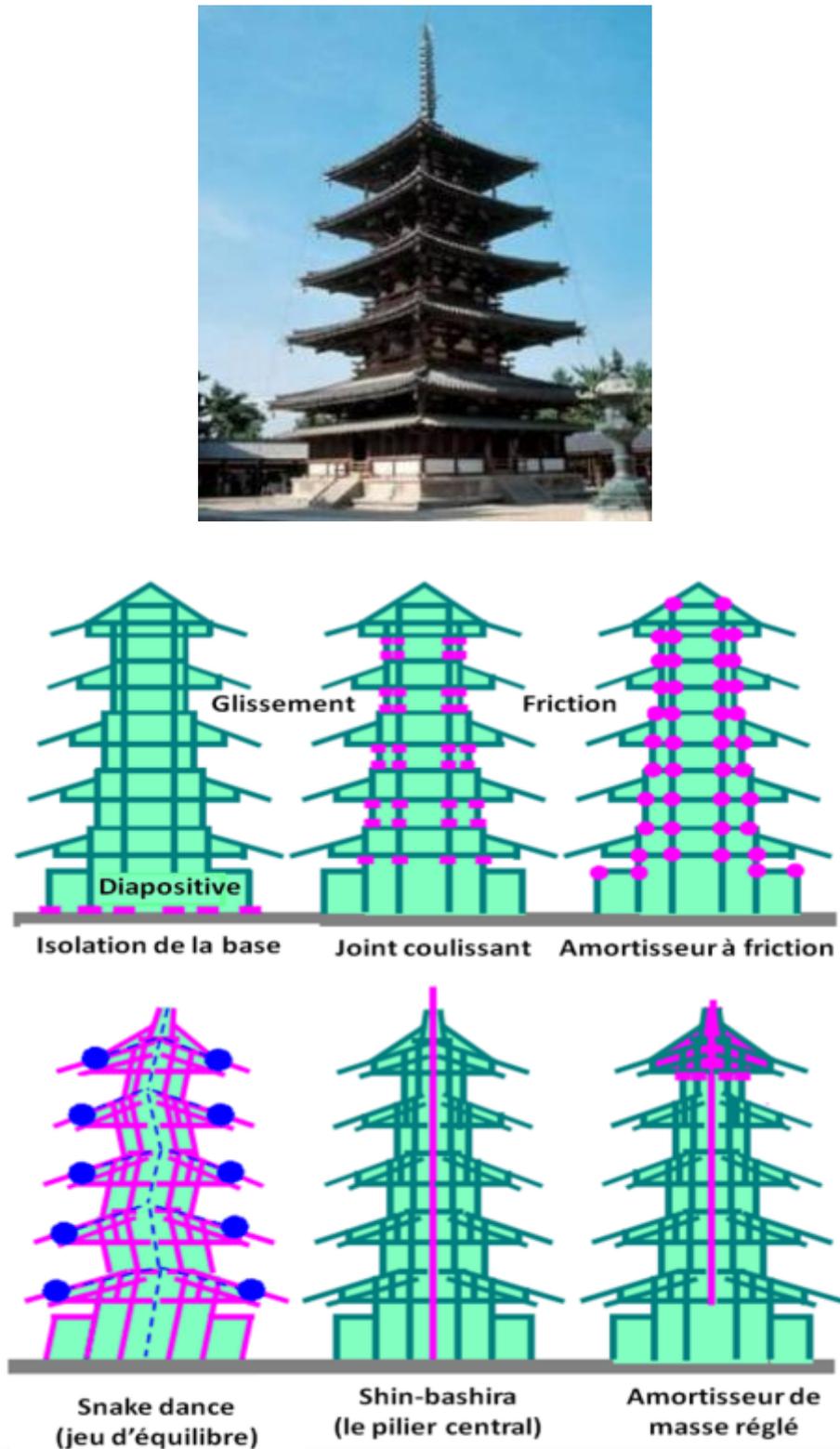


Figure 2. 3: Pagode du temple Hōryū-ji au Japon [3] et représentation des dispositifs de contrôle des vibrations de la pagode [60].

- Étude du temple de Qasr Al-Bint de Pétra en Jordanie

Qasr Al-Bint est l'un des sites archéologiques les plus connus. Il est situé dans le désert au sud-ouest de Petra, en Jordanie. Sa construction remonte à environ 300 ans avant JC. Les fouilles archéologiques entreprises dès le début du XXe siècle par les archéologues français dans les abords du Qasr el-Bint ont permis de reproduire une image 3D du temple, et ainsi effectuer des simulations numériques de la structure (Figure 2.4).

L'une des caractéristiques fondamentales de la construction nabatéenne est l'utilisation de cordages en bois. Cette technique suscite beaucoup l'intérêt de scientifiques. Hammond [61, 62] rapporte dans ses écrits que cette technique est purement une innovation nabatéenne. Le bois est le matériau le plus employé par certaine civilisation, dans différentes parties du monde, pour renforcer d'anciens bâtiments en terre et en maçonnerie.

Thomson [63] relate que, au cours du deuxième millénaire avant J.-C., le bois était largement utilisé pour renforcer les parties supérieures des murs de briques de terre crue en Anatolie et à Babylone dans les plaines mésopotamiennes. Kienzle [64] rapporte dans son étude sur les palais de Cnossos, que le laçage du bois était utilisé dans la construction de l'époque.

On trouve une pratique similaire en Crète minoenne, dans l'architecture grecque de l'âge du bronze [65], les bâtiments de l'âge du fer à Hazor, Samaria et Megiddo [66], les églises coptes des Ve et VIe siècles après J.-C. à Abu Mina, Barbara [67] et à Baouit en Égypte [68], dans les mosquées en Arabie du Sud [69] et en Afghanistan aux Xe et XIIe siècles, les bâtiments islamiques au Caire [70], ainsi que dans les médinas du Maghreb [71].

Selon Rababeh, les structures avec des poutres en bois encastrées présentent un niveau de dissipation d'énergie nettement plus élevé par rapport aux structures sans poutres de bois encastrées. La raison pour laquelle ce monument est encore debout, est dûe aux rangées de poutres de bois qui à intervalles réguliers dans ses murs le maintenaient uni. De ce fait, ces poutres (the wooden-string) fonctionnent comme un dispositif parasismique, ce qui peut réduire l'effet des charges sismiques sur la structure.

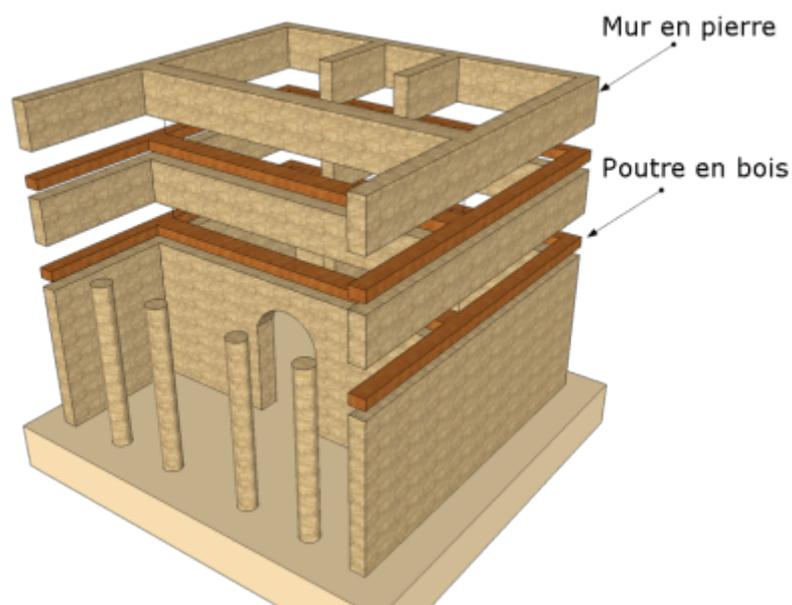
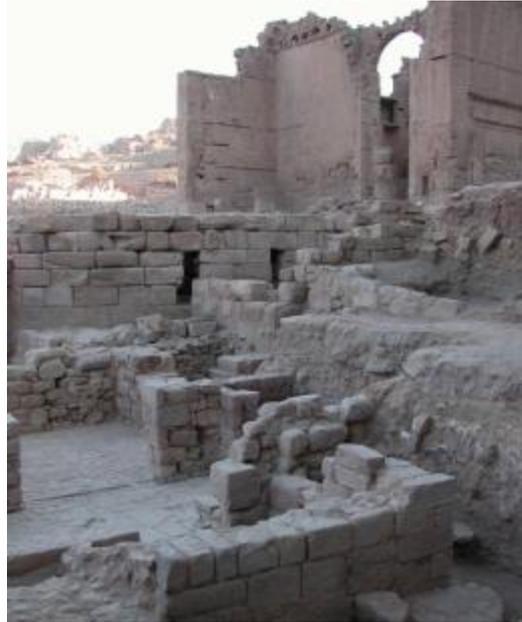


Figure 2. 4: Qasr al-Bint [72] et modèle 3D du temple[73].

- Les constructions parasismiques Machu Picchu, Pérou

La ville de Cusco (Pérou) est connue comme étant la capitale de l'empire inca. Dans une zone gravement touchée par les séismes, les Incas ont développé un système de construction de murs en utilisant de gros blocs de roches posés à joints vifs. Les Inca ont constaté sur certains bâtiments, que le mouvement du sol faisant basculer les composants du mur, comme si les blocs essayaient de rouler les uns sur les autres. Ils ont également observé qu'un bloc de pierre dissipera

l'énergie reçue lorsqu'il se déplace, ce qui faisait cesser son mouvement, et tant qu'il ne bouge pas excessivement, il peut revenir à sa position d'origine sous la force de rebasculement de son propre poids.

À partir de ces observations, les blocs de pierre de grande taille sont découpés de manière qu'ils soient emboîtés les uns dans les autres, et le tout se comporte comme un puzzle (Figure 2.5). Les murs sont formés d'un ensemble de pièces uniques : toutes peuvent bouger, mais aucune ne peut se détacher du plan de pose de l'ensemble. Ce type de taille de pierre nécessite beaucoup de temps et d'efforts, surtout en l'absence d'outils métalliques solides. Par conséquent, seuls les bâtiments sacrés ou célèbres peuvent être construits en utilisant cette technique.



Figure 2. 5: L'appareillage des blocs de pierre dans les constructions Machu Picchu, Pérou [74].

– La Casbah d'Alger en Algérie

La Casbah d'Alger représente un exemple emblématique de ville historique maghrébine. Un chef-d'œuvre architectural qui a eu une grande influence sur l'architecture et l'urbanisme moderne. Elle fut classée en novembre 1991 comme un site historique national, et puis au titre de secteur sauvegardé en 2003. En plus de sa richesse architecturale et urbanistique remarquable, elle regroupe un panel de techniques constructives sismo-résistantes.

Les investigations sur site conduites, par professeur Foufa [71, 75], sur la Citadelle, au palais du Dey, sur les maisons en ruine à l'intérieur de la médina et sur une maison privée du Fahs, ont permis de reconstituer la composition des

différents éléments qui composent la structure des bâtiments de la Casbah d'Alger. La caractéristique principale des techniques constructives sismo-résistantes des bâtiments est la présence d'un chaînage en bois depuis les fondations jusqu'aux murs.

La conception parasismique de la casbah d'Alger a largement inspiré les autorités françaises dans le projet d'urbanisation de la ville. En effet, le gouverneur général Bugeaud [76] demanda, en 1844, aux ingénieurs du génie français d'élaborer des règles de construction destinées pour l'Algérie. Afin de formuler des recommandations en matière d'architecture et d'urbanisme, les ingénieurs se réfèrent aux dispositions de la ville et des maisons mauresques de la casbah d'Alger. Sur la base des recommandations faites par les ingénieurs, le directeur du Génie en Algérie, le colonel Charon rédige une longue note au gouverneur d'Algérie :

« Les habitations mauresques modifiées et appropriées à nos habitudes sont les seules admissibles dans ce pays. Le climat et le risque de tremblement de terre doivent nous entraîner à étudier de près les constructions établies par les Arabes. Sans nous préoccuper ici des mœurs et des croyances religieuses qui ont eu une si grande influence pour déterminer la forme et la disposition des édifices des indigènes, nous reconnaitrons seulement l'existence de ce fait, et nous en concluons que les nouveaux habitants de l'Algérie, n'étant plus dirigés par ces mêmes influences pourront modifier cette forme et cette disposition, sans s'écarter toutefois des obligations imposées par la nature du sol et les exigences du climat. »[34]

Par conséquent, dans la même lettre, Charon a également fourni quelques recommandations pour les constructions en Algérie :

« Il est évident que pour obtenir dans les habitations une fraîcheur convenable, il faudra donner aux murs extérieurs une grande épaisseur et ne les percer que d'ouvertures rares et petites, surtout à l'exposition du midi ; peut-être aussi serait-il à propos de pratiquer une ventilation combinée de telle sorte, que l'on puisse aisément renouveler l'air. Sous le rapport de la solidité des constructions et sous celui de la sûreté des habitants, en raison de la probabilité des tremblements de terre, les édifices et les maisons devraient être peu élevés. Il

faudrait éviter avec grand soin d'affaiblir les murs, soit par des baies trop multipliées, soit par de trop fréquents passages de tuyaux de cheminées. Une des meilleures garanties de cette solidité consisterait à tenir les murs en fondation et ceux des étages inférieurs d'une forte épaisseur, et à voûter l'étage souterrain. Peut-être serait-il bon encore, dans quelques rues, de relier les bâtiments de l'un des côtés avec ceux de l'autre au moyen d'arcades établies de distance en distance, sous lesquelles on passerait, et qui pourraient, en outre, faciliter les moyens de tendre des bannes à l'heure de la grande chaleur, comme c'est l'usage dans l'Orient, et même dans les villes méridionales de la France. »[34]

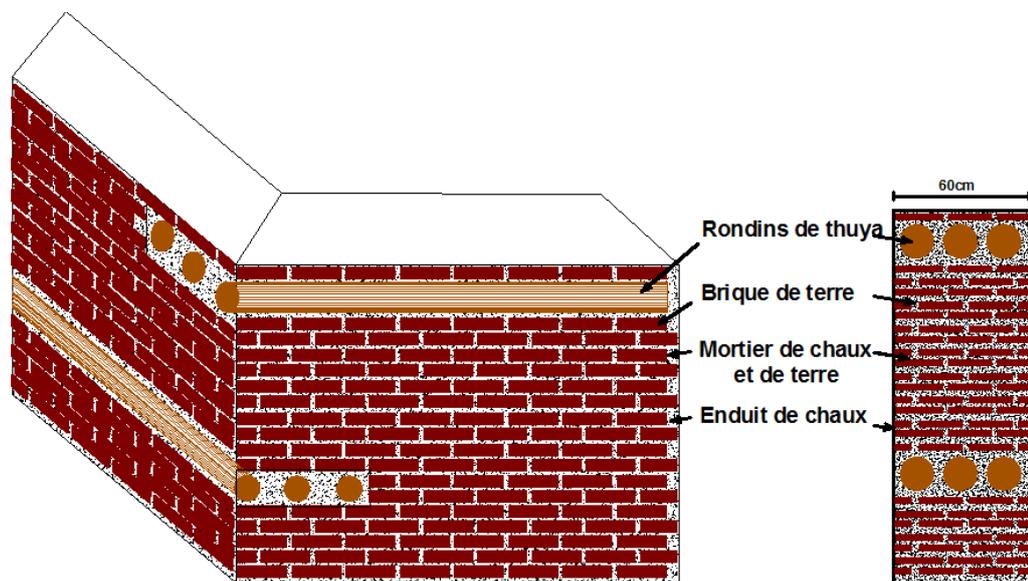


Figure 2. 6: Typologie constructive d'un mur chaîné avec des rondins de thuya [71].



Figure 2. 7: Chapiteau articulé et plancher en bois avec une superposition de deux rondins, la Casbah d'Alger [75].

3. La sismicité en Algérie

Depuis l'antiquité de nombreux séismes majeurs se sont produits en Algérie, causant de graves dommages et des pertes considérables (Sitifis, 419; Rusucurru (42 AD); Lambaesis (262 AD); Mostaganem (345 AD); Alger, 1365 et 1716; Oran, 1780; Blida, 1825 et 1857; Jijel 1856; Constantine 1858; Biskra, 1869 et Msila en 1885). Cependant, ce n'est qu'au séisme d'El Asnam en 1954 que les recherches scientifiques en sismologie et en génie sismique ont commencé et se sont développées après 1980 (El Asnam) puis 2003 (Boumerdès).

Des études historiques de l'activité sismique ont montré que la plupart des tremblements de terre affectant notre pays sont concentrés dans le nord. Il y a peu d'enregistrements de séismes forts dans le sud. Les tremblements de terre sont souvent mortels. Les sources historiques et l'actualité le confirment.

3.1. Bref historique de l'évolution de la sismologie en Algérie

Les premières recherches sur la sismicité en Algérie remontent à 1847. Bien que la réglementation parasismique soit récente, les publications sur les séismes datent de plus d'un siècle. Dès 1847, la sismicité en Algérie a suscité l'intérêt de l'un des pionniers dans le domaine, Alexis Perrey [77], qui publia une note sur les séismes en Algérie et dans l'Afrique dans les Mémoires de l'Académie des Sciences Arts et Belles Lettres de Dijon. Il publia également dans la même revue une liste des séismes ressentis en Algérie de 1844 à 1855.

Ces recherches vont être suivies en 1892 par la publication dans l'Annale des Mines, une note sur les séismes majeurs de la période 1716-1887, contenant des détails assez pertinents, par M. Chesneau. Dans le même annale de Montessus de Ballore publièrent quelques commentaires sur le nombre de séismes ressentis en Algérie sous le titre « La France et l'Algérie sismiques », et édita un livre intitulé « les tremblements de terre géographie sismologique » publié à Paris en 1906.

Plus tard en 1910, le Service Météorologique de l'Algérie et l'observatoire de Bouzareah (Alger) publient des bulletins mensuels des séismes de 1910 à 1949. À

cela s'ajoute, les publications d'A. Hée[77], assistante à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg spécialiste dans la sismicité de l'Algérie.

Ensuite, l'Institut Météorologique et de Physique du Globe de l'Algérie (IMPGA) avec J.P. Rothé (professeur à la faculté des sciences de Strasbourg) publièrent en 1950 un article accompagné d'une carte isoséiste qui décrit brièvement les principaux tremblements de terre survenus entre 1716 et 1749, intitulé « les séismes de Kherrata et la sismicité de l'Algérie », dans le Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie

Après l'indépendance, le service sismologique de l'IMPGA de l'Algérie dirigé par M. Lagrula reprend ces fonctions grâce aux chercheurs : H. Benhallou, A. Ferrer, J. Roussel, N. Girardin et A. Grandjean, qui entament un travail de dépouillement d'enquêtes macrosismiques pour faire paraître en 1971 les premières publications de l'IMPGA relatives aux séismes en Algérie.

En 1980, le centre national d'astronomie, d'astrophysique et de géophysique (CNAAG) fut créé sous la direction de Benhallou. Après six ans, le CNAAG change de nom et devient Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique (CRAAG). À partir de 1986, le CRAAG[38] a eu pour mission principale la recherche dans les domaines de l'Astrophysique et de la Géophysique, et la surveillance sismique du territoire.

Suite au séisme d'El Asnam (Chlef aujourd'hui) survenu le 10 octobre 1980, le gouvernement algérien créa le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS)[39] avec pour mission le développement des connaissances dans les différents domaines du génie parasismique. Ainsi, depuis sa création le CGS a de nombreuses études approfondies et enquêtes menées à propos des secousses sismiques en Algérie.

3.2. Importance du risque sismique en Algérie

Parmi les catastrophes naturelles qui affectent la surface de la terre, les séismes peuvent être considérés comme les plus destructeurs dans les zones urbanisées. Sur le plan international [54], le très important séisme de Kobé au Japon (17 janvier 1995), survenu un an après celui de Northridge en Californie (17 janvier 1994), nous amènent à nous tourner une fois de plus vers l'architecture

parasismique. Malheureusement, les événements sismiques continueront de surprendre l'humanité. Face à ce risque et à l'incapacité de le prédire, la seule mesure préventive efficace est la construction parasismique.

L'Algérie à l'égard des pays du Maghreb, est constamment menacée par cette catastrophe naturelle. Toutefois, à chaque séisme important, on observe un regain d'intérêt pour ce sujet. Deux événements sismiques, de Chlef en 1954 et puis celui de 1980, ont certainement contribué à cet intérêt grandissant. L'expertise a montré que la plupart des bâtiments endommagés lors de ces séismes n'étaient pas de conception parasismique ; construits avant 1980, ils n'ont pas pu bénéficier du code moderne parasismique Algérien.

La probabilité de l'occurrence d'un séisme destructeur dans le nord de l'Algérie n'est pas nulle. Même si l'on décide de construire de nouveaux bâtiments selon les règles parasismiques, le parc des logements anciens reste vulnérable.

3.3. Inventaire des séismes majeurs survenus depuis 419

Le nord de l'Algérie a connu plusieurs séismes violents au cours de son histoire (Figure 2.12). Le cas le plus ancien enregistré est le séisme d'Alger d'intensité X en 1365, qui a détruit toute la ville et déclenché un tsunami. Le dernier cas enregistré a été le séisme de Boumerdes le 21 mai 2003, d'une magnitude de 6,8, qui a tué et blessé des milliers.

Tableau 2. 1: Liste des grands séismes historiques enregistrés dans l'Algérie depuis 419

Date	Localisation	Magnitude (Ms)	Intensité (Io)	Référence	Les règles parasismiques	Images
419	Sétif			Guidoboni et al. (1994)[78]		 <p>Figure 2. 8: Gravure montrant la ville de Djedjelli avant et après le séisme des 21-22 Aout 1856 [79]</p>
02/01/1365	Alger	Forte	X	Ambraseys and Vogt (1988)[79]		
03/02/1716	Alger	Forte	IX	Ambraseys and Vogt (1988)[80] Abdessemed-Foufa et Benouar (2010)[43]	Mesures parasismiques de Dey Chaouch Alger	
29/11/1722	Alger			Ambraseys and Vogt (1988)[80]		
09/10/1790	Oran			Lopez Marinas and Salord (1990)[81]		
03/1819	Mascara			Mokrane et al. (1994)[77]		
02/03/1825	Blida	Forte	IX	Ambraseys and Vogt (1988)[80]		
22/11/1851	Mascara			Rothé (1950)[82]		
22/08/1856	Djidjelli			Ambraseys (1982)[79]		
09/03/1858	Mitidja			Ambraseys et al. (1991)[83]		
16/11/1869	Biskra			Rothé (1950)[82]		
23/09/1903	Blida	5,6		JICA (2006)[84]		
24/06/1910	Sour el Ghouzléne	6,4-6,6	X	JICA (2006)		
25/08/1922	A. el Hassan	5,1	IX-X	JICA (2006)		
07/09/1934	El At-El Ab	5,0	IX	JICA (2006)		
09/09/1954	Chlef	6,7	X-XI		Recommandations parasismiques AS55	
12/02/1960	Béjaia	5,6	VIII-IX	JICA (2006)		
21/02/1960	M'sila	5,6	VIII	JICA (2006)		
01/01/1965	M'sila	5,5	VIII	JICA (2006)		



Figure 2. 9: L'effondrement des structures en béton armé, séisme de Chlef de 1954 [40]

24/11/1973	Mansourah	5,1	VII	JICA (2006)		
10/10/1980	El Asnam	7,2		JICA (2006)		
27/10/1985	Canstantine	5,9	VIII	JICA (2006)	Règles parasismiques Algériennes RPA 81et 83	
31/10/1988	El Affroun	5,6	V	JICA (2006)	Révision en RPA88	
29/10/1989	Mont Chenoua	6,0	VIII	JICA (2006)		
18/08/1994	Mascara	5,8		JICA (2006)		
04/09/1996	Ain Benian	5,3		JICA (2006)		
22/12/1999	Ain Timouchent	5,4		JICA (2006)	Révision du zonage en RPA99	
10/11/2000	Beni Ourtilene	5,7		JICA (2006)		
21/05/2003	Zemmouri	6,8	X	Ayad et al (2015)[85]	Révision du RPA99 en RPA2003	
20/03/2006	Laalam	5.2	VII	Ayad et al (2015)[85]		
4/05/2010	Beni Ilmane	5.2	VII	Ayad et al (2015)[85]		
07/08/2020	Mila	4,9		CRAAG (2020)[38]		
22/11/2020	Skikda	5,2		CRAAG (2020)		

Figure 2. 10: Effondrement des cités d'habitations suite au séisme de Boumerdes en 2003 [38]

Figure 2. 11: Bâtisses menacées d'effondrement, séisme de Mila, 2020 [38]

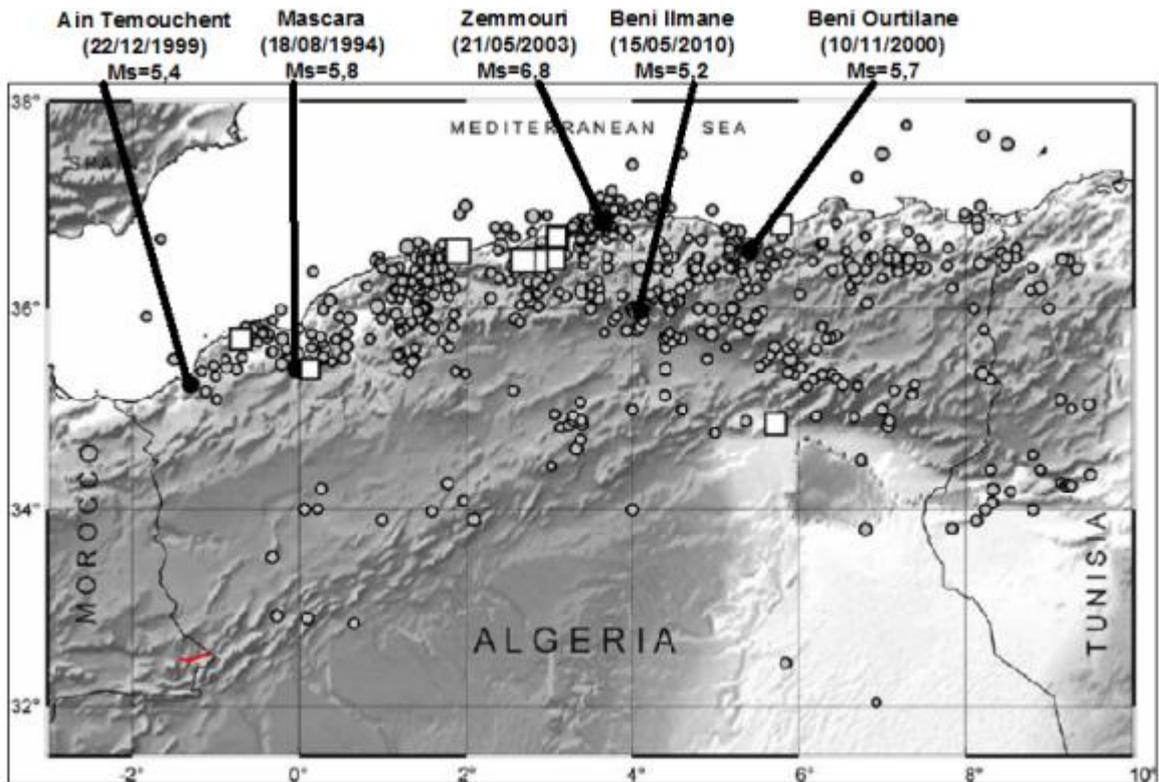


Figure 2. 12: Sismicité de l'Algérie en considérant les événements d'une magnitude $M \geq 5,0$. Les cercles noirs et gris représentent les événements de 1900 à 2013. Les carrés blancs représentent les événements de 1365 à 1900 [85].

3.4. Naissance du premier règlement parasismique Algérien

Depuis 1365, le nord de l'Algérie a connu une activité sismique importante, un séisme majeur d'intensité X [86] s'est produit cette année, suivi d'autres tremblements de terre majeurs. Parmi eux, El Asnam en 1954 et 1980 et Boumerdès le 21 mai 2003, furent les plus néfastes sur le plan économique et perte de vie humaine.

Après chaque séisme, les autorités prennent immédiatement des mesures d'urgence pour évaluer les dommages et déterminer quels bâtiments ne sont pas dangereusement occupés, et formuler une réglementation sismique tenant compte des dommages observés sur site. En effet, les trois tremblements de terre mentionnés précédemment ont donné respectivement naissance au premier code parasismique algérien en 1954, puis en 1981 et à sa dernière révision en 2003. .

D'un point de vue historique, il convient de rappeler qu'à la veille du séisme important qui a frappé la ville de Chlef, le 09 septembre 1954, l'Algérie ne disposait pas d'une réglementation en vigueur. Hormis les mesures préventives du Dey Chaouch[87] pour Alger en 1716, aucun texte officiel justifiant la résistance des constructions face aux risques sismiques n'a été édité.

Le séisme de Chlef a donné naissance au premier code parasismique « Recommandations AS55 »[40]. Il s'agit d'une note de deux pages, éditée par les services de construction du gouvernement général d'Algérie, sous la direction de M.G. Blachère[88]. Le document dit AS55 présente un caractère non officiel hérité de la période coloniale, a été appliqué seulement pour les projets de grande envergure. De plus, même dans les bâtiments où les recommandations AS55 sont appliquées, elles ont montré des lacunes évidentes lors de ce séisme[77]. Les recommandations AS55 fut révisées sous une forme plus substantielle en 1962 sous le nom de règles parasismiques PS62.

Par la suite des règles plus élaborées ont suivi suite aux événements sismiques. En 1973, le ministère algérien des travaux publics et de la construction a publié des recommandations sismiques sous forme de brochure[40], principalement basées sur le PS69 français. Les recommandations de 1973 contenaient une annexe qui indiquait la sismicité dans différentes régions du pays. Là encore, les dispositions n'ont pas été appliquées.

Après le séisme de Chlef, le règlement parasismique Algérien RPA 81 a été édité, et fut révisé et approuvé en 1983, 1988 puis en 1999. D'un point de vue juridique, le RPA 81 est le premier règlement parasismique, étant donné, le caractère non-officiel des recommandations AS55.

Le projet de rédaction du RPA81 a été préparé par l'Organisme National de Contrôle Technique de la Construction CTC en collaboration avec l'université de Stanford Californie, et une carte de micro-zonage sismique est élaborée par le professeur H. Shah[77].

Pour résumer, les textes réglementaires parus depuis le 09 septembre 1954 en Algérie sont les suivants :

- Recommandation AS55

- RPA 81/88
- RPA 99/2003

3.5. Lecture dans le contenu des recommandations parasismique AS55 et le règlement parasismique Algérien RPA99/2003

D'après l'analyse des divers articles du règlement parasismique Algérien RPA99/2003[89], on constate une grande amélioration dans les textes réglementaire et une évolution considérable par rapport aux recommandations parasismique AS55. Ce dernier, son caractère non officiel et la pauvreté des textes, qui le constituent s'est traduit sur le terrain par le nombre important de bâtiments effondré lors du séisme de 1980.

Malgré les progrès réalisés dans l'RPA99/2003, beaucoup de lacunes peuvent être énumérées. Les bâtiments existants n'ont pas été pris en considération dans l'élaboration de ce document technique. Les règles parasismiques concernant le patrimoine bâti ancien sont inexistantes.

À cela s'ajoute, les recommandations énoncées par professeur Kebaili[89], suite à une étude critique de l'RPA99/2003. Elles se résument comme suit :

- Compte tenu de la vulnérabilité des structures à système de contreventement poteaux poutres auto stables avec maçonnerie insérées soient plus restreints d'utilisation, en fonction du nombre d'étages, de la nature du site et de la zone sismique.
- Donner une définition simple basée sur la maçonnerie insérée dans les cadres poteaux poutres sans aucune autre indication prêtant à confusion et interprétation.
- Réviser les coefficients de comportement pour les structures auto stables avec insertion de la maçonnerie et pour les structures mixtes.
- Introduire la répartition de la maçonnerie dans la définition des structures régulières et la mission de contrôle et de suivi dans le critère de comportement après les séismes.
- Le degré de ductilité de la structure doit être défini en fonction de la qualité d'exécution et du contrôle.

- Utiliser le même spectre de calcul simplifié pour le calcul statique et dynamique sans aucune majoration.
- Mettre à jour les combinaisons de charges avec le règlement de béton armé CBA93, l'utilisation obligatoire des cadres au lieu des U au niveau des nœuds, les recouvrements sont à éviter en zone nodale sinon appliquer une majoration en termes de longueur, enfin mettre en conformité les calculs exposés avec ceux du béton armé aux états limites.

Tableau 2. 2: Etude comparative entre les recommandations parasismiques AS55 et le règlement parasismique Algérien RPA99/2003

	Recommandations AS55[40]	Réglementation RPA99/2003[90]
Statut du document	Non-officiel /Non obligatoire	Officiel/Obligatoire
Conception générale des bâtiments	Les dimensions des bâtiments sont déterminées par le rapport hauteur/largeur, qui ne doit pas dépasser (Figure 2.13) : Zone A : 2.5 Zone B : 2.0	La hauteur du bâtiment de doit pas dépassée pour les structures en maçonnerie (Figure 2.13) : Zone I : 17 Zone II : 14 Zone III : 11
Configuration parasismique en plan	Éviter les grandes ailes et ouvertures pour les formes en L ou T.	Il faut Privilégier des formes simples et régulières en plan et en élévation. Pour la maçonnerie, les dimensions des ouvertures et des éléments structuraux doivent respecter la condition : $\sum b_i \leq 0.5 L_i$ Pour les trumeaux extrêmes : $a_1 \geq 1.00$ m Pour les autres trumeaux :

		$a_2 \geq 1.00$ m pour la zone III $a_2 \geq b_1 + b_2/2$ pour les zones I et II
Fondation	<p>Éviter toutes fondations hétérogènes.</p> <p>Réaliser une liaison très résistante entre les fondations et la superstructure.</p> <p>Établir des fondations profondes soigneusement chaînées et engagées dans le sol résistant.</p> <p>Prise en compte de l'interaction sol / structure.</p> <p>Liaison entre les points d'appui : longrine / chaînage</p>	<p>Le système de fondations doit former un ensemble résistant et rigide. Le système de fondation doit être homogène (semelles superficielles, radier, pieux) avec un seul mode de fondation par bloc de construction, délimité par des joints. Il doit autant que possible constituer une assise horizontale unique sur toute l'emprise du bloc.</p>
Superstructure	<p>Distribution des masses en hauteur</p> <p>Réduire les charges verticales dans les parties supérieures et abaisser le plus possible le centre de gravité de la construction.</p> <p>Éviter notamment les terrasses et toitures lourdes.</p> <p>Construction en maçonnerie : chaînages horizontaux et verticaux tous les 5.00 m</p> <p>Encadrements autour des ouvertures : raidisseurs liés à structure</p>	<p>Les ouvrages doivent généralement comporter des contreventements dans au moins les deux directions horizontales, de façon à assurer une transmission directe des forces aux fondations.</p> <p>Les distances maximales entre les murs en maçonnerie porteurs sont fixées comme suit :</p> <p>Zone I : 10.00 m Zone II : 08.00 m Zone III : 06.00 m</p>

Joint sismique	<p>Joins entre deux bâtiments : ce point a été complété dans les règles parasismiques qui ont suivi les AS55 par l'augmentation de la largeur du joint passant à 5.00 cm.</p>	<p>La disposition des joints sismiques peut coïncider avec les joints de dilatation ou de rupture. Ils doivent assurer l'indépendance complète des blocs qu'ils délimitent et empêcher leur entrechoquement.</p> <p>Le calcul de la largeur de joint sismique, dont la largeur minimale d_{min} satisfait la condition suivante : $d_{min} = 15mm + (\delta_1 + \delta_2) mm \geq 40 mm$</p>
Les règles de calcul	<p>Composante horizontale : effort sismique : $F = \sigma P$ Calcul effort sismique : σP avec $\sigma = \sigma_1 * \sigma_2 * \sigma_3$ Coefficient de zone : σ_1 Coefficient de terrain : σ_2 Coefficient de fondations : σ_3 P : le poids de la structure Composante verticale : $F = \pm 2 \sigma P$ avec $\sigma = \sigma_1 * \sigma_2 * \sigma_3$</p>	<p>Force sismique : $V = ADQW/R$ A : coefficient d'accélération de zone D : facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (h) et de la période fondamentale de la structure (T). Q : facteur de qualité W : poids de la structure R : coefficient de comportement global de la structure</p>
Carte de zonage sismique (Figure 2. 13)	<p>Il est défini 2 zones sismiques classées comme suit :</p> <p>Zone A : sismicité faible Zone B : sismicité élevée</p>	<p>Il est défini 4 zones sismiques classées comme suit :</p> <p>Zone 0 : sismicité négligeable Zone 1 : sismicité faible Zone 2 : sismicité moyenne Zone 3 : sismicité élevée</p>

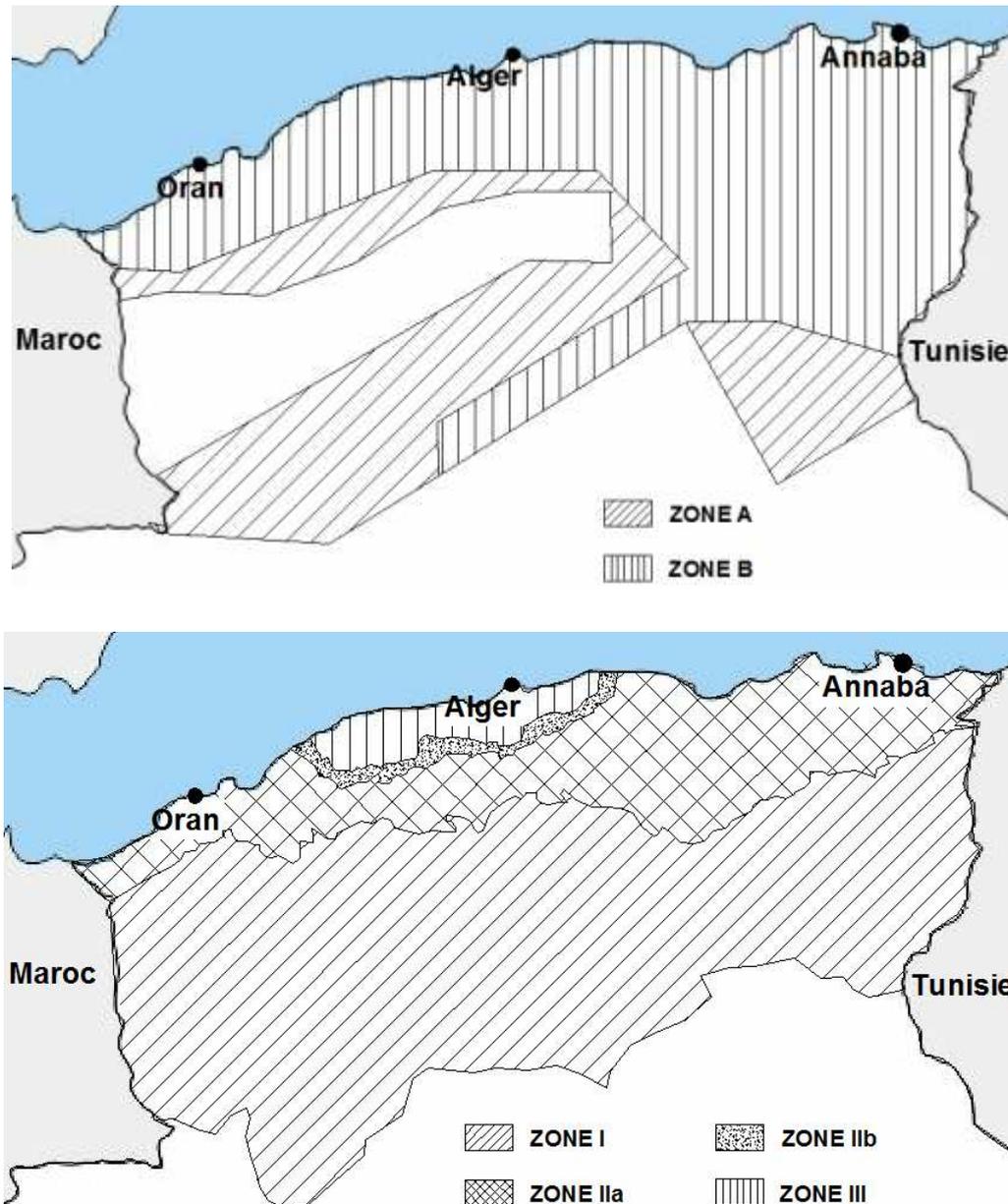


Figure 2. 13: Cartes de zonage sismique AS55 et RPA 99/2003.

4. Détermination des cas d'études

4.1. Critères de choix des cas d'étude

Dans ce travail de recherche, les cas d'étude seront déterminés en fonction de certains critères :

- La zone sismique : la ville d'Alger est l'exemple le plus pertinent de villes fortement touchées par les séismes, et est classée comme une zone à forte activité sismique (zone III) selon le règlement parasismique algérien RPA99/2003.

- La date de réception du projet : seuls les bâtiments réalisés avant l'apparition des recommandations AS55 seront sélectionnés dans cette étude.

4.2. Lecture dans les rapports et PV de chantier de l'Office Public D'habitation à Loyer Modéré de la ville d'Alger (OPHLM)

D'après la lecture des rapports de chantier, les recommandations parasismiques AS55 ont été évoquées pour la première fois dans le PV des réunions du chantier Climat de France n°76 du 28-02-1956 [91].

À cette date, une réunion est programmée entre Fernand Pouillon (architecte en Chef de l'OPHLM), Colomb (ingénieur en Chef de la ville d'Alger et Conseiller Technique de l'OPHLM), Dervieux (directeur du Centre Expérimental de Recherche et d'Étude du Bâtiments et des Travaux Publics), Barthe Daure (architectes d'opération), Pourey (chef du Service de la Voirie), Ayme (géologue), Pays Caruana (bureau de coordination), Despsyroux Joron (bureau SECURITAS d'Alger), Porcher de l'OPHLM, ainsi que les représentants des entreprises (URIOS, Leon Ballot, Grands travaux de l'Est, CERSTLE, Leon Chagnaud et fils, Routière Roussel...) pour discuter sur les deux lettres de l'entreprise URIOS qui est représenté par Urios, Sornay et Schurdevin .

URIOS est l'entreprise de réalisation de gros œuvre, dirigé par René Urios, et choisi par Pouillon pour la construction des logements de la Tourette, les deux cents logements d'Aix, les cités d'habitation d'Alger et bien d'autres projets.

Dans les lettres reçues par Pouillon, deux points importants ont été soulevés par l'entreprise URIOS. La première étant que jusqu'à cette date, il n'a encore aucune instruction sur les dispositions asismiques à adopter. La deuxième est que les mesures envisagées par l'architecte ne satisfont pas aux recommandations AS 55.

« Asismie » est le terme utilisé dans le document pour désigner les mesures parasismiques. Au départ, il a été convenu suite à la réunion de chantiers PV n°77 du 06-03-1956 [91] d'apporter des modifications sur les plans des bâtiments encore non réalisés et les bâtiments commencés par les entreprises seront continués sans tenir compte des réserves de SOCOTEC puisqu'ils sont exécutés

suivant les plans. Par la suite, l'application des règles AS 55 a été abandonnée et supprimé dans le descriptif du projet par Gallotti (PV n°79 du 20-03-1956)[91] et Rouquette. Seules les directives données par SOCOTEC sont suivies. Cela peut être justifié par le coût que peut engendrer ce genre d'intervention.

Il est important de rappeler que des mesures parasismiques ont été entreprises dans les chantiers de Pouillon avant même cette réunion (Figure 2.15). En décembre 1955, une conférence s'est tenue à ce sujet à Paris en présence des représentants de la SOCOTEC[92]. Il y aurait été envisagé de raidir certaines cloisons par des potelets d'angle en béton armé. Des chainages verticaux « poteau parasismique » [91] ont été ajoutés à la structure (PV 87 du 15-05-1956).

La même année de lancement du projet de Climat de France, la cité des eucalyptus d'Alger, de l'architecte Michel Luyckx, a vu le jour. Contrairement à Climat de France, les immeubles de la cité des eucalyptus sont construits suivant les recommandations parasismiques établies à la suite du tremblement de terre d'Orléans ville. Les éléments résistants sont des voiles en béton armé distants de 20 mètres, et limitant un groupe de trois appartements desservis par une cage d'escalier [93].



Figure 2. 14: Image prise dans le chantier Climat de France, dans laquelle figure les poteaux parasismiques.

4.3. Extraits des les rapports et PV de chantier de l'Office Public d'Habitation à Loyer Modéré de la ville d'Alger

4.3.1. P.V. 73 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 7-02-1956

– Antisismie :

En ce qui concerne les mesures envisagées pour améliorer la résistance aux séismes, Despeyroux informe Pouillon que les bâtiments ont été classés par type car chaque bâtiment représente un cas particulier.

Un avant-projet par bâtiment devra être remis aux entrepreneurs.

En ce qui concerne les plans d'exécution, Despeyroux demande à Pouillon de permettre au bureau SECURITAS de faire ces études sur la planche à dessin avec les entreprises.

Pouillon estime qu'il serait préférable de réaliser une planche de prototypes qui serait reportée sur les autres en autant de jeux nécessaires à la réalisation, ce qui permettrait d'effectuer immédiatement les estimations.

Ce projet ne suscite aucune objection de la part des entreprises.

Il est en conséquence décidé qu'un projet type sera préparé par le bureau SECURITAS puis mis à jour par le bureau d'étude de l'architecte chef et qui sera donné à chaque entreprise pour les bâtiments la concernant.

– Liaison :

Pour la liaison entre infrastructure et superstructure des parties de travaux déjà exécutés, il est impossible d'ancrer les poteaux.

En ce qui concerne les bâtiments futurs, il y a lieu de prévoir des attentes pour les potelets en question. La prise des potelets dans les planchers telle qu'elle est prévue n'est pas suffisante, car la liaison ne serait faite que par frottement. Il sera donc placé des aciers en attente dans les infrastructures, ancrés d'un mètre dans les bétons.

Pouillon précise que les entreprises exécuteront leurs infrastructures suivant les plans initiaux et ne mettront les fers en attente que lorsque les indications seraient données par SECURITAS.

4.3.2. P.V. 76: chantier Climat de France, réunion de chantiers du 28-02-1956

– Asismie :

Pouillon donne lecture de deux lettres de l'entreprise URIOS (jointes au présent P.V), dans lesquelles celle-ci fait savoir, d'une part, qu'elle n'a encore aucune instruction sur les dispositions asismiques à adopter et, d'autre part, que les mesures envisagées par l'architecte ne satisfont pas aux recommandations AS 55. Pouillon souligne que les dispositions envisagées sont celles préconisées par la direction du bureau SECURITAS et s'étonne que l'on revienne sur cette question.

Urios communique les plans qui lui ont été remis par SECURITAS. Pouillon constate que ces plans ne correspondent pas aux décisions adoptées à Paris et décide qu'une réunion aura lieu mardi prochain, réunion à laquelle il demande que des représentants qualifiés de SOCOTEC soient présents.

Pouillon précise au bureau SECURITAS qu'aucune réunion ne doit avoir lieu avec les entreprises en dehors du bureau de l'architecte en chef auquel toutes les dispositions doivent être soumises.

Despeyroux fait remarquer que contrairement aux termes de la lettre de l'entreprise URIOS et suivant les termes du cahier des charges particulières, il appartient à l'entreprise d'établir des plans et de les soumettre à SECURITAS pour approbation.

Pouillon fait remarquer à SECURITAS qu'étant donné que l'asismie a été demandée par le bureau SOCOTEC, il appartient à SOCOTEC de faire ses calculs et de donner toutes instructions aux entreprises pour l'établissement de leurs plans.

4.3.3. P.V. 77 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 06-03-1956

– Asismie :

Pouillon signale que Rouquette sera à Alger avant la fin de la semaine et qu'il prendra contact avec Dervieux, Moussu et la coordination pour préparer le voyage de M. Mercy.

Il sera demandé aux entreprises de faire quelques travaux de nettoyage, et à chacun d'aider Rouquette en donnant tous renseignements utiles pour la préparation de son rapport à l'intention de Mercy (responsable de la société SOCOTEC).

– Réserve SOCOTEC :

M. Pouillon fait remarquer à SECURITAS Alger que la réserve faite au sujet de l'antisismie hors de l'approbation des plans paraît inutile étant donné qu'ils ont été faits sur les principes donnés par Mercy et mis au point par Rouquette en compagnie de Gallotti.

Les bâtiments commencés par les entreprises seront continués sans tenir compte des réserves de SOCOTEC puisqu'exécutés suivant les plans.

– Paliers intermédiaires :

Pour les paliers intermédiaires, Pouillon autorise les entreprises à faire une dalle en béton en remplacement du plancher à marmites.

– Approbation des plans :

Despeyroux fait remarquer que certains plans d'infrastructure devraient rester en attente du fait de la répercussion des plans de la superstructure à modifier pour assurer l'asismie des bâtiments.

– Antisismie :

Cette question est suspendue pour le moment. Mercy donnera son avis dans quelques jours. Les entreprises continueront à travailler selon les plans initiaux.

– Planchers :

Mercy signale que des planchers ont été réalisés dont le bureau de contrôle technique SECURITAS n'avait pas les plans. Il demande que cela ne se produise

plus. Mercy précise qu'il donne son accord sur le plancher exécuté par l'entreprise URIOS.

– Plans entrepris :

Un plan d'infrastructure remis par G.T.E, indiquait des murs en béton banché à travers lesquels des poteaux de béton armé, espacés de 3 à 3,50 m d'une façon systématique, passaient.

Mercy estime inutile du point de vue asismique ou stabilité de fondation cette précaution qui est certainement d'un prix très élevé.

Pouillon fait remarquer que cela n'est pas payé. Il précise que les fondations doivent être exécutées suivant les plans de l'architecte et que seules, les modifications imposées par SOCOTEC, seront payées.

Mercy demande à Pouillon l'autorisation pour le bureau SECURITAS d'étudier du point de vue technique ces questions directement avec les entreprises. Pouillon donne cette autorisation, mais précise que la décision adoptée devra être soumise à la réunion du mardi.

– Modification A :

Une modification a été faite par SOCOTEC dans le A.

L'entreprise demande des explications au sujet du doublage demandé en brique C au lieu de brique A, dans les façades intérieures. Cette disposition fait suite aux mesures parasismiques, répond Despsyroux.

Lacoin demande que les nouvelles formules soient indiquées le plus rapidement possible, car il faut informer les briquetiers du changement à apporter à la fabrication des briques.

Urios et Piques signalent l'incidence économique de l'emploi de ces nouvelles briques sur les prix du marché. Mercy demande de réserver cette question quelques jours.

4.3.4. P.V. 87 : chantier Climat de France, réunion de chantiers du 15-05-1956

– Points importants sur chantier :

Pouillon fait remarquer aux entreprises que les briques sont mal montées ; les joints sont trop forts (ils doivent être en moyenne de 1 cm à 2 cm maximum). Les dessous de planchers au bâtiment B4 sont à reprendre entièrement ainsi que les liaisons asismiques : potelets pierre-murette. En ce qui concerne la pierre, Pouillon félicite les entreprises sur la façon de son montage.

Poteau parasismique : il serait nécessaire d'avoir des renseignements sur le prix de revient des potelets parasismiques le plus rapidement possible.

Fondations B4 : pour ce bâtiment qui se trouve moitié sur un rocher et moitié sur une marne bleue très compacte, Pouillon demande à SECURITAS d'étudier le remplacement des armatures de la semelle et des murs ainsi que du premier chaînage.

4.3.5. Réunion de coordination : commission de coordination des chantiers, Climat de France (Réf : 31P), le 12-12-1955

– Asismie :

Pouillon informe la commission qu'une conférence s'est tenue à ce sujet à Paris en présence des représentants de la SOCOTEC. Il y aurait été envisagé de raidir certaines cloisons par des potelets d'angle en béton armé. La somme nécessaire au règlement de ce supplément de travail est prévue au plan de financement.

4.4. Cas d'étude : les cités d'habitation d'Alger (Diar es Saada et Diar el Mahçoul)

Pendant la période coloniale, l'architecte Fernand Pouillon a construit trois cités d'habitation en Algérie. La première étant la cité d'habitation, Diar es Saada (750 logements) à El Madania. La pose de la première pierre du chantier a commencé le 04 août 1953 et réceptionné en octobre 1954. La deuxième est la cité d'habitation Diar el Mahçoul (1800 logements), également à El Madania. Les travaux débutèrent le 15 avril 1954 et furent livrés le 01 octobre 1955. La troisième est la plus grande cité d'Alger, la cité d'habitation Climat de France (3 500 logements), située sur les hauteurs de Bab El-Oued. Les travaux débutèrent le 4 août 1954 et furent livrés en 1957.

Ainsi, après lecture des rapports du chantier des trois projets, il a été conclu que des mesures parasismiques ont été appliquées dans les bâtiments conçus après l'apparition des recommandations parasismiques AS55. Dans ce travail de recherche, seuls les bâtiments non concernés par AS55 seront étudiés. À partir de là, les deux cités d'habitation Diar es Saada et Diar el Mahçoul ont été sélectionnées pour cette étude, et la cité d'habitation Climat de France a été écartée des cas d'étude.

5. Conclusion

À travers l'histoire, construire des structures parasismiques a toujours été une des préoccupations de diverses civilisations. De l'époque de la civilisation sumérienne en Mésopotamie jusqu'à ce jour les techniques de construction sismo-résistantes n'ont jamais cessé d'évoluer pour s'adapter aux besoins contemporains.

En Algérie, durant la majeure partie de la période coloniale française, la résistance aux séismes n'a pas été le premier problème que les Français ont trouvé le plus inquiétant dans la construction. C'est ce qu'on a pu constater à travers la lecture du numéro 03-1939 de la revue « Architecture d'aujourd'hui » consacré à l'Afrique du Nord. La menace sismique a été à peine soulignée et n'a jamais été considérée comme un problème majeur de construction.

Certes des mesures parasismiques existent, mais aucun code n'encadre la conception parasismique du bâtiment. Les deux grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul font partie de ces bâtiments, conçus bien avant l'application des recommandations AS55, et qui ont survécus aux événements sismiques qu'a connu la ville d'Alger et ses abords. De ce fait, des études approfondies vont être faites pour comprendre le comportement sismique des grands ensembles et de tirer des leçons du génie constructif de Fernand Pouillon.

CHAPITRE 03

CONCEPTION PARASISMIQUE DES GRANDS ENSEMBLES DIAR ES SAADA ET DIAR EL MAHÇOUL

1. Introduction

Comme mentionné dans les chapitres précédents, de grands changements se sont produits dans la seconde moitié du XXe siècle : la construction de nombreux logements sociaux, le développement de logements à grande échelle, l'industrialisation du bâtiment, l'évolution de la préfabrication lourde et légère, etc. L'Algérie a constitué un terrain d'expérimentation architecturale des différentes formes de logements sociaux pour les architectes de l'époque, comme Fernand Pouillon, dont les grands ensembles d'Alger demeurent encore célèbres. Deux caractéristiques singulières marquent ses projets, Diar es Saada et Diar el Mahçoul : la recherche d'un modèle d'habitat méditerranéen et de montrer qu'on peut faire de la qualité même si on fait de la quantité.

Pouillon fut éventuellement l'architecte français qui a construit le plus de logements en Algérie, tous de bonne qualité, moins cher et plus vite. Aujourd'hui, plus de 67 ans se sont écoulés depuis la pose de la première pierre dans la première ville d'Alger, les immeubles sont fonctionnels et n'ont pas encore bougés, semblant défier le temps avec vigueur. C'est ce qui nous motive à comprendre quels sont les éléments structurels qui ont permis à ces bâtiments de survivre à tous les événements sismiques qui ont marqué la ville d'Alger, sans aucun dommage majeur.

Avant d'entamer la modélisation numérique, il y a lieu d'abord de visiter les lieux pour vérifier la conformité des plans d'archives, l'état de conservation des bâtiments, et relever les dommages probables puisque le séisme de 2003 a affecté beaucoup de bâtiments datant de la période coloniale. Après de nombreuses visites in-situ, cette étude sera suivie d'une vérification des critères de conception selon les règles parasismiques algériennes RPA99/2003.

2. Diar es Saada et Diar el Mahçoul : des grands ensembles atypiques

2.1. Présentation des grands ensembles

L'architecte en chef de la ville d'Alger pendant plusieurs années, de 1953 à 1957, Fernand Pouillon a la production architecturale importante et de renommée pour cette ville. Parmi les nombreux projets d'habitats qu'il a construits dans la capitale algérienne, deux d'entre eux se localisent à la commune d'El Madania (ex Salembier). Couronnant les falaises de Belcourt et le plateau des Arcades d'Alger, ces deux quartiers bénéficient d'une position géographique exceptionnelle, comme l'illustre la figure 3.1.

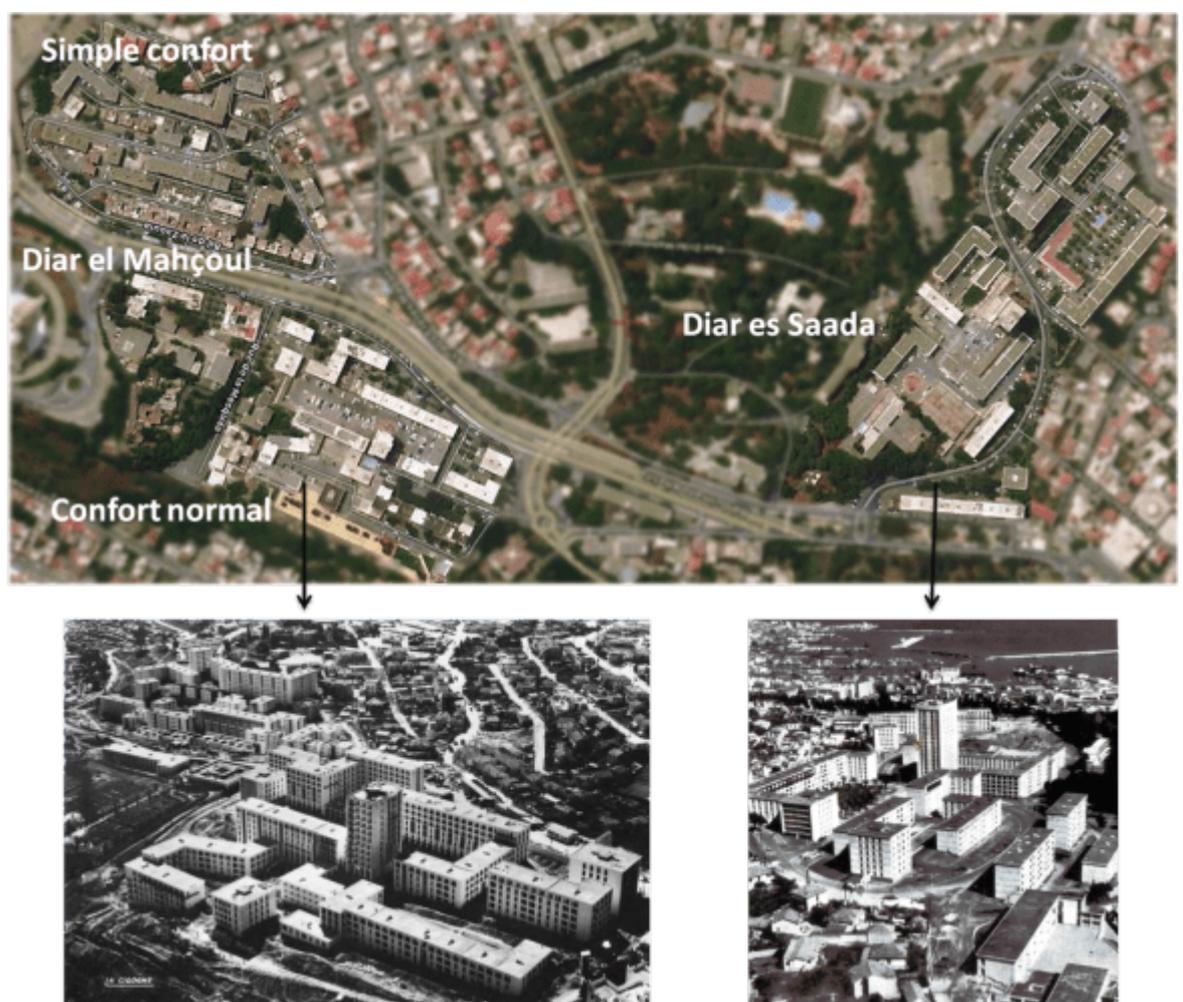


Figure 3. 1: Vue aérienne des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul (simple confort et confort normal) [84, 94].

Diar es Saada, baptisé en français la cité du bonheur par Chevallier, est la première cité de Pouillon en Algérie. Les logements fussent dédiés exclusivement

aux Européens[84]. Le projet est lancé le 04 août 1953 et livré en octobre 1954, donc réalisé dans un délai de quatorze mois (425 jours). Les principes de conception de cette cité sont les mêmes que pour les deux cent logements d'Aix en Provence en France. Ce quartier concentre environ 800 logements sur le site de Sifaoui [95], couvrant une superficie de 6,5 hectares. Adjacent au célèbre Centre Frédérique Lung, une grande propriété boisée léguée en 1950 à la Croix-Rouge qui en a fait un centre de vacances pour enfants pauvres.

Sa sœur jumelle, Diar el Mahçoul ou la cité de la promesse tenue, est la deuxième cité que Pouillon entreprend sur le terrain de plus de quinze hectares d'El Mansali. Aujourd'hui, la cité avoisine le monument des Martyrs et le centre commercial et culturel de Riadh el Feth. À l'instar de Diar es Saada, elle a été construite en un temps record.

Les premiers terrassements sont débutés en octobre 1953, et se sont achevés en août 1955, quelques mois seulement après la réception de Diar es Saada. Ainsi, grâce à la collaboration de Fernand Pouillon, en à peine plus de deux ans, la promesse faite par Chevalier de bâtir 1500 logements répartis en deux sous-ensembles, l'un pour les musulmans (simple confort) et l'autre pour les européens (confort normal) était ainsi tenue, d'où l'appellation « la cité de la promesse tenue ».

2.2. Contexte de création des grands ensembles

2.2.1. L'invention des grands ensembles

L'histoire des grands ensembles est indissociable de l'histoire des Trente Glorieuses, la période mythique d'industrialisation du bâtiment en France après la deuxième Guerre mondiale. Le premier grand ensemble destiné pour les musulmans, réalisés en Algérie remonte au cours des années 1935 [96, 97]. Il s'agit de la cité indigène de François Bienvenu situé au boulevard Verdun aux abords de la Casbah d'Alger. Un exemple précoce d'habitat qui combine entre le traditionnel et le moderne. Une architecture inspirée des villes anciennes dans l'organisation spéciale des bâtiments qui se traduit par un esprit moderne.

Le terme « grand ensemble » fait référence à un projet de logement caractérisé par une architecture de barres et de tours d'une part, le caractère locatif des immeubles, la zone d'implantation, la dimension à grande échelle, et

l'ampleur de l'opération d'autre part [98]. Cette expression a figuré pour la première fois dans l'article rédigé par Marcel Rotival, publié dans la revue « L'Architecture d'Aujourd'hui », année 1935 [99]. En concurrence avec d'autres appellations, tels que « gratte-ciel de banlieue » repris des États Unis, « ville nouvelle » apparu dans les années 1960 [100], « grande opération » avancée par Claudius Petit en 1950, « nouvel ensemble urbain », « nouvel ensemble d'habitation », « cité neuve », « grand bloc »[101], « ville satellite », « ville-champignon » et de « mille fenêtres », reprises dans les médias, elle s'impose au fil des années.

Selon Yves Lacoste, ce modèle d'habitat se définit comme suit : « Le grand ensemble apparaît donc comme une unité d'habitat relativement autonome formée de bâtiments collectifs, édifiés dans un assez bref laps de temps, en fonction d'un plan global qui comprend plus de 1000 logements environ. Théoriquement, seraient à exclure de ces grands ensembles véritables, voulus comme tels, les nombreux conglomérats inorganiques formés de la coalescence fortuite ou non de plusieurs petites opérations immobilières juxtaposées. »[102]

Perçu à l'époque comme un remède à la crise du logement [103], et représentant un modèle incontournable du modernisme, aujourd'hui une grande partie des grands ensembles est démolie.

2.2.2. La politique de l'Habitat à Loyer Modéré HLM en Algérie

Le programme de l'habitat à loyer modéré HLM a été lancé par le gouvernement français en Algérie à partir de 1948[6], dans le but de reloger les habitants appartenant à des couches sociales inférieures et d'offrir des conditions meilleures à la population. En effet, c'est à cette époque que remonte la réalisation des premiers bâtiments HLM, type Barre de R+2 à R+10, spécialement conçus pour les indigènes. Il est important de rappeler que, l'habitat HLM était considéré comme un logement temporaire.

À partir de 1950, de nombreux grands ensembles d'habitations sont réalisées dans la ville d'Alger (Figure 3.2). Ils partagent tous les mêmes caractéristiques. Le numéro 23 datant de 1956 de la revue Chantier[93] est spécialement dédié pour

les réalisations de l'office public d'HLM de la ville d'Alger, qui se résume comme suit :

- Diar es Saada, Diar el Mahçoul et Climat de France par l'architecte Pouillon
- Château-neuf, cité de la maison familiale par les architectes Guion, Vieillescaze et Mercier
- Cité des fonctionnaires par l'architecte Lugan
- Cité La Concorde à Birmandreis, par les architectes Daure et Beri
- La cité Les Eucalyptus par l'architecte Michel Luyckx

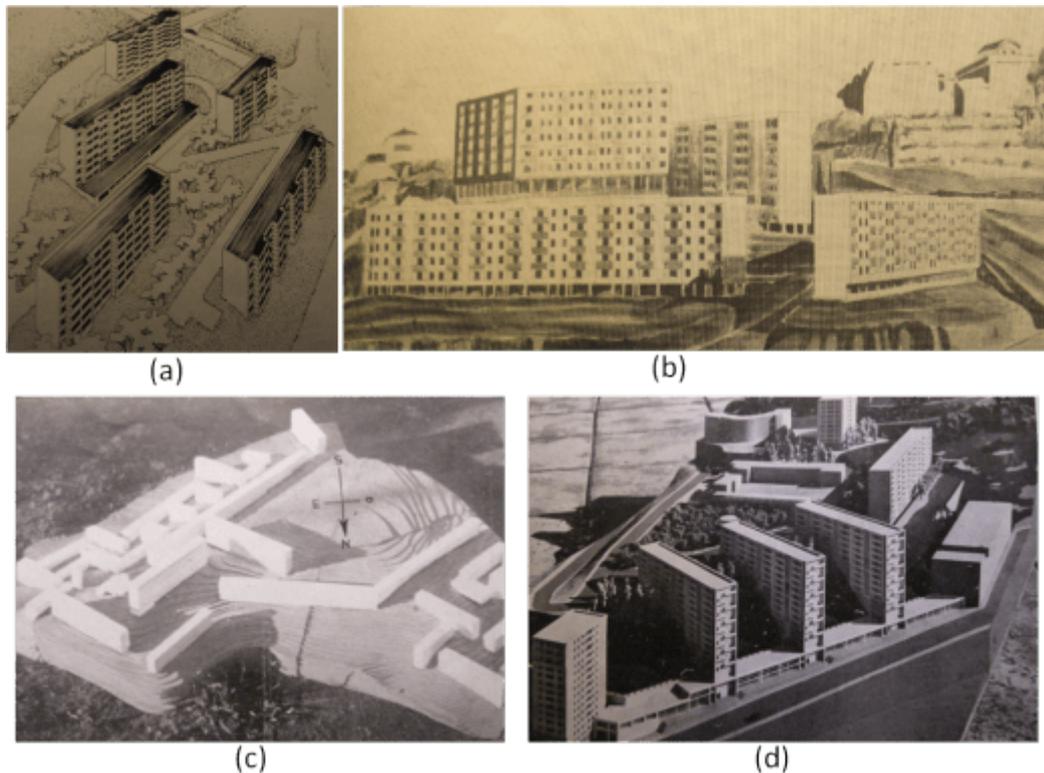


Figure 3. 2: Les projets d'habitat à loyer modéré HLM de la municipalité d'Alger :
 (a) Château-neuf, cité de la maison familiale par les architectes Guion, Vieillescaze et Mercier, (b) Cité des fonctionnaires par l'architecte Lugan, (c) Cité La Concorde à Birmandre [93].

2.2.3. Contexte de réalisation des deux cités dans la ville d'Alger

Le contexte de l'époque est celui de la construction à grande échelle, en particulier de logements sociaux, qui a vu naître les grands ensembles. Ainsi, la construction des cités de Pouillon par l'OPHLM s'inscrivait dans le cadre des

dispositions gouvernementales du plan directeur d'aménagement de la municipalité d'Alger et de sa banlieue, sous la direction de Claudius Petit [104], ministre de la Reconstruction en 1948.

À la base les logements de la cité Simple confort sont prévus pour y loger les habitants des bidonvilles de la cité Mahieddine nommée par le chercheur Sadek Hadjerès « les cités de la faim » [105], situé sur le même site où sera édifié la future cité de Diar el Mahçoul. Comme l'illustre la figure 3.3, ce bidonville regroupe une population venue de toutes les régions d'Algérie. Selon le recensement, la cité Mahieddine comprend un millier de baraques pour 7000 familles, donc plus de dix mille personnes chassées de chez elles à cause de la faim[105].

Une fois élu maire d'Alger, le 03 mai 1953 [37], Jacques Chevalier entame la bataille pour le logement collectif dans la ville d'Alger. Dans l'urgence, il invite immédiatement l'architecte Pouillon, qui débarque cinq jours plus tard pour discuter du programme de logements prévu pour la ville. Il a raconté dans ses mémoires sa première rencontre avec Chevallier[96]. Après un mois, le projet d'exécution et les pièces d'adjudication [16] de Diar es Saada sont prêts. Grâce à son travail acharné, Pouillon a non seulement obtenu des délais plus courts et des prix défiants toute concurrence (un budget inférieur de 20% à la moyenne du marché)[20], mais aussi il a su garantir un confort optimum pour les habitants, tout en respectant l'architecture locale.

À ce sujet, Pouillon rapporte dans ses mémoires : « *Avant août, je gagnai la bataille des prix aux adjudications. C'était aussi une victoire pour la pierre Blachette-Marcerou. Mon système la rendait plus économique que n'importe quelle autre structure [...] le luxe et le confort des cités étaient sans précédent, on fournissait jusqu'aux réfrigérateurs. Une centrale thermique de trois millions de calories devait alimenter quinze cents logements. La première cité pouvait être habitable dans le délai de trois cent soixante-cinq jours. Quant aux prix, ils furent inférieurs de cinq pour-cent à mes prévisions.* »[16]



Figure 3. 3: Etat antérieur du site Diar el Mahçoul, côté simple confort (les bidonvilles de la cité Mahieddine)[106].

3. La lecture architecturale des grands ensembles d'habitations Diar es Saada et Diar el Mahçoul

Dans la conception des grands ensembles de Pouillon, tout prend de l'importance : le gabarit, les façades d'immeubles, les proportions des ouvertures, les espaces publics, les matériaux, la qualité environnementale, les vues et les perspectives, les orientations des bâtiments, pour garantir une harmonie de l'ensemble. Au-delà d'une architecture moderne inspirée de la Casbah d'Alger, basé sur l'utilisation à grande échelle de la pierre massive, l'humanisme de ces casbahs contemporaines[96] est un élément primordial dans les œuvres de Pouillon.

Pouillon résume sa philosophie de conception dans ses mémoires : « Je n'avais qu'un seul but, un seul : imposer par le nombre et la qualité, une forme d'architecture humaine et généreuse, créer un exemple... L'architecte, l'urbaniste doivent penser en sculpteurs, et non en agents voyers distribuant des immeubles le long d'une rue. »[16]

3.1. L'architecture des cités d'habitation

Les cités d'Alger de Pouillon se caractérisent par une architecture simple et monumentale, qui rappelle à certains égards la rigueur de l'architecture romaine,

la hardiesse des structures gothiques, la pureté de l'art grec avec une l'inspiration orientale. Diar es Saada et Diar el Mahçoul apparaissent comme deux variantes issues d'une même attitude architecturale[84]. Les principes de conception sont les mêmes que ceux des deux cent logements d'Aix en Provence construit bien avant en France.

Les deux cités sont conçues et pensées comme une ville indépendante. Elles sont ornées de places, de jardins décorés de palmier, de fontaines, de cours d'eau, de sculptures en céramique (des dauphins à Diar es Saada et des chevaux à Diar el Mahçoul). L'ensemble des immeubles s'organise autour d'une tour donnant sur une place centrale.

Pouillon écrivait à ce sujet : *« Je voulais une architecture sobre, traditionnelle sans excès, confortable dans les détails, sinon luxueuse au sens parisien de mot : des immeubles inspirés des quartiers XVIIe et XVIIIe de la cité ou de ces banales et charmantes maisons de IVe ou du VIe arrondissement, qui ne valent que par leurs proportions et la pierre. Les Parisiens ont la nostalgie des quartiers centraux et des vieilles maisons d'Ile Saint-Louis. L'humanisme de mes « Casbah » contemporaines d'Alger, trouverait un écho dans la recherche d'une ambiance dont la place des Vosges apparaît, selon moi, le chef-d'œuvre. »*[16]

3.2. Caractéristiques constructives générales des immeubles et des logements

La structure des immeubles est conçue avec des matériaux traditionnels, associés à des modes de construction modernes. Les mêmes principes constructifs innovants mis au point pour les logements d'Aix en Provence ont été reproduits dans l'ensemble des deux cités : façades en bloc de pierre massive de Fontvieille, cloisons en briques porteuses appareillées verticalement, semelle et plancher à caisson en béton armé, voûtes en briques, etc[107]. Ces procédés de construction ont été développés par Pouillon afin d'assurer une meilleure résistance de la structure des immeubles. Et grâce à ces procédés qu'il ait pu rationaliser de l'économie du chantier et ainsi livrer les projets dans les délais requis par Chevalier.

3.2.1. Les fondations

Les murs porteurs intérieurs et extérieurs des immeubles reposent sur des fondations superficielles et profondes, choisies selon le type de sol. La plupart des bâtiments sont bâtis sur des fondations superficielles, des semelles filantes en béton armé. Néanmoins, la nature du sol impose le recours dans certains emplacements à des pieux FRANKI (Figure 3.4).

À titre d'exemple, les fondations des bâtiments entre les voies F et G de la cité confort normal (Diar el Mahçoul), le sondage effectué à l'angle Sud-est du bâtiment 16 au cours de l'exécution des fouilles en rigoles, a fait découvrir dans cette partie une argile noire plastique à la cote 103 environ. Par conséquent, les plans de fondations de ce bâtiment ont été modifiés, en portant le taux de travail admissible du sol de $1,3 \text{ kg/cm}^2$ à 3 kg/cm^2 [40]. En effet, des sondages sur les emplacements des bâtiments sont réalisés avant le commencement des travaux de fondations dans le but d'avoir une connaissance assez précise du terrain et ainsi déterminer le type de fondation. De plus, il a été rapporté dans les procès-verbaux des chantiers qu'à cause de l'hétérogénéité du terrain le garage de Diar es Saada est fondé sur des pieux [40].



Figure 3. 4: Affiche publicitaire des pieux FRANKI [108].

3.2.2. Les murs porteurs

Les murs porteurs extérieurs des immeubles sont constitués de bloc de pierre de taille blanche provenant des carrières de Fontvieille en France, transportés par camion à Marseille et puis par bateau vers Alger. L'épaisseur de la pierre varie entre 45 cm et 80 cm. Les cloisons sont en brique creuse en terre cuite fabriquée dans des briqueteries algériennes. Ces briques différentes épaisseurs, elles varient de 10, 13, 18, 20 et 25 cm, montées au mortier de ciment et enduites au plâtre.

3.2.3. Les planchers et les couvertures

Les planchers sont en dalle de béton armé à nervures croisées avec insonorisation, couvertes de carrelages, et les plafonds sont finis au plâtre. Les caractéristiques relatives à l'exécution des planchers suivantes sont citées dans les rapports de chantier, comme suit :

- Les marmites courantes constituant les planchers devront présenter des dimensions telles qu'elles permettront de réaliser pratiquement dans tous les cas, des nervures d'une épaisseur minimum de 8 à 9 cm.
- Les marmites devront être de forme régulière ; elles seront entières ; les éléments dont les joues ne seraient pas intactes ou de hauteur constante ($h=14$ cm) seront éliminés. Dans tous les cas, le dessus des marmites en place devra régner dans un plan horizontal, sans aucune dénivellation.
- Les armatures seront placées sur cales toutes les deux nervures. Les chapeaux devront être convenablement calés aux ligatures pour assurer leur maintien en place ; ils seront toujours constitués par des barres droites et non par des barres cintrées ou relevées en équerre.
- Les nervures seront convenablement arrosées avant la mise en place du béton et, pour en faciliter le glissement. Le béton utilisé comportera une quantité d'éléments fins compatibles avec une mise en place efficace.
- Le serrage étant effectué par aiguille ou par règle vibrante, les conditions de mise en place imposent l'emploi d'un béton plastique et non d'un béton sec.

- Les joints de dilatation devront être réalisés avec des plaques de liège coupées à la hauteur du chaînage ; l'interposition du bois est à éliminer totalement en raison de la difficulté d'extraire complètement les planches.

3.2.4. Le chauffage central et le service d'eau chaude

Le chauffage central est du type à radiateurs en fonte ou en acier, à eau chaude avec chaufferie centrale, de même que pour l'eau chaude qui sera distribuée au compteur. Ce système de chauffage central génère une économie de 50 % environ sur le système individuel[106]. Le local desservant les deux grands ensembles est situé dans la cité Diar es Saada, en juxtaposition avec la tour Totem.

3.3. Choix du site d'implantation

Le choix des sites des futures constructions a été fait par Chevalier puis validé par Pouillon lors de sa première visite en Algérie. Les deux sites d'implantation sont d'une topographie relativement compliquée avec une forte déclivité, ce qui a nécessité des terrassements de grande importance et la construction de murs de soutènement en béton armé.

La cité Diar es Saada est édifiée sur un terrain assez étroit, creusé par un ruisseau dans son axe transversal (Figure 3.5). Ce terrain est bordé au nord par la forêt de pins de la propriété des Lung, à l'Ouest par un cimetière et au Sud et à l'Est par un lotissement destiné pour les Européens. Il offre une vue remarquable sur la mer et le plateau du jardin d'essai el Hamma.

À cinq cents mètres de Diar el Mahçoul se situe le terrain d'El Mansali d'une superficie de 15 hectares (Figure 3.6). Il est situé sur une falaise de plus d'une centaine de mètres de haut surplombant la ville d'Alger. Contrairement au terrain de simple confort, le confort normal présente une forte déclivité réputé instable.



Figure 3. 5: Site d'implantation de Diar es Saada, extrait de la revue « Alger », 1954 [106].



Figure 3. 6: Site d'implantation de Diar el Mahçoul, avec la villa des Arcades au premier plan [106].

3.4. Les variétés typologiques

Les immeubles des grands ensembles de Pouillon se caractérisent par un dynamisme des masses, basées sur la manipulation de volumes de forme parallélépipédiques ou cubiques, qui renvoie aux bâtiments de la Casbah dans la recherche typologique d'habitats algériens contemporains[84]. Comme le montre la figure 3.7, Il y a surtout un effort pour rompre le monolithisme des façades à travers la disposition des immeubles[109]. L'immeuble peut prendre plusieurs formes à l'intérieur d'une même cité. La diversité dans la composition urbaine des volumes rend chaque immeuble unique, et distingue chaque façade selon son

orientation sur les espaces publics ou sur le paysage, intérieur ou extérieur, de la cité.

Par la disposition, l'immeuble se prêtait à la convivialité[110]. Le même concept de composition urbaine est développé par la suite dans la cité Climat de France[13]. Pouillon écrivait, « *J'ai fait des tours, dans ma vie, parce que j'avais des ensembles d'habitations assez basses et que mes cités avaient besoin d'un clocher, d'un élément haut, d'un sentiment d'élévation qui n'existe plus...J'avais décidé de construire des immeubles de hauteurs différentes, dominés par une tour de vingt étages dressés comme un beffroi au centre de la composition, sur la place du marché.* »[16]



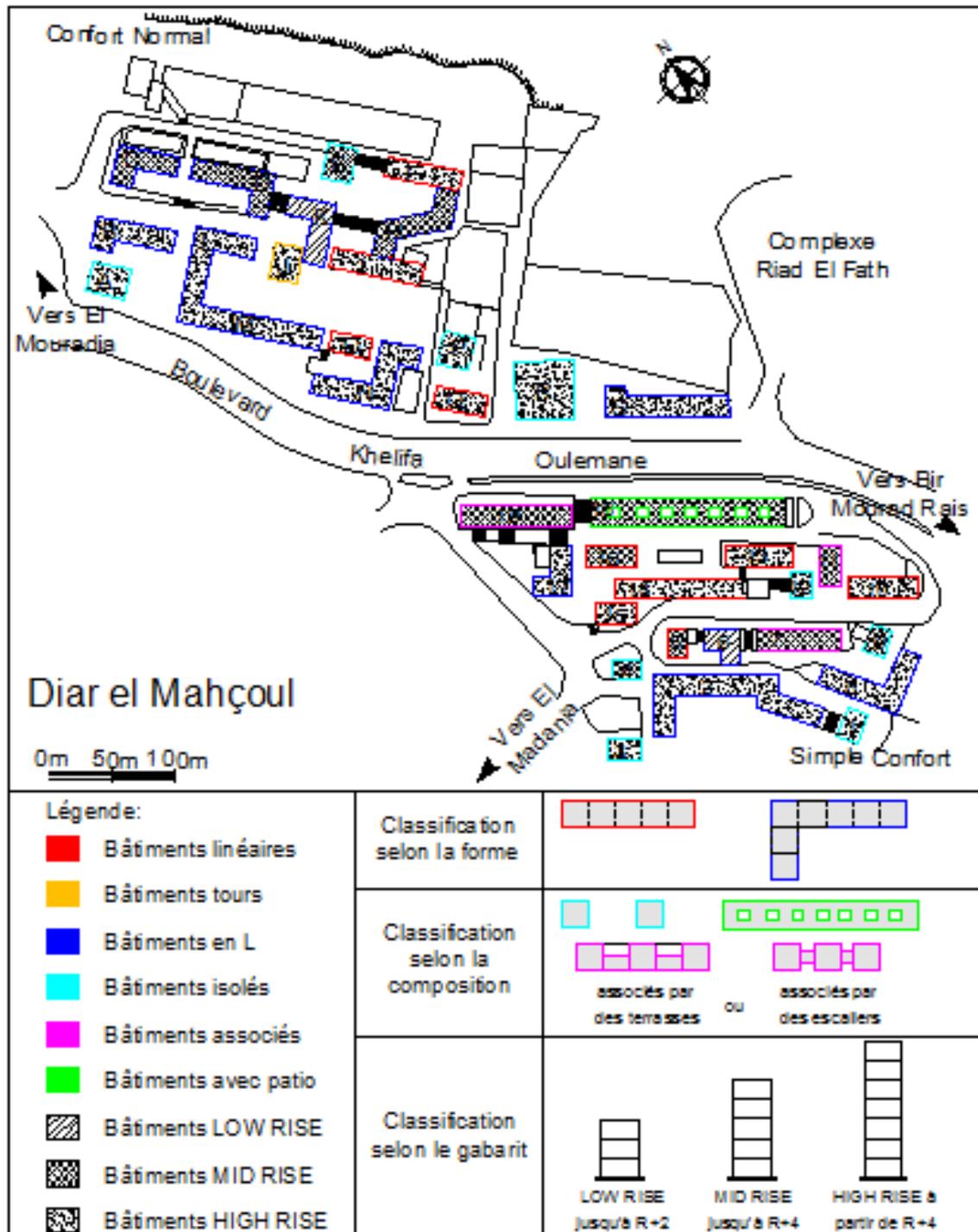


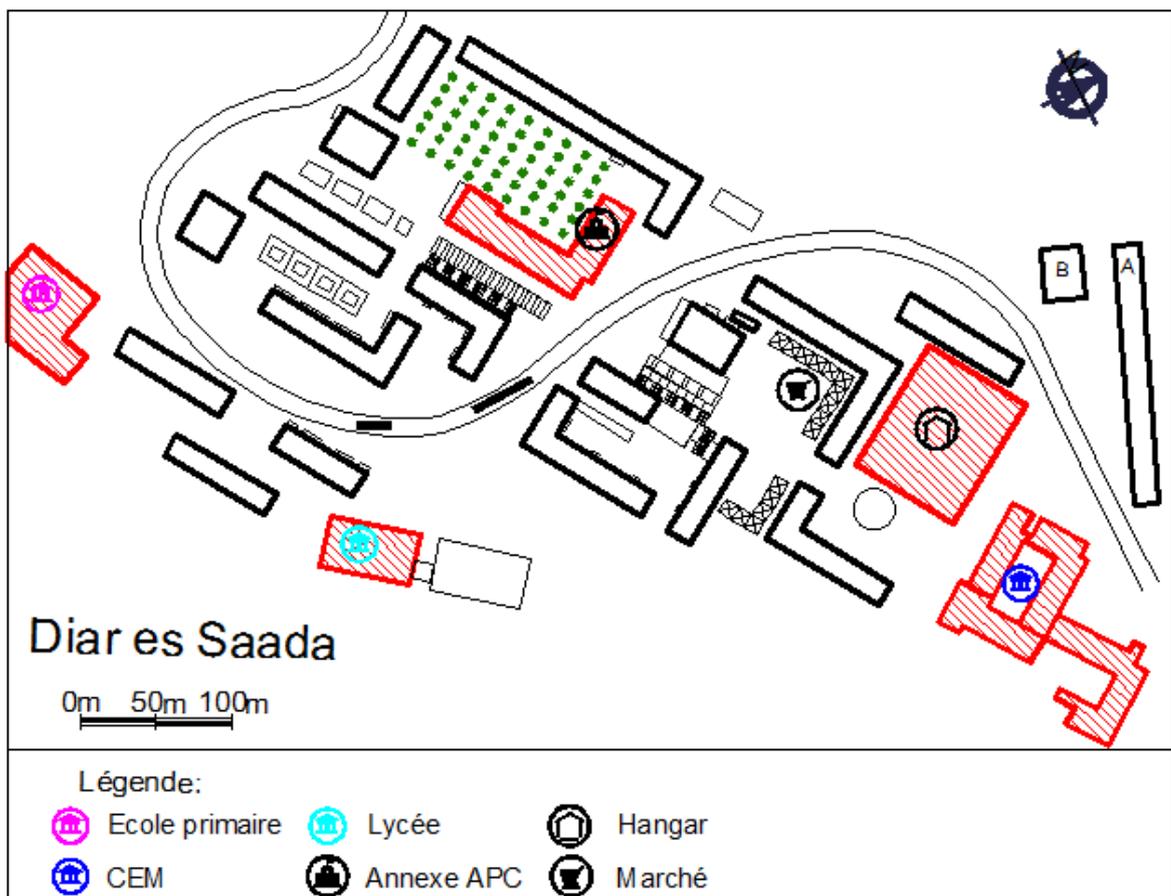
Figure 3. 7: Plan et schéma de types d'immeubles de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul.

3.5. La mixité fonctionnelle

Les cités d'habitation, Diar es Saada et Diar el Mahçoul, constituent un pôle d'attractivité à grande échelle (le territoire), favorisant la centralité à l'échelle locale

(Figure 3.8). En effet, elles offrent une programmation mixte : logements et services (bureau de poste, école primaire, un lycée, collège d'enseignement moyen CEM, marché couvert, boutique, garage, espace de stationnement, église transformée en mosquée, etc.).

La mixité fonctionnelle joue un rôle important dans le dynamisme et également l'animation du quartier, et permet également de trouver un équilibre entre le logement, le travail, les commerces et équipements, composants essentiels de la ville.



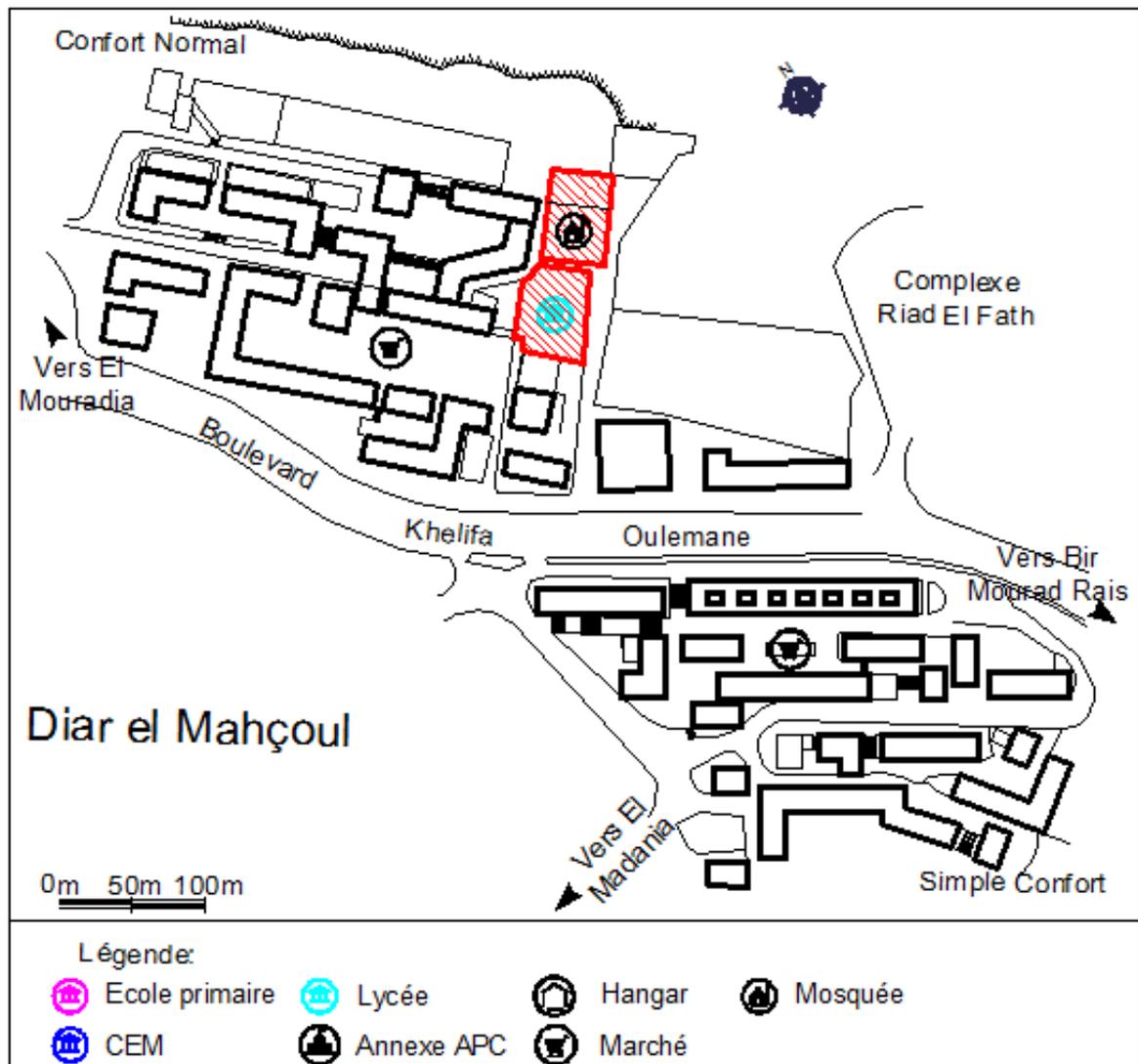


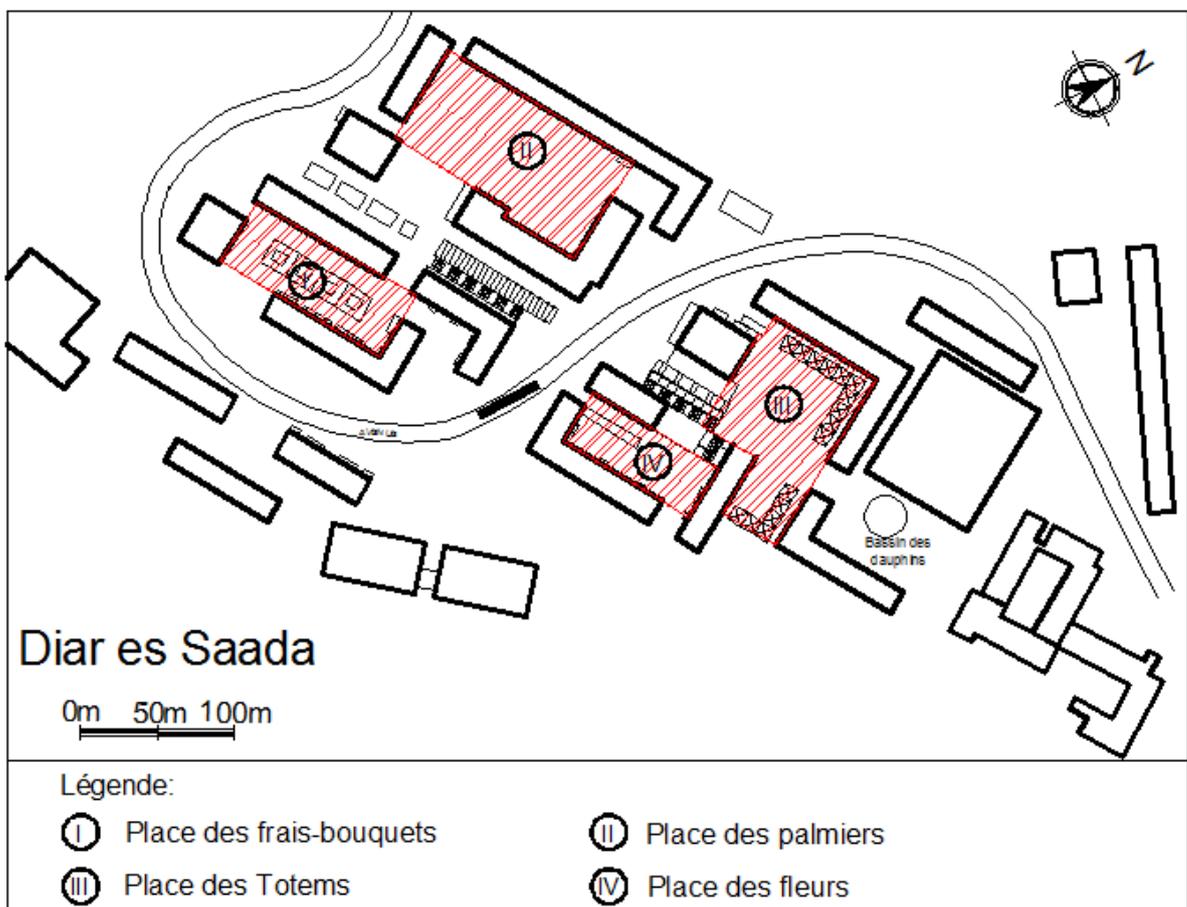
Figure 3. 8: Plan représentatif des équipements publics de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul.

3.6. Les espaces publics

Les espaces publics de qualité aménagés par Pouillon participent à la valorisation de l'identité des cités d'habitation, et ont créé une animation urbaine. Ces espaces sont pensés comme une continuité urbaine, plutôt que des espaces ponctuels détachés du quartier. Pouillon a conçu ses grands ensembles comme des villes, et les places publiques représentent des lieux de communication, favorisant la vie collective et les rapports sociaux. Une attention particulière est portée aux places publiques.

La composition spatiale de Diar es Saada et Diar el Mahçoul est constitué d'un réseau d'espaces publics, chacun ayant ses propres spécificités : des placettes plantées reliées par des escaliers monumentaux, des fontaines ornées de sculptures, et des parcours animés par des cascades d'eau, des esplanades, des portiques et des passages couverts, etc. (Figure 3.9).

À ce sujet, on retrouve les recherches de Lamraoui [111] sur les ambiances vécues dans les espaces publics de Diar el Mahçoul. Et d'après son étude, les espaces collectifs de ce quartier sont une référence fondamentale pour les nouveaux programmes d'habitat qui se construisent de nos jours.



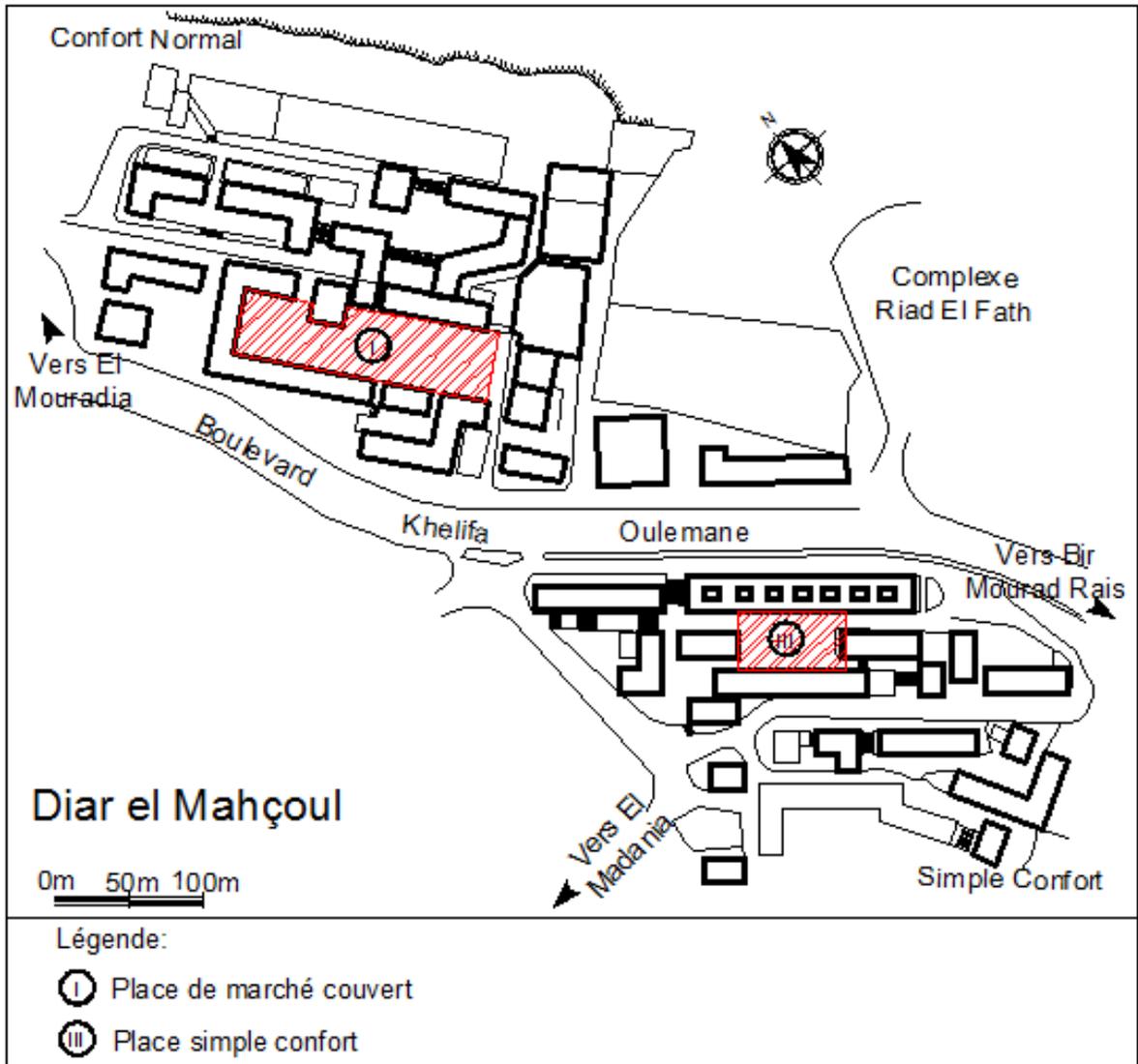


Figure 3. 9: Plan représentatif des espaces publics de la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul.

3.7. Le traitement paysager

Dans les grands ensembles de Pouillon, la notion de paysage est appréhendée à différentes échelles de la planification urbaine (territoire, quartier, bâti). Les percées sous forme de passages sous les arcades en pierre des immeubles forment un axe visuel traversant les places publiques de la cité (Figure 3.10). Ajoutant à cela, les dimensions variables ainsi que les hauteurs (de trois à vingt niveaux) du bâti sont soigneusement calculées dans la perspective d'offrir à tous les logements des vues panoramiques surprenantes sur le jardin d'essai et sur la baie d'Alger.



Figure 3. 10: Carte de la ville d'Alger avec la localisation des éléments environnants.

3.8. La qualité environnementale

Des choix environnementaux avantageux ont été appliqués par Pouillon dans la réalisation de ses projets d'habitations. La présence du végétal, d'espaces verts et la présence d'eau dans les places publiques sont vectrices de biodiversité et fournissent des îlots de fraîcheur, essentiels dans un contexte de climat méditerranéen.

Dans les immeubles des cités d'habitation, tout est pensé pour réduire la consommation énergétique soit par les matériaux de construction (la pierre et les plaques de liège), par la favorisation du chauffage central, ou à travers les dispositifs de ventilation[112] intégré au-dessus des linteaux des ouvertures sur les façades, comme l'illustre la figure 3.11.

Il est important de souligner que les murs porteurs en pierre massive sont dotés, sur la surface intérieure de la façade, d'une fine couche d'isolation thermique composée de murs en briques de terre cuite de 03 cm d'épaisseur, avec un vide d'air entre les deux surfaces. Par la suite, pour des raisons d'économie et de gain de temps, les contre-cloisons prévues en brique ont été

remplacées par des contre-cloisons en béton de ponce[113]. Et pour améliorer l'isolation phonique et thermique du plancher, des plaques de liège sont fixées au plafond au moyen de crochets en fer galvanisé, ceux-ci venant renforcer l'adhérence naturelle du liège sur le béton.

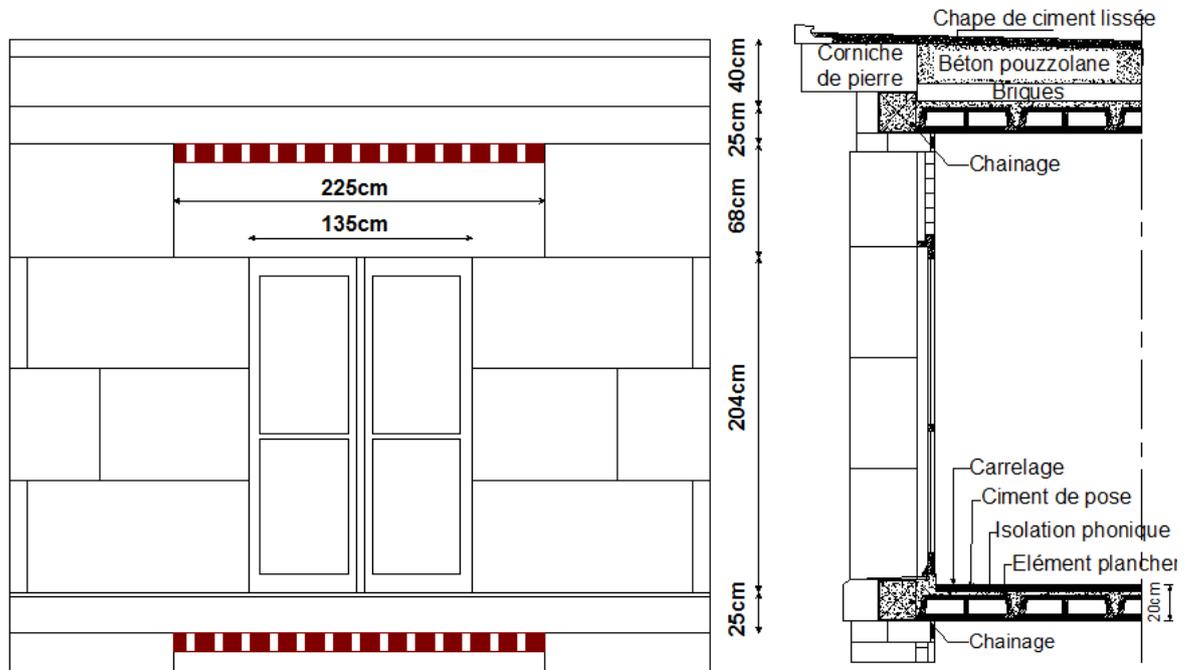


Figure 3.11: Vue en façade et en coupe du dispositif de ventilation spécial Pouillon.

3.9. La mixité sociale

Les cités d'habitation Diar es Saada et Diar el Mahçoul sont parmi les premiers projets dans l'histoire de l'Algérie coloniale, qui favorisent la coexistence sociale des deux communautés. Loin de l'esprit de ségrégation qui régnait dans les opérations de logements en Algérie depuis la colonisation[106], ces grands ensembles sont conçus et destinés à la fois pour les musulmans et les Européens les plus démunies, dans l'objectif d'assurer le bien-être et le confort des habitants.

« *J'avais axé ma vie de bâtisseur sur le rôle social de l'architecture : avant tout construire des villes pour l'amélioration de la condition des hommes, en mettant à la portée de chacun le confort et la beauté.* »[16], Écrit Pouillon dans ses mémoires.

4. Le diagnostic d'état de conservation des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul

4.1. Etat de l'art des études antérieures sur la réhabilitation des grands ensembles

De nombreuses études ont été menées sur la réhabilitation des grands ensembles de Pouillon à Alger. Parmi ces recherches, on peut effectivement mentionner, le travail de Magister de Behloul[114] réalisé en 2008 sur la cité Diar el Mahçoul, de celui du mémoire de master de Oukrif[115] en 2016 sur la tour de Diar el Mahçoul et récemment le projet du groupe d'étudiant de l'EPAU qui a remporté le premier prix du concours international « art urbain » pour l'année 2018/2019[116], réalisé sur Diar es Saada. Les résultats et les propositions d'intervention pour chacune des trois (03) études seront décrits en détail ci-après.

D'abord, l'étude réalisée en 2008 sur la cité Diar el Mahçoul par Behloul, va nous permettre de comparer l'état de conservation des immeubles de l'époque avec celle d'aujourd'hui et de mettre l'accent sur les modifications qui ont été apportées, les altérations supplémentaires survenues durant ces 12 dernières années, mais il y a eu une opération de réparation et d'entretien qui s'est traduite par le ravalement de façades en 2018.

Sur la base de cette analyse, l'auteur estime que les logements de Diar el Mahçoul sont dans un état très dégradé en particulier la partie « simple confort » et plusieurs facteurs sont à l'origine. Les deux phénomènes les plus apparents sont :

- L'effet de l'humidité (proximité de la mer Méditerranée) a largement influencé sur l'aspect extérieur esthétique des façades en pierre. Selon l'auteur les façades de la cité « Simple confort » dégage un caractère hideux et terne, notamment ceux exposés à la mer.
- L'infiltration des eaux pluviales qui pénètrent jusqu'aux logements inférieurs des bâtiments, ce qui rend les habitations humides et provoque également le décollement du plâtre et de l'enduit des murs et des plafonds.

Un diagnostic technique a été établi par l'auteur après des investigations sur le terrain. Différentes pathologies subies par les bâtiments ont été notées. Les

principaux symptômes observés étaient les fissures, façades cloquées et écaillées, béton rongé laissant apparaître les armatures (carbonatation), mauvaise étanchéité, traces d'humidité dans la maison et dégradations causées par le vandalisme.

Suite à cette étude, une série d'interventions ont été proposées pour améliorer et valoriser l'image du quartier. Comme l'illustre la figure ci-après, l'auteur propose deux opérations principales : la réparation et la rénovation. Les travaux de restauration se résument à embellir les façades par brossage et le polissage de la pierre devenue terne, ainsi que la remise en état des parties communes (repeindre les murs, réparer la menuiserie, restaurer les caves squattées, etc.).

Behloul suppose que vu l'état de vétusté d'un bon nombre d'immeubles, la réhabilitation n'est pas suffisante pour redonner une nouvelle image au quartier. Ainsi, des opérations de rénovation ont été suggérées (Figure 3.12). En plus, il estime qu'en raison de l'état de délabrement et de vétusté d'un bon nombre d'immeubles, les travaux de réhabilitation ne sont pas suffisants pour apporter une nouvelle image au quartier. Par conséquent, des opérations de rénovation ont été proposées.

À ce jour, hormis la réhabilitation du quartier en 2018, aucune opération de rénovation n'a été lancée.

Ensuite, l'étude d'Oukrif en 2016 dans son Master sur l'état de conservation de la tour (R+10) de Diar el Mahçoul. Le diagnostic est basé sur la dégradation et la modification apportées par les résidents ou les services de l'APC d'El Madania. Dans l'ensemble, la même pathologie précédemment constatée par Behloul a été observée sur la tour, mais avec plus d'intensité, surtout en ce qui concerne l'aspect extérieur des façades en pierre (la couleur a plus noirci.). De plus, de nouvelles formes de dégradation sont apparues, telles que la dégradation et la séparation des éléments décoratifs en porte-à-faux.

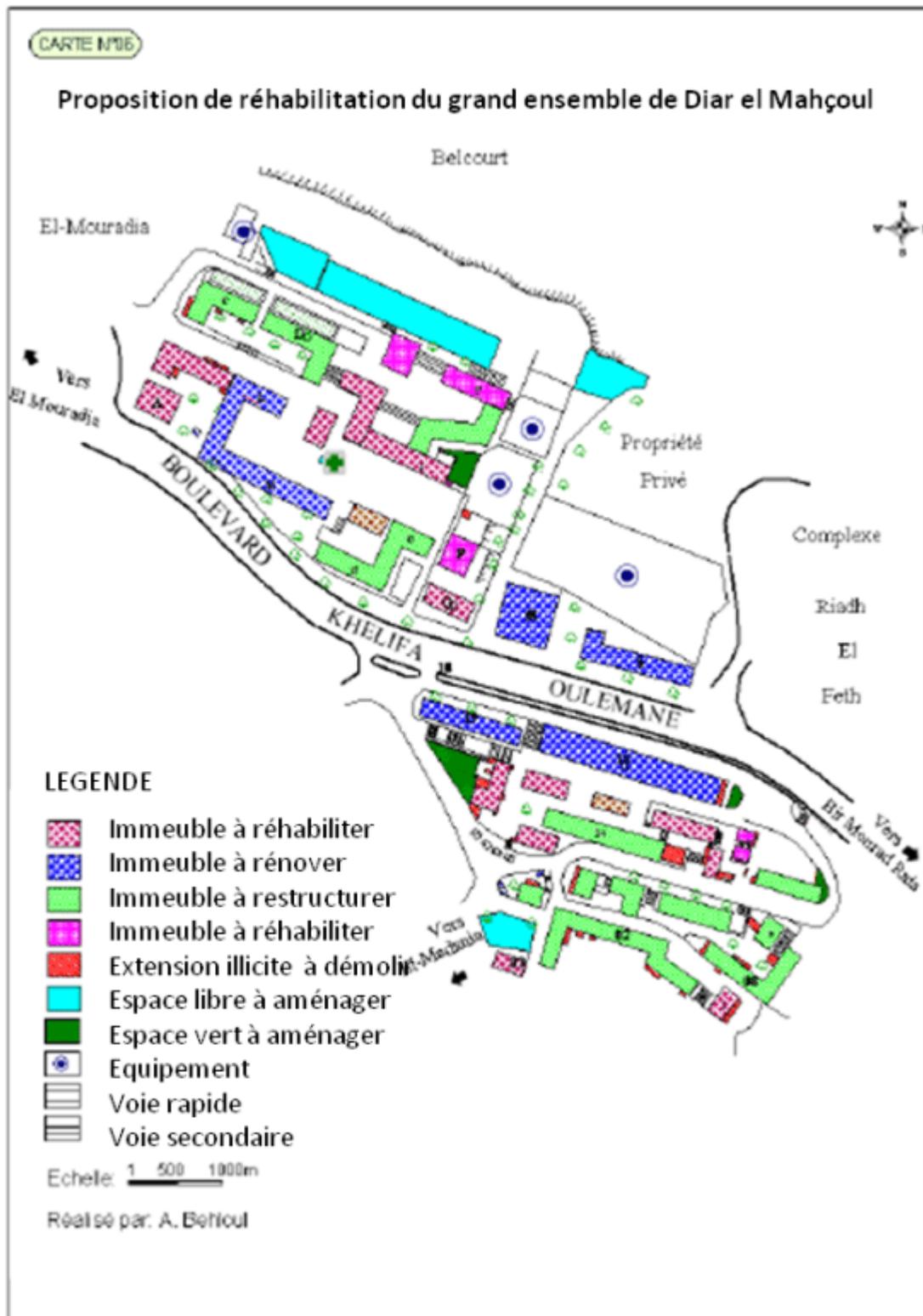


Figure 3. 12: Plan d'action du quartier de Diar el Mahçoul proposé par Behloul [114].

Enfin, le projet réalisé par le groupe de l'EPAU qui a remporté le premier prix du concours international « art urbain » pour l'année 2018/2019[116]. Il s'agit d'un

projet qui vise à améliorer la qualité architecturale, sociale et environnementale du quartier de Diar es Saada. Ce dernier, est le moins vétuste par rapport au quartier de Diar el Mahçoul.

4.2. Synthèse d'état des lieux : diagnostic de l'état de conservation des grands ensembles

Concernant l'état de conservation, on va vérifier trois points essentiels qui sont : les dégradations, les modifications et les pathologies.

Le diagnostic visuel établi après notre visite des lieux, effectué en 2017[117], a permis de déterminer les pathologies apparentes et les différentes formes de détérioration subies par le bâtiment Pouillon (Figure 3.13).

Il se résume comme suit :

- Détérioration du béton, laissant apparaître les armatures des planchers au niveau des balcons (ou les désordres observés sur les balcons en béton correspondent à des fissures, des épaufrures et des zones d'éclatement accompagnées de la mise à nu des fers).
- Altération des pierres de construction : perte de la matière (perforation, piqûres, désagrégation et érosion), changement de couleur (croûtes, écrasement et subflorescence) et colonisation biologique (lichens et mousses)[118, 119].
- L'effritement des décorations en céramique, qui caractérisent un bon nombre de bâtiments.
- Humidité permanente et suintements de condensation entraînant une corrosion externe décollement des revêtements.
- Prolifération de végétation par manque d'entretien engendrant la dégradation de la pierre par l'effet de l'humidité.
- Décollement des revêtements suite à la corrosion des aciers.
- Intégration d'équipement de climatisation fragilisant la structure.
- Les façades des immeubles apparaissent ternes, ce qui dégage un caractère hideux et offre aux visiteurs une vue déplaisante.



Figure 3. 13: Les différentes formes de dégradation et les pathologies apparentes identifiées.

4.3. Les modifications depuis 1953 à aujourd'hui : les opérations de réhabilitation

Plusieurs modifications ont été apportées aux grands ensembles depuis leurs réalisations jusqu'à présent. On distingue celles faites par les habitants et d'autre par le maître d'ouvrage l'APC d'El Madania. Les différents changements apportés sont énumérés comme suit : les modifications apportées sur les espaces

extérieurs, les modifications à l'intérieur des immeubles, et les opérations de ravalement des façades en pierre.

4.4. Les modifications apportées sur les espaces extérieurs

Toutes les modifications extérieures peuvent être résumées comme suit (Figure 3.14) :

- La récupération des espaces caves squattés par les habitants, qui sont par la suite réaménagés (relogement des habitants). (après 2008)
- Réaménagement des espaces publics. (après 2008)
- La création de la fontaine de la cité de Diar el Mahçoul.
- Délocalisation dans les années 90, de la statue hybrides et à queue de sirène « chevaux de Diar el Mahçoul » vers Bab El-Oued. Pour rappel, cette statue est l'œuvre de Louis Arnaud, qui est érigé au pied de la tour en face à la mer. Elle représente « un Neptune emmenant un char tiré par des chevaux agiles et aériens ».
- Amélioration de l'étanchéité des terrasses ainsi que l'assainissement des caves. (après 2008)
- Le sablage des murs de façade d'immeubles. (après 2018)



Le marché sur la place Totems « Diar es Saada »



La cité simple confort



La place « porte de la mer » confort normal de Diar el Mahçoul



Figure 3. 14: Les modifications apportées aux deux cités « Diar es Saada et Diar el Mahçoul (photos prises en 1959 et juillet 2017)[69].

4.4.1. Les modifications à l'intérieur des immeubles

Dans les deux quartiers, Diar es Saada et Diar el Mahçoul, l'agencement des espaces intérieurs ainsi que la disposition des murs dans certains logements a été modifié par les occupants à cause de manque de connaissance des habitants sur la structure des immeubles. Des murs en brique ont été démolis pour augmenter

la surface des espaces. Il convient de rappeler que ces actions de démolition sont dangereuses pour la structure du bâtiment, car ces murs de briques sont porteurs et toute modification peut engendrer des dégâts irréversibles au fil du temps.

4.4.2. Les opérations de ravalement des façades en pierre

La pierre employée dans la réalisation des immeubles est d'une nature calcaire à grain moyen et fin, parfois coquillier, de fond blanc jaunâtre avec reflets roux. Ce qui a largement contribué dans le changement de la couleur et l'apparition des encroûtements noirs sur la façade. Il existe différents procédés pour nettoyer les façades en pierre : sablage, ponçage, hydro-gommage, aéro-gommage, etc.

- Sablage : une technique de nettoyage en profondeur des murs extérieurs très sales. Elle est fortement déconseillée pour les surfaces tendres, car elle est particulièrement agressive. Le sablage consiste à pulvériser des particules (sable ou poudre abrasive) à sec sur la surface à nettoyer.
- Ponçage : une technique de nettoyage à sec des murs extérieurs qui nécessite un équipement et des méthodes appropriés. Il est également connu pour être très agressif sur les surfaces fragiles.
- Hydro-gommage : une technique de nettoyage des murs extérieurs douce destiné pour des surfaces sensibles. Elle consiste à pulvériser des micro-agrégats sous forme d'eau et de poudre à basse pression.
- Aéro-gommage : une technique de nettoyage douce et respectueuse de l'environnement, qui consiste à pulvériser un mélange d'air et de particules sous haute pression.

Dans le cas des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul, depuis leurs réalisations en 1953 à ce jour, les façades de ces immeubles ont subi deux opérations de nettoyage mécanique : la première en 1983 et récemment la deuxième en 2018 (Figure 3.15). Cette dernière a été réalisée 35 ans plus tard, en utilisant la technique du sablage pour nettoyer les murs extérieurs du bâtiment.



Figure 3. 15: Opérations de sablage des façades des grands ensembles : (a) Diar es Saada et (b, c) Diar el Mahçoul (photos prises en septembre 2018).

5. La conception architecturale parasismique des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul

Pouillon a apporté un grand intérêt pour la conception parasismique dans ses projets, à une époque où le domaine du génie parasismique n'est pas très développé. En effet, des mesures parasismiques sont prises en compte dès les premiers stades de la conception des deux cités d'habitations Diar es Saada et Diar el Mahçoul pour assurer un comportement sismique favorable de la structure des bâtiments. Privilégier une forme simple et compacte, respecter la régularité et la symétrie, proscrire tout changement brusque de résistance et de rigidité, procurer une résistance et une rigidité vis-à-vis de la torsion, représentent un

ensemble de principes qui guident une bonne conception dans une zone sismique.

5.1. Principes de conception parasismique

Tout projet architectural débute obligatoirement par une étape de conception, au cours de laquelle des choix décisifs doivent être faits sur les principales caractéristiques de l'ouvrage. Cette étape est cruciale et déterminante dans le processus de construction. Une bonne conception sismique nécessite une compréhension globale de la problématique du risque sismique, et repose davantage sur une solide expérience et savoir-faire du maître d'œuvre ainsi que sur des calculs rigoureux et minutieux.

Selon Lestuzzi[120] et Zacek[121], un ouvrage mal calculé et bien conçu se comportera toujours mieux face aux événements sismiques qu'un ouvrage bien calculé, mais mal conçu. Dans le génie parasismique une erreur de conception ne peut pas être rattrapée par les calculs, aussi sophistiqués soient-ils. Un bâtiment correctement conçu et exécuté peut résister aux événements sismiques les plus importants. Ainsi, la disposition des murs porteurs, des cloisons, des escaliers, des baies et des éléments non porteurs peut grandement modifier les performances sismiques d'un bâtiment. Pour cette raison, les concepteurs doivent avoir des connaissances suffisantes dans le domaine de la conception parasismique pour concevoir des structures adaptées.

Les éléments de conception des cités d'habitation d'Alger visent à garantir le bon comportement de la structure face aux séismes. Les principes parasismiques qui interviennent dans la conception des bâtiments peuvent être répartis dans les quatre catégories suivantes :

- L'implantation du bâtiment
- La forme en plan et en élévation
- Le système de contreventement
- L'insertion des éléments non-porteurs

5.2. L'implantation du bâtiment

Le choix de l'implantation du bâtiment en amont de la conception joue un rôle important dans la stabilité de la structure. Cependant, certaines considérations parasismiques interviennent dans ce choix. La réglementation parasismique algérienne recommande d'éviter d'implanter le bâtiment sur une faille ou dans les alentours immédiats.

Dans le cas de la ville d'Alger et ses alentours, six failles actives ont été identifiées dans le rapport de JICA : la faille de Zemmouri, Thenia, Sahel, Blida, Chenoua, et Khair al Din (Figure 3.16). Plusieurs structures régionales identifiées dans la zone d'Alger sont susceptibles d'être réactivées dans le modèle de contrainte du jour présent[84]. D'après la carte de la localisation des failles, le site d'implantation de la commune El Madania se situe entre les trois failles de Sahel, Thenia et celle de Blida.

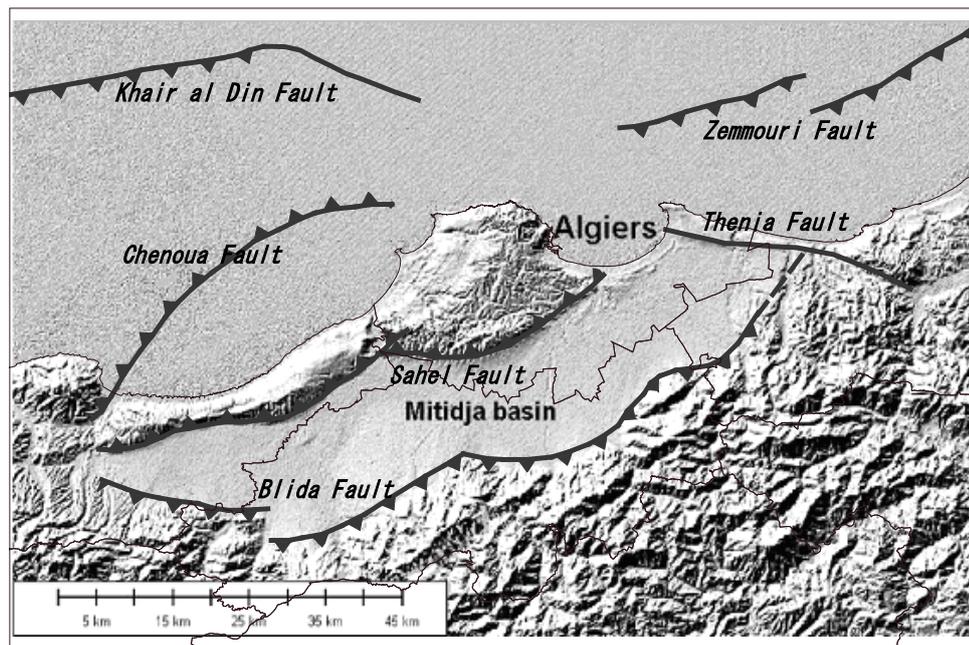
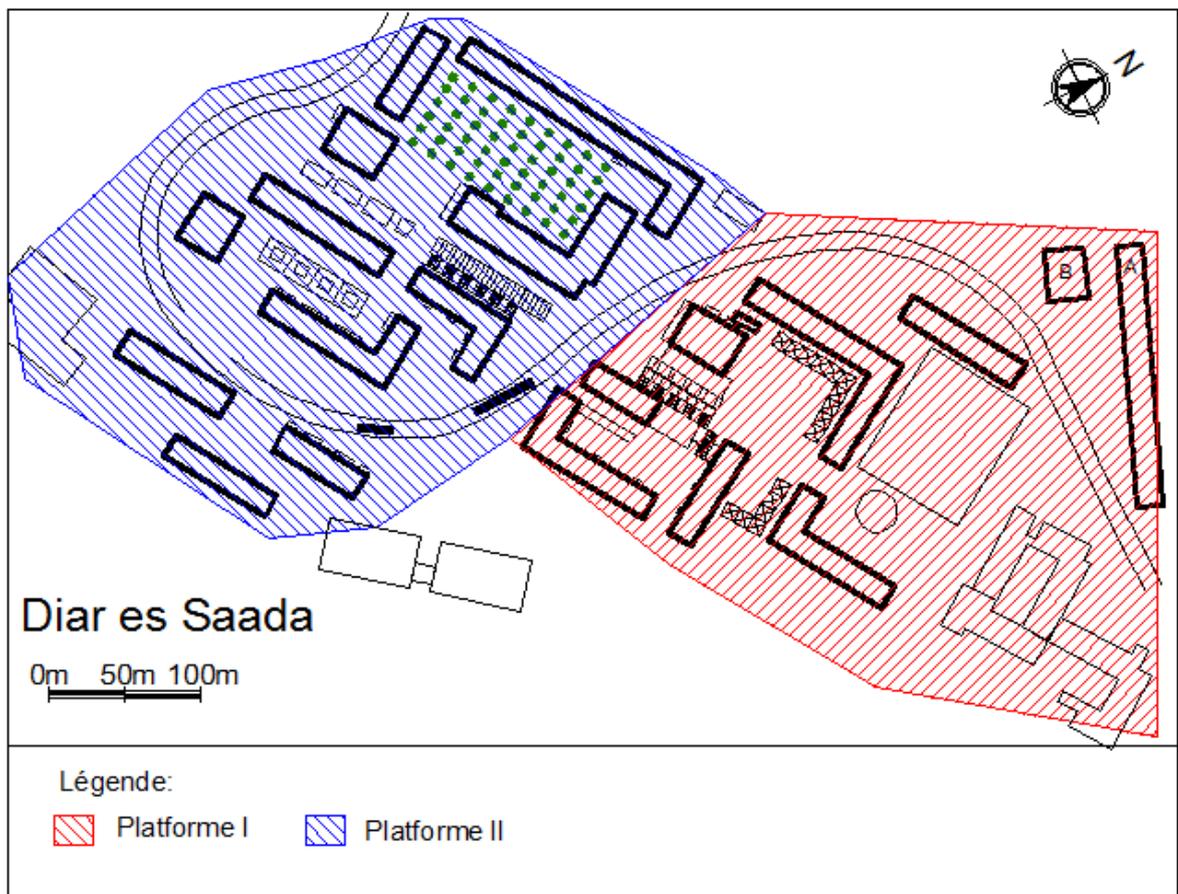


Figure 3. 16: Localisations et traces des surfaces inférées des failles [84].

De même, il faut éviter les emplacements qui peuvent être instables et donc dangereux en cas de tremblement de terre : les sols meubles saturés qui ont tendance à se liquéfier, les bords de falaises, les pieds de falaises où des glissements de terrain peuvent se produire, les talus instables et bien sûr les pentes sujettes aux glissements de terrain.

Du point de vue de la parasismique, le choix de l'emplacement du bâtiment fait généralement l'objet d'une étude et d'une reconnaissance approfondies des sols. Contrairement aux projets de Diar es Saada, Diar el Mahçoul est situé au bord d'une falaise (Figure 3.17). Le choix du terrain est fait par le maire d'Alger Chevalier, puis validé par la suite par Pouillon. La construction de la structure représente un défi architectural en raison de contraintes liées à la pente et à la nature du sol. Selon les informations géologiques obtenues, le sol est calcaire[2], ayant une résistance homogène. En raison de la pente du terrain, on trouve dans le même immeuble des fondations superficielles d'un côté et des fondations formant soutènement avec refends sur le côté opposé.



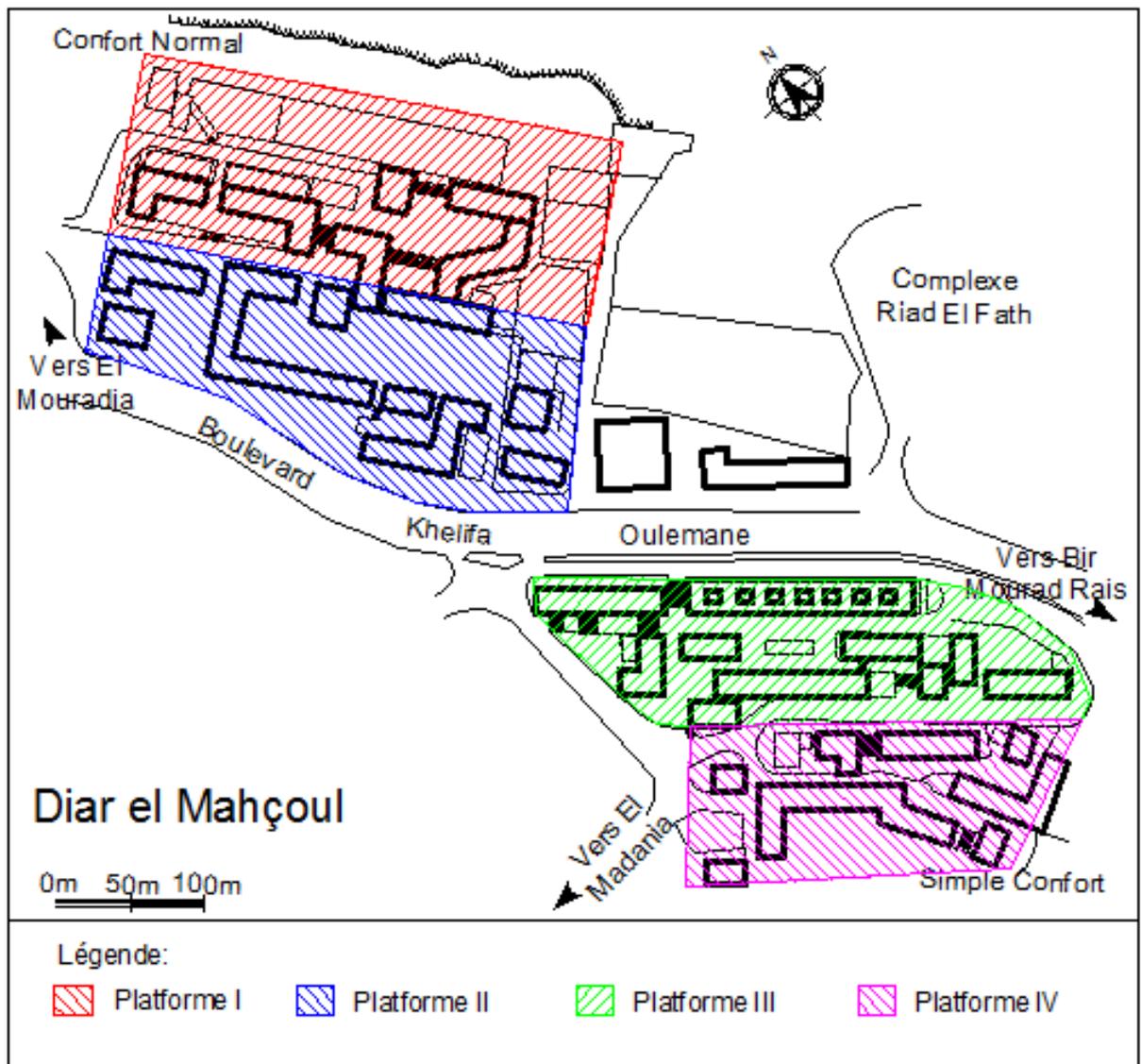


Figure 3. 17: Plan des différentes plateformes d'implantation la cité Diar es Saada et Diar el Mahçoul.

5.3. La forme en plan et en élévation

La forme en plan et en élévation du bâtiment est très importante, car elle influence fortement sur la réponse globale du bâtiment aux sollicitations sismiques. Afin d'obtenir de bonnes performances sismiques, il faut favoriser les formes simples compactes et régulières, que ce soit en plan ou en élévation. Les formes complexes provoquent des vibrations parasites qui vont se traduire par la suite à travers des déformations accentuées et entraîner des concentrations locales d'efforts[120].

Pour cette raison, il est recommandé de décomposer des formes complexes en plusieurs formes simples séparées par des joints sismiques. Il est également nécessaire de répartir régulièrement les éléments structurels sur toute la hauteur du bâtiment. Les sollicitations supplémentaires engendrées par la forme irrégulière en élévation peuvent provoquer la destruction du bâtiment.

Fernand Pouillon privilégie dans la conception de ses projets les formes compactes et régulières en plan, et continue en élévation. Comme le montre le tableau 3.1, les formes complexes sont divisées en plusieurs formes plus compactes en introduisant des joints sismiques, ce qui améliore considérablement le comportement sismique des bâtiments. De plus, une attention particulière est portée aux parties saillantes ou encastrées et aux évidements.

5.4. Le système de contreventement

Le choix du système de contreventement dépend de diverses contraintes, principalement d'ordre architectural[121], tels que la forme, le gabarit, le matériau, etc. Tous les systèmes de contreventement n'ont pas la même performance sismique, enfin certains ne sont pas recommandés. Les voiles en maçonnerie non armée ne sont pas recommandés dans zones exposées aux tremblements de terre, et seule la maçonnerie armée conçue conformément aux prescriptions parasismiques est autorisée dans ces zones.

Cependant les immeubles de Pouillon sont à la fois traditionnels et spéciaux. Ils ne comportaient aucune ossature en béton armé, à l'exception du plancher caisson en béton armé formant un diaphragme rigide, seuls les murs porteurs en pierre pré-taillée et les cloisons semi-porteuses en brique constituent le contreventement de la structure.

5.5. L'insertion des éléments non-porteurs

Lors de la conception d'un projet architectural, il est essentiel de porter une attention particulière aux éléments, non-porteurs, qui interviennent également dans la conception parasismique, même s'ils ne contribuent pas à la résistance structurelle. Les dommages dus aux tremblements de terre impliquent aussi des

éléments non-porteurs, par exemple, la chute de faux plafonds. À titre d'exemple, dans les cités d'habitation d'Alger, les plaques de liège sont fixées au plafond au moyen de crochets en fer galvanisé, ceux-ci venant renforcer l'adhérence naturelle du liège sur le béton[38].

6. La structure des immeubles et la réglementation parasismique algérienne

Selon la réglementation algérienne RPA99/2003, seul le système de construction en maçonnerie porteuse chaînée est permis dans les zones sismiques. En effet, construire en maçonnerie non chaînée est complètement interdit dans ces zones, notamment la zone III.

- *Étude comparative entre les normes parasismiques Algériennes et les dispositions constructives adoptées dans les grands ensembles*

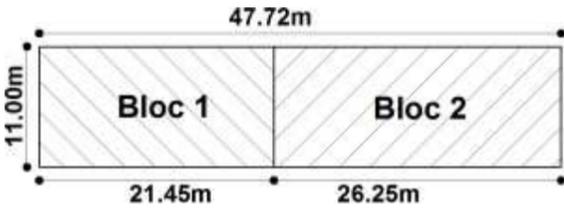
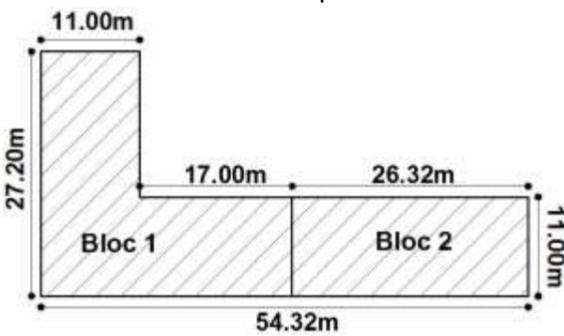
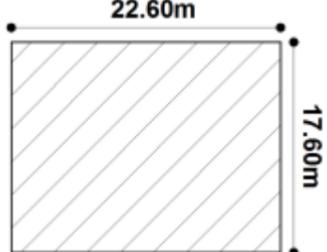
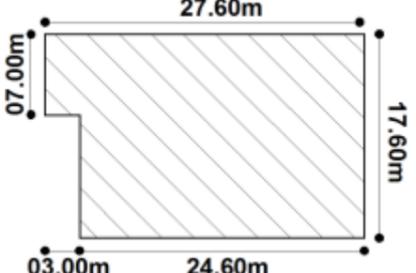
Le code sismique algérien fournit un ensemble de normes pour la catégorie des constructions en maçonnerie afin de définir les aspects sismiques des bâtiments. En effet, il existe un chapitre dans le document technique de spécification DTR B.C 2 48 qui traite spécifiquement de la structure de la maçonnerie porteuse chaînée. Selon l'article 9.1.1 du RPA99/2003, l'utilisation de maçonnerie non chaînée n'est pas autorisée dans les zones sujettes aux tremblements de terre, comme la ville d'Alger. Par conséquent, les normes mentionnées ci-dessous sont principalement utilisées pour la construction en maçonnerie porteuse chaînée.

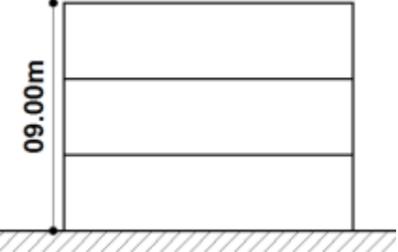
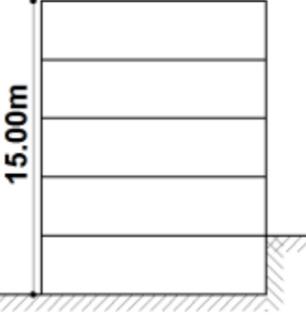
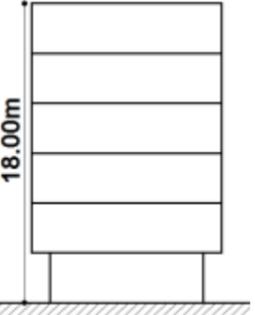
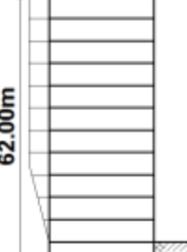
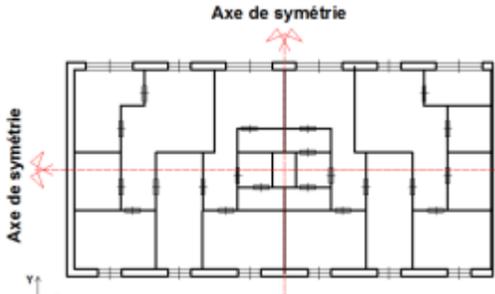
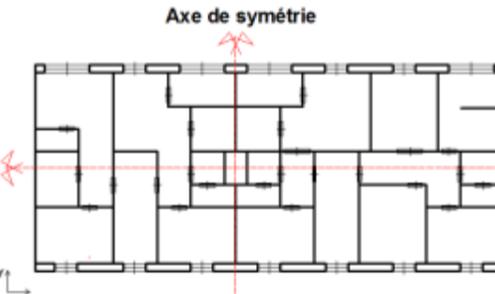
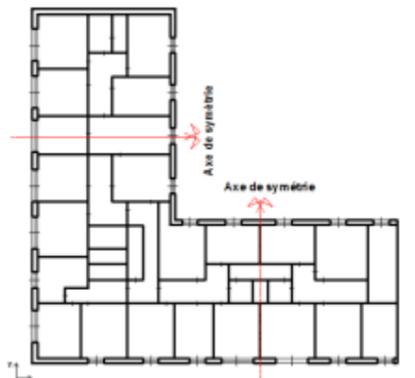
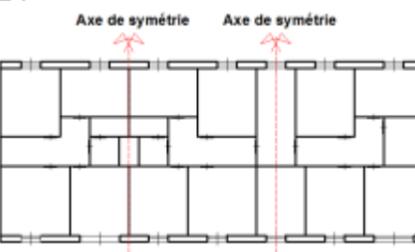
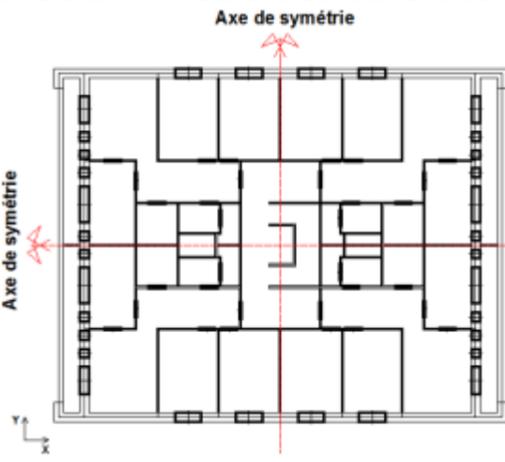
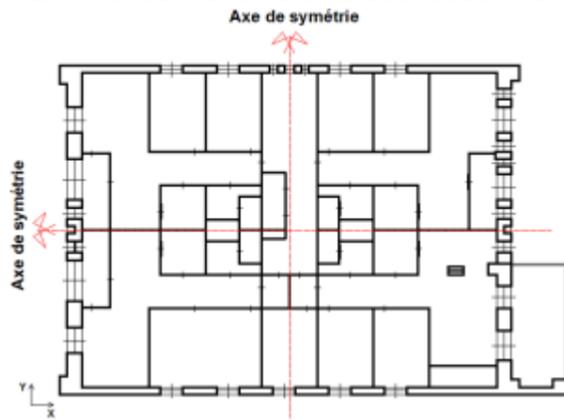
Une étude de cas a été sélectionnée pour chaque catégorie de bâtiments : basse (LOW rise), moyenne (MID rise), grande (HIGH rise) et très grande hauteur (SuperHIGH rise), comme le montre la figure 3.18.



Figure 3. 18: Les critères de sélection des bâtiments de Diar es Saada.

Tableau 3. 1: Etude comparative des techniques constructives adoptées dans les projets de Pouillon et le code parasismique algérien RPA 99/2003

RPA 99/2003	Les dispositions constructives adoptées dans les grands ensembles			
	LOW rise (bâtiment R)	MID rise (bâtiment E)	HIGH rise (bâtiment L)	SuperHIGH rise (bâtiment D)
Système structurel				
Selon l'article 9.1.1 : seul système de construction en maçonnerie porteuse chaînée est permis en zone sismique	- Système de construction en maçonnerie porteuse non chaînée. - Immeuble à la fois traditionnel et spécial (il ne comportait aucune ossature, seules les briques porteuses et la pierre le soutenaient).	- Système de construction en maçonnerie porteuse non chaînée. - Immeuble à la fois traditionnel et spécial (il ne comportait aucune ossature, seules les briques porteuses et la pierre le soutenaient.)	- Système de construction en maçonnerie porteuse non chaînée. - Immeuble à la fois traditionnel et spécial (il ne comportait aucune ossature, seules les briques porteuses et la pierre le soutenaient.)	- Système de construction en maçonnerie porteuse non chaînée. - Immeuble à la fois traditionnel et spécial (il ne comportait aucune ossature, seules les briques porteuses et la pierre le soutenaient.)
	<u>Condition non vérifiée</u>	<u>Condition non vérifiée</u>	<u>Condition non vérifiée</u>	<u>Condition non vérifiée</u>
Les principes de base de la conception parasismique en plan et en élévation				
Selon l'article 9.1.2 : Le bâtiment doit présenter une configuration régulière en plan et en élévation.	- Forme idéale simple compacte et régulière. 	- Le bâtiment E présente en plan une configuration complexe. Il est composé de deux blocs : bloc 1 avec une forme en L et bloc 2 avec une forme simple. 	- Forme idéale simple compacte et régulière. 	- Forme idéale simple compacte et régulière. 
	<u>Condition vérifiée</u>	<u>Condition non vérifiée</u>	<u>Condition vérifiée</u>	<u>Condition vérifiée</u>
Selon l'article 9.1.3 : Le rapport longueur/largeur sera limité à 3.5.	- Bloc 1 : Le rapport longueur/largeur = $21.45/11 = 1.95$ - Bloc 2 : Le rapport longueur/largeur = $26.25/11 = 2.38$	- Bloc 1 : Le rapport longueur/largeur = $28/11 = 2.54$ - Bloc 2 : Le rapport longueur/largeur = $26.32/11 = 2.39$	- Le rapport longueur/largeur = $22.60/17.6 = 1.28$	- Le rapport longueur/largeur = $27.60/17.60 = 1.56$
	<u>Condition vérifiée</u>	<u>Condition vérifiée</u>	<u>Condition vérifiée</u>	<u>Condition vérifiée</u>
Selon l'article 9.1.3 tableau 9.1 : Pour la zone III le nombre d'étages permis est de 3 niveaux (11m).	- La hauteur de bâtiment est de 09 m. - Le nombre d'étages est de 03 niveaux (R+2)	- La hauteur de bâtiment est de 15 m. - Le nombre d'étages est de 05 niveaux (R+3)	- La hauteur de bâtiment est de 18 m. - Le nombre d'étages est de 06 niveaux (R+5)	- La hauteur de bâtiment est de 62 m. - Le nombre d'étages est de 20 niveaux (R+19)

	 <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	 <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	 <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	 <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.4 (Répartition et densité des murs):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les murs porteurs en maçonnerie devront être répartis de manière uniforme suivant les deux directions principales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les murs porteurs sont répartis d'une manière uniforme suivant les deux directions. - Bloc 1 :  <ul style="list-style-type: none"> - Bloc 2 :  <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les murs porteurs sont répartis d'une manière uniforme suivant les deux directions. - Bloc 1 :  <ul style="list-style-type: none"> - Bloc 2 :  <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les murs porteurs sont répartis d'une manière uniforme suivant les deux directions.  <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les murs porteurs sont répartis d'une manière uniforme suivant les deux directions.  <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.4 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leur nombre doit être suffisant pour résister aux forces sismiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre de murs porteurs est suffisant pour résister aux forces sismiques. Une hypothèse à vérifier par la modélisation numérique. <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre de murs porteurs est suffisant pour résister aux forces sismiques. Une hypothèse à vérifier par la modélisation numérique. <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre de murs porteurs est suffisant pour résister aux forces sismiques. Une hypothèse à vérifier par la modélisation numérique. <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre de murs porteurs est suffisant pour résister aux forces sismiques. Une hypothèse à vérifier par la modélisation numérique. <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 3.5.1.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le système de 	<ul style="list-style-type: none"> - Les éléments porteurs verticaux reste continus de la base au sommet du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les éléments porteurs verticaux reste continus de la base au sommet du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les éléments porteurs verticaux reste continus de la base au sommet du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les éléments porteurs verticaux reste continus de la base au sommet du bâtiment.

<p>contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation.</p>	<p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 3.5.1. - Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.</p>	<p>- La raideur et la masse des différents niveaux restent constants, sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La raideur et la masse des différents niveaux restent constants, sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La raideur et la masse des différents niveaux restent constants, sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La raideur et la masse des différents niveaux restent constants, sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 3.5.1. - La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension totale du bâtiment dans cette direction.</p>	<p>- Le bâtiment R ne présente aucun décrochement en plan et en élévation.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment E ne présente aucun décrochement en plan et en élévation.</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment L présente un décrochement en élévation. Il s'agit d'une loggia de de 17.6m de longueur et 1.3m de largeur, reposant sur des murs porteurs en pierre sur les deux extrémités. C'est une partie encastrée dans les logements qui sont situés en étage. 1- Limites des décrochements en plan $l_1+l_2/L \leq 0.25$ $1.30+1.3/22.60=0.115 \leq 0.25$ 2- Limites des décrochements en élévation $L/L' \leq 1.25$ $22.60/20=1.13 \leq 1.25$ L : longueur de batiment L' : longueur à la base de batiment</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment D présente un décrochement en élévation. Il s'agit d'une loggia de de 7m de longueur et 3m de largeur, reposant sur un mur porteur en pierre sur l'une des extrémités. 1- Limites des décrochements en plan $l_x/L_y \leq 0.25$ $3/27.6=0.10 \leq 0.25$ 2- Limites des décrochements en élévation $L/L' \leq 1.25$ $27.60/24.60=1.12 \leq 1.25$ L : longueur de batiment L' : longueur à la base de batiment</p> <p align="center"><u>Condition vérifiée</u></p>

<p>Selon l'article 9.1.4 :</p> <p>- L'aire totale des sections droites des murs porteurs dans une direction donnée et à chaque niveau doit être supérieur à 4 % de la surface de plancher au niveau considéré.</p>	<p>- L'aire totale des sections droites des murs porteurs est supérieur à 4 % de la surface de plancher pour chaque niveau.</p> <p>$100 S_{\text{mur } x-x} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>$100 S_{\text{mur } y-y} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>- Bloc 1 :</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 24.481) / 235.95 = 10.47\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 15.395) / 235.95 = 6.52\% > 4\%$</p> <p>- Bloc 2 :</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 29.405) / 288.45 = 10.19\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 19.97) / 288.45 = 6.91\% > 4\%$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- L'aire totale des sections droites des murs porteurs est supérieur à 4 % de la surface de plancher pour chaque niveau.</p> <p>$100 S_{\text{mur } x-x} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>$100 S_{\text{mur } y-y} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>- Bloc 1 :</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 98.86) / 486.67 = 20.31\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 36.67) / 486.67 = 7.53\% > 4\%$</p> <p>- Bloc 2 :</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 29.08) / 289.28 = 10.05\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 15.02) / 289.28 = 5.19\% > 4\%$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- L'aire totale des sections droites des murs porteurs est supérieur à 4 % de la surface de plancher pour chaque niveau.</p> <p>$100 S_{\text{mur } x-x} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>$100 S_{\text{mur } y-y} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 30.152) / 397.76 = 7.58\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 28.342) / 397.76 = 7.12\% > 4\%$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- L'aire totale des sections droites des murs porteurs est supérieur à 4 % de la surface de plancher pour chaque niveau.</p> <p>$100 S_{\text{mur } x-x} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>$100 S_{\text{mur } y-y} / S_{\text{plancher}} > 4\%$</p> <p>Selon x-x : $(100 \times 33.98) / 453.96 = 7.48\% > 4\%$</p> <p>Selon y-y : $(100 \times 30.05) / 453.96 = 6.61\% > 4\%$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.4 :</p> <p>- Ces murs doivent être solidement liés aux planchers rigides ; ces derniers vont distribuer aux murs les forces d'inertie au prorata de leur rigidité.</p>	<p>- L'absence de chaînage vertical entre les murs et les planchers. Donc, la condition est non vérifiée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'absence de chaînage vertical entre les murs et les planchers. Donc, la condition est non vérifiée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'absence de chaînage vertical entre les murs et les planchers. Donc, la condition est non vérifiée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'absence de chaînage vertical entre les murs et les planchers. Donc, la condition est non vérifiée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.4 :</p> <p>- L'épaisseur des murs porteurs doit être supérieure à 20 cm.</p>	<p>- L'épaisseur minimale des murs porteurs en pierre est de 40 cm. L'épaisseur des cloisons semi-porteuses en brique est de 15 cm. Donc, cette condition est non vérifiée pour les murs en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'épaisseur minimale des murs porteurs en pierre est de 40 cm. L'épaisseur des cloisons semi-porteuses en brique est de 15 cm. Donc, cette condition est non vérifiée pour les murs en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'épaisseur minimale des murs porteurs en pierre est de 40 cm. L'épaisseur des cloisons semi-porteuses en brique est de 15 cm. Donc, cette condition est non vérifiée pour les murs en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>	<p>- L'épaisseur minimale des murs porteurs en pierre est de 40 et 80 cm. L'épaisseur des cloisons semi-porteuses en brique est de 10 et 15 cm. Donc, cette condition est non vérifiée pour les murs en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.4 :</p> <p>- Les distances maximales entre les murs porteurs sont fixées à 6 m pour la zone III.</p>	<p>- Les distances entre les murs porteurs, pour les deux bloc et suivant les deux directions, varient entre 1.5 et 5.4. Elles sont déterminées par la trame des marmittes (les caissons). La distance maximale entre les murs est celle de la cage d'escalier 9marmittes=5.4.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les distances entre les murs porteurs, pour les deux bloc et suivant les deux directions, varient entre 1.5 et 5.4. Elles sont déterminées par la trame des marmittes (les caissons). La distance maximale entre les murs est celle de la cage d'escalier 9marmittes=5.4.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les distances entre les murs porteurs, pour les deux bloc et suivant les deux directions, varient entre 1.5 et 5.4 (9marmittes). Elles sont déterminées par la trame des caissons.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les distances entre les murs porteurs, pour les deux bloc et suivant les deux directions, varient entre 1.5 et 5.4. Elles sont déterminées par la trame des marmittes (les caissons). La distance maximale entre les murs est celle de la cage d'escalier 9marmittes=5.4.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>

<p>Selon l'article 9.1.5 :</p> <p>- La longueur totale d'ouverture dans un mur ne devra pas dépasser la moitié de la longueur de ce mur.</p>	<p>- La longueur totale d'ouverture dans les murs en pierre ne dépasse pas la moitié de la longueur totale du mur. Condition observée dans les deux directions.</p> <p>$L_{ouverture_F1}=20.17 < 47.72/2$ $L_{ouverture_F2}=23.35 < 47.72/2$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La longueur totale d'ouverture dans les murs en pierre ne dépasse pas la moitié de la longueur totale du mur. Condition observée dans les deux directions.</p> <p>$L_{ouverture_F1}=25.65 < 54.32/2$ $L_{ouverture_F2}=17.80 < 43.32/2$ $L_{ouverture_F3}=12.95 < 27.20/2$ $L_{ouverture_F4}=4.05 < 14.27/2$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La longueur totale d'ouverture dans les murs en pierre ne dépasse pas la moitié de la longueur totale du mur. Condition observée dans les deux directions.</p> <p>$L_{ouverture_F1}=6.75 < 27.60/2$ $L_{ouverture_F2}=6.75 < 24.60/2$ $L_{ouverture_F3}=9.90 > 17.60/2$ $L_{ouverture_F4}=9.90 > 17.60/2$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée pour l'axe y-y</u></p>	<p>- Selon l'axe x-x, la longueur totale d'ouverture dans les murs en pierre ne dépasse pas la moitié de la longueur totale du mur. Cette condition n'est pas observée dans la direction y-y.</p> <p>$L_{ouverture_F1}=5.40 < 22.60/2$ $L_{ouverture_F2}=5.40 < 22.60/2$ $L_{ouverture_F3}=11.10 > 17.6/2$ $L_{ouverture_F4}=11.10 > 17.6/2$</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition non vérifiée pour l'axe y-y</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.5 :</p> <p>- La symétrie de la configuration en plan des ouvertures dans les deux directions du bâtiment.</p>	<p>- Parmi les principales caractéristiques architecturales des œuvres de Pouillon est l'uniformité de la disposition des ouvertures des façades en pierre. La position des ouvertures d'une manière plus au moins symétrique.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Parmi les principales caractéristiques architecturales des œuvres de Pouillon est l'uniformité de la disposition des ouvertures des façades en pierre. La position des ouvertures d'une manière plus au moins symétrique.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Parmi les principales caractéristiques architecturales des œuvres de Pouillon est l'uniformité de la disposition des ouvertures des façades en pierre. La position des ouvertures d'une manière plus au moins symétrique.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Parmi les principales caractéristiques architecturales des œuvres de Pouillon est l'uniformité de la disposition des ouvertures des façades en pierre. La position des ouvertures d'une manière plus au moins symétrique.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.5 :</p> <p>- Les ouvertures seront placées autant que possible sur le même alignement vertical.</p>	<p>- La redondance et l'alignement en élévation des ouvertures est assurée dans les bâtiments.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La redondance et l'alignement en élévation des ouvertures est assurée dans les bâtiments.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La redondance et l'alignement en élévation des ouvertures est assurée dans les bâtiments.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La redondance et l'alignement en élévation des ouvertures est assurée dans les bâtiments.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.1.5 :</p> <p>- Les ouvertures seront placées en dehors des zones d'influence des charges localisées ramenées les éléments porteurs.</p>	<p>- Les ouvertures de bâtiment R sont placées en dehors des zones d'influence des murs porteurs.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les ouvertures de bâtiment E sont placées en dehors des zones d'influence des murs porteurs.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les ouvertures de bâtiment E sont placées en dehors des zones d'influence des murs porteurs.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les ouvertures de bâtiment E sont placées en dehors des zones d'influence des murs porteurs.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>

<p>Selon l'article 9.1.5 :</p> <p>- Les dimensions des trumeaux doivent être supérieures à 1 m, pour la zone III.</p>	<p>- La dimension minimale des trumeaux dans le bâtiment R est de 85 cm, donc condition non respectée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La dimension minimale des trumeaux dans le bâtiment E est de 90 cm, donc condition non respectée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La dimension minimale des trumeaux dans le bâtiment L est de 45 cm, donc condition non respectée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- La dimension minimale des trumeaux dans le bâtiment D est de 45 cm, donc condition non respectée.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.2.1 :</p> <p>- Le fournisseur doit établir un document donnant les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau en particulier la résistance caractéristique à la rupture en compression.</p>	<p>- Des essais expérimentaux sur les matériaux divers de construction utilisés dans les bâtiments ont été effectués sur site. Un avis favorable a été attribué par bureau de contrôle technique SECURITAS aux matériaux employés dans la réalisation de l'immeuble.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Des essais expérimentaux sur les matériaux divers de construction utilisés dans les bâtiments ont été effectués sur site. Un avis favorable a été attribué par bureau de contrôle technique SECURITAS aux matériaux employés dans la réalisation de l'immeuble.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Des essais expérimentaux sur les matériaux divers de construction utilisés dans les bâtiments ont été effectués sur site. Un avis favorable a été attribué par bureau de contrôle technique SECURITAS aux matériaux employés dans la réalisation de l'immeuble.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Des essais expérimentaux sur les matériaux divers de construction utilisés dans les bâtiments ont été effectués sur site. Un avis favorable a été attribué par bureau de contrôle technique SECURITAS aux matériaux employés dans la réalisation de l'immeuble.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 9.3.2, les éléments structuraux principaux doivent être prévus dans deux directions perpendiculaires.</p>	<p>- Cette condition est vérifiée pour les deux directions. Les éléments structuraux principaux du bâtiment sont représentés par les des murs porteurs en pierres et cloisons semi-porteuses en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Cette condition est vérifiée pour les deux directions. Les éléments structuraux principaux du bâtiment sont représentés par les des murs porteurs en pierres et cloisons semi-porteuses en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Cette condition est vérifiée pour les deux directions. Les éléments structuraux principaux du bâtiment sont représentés par les des murs porteurs en pierres et cloisons semi-porteuses en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Cette condition est vérifiée pour les deux directions. Les éléments structuraux principaux du bâtiment sont représentés par les des murs porteurs en pierres et cloisons semi-porteuses en briques.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>

<p>Selon l'article 9.3.6, les planchers seront réalisés en :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dalle en béton armé coulé en place - Poutrelles et corps creux avec dalle de compression. 	<p>- Les planchers du bâtiment R sont réalisés en béton armé (plancher à caissons).</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les planchers du bâtiment E sont réalisés en béton armé (plancher à caissons).</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les planchers du bâtiment L sont réalisés en béton armé (plancher à caissons).</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Les planchers du bâtiment D sont réalisés en béton armé (plancher à caissons).</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 2.1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Il faut éviter les sites à topographie accidentée comme : les abords de changement de pente important, les Crêtes, piton rocheux, les bords de vallées encaissées. 	<p>- Le bâtiment R est implanté sur un terrain plat.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment E est implanté sur un terrain légèrement accidenté.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment L est implanté sur un terrain légèrement accidenté.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment D est implanté sur un terrain en pente.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 2.1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Il est recommandé d'éviter les terrains instables susceptibles de glissement : les abords de falaises, rives et berges sujettes à affouillement. 	<p>- Le bâtiment R est implanté sur un terrain stable, non susceptible de glissement.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment E est implanté sur un terrain stable, non susceptible de glissement.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment L est implanté sur un terrain stable, non susceptible de glissement.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le bâtiment D est implanté sur un terrain stable, non susceptible de glissement.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>
<p>Selon l'article 2.1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Il est recommandé d'éviter les zones favorisées à la liquéfaction. 	<p>- Le terrain d'implantation du bâtiment R n'a jamais subis le phénomène de la liquéfaction.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le terrain d'implantation du bâtiment E n'a jamais subis le phénomène de la liquéfaction.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le terrain d'implantation du bâtiment L n'a jamais subis le phénomène de la liquéfaction.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>	<p>- Le terrain d'implantation du bâtiment D n'a jamais subis le phénomène de la liquéfaction.</p> <p style="text-align: center;"><u>Condition vérifiée</u></p>

7. Conclusion

Dans les années 1950, en réponse à la croissance démographique et à la réconciliation des Algériens et des Français, de nouveaux grands projets commencent à être mis en œuvre, d'abord sous l'impulsion du maire Chevallier en 1953, puis à travers le plan de Constantine jusqu'en 1962. Parmi tous ces projets, on citera les réalisations de Fernand Pouillon dans la ville d'Alger.

Aujourd'hui, plus de 68 ans après la pose de la première pierre du chantier de Diar es Saada et Diar el Mahçoul, le bâti n'a toujours pas bougé, et reste stable structurellement, semblant défier le temps avec vigueur. Les logements sont encore fonctionnels et logent des milliers de familles. C'est sans doute l'un des projets urbains les plus importants et les plus spectaculaires du mandat de Chevalier conçu par Pouillon. Ces cités d'habitation sont édifiées sur des terrains en pente surplombant le quartier d'El Hamma. Ces cités d'habitation présentent des caractéristiques uniques et exceptionnelles qui méritent une étude plus approfondie.

L'expertise du bâtiment nous a fait constater que depuis l'achèvement du bâtiment, aucun plan n'a été modifié et aucun dommage structurel n'a été constaté. Après vérification des conditions spécifiées dans le règlement parasismique algérien RPA99/2003, on constate que les principes architecturaux et les concepts structurels des bâtiments étudiés répondent aux normes en vigueur. En effet, la plupart des normes exigées par le code ont été vérifiées pour les quatre typologies, mais le comportement et les performances sismiques de la structure restent à vérifier à l'aide de la modélisation numérique.

CHAPITRE 04

APPROCHES D'ANALYSES SISMIQUES ET EXEMPLES D'APPLICATION SUR DES BÂTIMENTS EXISTANTS

1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, les pays à forte intensité sismique ont développé des méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments existants, dont le patrimoine ancien. Les retours d'expérience ont largement contribué à l'identification des critères structuraux les plus défavorables à la tenue aux séismes et qui doivent être repérés pour l'évaluation de la vulnérabilité.

Une revue de la littérature des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité a été menée pour découvrir les différentes approches empiriques, expérimentales, hybrides et analytiques, afin de produire une adaptation cohérente à notre recherche.

2. Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants

2.1. La vulnérabilité sismique

Le terme « vulnérabilité » peut être interprété de diverses manières selon le domaine d'étude, et varie d'un chercheur à l'autre. Néanmoins, ce terme ne peut être dissocié du risque et de l'aléa[71]. Le risque R est par définition la convolution de l'aléa A, de la vulnérabilité à cet aléa V et de la valeur de l'élément exposé E :

$$R = A.V.E$$

Les éléments R, A, V et E sont définis comme suit[122]:

- Risque (R) : pour un aléa spécifique, espérance mathématique de pertes en matière de vies humaine, blessés, dommages matériels et atteinte à l'activité économique, pendant la période de référence et dans une zone donnée.
- Aléa (A) : événement menaçant ou probabilité d'occurrence d'un phénomène pouvant causer des dommages matériels et des blessures corporelles, dans une zone et à un moment donné.

- Vulnérabilité (V) : le degré de perte d'éléments à risque de 0 % à 100 % en raison de phénomènes pouvant causer des dommages aux biens et d'engendrer des victimes.
- Éléments exposés ou élément à risque (E) : il s'agit des éléments ayant une valeur constituant un enjeu (population, constructions et ouvrages de génie civil, activité économique, services et infrastructures publiques) exposés à un aléa.

La vulnérabilité sismique d'un bâtiment se définit, selon Vincenzo Mallardo[123] et Carlo Gavarini[124], comme une quantité associée à la faiblesse de la structure en présence d'un séisme d'une intensité donnée, de sorte que la valeur de cette quantité et la connaissance de l'aléa sismique permettent d'estimer les dommages attendus de futurs séismes[125]. Pour G.M. Calvi[126], la vulnérabilité sismique d'une structure peut être décrite comme sa susceptibilité à être endommagée par une secousse du sol d'une intensité donnée.

En outre, Ambraseys définit la vulnérabilité sismique comme étant, le degré d'endommagement d'une structure donnée causé par un tremblement de terre avec un paramètre X (magnitude, intensité, amplitude). En d'autres termes, il s'agit d'une mesure du taux de perte après un séisme donné, ainsi que d'une mesure du pourcentage de dommages de la structure globale par rapport à chaque élément structurel, avec un rapport à partir de zéro (aucun dommage) représentant chaque unité (perte totale d'éléments). Ajoutant à cela, les diverses définitions qu'on retrouve dans la littérature sur le sujet développé par Boukri[127] dans son mémoire de magister.

2.2. Classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique

En l'absence d'une méthode standardisée pour estimer la vulnérabilité des structures face aux séismes, de nombreuses approches ont été développées, notamment dans les pays de forte sismicité (Japon, Italie, Etats-Unis, etc.). Chaque méthode vise à estimer le degré de vulnérabilité global des bâtiments. Le degré de vulnérabilité, dont les modalités varient d'une méthode à l'autre, est généralement hiérarchisé sous forme d'une note ou un coefficient. En fonction du degré de vulnérabilité, il est décidé d'entreprendre une réhabilitation sismique ou

non. Le but est d'estimer le comportement sismique afin d'éviter des mesures inutiles de renforcement.

D'une manière générale, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des structures peuvent être classées selon trois (03) critères : l'échelle, l'approche d'analyse et l'utilisation des calculs pour l'estimation de la vulnérabilité, tel que décrites dans l'organigramme suivant (Figure 4.1) :

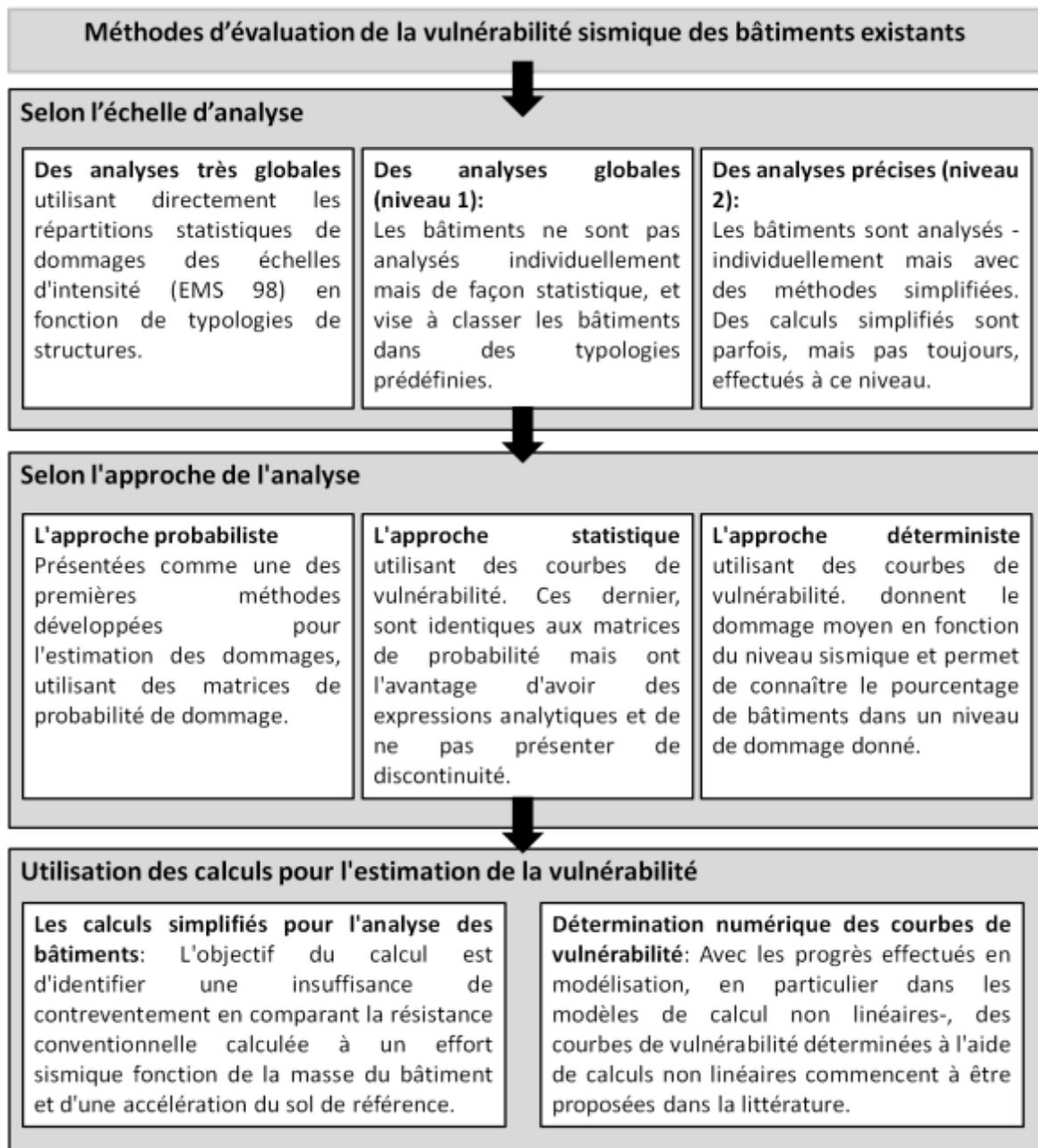


Figure 4. 1: Synthèse des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants [122].

3. Approches d'analyse des structures en maçonnerie

Selon l'étude menée en 2006 par G.M. Calvi[126], puis suivi en 2015 par celle d'A.E. Athmani[128], les méthodes permettant d'évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments peuvent être divisées en deux catégories principales : empirique ou analytique, les deux pouvant être utilisées dans des méthodes hybrides. A ces méthodes viens s'ajouter l'approche expérimentale.

Une revue de la littérature des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité a été réalisée pour mettre en évidence les principes de chaque méthode afin de déterminer la méthode appropriée pour notre étude de cas.

Les quatre approches sont décrites dans les sections suivantes :

3.1. Approche empirique

L'approche la plus ancienne d'évaluation de la vulnérabilité sismique est dénommée approche empirique. Il s'agit également de méthodes d'évaluation basées essentiellement sur le jugement des experts et les observations de distributions statistiques de dommages dus à des séismes passés. Cette méthode est généralement utilisée dans les études à grande échelle impliquant un groupe de bâtiments. Son objectif est d'obtenir la probabilité d'un niveau donné de dommages pour un type de bâtiment donné en raison d'un scénario sismique.

3.1.1. Approche d'évaluation fondée sur l'échelle macrosismique européenne (EMS-98)

Parmi les différentes méthodes empiriques d'évaluation de la vulnérabilité qui ont été développées dans le passé pour être utilisées dans l'estimation des dommages, on distingue celles basée sur l'échelle macrosismique européenne (EMS-98).

L'échelle macrosismique européenne (EMS), conçue à l'origine pour déterminer l'intensité des séismes, est aussi utilisée pour évaluer et prédire l'étendue des dommages en cas d'événement sismique. Certes, c'est une méthode très sommaire, qui représente le niveau 0 d'analyse. Elle associe également quinze types de structures (dont sept en maçonnerie), aux classes de vulnérabilité A à E, A étant la plus vulnérable (Figure 4.2). En effet, la typologie du

bâtiment est définie par la nature du matériau et le système de contreventement qui ont un effet sur la réponse de la structure.

L'échelle EMS-98 permet également de classer un ensemble de bâtiments en fonction d'une catégorie de vulnérabilité donnée, et d'estimer le degré d'endommagement attendu selon la typologie des structures.

Typologie des Structures		Classe de Vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut - pierre tout-venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	—	○				
	Pierre Massive		—	○	—		
	Maçonnerie non armée avec des éléments préfabriqués	—	○	—			
	Maçonnerie non armée avec des planchers en béton armée chaînée		—	○	—		
	Maçonnerie renforcée ou chaînée			—	○	—	
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique	—	—	○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de conception parasismique		—	—	○	—	
	Ossature avec un bon niveau de conception parasismique			—	—	○	—
	Murs en béton armé sans conception parasismique	—	○				
	Murs en béton armé avec un niveau moyen de conception parasismique		—	○	—		
	Murs en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique			—	—	○	—
					—	○	—
BOIS ACIER	Bâtiments en charpente métallique			—	—	○	—
BOIS	Bâtiments en bois de charpente		—	—	○	—	

○ classe de Vulnérabilité — gamme la plus probable
 --- gamme la moins probable, cas exceptionnel

Figure 4. 2: Définition des typologies EMS98 et la classe de vulnérabilité associée [129].

Cette méthode est aussi utilisée pour déterminer l'intensité sismique correspondant à une secousse, en se basant sur les dommages observés sur les différentes classes de vulnérabilité de structures (Figure 4.3). Cinq niveaux de dommages peuvent être observés, qui peuvent être résumés comme suit :

- Degré 1 : Dommages négligeables à légers (aucuns dégâts structurels, légers dégâts non-structuraux)
- Degré 2 : Dommages modérés (dégâts structurels légers, dégâts non-structuraux modérés)
- Degré 3 : Dommages importants à lourds (dommages structurels modérés, dommages non-structuraux importants)
- Degré 4 : Très lourds dommages (dégâts structurels importants, dégâts non-structuraux très importants)
- Degré 5 : Destruction (dégâts structurels importants)

Echelle EMS98	1	2	3	4	5
Structure en maçonnerie					
Structure en béton armé					
Damage moyen	[0.0 - 0.2[[0.2 - 0.4[[0.4 - 0.6[[0.6 - 0.8[[0.8 - 1.0[

Figure 4. 3: Classification des dommages pour les bâtiments en maçonnerie, d'après [EMS98].

3.1.2 Méthode Risk-UE (2003)

Le projet européen RISK-UE a été développé par les institutions universitaires et les organismes de recherches (UNIGE, UTCB, BRGM, IZIIS, CLSMEE, AUTH, CIMNE) dans le cadre du Work Package IV relatif à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti courant, afin d'analyser le risque sismique à l'échelle de la ville et de conduire à la création d'une méthode d'évaluation des risques.

La méthode Risk-UE[130] comporte deux niveaux d'estimation de la vulnérabilité sismique[131]:

- Niveau 1 : une méthode dite macrosismique qui s'appuie sur l'évaluation d'un indice de vulnérabilité pour un bâtiment donnée, indice qui est fonction de la typologie constructive du bâtiment ainsi que de divers facteurs susceptibles de modifier son comportement, et se base sur des retours d'expérience post-sismique.

- Niveau 2 : une méthode mécanique qui s'appuie sur une analyse analytique du comportement d'une structure face à une agression sismique sous forme d'un spectre d'accélération.

Cette méthode a été appliquée sur sept villes européennes : Sofia (Bulgarie), Nice (France), Bucarest (Roumanie), Barcelone (Espagne), Thessalonique (Grèce), Bitola (Macédoine) et Catania (Italie).

3.1.3. La méthode *VulnéRAIp* (2005)

VulnéRAIp[132] est une méthode empirique simplifiée basée sur la méthode italienne GNDT (Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti). Elle a été établie dans le cadre du projet de la région Rhône-Alpes *VulnéRAIp* (vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville Rhône-Alpine).

La méthode *VulnéRAIp* permet de réaliser une estimation simple de la vulnérabilité sismique à l'échelle urbaine. Elle a été appliquée pour la première fois sur la ville de Grenoble (France), qui reste fiable en comparaison des méthodes plus complexes à mettre en œuvre.

Cette méthode propose jusqu'à présent quatre niveaux d'analyse[131] :

- Niveau 0 (le plus basique) : Il est uniquement basé sur la typologie des structures énoncée dans le rapport d'EMS 98. Il permet d'analyser d'une manière rapide des niveaux probables de dommages pour une typologie présente dans la ville (comme l'INSEE).
- Niveau 1.0 (assez sommaire) : Il est basé sur une approche qualitative et géométrique du parc immobilier, tel que l'année de construction, les matériaux et les techniques constructives, le gabarit et la forme géométrique.
- Niveau 1.1 (plus détaillé) : Il est caractérisé par l'utilisation des documents plus détaillés remplis par des techniciens spécialistes correctement formés après l'inspection visuelle externe. Les informations complémentaires ainsi obtenues permettent d'améliorer l'estimation de l'indice de vulnérabilité et la réduction de la marge d'incertitude.

- Niveau 1.2 (plus précis) : Ce niveau est plus précis que la précédente fiche d'information, et permet d'identifier les éventuels défauts structuraux visibles. Il nécessite en particulier l'intervention de professionnels de la construction pour obtenir des informations sur la structure elle-même par le biais d'inspections internes et externes et à la consultation des plans de construction.

3.1.4. La Méthode FaMIVE

La méthode FaMIVE (Failure Mechanism Identification and Vulnerability Evaluation)[133] est un autre programme basé sur les mécanismes d'effondrement, qui vise à évaluer la vulnérabilité des bâtiments historiques et des centres-villes. Dans cette méthode, la méthodologie EMS-98 est utilisée au premier lieu pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments, puis les mécanismes d'effondrement sont déterminés via le logiciel FaMIVE. Ce dernier est principalement basé sur l'analyse statique équivalente des murs extérieurs de la structure.

Ainsi, il est possible de prédire le mode de dommages éventuels et le niveau de vulnérabilité d'un groupe de bâtiments par rapport au niveau d'intensité des séismes attendus. Il est également possible d'analyser la capacité à réduire les vulnérabilités en introduisant certains types de renforcement.

3.1.5. Approche d'évaluation par pointage

Par rapport à d'autres méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique, l'approche d'évaluation par pointage ou notation se caractérise par la simplicité et la rapidité du processus d'application. En effet, les bâtiments sont classés en fonction du type de structure. C'est une méthode déterministe fondée sur la classification typologique de la structure. Les points sont attribués en fonction de paramètres typologiques représentant le domaine d'étude[134]. L'indice de vulnérabilité est établi sur la base des tableaux standards structurels et non structurels enregistrés lors de l'inspection structurelle.

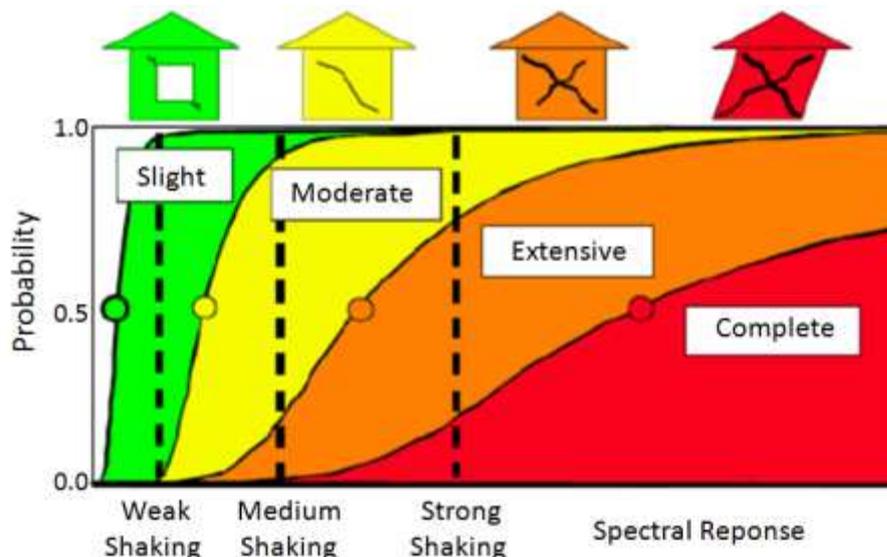
3.1.6. Méthode américaine FEMA

FEMA (Federal Emergency Management Agency) est une approche développée par l'Agence fédérale de gestion des urgences aux états unis en 1997[135]. Il s'agit d'une méthode facile et rapide d'évaluation sismique visuelle, dont sa méthodologie s'appuie sur le système de notation. Cette méthode est reconnue aussi sous le nom d'ATC-21, et a été élaboré par une grande équipe de spécialistes dans le génie parasismique et la réhabilitation sismique.

Selon les paramètres constructifs du bâtiment, compte tenu de la sismicité de la zone, une cote de base liée au risque structurel est attribuée au bâtiment (Figure 4.4). Cette côte est identifiée en fonction de la résistance du bâtiment parmi les 15 typologies de bâtiments courants aux États-Unis, avec une valeur maximale de 7,4 pour les structures en bois situées dans les zones à faible sismicité, et une valeur minimale de 1,6 pour les structures en béton armé avec remplissage en maçonnerie situées dans les zones à forte sismicité.

La méthode FEMA prévoit trois niveaux d'évaluation de vulnérabilité ; allant d'une simple estimation à l'aide d'une série de "check-lists" à des analyses plus précises et détaillées.

- Niveau 1 : présomption de vulnérabilité
- Niveau 2 : analyse quantitative
- Niveau 3 : analyse approfondie



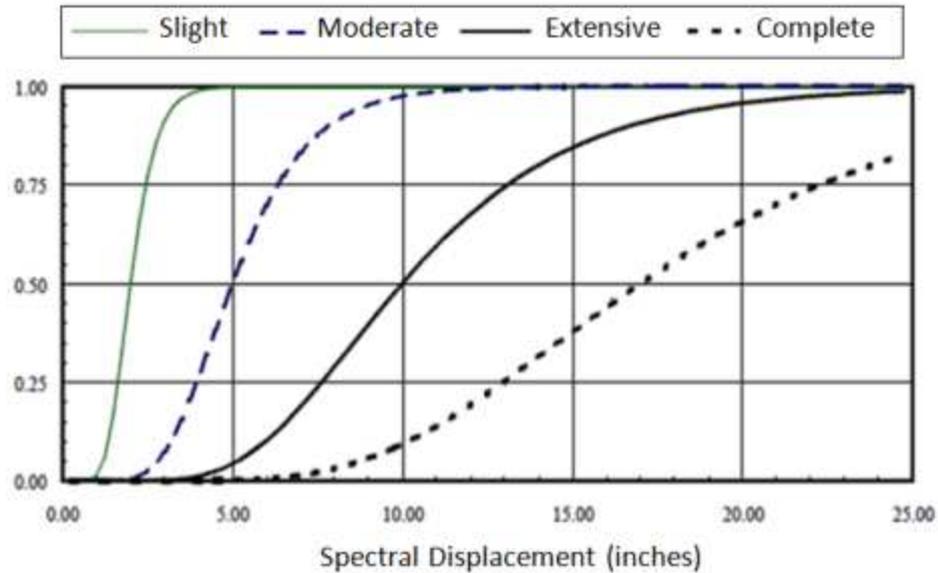


Figure 4. 4: Forme typique des courbes de fragilité pour les dommages légers, modérés, étendus et complets (FEMA, 1999) [108].

3.1.7. La méthode GNDT, Italie

GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) est l'une des méthodes connues les plus courantes dans la littérature concernant la vulnérabilité sismique des structures. Elle a été établie par le groupe de défense contre les tremblements de terre du Conseil national de recherche Italien en 1993, sur la base d'une approche élaborée par Benedetti et Petrini en 1984[136].

La méthodologie GNDT (BENE88, GNDT93, OMB81, CNR86) est généralement utilisée pour identifier et caractériser les déficiences sismiques d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments, s'appuyant sur les données d'observation et d'enquête sur les dommages post-sismiques, et en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé. Elle propose deux niveaux d'analyse qui traduisent la qualité et la quantité des données issues du diagnostic visuel[122].

Le premier niveau consiste à collecter des données générales sur la structure du bâtiment. Une l'analyse globale du bâtiment concernant sa localisation, son état de conservation, sa géométrie, son gabarit, et la nature des matériaux de construction.

Le second niveau caractérise la structure de façon plus précise. Ce niveau repose sur onze paramètres d'évaluation la vulnérabilité des structures en

maçonnerie, qui sont : type et organisation du système résistant, qualité du système résistant, résistance conventionnelle sous un chargement horizontal, localisation de la structure et fondations, caractéristiques des planchers, irrégularité en plan, irrégularité en élévation, distance entre murs, caractéristiques des toitures, éléments non-structuraux, et l'état de conservation.

3.2. Approche expérimentale

Dans la plupart des cas, il s'agit de méthodes mises en œuvre par différentes organisations en fonction de leurs besoins. L'approche expérimentale est couramment combinée avec d'autres approches, telles que les méthodes analytiques. En effet, les mesures expérimentales sont parfois complétées par les analyses numériques. Ces méthodes diverses d'essais reposent sur trois moyens d'essais : la table vibrante, les murs de réaction, les centrifugeuses. Néanmoins, l'essai à l'aide de tables vibrantes est l'un des principaux moyens d'essais les plus utilisés à l'échelle mondiale.

Contrairement aux méthodes empiriques, les essais expérimentaux permettent de mieux déterminer et décrire le comportement réel de la structure sous différentes charges sismiques. Les principales méthodes d'essais expérimentaux sont[137] :

- Méthode d'essai par chargement quasi-statique
- Méthode de la force efficace (Effective force method)
- Méthode d'essai pseudo-dynamique (pseudo-dynamic testing method)
- Méthode d'essai pseudo-dynamique en temps réel (Real time pseudo-dynamic testing method)
- Méthode d'essai sur table vibrante
- Méthode d'essai dynamique hybride en temps réel (Real time dynamic hybrid testing method)
- Méthode d'essais sur des centrifugeuses

3.3. Approche hybride

L'approche hybride est le résultat d'une combinaison de deux ou plusieurs méthodes d'analyse et d'estimation de la vulnérabilité sismique. La matrice de

probabilité de dommages et la fonction de vulnérabilité hybride combinent les statistiques de dommages post-sismiques avec des statistiques de dommages analytiques simulées sur la base du modèle mathématique selon la typologie de bâtiment[128].

Cette approche est souvent considérée comme un outil pratique pour estimer les pertes, en particulier lors de l'utilisation de composants de méthodes analytiques et empiriques pour mener les recherches. Lorsqu'il y a un manque de données sur les dommages à certains niveaux d'intensité d'une zone géographique, les modèles hybrides peuvent être particulièrement avantageux.

3.4. Approche analytique ou numérique

L'approche analytique pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments est fondée purement sur les méthodes de calcul numérique basées sur les théories classiques de l'élasticité et de la plasticité, et plus récemment sur les théories de l'endommagement. Contrairement à l'approche empirique où un accent plus important est mis sur l'évaluation de la vulnérabilité de l'environnement bâti à l'échelle urbaine, l'approche analytique n'est applicable qu'à un seul bâtiment. En plus, cette approche garantit des résultats plus précis.

D'une manière générale, il existe deux familles de méthodes de calcul pour prédire analytiquement les dommages structurels d'un bâtiment soumis à une action sismique, à savoir :

- Méthode élastique : méthodes basées sur les forces (MBF)
- Méthode non-linéaire : méthodes basées sur les déplacements (MBD)

Ces méthodes sont généralement appliquées lorsque l'expérimentation serait d'un coût excessif.

Le tableau 4.1 résume les différentes méthodes de calcul disponibles, que l'on peut trouver dans la littérature. Dans ce tableau, la complexité de la méthode augmente de gauche à droite et de haut en bas.

Tableau 4. 1: Les méthodes analytiques d'évaluation de la vulnérabilité sismique.

Action \ Structure	Élastique : Méthode basée sur les forces (MBF)	Non-linéaire : Méthode basée sur les déplacements (MBD)
Statique	Forces de remplacement	Pushover
Dynamique	Spectre de réponse	Non-linéaire dynamique

3.4.1. Méthode des forces de remplacement

La méthode des forces de remplacement ou la méthode statique linéaire est la première méthode numérique pour estimer la résistance sismique des structures. Les spectres normalisés de séisme sont définis en fonction de la localisation géographique du bâtiment et la nature du sol. Le spectre normalisé représente l'accélération à considérer en fonction de la période propre de la structure. Par conséquent, en connaissant la fréquence propre de la structure, l'accélération dimensionnelle peut être dérivée. Cette accélération donne la force horizontale équivalente au chargement sismique (Figure 4.5)[138].

Le principe de la méthode des forces de remplacement est représenté dans la figure 4.6. Afin d'envisager d'éventuelles superpositions de contraintes, la force globale F_d prend en compte des charges quasi-permanentes avec des facteurs de probabilité correspondants. F_d est ensuite répartie verticalement sur les différents niveaux de la structure. La méthode des forces de remplacement ne considère que la première fréquence propre de la structure. La réponse globale de la structure est une superposition d'un grand nombre de modes propres plus ou moins excités par le contenu fréquentiel du séisme.

L'avantage de cette méthode est de fournir une solution de calcul simple et moins coûteuse. Elle convient éventuellement aux structures régulières avec une période fondamentale de vibration prédominante. Dans le cas des structures irrégulières il est recommandé d'utiliser la méthode dynamique linéaire ou la méthode de spectre de réponse.

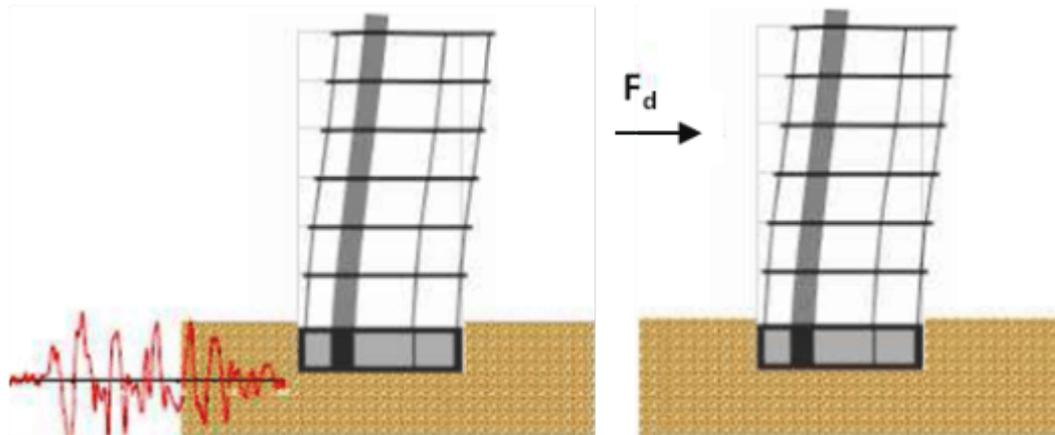


Figure 4. 5: Principe de la méthode des forces de remplacement [138].

3.4.2. Méthode de spectre de réponse

La méthode de spectre de réponse ou la méthode dynamique linéaire est couramment utilisée pour les structures irrégulières ou de hauteur importante. Elle utilise tous les modes qui contribuent à la réponse globale de la structure. La structure du bâtiment est modélisée par un système à plusieurs degrés de liberté, qui possède une matrice de rigidité linéaire élastique et une matrice d'amortissement visqueux équivalent. Ces contributions sont statistiquement combinées pour obtenir une réponse structurale approximative.

Le séisme est souvent modélisé par une analyse spectrale modale ou par une analyse pas à pas (time-history) qui nécessite l'utilisation d'enregistrements sismiques. Dans les deux cas, les forces et les déplacements sont obtenus par une analyse linéaire élastique.

3.4.3. Méthode Pushover

La méthode basée sur la déformation est une méthode statique non-linéaire (également connue sous le nom de méthode de « poussée progressive » ou « Pushover»), qui donne souvent de meilleurs résultats que les méthodes classiques basées sur la force. Le calcul prend en considération les phénomènes non-linéaires de la structure. Par conséquent, elle est bien adaptée pour l'évaluation sismique des structures existantes.

La structure supporte des charges incrémentales réparties sur la hauteur, et la courbe de réponse force-déplacement est obtenue en contrôlant le déplacement

du haut de la structure (Figure 4.6). La méthode est relativement simple et fournit des informations sur la résistance, la déformation, la ductilité et la distribution de la demande statique non-linéaire.

De cette manière, les éléments critiques qui peuvent atteindre l'état limite lors d'un séisme peuvent être déterminés. Bien qu'il existe des limitations inhérentes, telles que l'ignorance du changement de vitesse de chargement et de l'influence des modes supérieurs, cette méthode peut encore raisonnablement estimer la capacité de déformation totale, en particulier pour les grandes déformations structurelles[139].

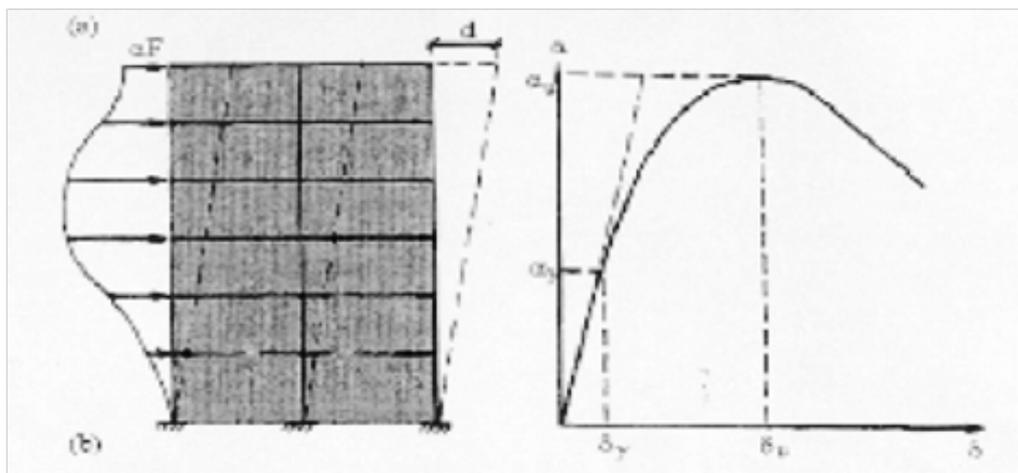


Figure 4. 6: Principe de la méthode Pushover [139].

3.4.4. Non-linéaire dynamique

La méthode d'analyse dynamique non-linéaire est similaire à la méthode statique non-linéaire, car elle prend en considération la réponse inélastique de la structure, et le séisme est modélisé par une analyse pas à pas. Il s'agit également de la méthode la plus complexe et la mieux adaptée aux applications de recherche pour décrire la réponse non-linéaire détaillée de la structure. Il est donc préférable d'utiliser plusieurs enregistrements sismiques (Figure 4.7), car la réponse calculée est très sensible aux caractéristiques du séisme utilisé.

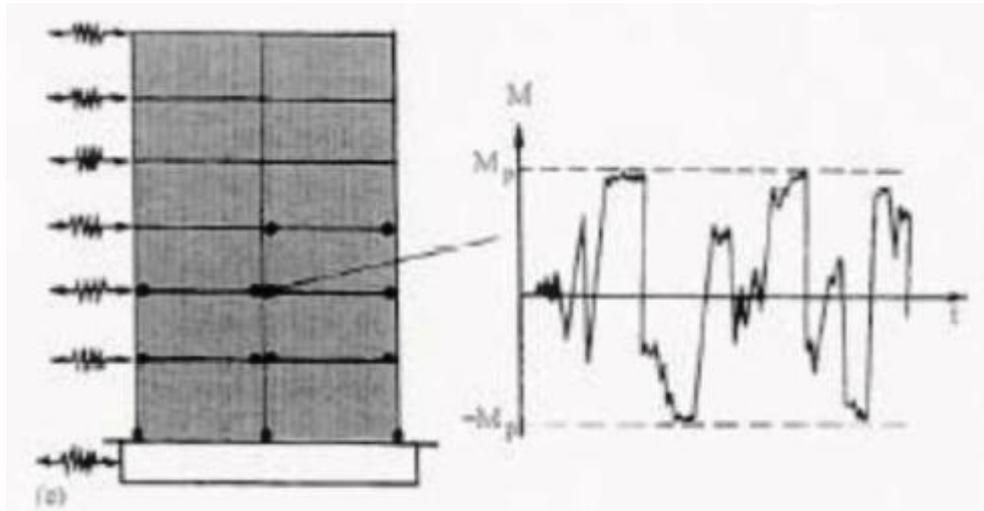


Figure 4. 7: Principe de la méthode dynamique non-linéaire [132].

4. Les méthodes d'analyse dans le code parasismique algérien RPA99/2003

D'après le document technique « DTR BC 2-48 » portant sur les règles parasismiques algériennes RPA 99/2003, le choix des méthodes d'analyse et de modélisation des structures doivent avoir pour objectif de reproduire au mieux le comportement réel de l'ouvrage. Le calcul de la force sismique peut être effectué selon les trois méthodes d'analyse :

- La méthode d'analyse statique équivalente est recommandée dans le cas des bâtiments d'une configuration régulière en plan et en élévation, avec une hauteur au plus égale à 65 m en zones I et II et à 30 m en zones III.
- La méthode d'analyse modale spectrale est recommandée pour les bâtiments réguliers et irréguliers, lorsque la méthode statique équivalente n'est pas autorisée.
- La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes peut être utilisée par du personnel qualifié, au cas par cas, ayant justifié auparavant les choix des séismes de calcul et des lois de comportement utilisées ainsi que la méthode d'interprétation des résultats et les critères de sécurité à satisfaire.

5. Maçonnerie et vulnérabilité sismique : application des méthodes d'analyse sur le patrimoine bâti

5.1. Le projet de recherche italien RiSEM (2011-2013)

5.1.1. Présentation du projet de recherche

RiSEM (acronyme italien de "Rischio Sismico negli Edifici Monumentali"- Risque sismique des bâtiments monumentaux) est un projet de recherche multidisciplinaire financé par le gouvernement régional de Toscane en Italie, sous la direction de professeur Gianni Bartoli[113]. Ce projet est créé dans le but de développer de nouvelles techniques d'investigation, d'analyse et de diagnostic qui permettraient, d'évaluer les performances sismiques des bâtiments à caractère patrimonial, et éventuellement de biens urbains d'intérêt historique, d'une manière rapide, relativement peu coûteuse et en utilisant autant que possible les techniques sans contact.

RiSEM implique en plus de la municipalité de San Gimignano (COMSG) quatre départements des universités de Florence et de Sienne. L'université de Florence, réunit les départements les suivants : département d'ingénierie civile et environnementale (DICeA), département de construction et de restauration (DiCR), département d'électronique et de télécommunications (DET), et le département des sciences de la terre (DST) de l'université de Sienne.

Le projet RiSEM s'est focalisé sur le centre historique San Gimignano, car il représente un cas unique dans le panorama mondial et se caractérise par une forte présence de la typologie de bâtiments "tours", un site d'expérimentation idéal pour le développement de nouvelles méthodes d'investigation et d'analyse. À travers l'étude du cas des tours de San Gimignano, le projet vise à combiner des techniques d'investigation classiques, long héritage de la communauté scientifique, avec une série de méthodes innovantes.

San Gimignano représente un projet pilote pour la mise au point de méthodologies qui pourraient ensuite être étendues non seulement aux bâtiments patrimoniaux présents sur le même territoire communal, mais aussi à d'autres structures présentes sur le territoire régional. Les objectifs du projet sont brièvement résumés ci-dessous.

5.1.2. Méthodologie d'analyse

Les lignes directrices du projet RiSEM proposent une méthodologie d'analyse, selon le niveau de connaissance de la structure, basée sur trois niveaux d'évaluation différents : analyse territoriale LV1, analyse locale LV2 et analyse globale LV3.

Le premier niveau d'évaluation permet d'évaluer l'accélération de l'effondrement structurel à travers un modèle simplifié basé sur un nombre limité de paramètres mécaniques et géométriques et d'outils qualitatifs tels que le diagnostic et l'observation visuelle.

Le deuxième niveau d'évaluation est basé sur une méthode cinématique réalisée pour analyser les mécanismes d'effondrement locaux qui peuvent se développer sur plusieurs macroéléments. La détermination des macroéléments appropriés est basée sur la connaissance des détails structurels du bâtiment : les modèles de fissuration, les techniques de construction, connexions entre les éléments structurels et architecturaux.

Le troisième niveau de l'évaluation comprend l'analyse globale de l'ensemble du bâtiment sous les charges sismiques à travers des modèles numériques appropriés. Par rapport aux deux niveaux précédents, LV3 est le plus précis, mais selon la méthode numérique utilisée, il nécessite beaucoup de données d'entrée et beaucoup de travail de calcul.

5.1.3. Exemple d'application

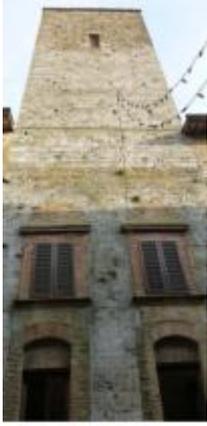
Le tableau suivant résume les résultats obtenus des recherches effectuées sur quatre tours de la ville de San Gimignano[140] : Becci, Cugnansi, Chigi et Coppi-Campatelli. La vulnérabilité sismique des tours est évaluée en se référant aux lignes directrices italiennes RiSEM. La méthodologie adoptée dans l'analyse est basée sur les éléments suivants : évaluation de l'aléa sismique et des interactions sol-structure ; acquisition des caractéristiques géométriques et reconstruction de l'évolution historique des bâtiments en maçonnerie ; évaluation du comportement statique et dynamique des structures à travers des techniques d'investigation non conventionnelles et innovantes ; évaluation de la vulnérabilité sismique ; et enfin évaluation du risque sismique.

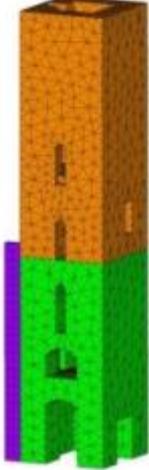
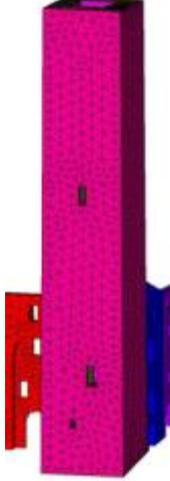
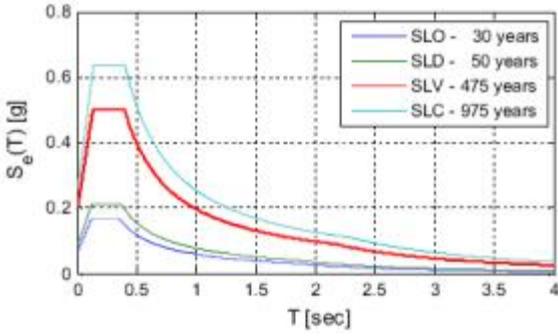
Comme les quatre cas d'étude sont intégrés aux bâtiments environnants aux niveaux inférieurs, trois modèles distincts avec différentes hauteurs supposées pour chaque tour :

- Modèle A : le cas d'étude est analysé comme une construction isolée, et la présence des bâtiments voisins n'est pas pris en compte (on suppose implicitement que l'action offerte par les structures voisines est inefficace ou qu'elle peut être perdue lors de séismes.).
- Modèles B et C : le cas d'étude analysé comme une construction isolée, mais la hauteur de la tour a été rendue égale à la partie de la structure émergeant des bâtiments environnants. La tour est représentée dans le modèle 3D uniquement par la partie de la structure qui émerge des bâtiments voisins (en fonction de la hauteur différente des bâtiments voisins, différents modèles B et C ont été considérés pour tenir compte des différentes hauteurs émergentes des tours).

La vulnérabilité sismique des tours a été évaluée à l'aide de modèles FE, par l'analyse Pushover (tableau 4.2). Les résultats d'analyse des modèles FE ont une fois de plus montré que les effets du confinement de la structure se reflètent sur les performances sismiques de la tour, mettant ainsi en évidence la nécessité d'études plus précises concernant la partie effective de la tour à considérer comme non contrainte par rapport aux bâtiments adjacents. Cette étude confirme aussi que l'élancement est un paramètre d'une importance primordiale sur la vulnérabilité sismique des tours.

Tableau 4. 2: Résultat d'analyse de quatre tours de la ville de San Gimignano.

Tours	Coppi-Campatelli[141]	Chigi	Cugnansi	Becci
				
Caractéristiques géométriques	H=27,6m S=6,5x8,1m	H=26,9m S=5,2x5,6m	H=42,8m S=7.6x7,5m	H=39,4m S=6,6x6,8m
Typologies constructives	a- Maçonnerie de pierre non taillée avec des murs de parement d'épaisseur limitée et un noyau de remplissage. b- Maçonnerie de pierre rectangulaire dressée.	Maçonnerie de pierres tendres. Maçonnerie de briques pleines avec mortier de chaux.	Maçonnerie de pierre rectangulaire dressée.	Maçonnerie de pierre tendre
Caractéristiques mécaniques	a- f_m (N/mm ²)= 2.00 τ_0 (N/mm ²)= 0.035 E (N/mm ²)= 1,020 b- f_m (N/mm ²)= 6.00	c- f_m (N/mm ²)= 1.40 τ_0 (N/mm ²)= 0.028 E (N/mm ²)= 900 d- f_m (N/mm ²)= 2.40	b- f_m (N/mm ²)= 6.00 τ_0 (N/mm ²)= 0.090 E (N/mm ²)= 2,400	c- f_m (N/mm ²)= 1.40 τ_0 (N/mm ²)= 0.028 E (N/mm ²)= 900

	τ_0 (N/mm ²)= 0.090 E (N/mm ²)= 2,400	τ_0 (N/mm ²)= 0.060 E (N/mm ²)= 1,200		
Modèle FEM (analyses pushover)				
	Modèle A : H = 33,1 m Modèle B : H = 27,6 m Modèle C : H = 13,4 m	Modèle A : H = 26,9 m Modèle B : H = 13,4 m Modèle C : H = 10,5 m	Modèle A : H = 26,9 m Modèle B : H = 13,4 m Modèle C : H = 10,5 m	Modèle A : H = 42,8 m Modèle B : H = 27,8 m Modèle C : H = 26,1 m
Logiciel	Code Aster	ANSYS	ANSYS	ANSYS
Données d'analyse	 <p style="text-align: center;">Spectre de réponse élastique</p>			
Résultats et conclusions	Deux hypothèses ont été confirmées par cette étude : 1- Les effets du confinement de la structure se reflètent sur les performances sismiques de la tour. 2-L'élancement est un paramètre d'une importance primordiale sur la vulnérabilité sismique des tours.			

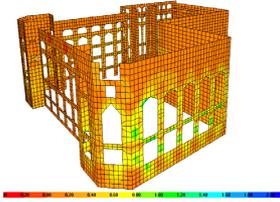
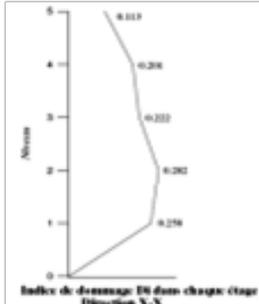
5.2. Expériences algériennes récentes dans la modélisation de comportement sismique du patrimoine bâti

La vulnérabilité de la structure en maçonnerie peut avoir des origines multiples. Elle peut être causée par l'utilisation du bâtiment et des équipements contenus dans l'ouvrage, la conception du bâtiment lui-même ou de l'interaction entre la structure et son environnement immédiat.

Ces dernières années, la recherche sur la vulnérabilité sismique du patrimoine architectural a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs en raison de l'importance du risque sismique en Algérie. La diversité des typologies constructives existantes et l'homogénéité de la maçonnerie compliquent la recherche sur ces structures. En effet, il existe d'innombrables types de structures de maçonnerie à travers le territoire national.

La maçonnerie présente un comportement mécanique, très complexe dû essentiellement à l'hétérogénéité de ses constituants. Les tableaux 4.3 et 4.4 sont une synthèse de cinq projets de recherche entrepris pour comprendre le comportement sismique des structures en maçonnerie : le siège de la wilaya d'Alger[142], les Galeries de France actuellement Musée public d'art moderne et contemporain d'Alger MAMA[143], la mosquée de Dellys "Djamaa' al kabir" à Boumerdes[144], la faculté des sciences naturelles et de la vie de l'Université de Mostaganem[145] et l'hôtel de ville de Constantine[146].

Tableau 4. 3: Expérience algérienne dans l'analyse numérique des structures existantes en maçonnerie : Le MAMA d'Alger, Siège de la wilaya d'Alger et Mosquée de Dellys "Djamaa' al kabir", Boumerdes.

Projet architectural	Les Galeries de France (MAMA), Alger (Bourahla, 2011)	Siège de la wilaya d'Alger (Remki, 2010)	Mosquée de Dellys "Djamaa' al kabir", Boumerdes (Foufa, 2013)
			
Année de réalisation	Époque coloniale 1909-1914	Époque coloniale 1908–1913	Époque coloniale (reconstruction) (1844-1847)
Caractéristiques géométriques		H=23,35 m S=41,8 m x38,45m	H=22,96 m S=29,55 m x16,25m
Typologies constructives	Murs périphériques en maçonnerie de pierre/brique, avec une charpente légère en acier.	Maçonnerie non renforcée. Planchers souples en bois (plancher flexible)	Maçonnerie non renforcée : Pierres liées avec du mortier d'argile et de chaux ; Dalle en béton armé posée sur une poutre en acier ; Toit en acier avec des voutains en maçonnerie de briques.
Caractéristiques mécaniques	$E= 800\text{N/mm}^2$ $\nu= 0,15$ (coefficient de poinçonnement) $\gamma= 18\text{kN/m}^3$ (poids spécifique)	Densité : $d=2,7\text{t/m}^3$ Module d'élasticité : $E=2000000\text{Kpa}$ Module de cisaillement : $G=500000\text{Kpa}$ Contrainte de compression : $\sigma=1500\text{Kpa}$ Contrainte de traction : $\tau=40\text{Kpa}$	
Modèle FEM			

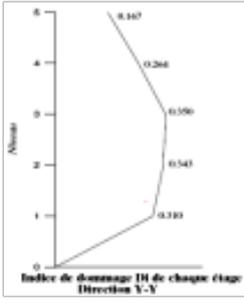
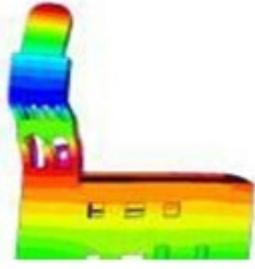
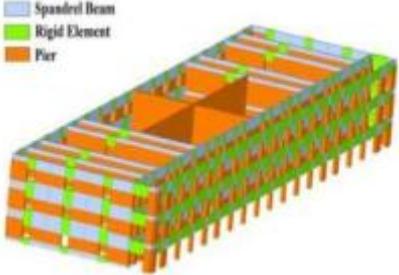
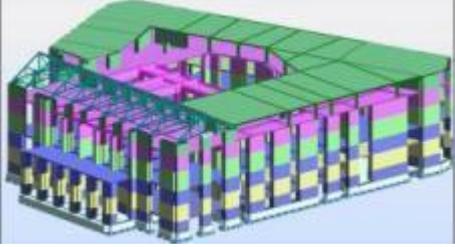
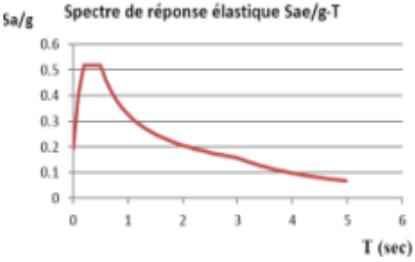
	Distribution des contraintes dans les murs périphériques en maçonnerie	 <p>Indice de dommage (ID) de chaque étage Direction Y-Y</p>	 <p>Analyse cinématique linéaire et non linéaire</p>
Logiciel	SAP2000	/	Straus7
Données d'analyse	Les paramètres : R=2,5	Accélérogrammes : EL CENTRO N-S 08mai 1940 ; ULCINJ (ALBATROS) N-S 1979 ; CHERCHEL N-S 1989	Spectre de réponse élastique Les paramètres : A=0,3 ; Q= 1,30 ; CT= 0,05
Résultats et conclusions	La rigidité du bâtiment est acceptable et la capacité de cisaillement des murs est également suffisante pour résister aux forces sismiques. Les régions critiques sont situées à proximité de l'ouverture inférieure avec des contraintes de traction assez élevées. Par conséquent, le renforcement est principalement destiné à soulager la concentration locale de contraintes autour des ouvertures et à empêcher la dislocation des murs aux angles.	L'étude a démontré qu'il existe un risque important d'effondrement du bâtiment en cas de séisme de forte intensité. La structure risque d'être gravement endommagée vu la forte concentration de dommage aux niveaux inférieurs. D'où la nécessité d'envisager le renforcement des éléments et des étages les plus vulnérables.	Des solutions de restauration de la mosquée ont été proposées et vérifiées par une analyse modale et spectrale. Afin d'obtenir un meilleur comportement de la structure, la dalle du toit-terrasse devrait être restauré plutôt que son remplacement par une dalle en béton armé.

Tableau 4. 4: Expérience algérienne dans l'analyse numérique des structures existantes en maçonnerie : la faculté des sciences naturelles et de la vie de l'Université de Mostaganem et Hôtel de ville de Constantine.

Projet architectural	Faculté des sciences naturelles et de la vie de l'Université de Mostaganem (Chaibedra, 2017)	Hôtel de ville, Constantine (Remki, 2020)
		
Année de réalisation	Achevée en 1884	Époque coloniale 1895-1903
Caractéristiques géométriques	H= 14,1m S=64m x 22m	H=22,13 m S= 42,47 m x 42,94 m (Seul le premier sous-sol a été pris en compte dans le calcul, les autres étant encastrés)
Typologies constructives	Maçonnerie non renforcée. Le plancher de voûtes en briques creuse placées sur des poutres en acier.	Murs de maçonnerie en pierre non armée. Planchers voûtés de briques
Caractéristiques mécaniques des matériaux	Paramètres de la maçonnerie extrait du code italien NTC08 : E=2400 N/mm ² f _m = 6,00 N/mm ² τ ₀ = 0,09 N/mm ² G=780 N/mm ² W= 22 N/mm ³	Maçonnerie : Densité : d = 2.7 t/m ³ Module d'élasticité : E _m = 2.103 MPa Cisaillement : G = 5.102 MPa Compression : σ _c = 1.5 MPa Contrainte de traction. : σ _t = 0.40 MPa Béton : f _{c28} = 20 MPa ; f _{t28} = 1.8 MPa ; ε _e = 2% ; ε _u = 3.5% Acier: FeE400; ε _e = 2% ; ε _u = 10%
Modèle FEM	Analyse statique non-linéaire « Pushover »	Méthode équivalente statique et analyse dynamique non-linéaire

		
Logiciel	Tremuri/ ANSYS	Robot Autodesk
Données d'analyse	 <p>Spectre de réponse élastique en format Sa-T</p> <p>Les paramètres : $A=0,2$; $R=1$; $\eta= 0,881$; $\xi= 7\%$; $Q= 1,20$; $CT= 0,05$</p>	<p>Catégorie S1 : Site rocheux</p> <p>Accélérogrammes : EL CENTRO N-S 08mai 1940 ; ULCINJ (ALBATROS) N-S 1979 ; CHERCHEL N-S 1989</p>
Résultats et conclusions	<p>Les résultats montrent que les éléments les plus vulnérables, sont ceux contenant des ouvertures en arc, ce qui peut s'expliquer par la flexibilité des piliers conduisant à de grandes déformations. Il est nécessaire de réaliser une réhabilitation spécifique du bâtiment afin d'améliorer sa réponse sismique.</p> <p>Une intervention de raidissement de la toiture pour garantir une meilleure redistribution des forces sismiques entre les macroéléments et pour limiter l'apparition de grands déplacements dans certaines parties du bâtiment.</p>	<p>Le système structurel présente une capacité très faible en termes d'efforts, de déplacements et de ductilité à certains niveaux du bâtiment. La structure manque énormément de performances lors d'un séisme important, du fait qu'elle n'a pas été construite sur la base d'une réglementation adéquate et qu'elle doit donc être renforcée pour augmenter sa résistance et limiter les déplacements absolus sous un séisme majeur.</p>

6. Conclusion

Étant donné que ces méthodes ont déjà fait l'objet de plusieurs études et recherches en Algérie, nous nous intéressons aux méthodes les plus importantes et les plus largement utilisées pour évaluer les structures de maçonnerie.

Ainsi, une revue de certaines des contributions les plus importantes au domaine de l'évaluation de la vulnérabilité au cours des dernières années a été brièvement présentée dans le but de déterminer la méthode numérique optimale ou idéale pour évaluer les grands ensembles de Pouillon.

À travers l'étude du cas, nous constatons que la simulation et l'analyse numérique apportent une valeur ajoutée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique du patrimoine architectural ancien. Une évaluation fiable de la vulnérabilité d'une structure donnée est susceptible de nécessiter l'emploi d'au moins deux approches différentes, qui devraient se compléter et/ou se vérifier mutuellement. Néanmoins, il est important de signaler que l'architecte ou l'ingénieur doit être prudent et en recul pour pouvoir apporter sa propre lecture dans l'interprétation des résultats obtenus de cette simulation à la base de ses prés requis et son expérience.

CHAPITRE 05

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA TOUR TOTEMS DE DIAR ES SAADA

1. Introduction

Afin de vérifier le comportement sismique des immeubles de Pouillon, nous avons pris le bâtiment D de la cité de Diar es Saada comme exemple pour mener les recherches. La nommée "la tour Totems" est considérée comme, un véritable point de repère pour le quartier, et même à l'échelle de la ville, avec ses vingt niveaux (62m de hauteur totale).

Il faut rappeler que l'intérêt de cette analyse est de vérifier le comportement sismique de la structure vis-à-vis de la réglementation parasismique Algérienne RPA99/V2003. En se basant sur les chapitres précédents deux méthodes d'analyse analytique ont été sélectionnées : la méthode d'analyse dynamique linéaire et statique non-linéaire et « Pushover » fortement recommandée pour l'analyse des structures existantes. Ainsi, les déplacements inter-étages sont calculés à l'aide de deux logiciels de calculs SAP2000 version professionnelle et 3Muri.

2. Critères de choix des cas d'étude

La tour Totems est sélectionnée parmi les 19 bâtiments de la cité de Diar es Saada, grâce aux critères suivants :

a) Bâtiment en maçonnerie non chaînée (URM : Unreinforced Masonry). Il s'agit d'un immeuble à la fois traditionnel et Spécial (il ne comporte aucune ossature, seules les blocs de pierre et les briques porteuses le soutiennent). C'est une structure monolithique en maçonnerie avec des percements (Figure 5.1).

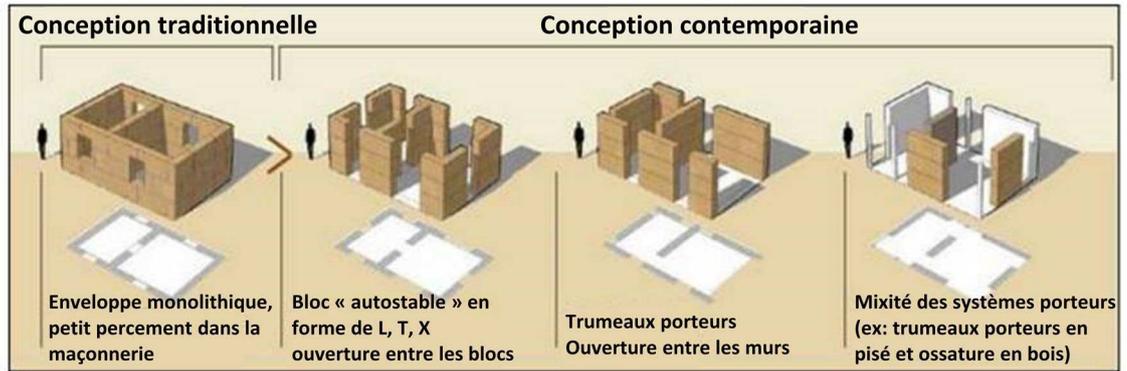


Figure 5. 1. Typologies des maçonneries (monolithique, blocs autostables, à trumeaux, mixte: murs et ossature)[147].

b) La tour est réalisée avant l'apparition et l'application des recommandations parasismique AS55, selon les rapports de chantier « Diar es Saada » 1953-1954.

c) La tour Totems est l'immeuble le plus haut des grands ensembles réalisés par Pouillon, bâtiment R+19 avec une hauteur totale de 62 m.

d) L'utilisation d'un système constructif en maçonnerie très performant, afin de supporter son poids et les efforts horizontaux (Par exemple : vent, séisme, choc, etc.).

e) L'irrégularité en plan et en élévation, marquée par la présence imposante de la sculpture en céramique « Totems » sur 13 niveaux.

f) Un étage supplémentaire a été ajouté in extrémis (au tout dernier moment) lors de la construction de l'immeuble, sans permis de construire donc, comme un challenge proposé par l'entreprise de réalisation.

g) La structure de l'immeuble est semi-enterrée (sous-sol en béton armé encastré dans la pente du terrain; entresol)

h) Selon le règlement parasismique algérien RPA99/2003 (l'article 9.1.3, tableau9.1), les constructions en maçonnerie porteuse non chaînées sont interdites dans les zones sismiques.

3. Méthodologie d'analyse

3.1. Présentation de la méthodologie d'analyse du cas d'étude

Il existe dans la littérature diverses méthodes de modélisation par éléments finis FEM pour évaluer la vulnérabilité sismique du patrimoine architectural[148, 149] et en particulier les anciennes tours en maçonnerie[150, 151]. Néanmoins, dans ce travail, les méthodes d'analyses statiques et dynamiques (linéaires et non linéaires) ont été sélectionnées pour évaluer l'état structurel de la tour Totem dans le domaine sismique, en utilisant des modèles numériques construits dans deux programmes commerciaux : SAP2000[152, 153] et 3Muri/ TreMuri[154]. Les méthodes utilisées sont celles recommandées par le règlement parasismique algérien RPA99/2003.

Comme le montre l'organigramme ci-dessous (Figure 5.2), la première section d'analyse est consacrée à l'étude préliminaire et au diagnostic de l'état de conservation de l'immeuble. Puis, il est important de vérifier si des modifications ont été apportées au plan initial de la tour par les habitants, car un simple changement dans la disposition des murs peut engendrer des dommages irréversibles[155].

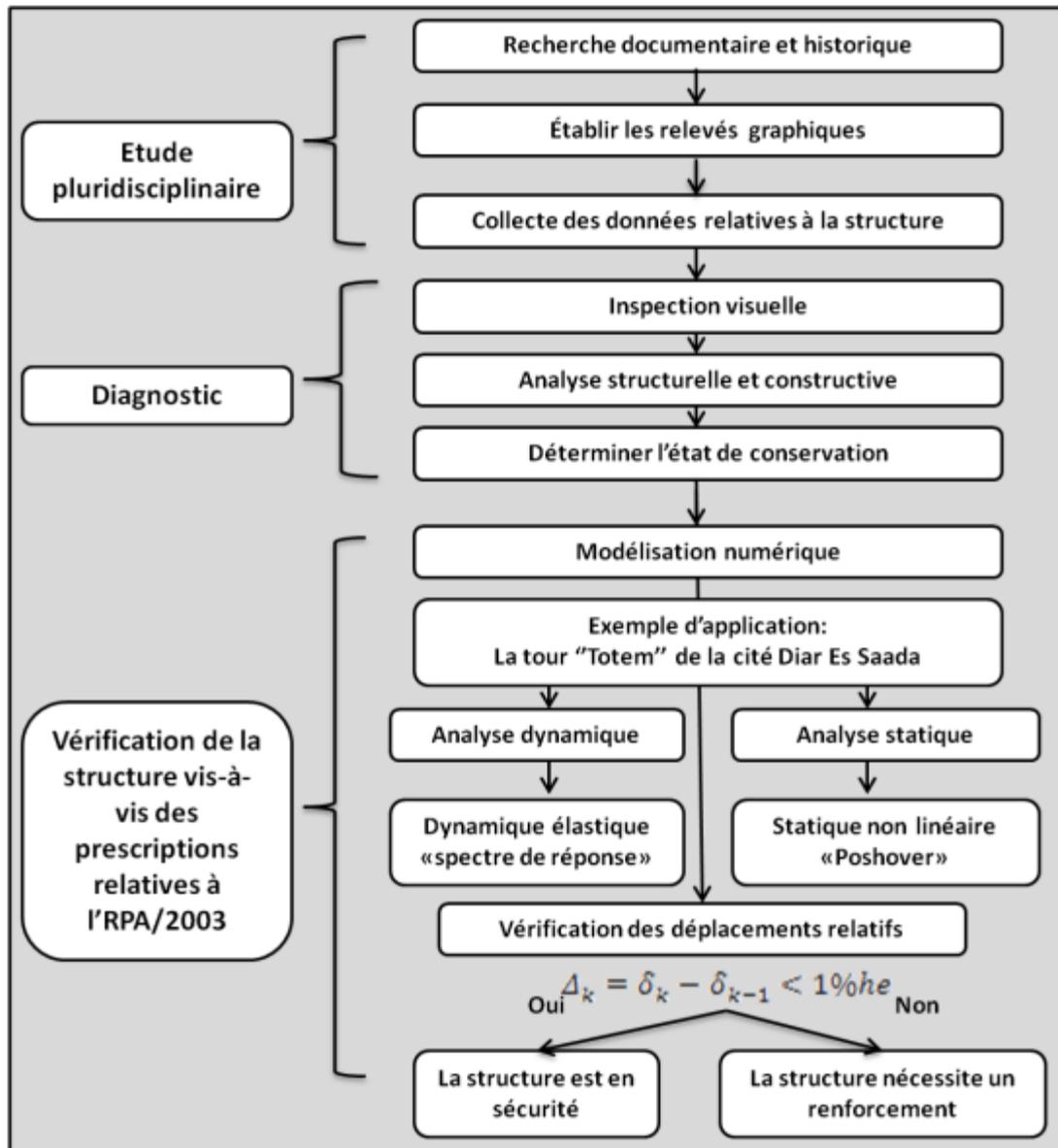


Figure 5. 2: Méthodologie d'évaluation de la performance sismique de la tour Totem.

La deuxième section est destinée pour la modélisation numérique de la tour. En premier lieu, la réponse globale de la tour a été évaluée par la méthode d'analyse dynamique linéaire, en utilisant le spectre de réponse, comme l'exigent les récents codes parasismiques en Algérie[90]. Par cette approche, pour chaque mode de vibration, l'effet maximum de la structure sous l'action de la force sismique est recherché, et la force sismique est caractérisée par le calcul du spectre de réponse. Ces effets sont ensuite combinés pour obtenir une réponse structurelle.

La structure étudiée est caractérisée par une forme légèrement irrégulière. Ainsi, la structure sera représentée par un modèle tridimensionnel, encastré dans la base avec les masses de niveau concentrées en leur centre de gravité avec trois (03) DDL (2 translations horizontales et une rotation à axe vertical)[90]. L'analyse numérique est effectuée en utilisant le logiciel commercial SAP2000[10].

Enfin, pour avoir une évaluation plus précise de la résistance du bâtiment, l'étude a été suivie d'une analyse statique non-linéaire, nommée poshover. La modélisation de la tour a été réalisée à l'aide du logiciel commercial TreMuri (S.T.A. DATA, s.r.l, version 11.4.0.8)[113]. Ce programme a été conçu spécifiquement pour les structures de maçonnerie. Dans cette approche, le comportement non linéaire est considéré de manière plus adéquate.

3.2. Modèles d'analyse numérique

En s'appuyant sur la section précédente, la méthode utilisée dans l'étude sismique de la tour est fortement inspirée des travaux de recherche réalisés dans le cadre du projet italien RiSEM (Seismic Risk in Historic Buildings), et les analyses ont été effectuées en se référant aux lignes directrices pour l'évaluation et la réduction des risques sismiques du patrimoine culturel italien "Guidelines for the Assessment and Mitigation of Seismic Risks of Cultural Heritage". L'étude de cas de la tour médiévale Cugnanesi (Italie) a démontré que plusieurs paramètres affectent fortement le comportement dynamique, et donc la performance sismique des tours en maçonnerie, comme la présence de bâtiments environnants[113]. Ainsi, dans le cas de la tour Totem, le bâtiment est complètement séparé du bâtiment adjacent, néanmoins la présence d'un sous sol encastré peut influencer sur le comportement sismique de la structure.

Par conséquent, ce paramètre est pris en compte en analysant deux modèles distincts, avec des hauteurs différentes, qui se résume comme suit (Figure 5.3) :

- Modèle A (H = 62 m) : la tour est analysée comme une structure isolée en tenant compte de la présence du sous-sol comme raidisseur.
- Modèle B (H = 57 m) : toujours en considérant la tour comme une structure isolée, mais sans tenir compte de la présence du sous-sol.



Figure 5. 3: Représentation des modèles A et B.

4. Présentation du cas d'étude

4.1. Description géométrique et structurelle

La tour Totem occupe une surface au sol de 418.880 m². Les dimensions du bloc sont de 27,60 m de longueur, 17,60 m de largeur pour 62 m de hauteur (Figure 5.4). Le bâtiment présente une forme légèrement irrégulière en plan et en élévation. Un décrochement en élévation sous forme de loggia sur 13 niveaux, maintenu par un encorbellement en bois qui prend naissance à la base du 1er étage et s'élance sur 5 niveaux.

L'immeuble abrite au total 72 logements répartis comme suit : 18 logements de type F4 et 52 logements de type F3. Il s'agit d'un bâtiment d'une forme rectangulaire réalisé seulement en 96 jours. Elle est composée d'un sous-sol, avec des murs périphériques en béton armé, surmonté de 18 niveaux à usage d'habitation et une terrasse accessible. Le sous-sol est composé de locaux à usage commercial et d'un vide-ordures. Hormis le premier niveau, les étages supérieurs sont composés de murs porteurs périphériques en maçonnerie, avec une épaisseur de 40 et 80 cm pour les murs en pierre de Fontvieille, et de 15 cm pour des murs porteurs intérieurs en brique.

Les hauteurs des niveaux sont différentes entre le sous-sol et les étages courant, qui se résument comme suit :

- Premier niveau : $h = 5.00$ m
- Autres niveaux : $h = 3.00$ m

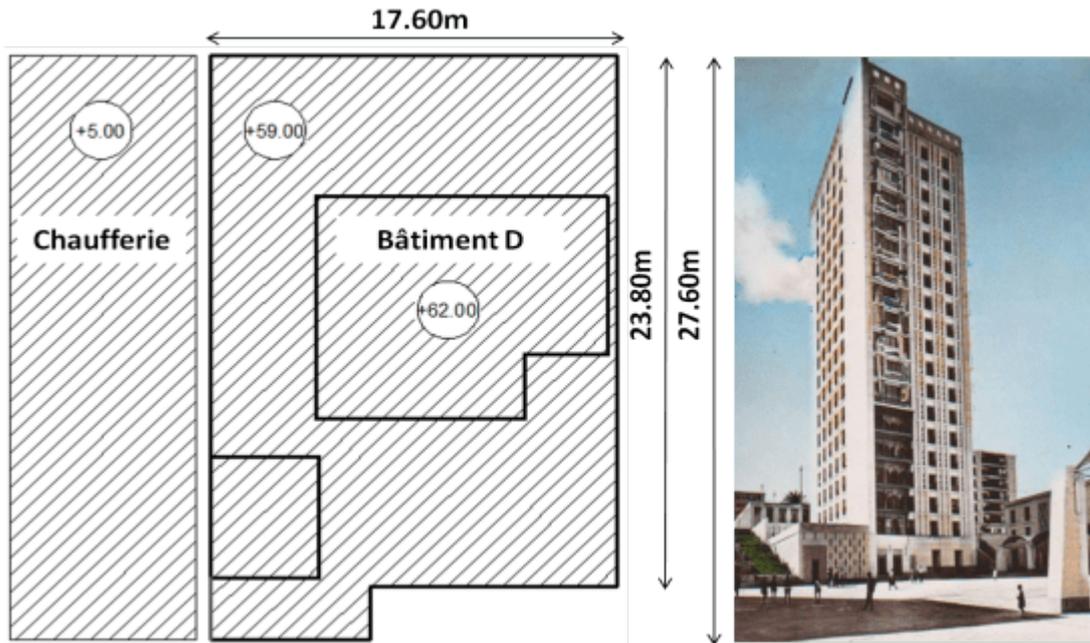


Figure 5. 4: Configuration en plan et vue d'ensemble de la tour Totem

4.2. Nature du sol d'implantation

Le bâtiment a été construit sur un sol meuble, avec une contrainte admissible " σ sol" qui varie de 1,5 à 2 bar. Le site est actuellement classé en zone sismique III : haute sismicité (El-Madania). Cependant, pour donner une plage de sécurité suffisante, nous avons pris dans les calculs la portance de 1,5 bar.

4.3. Caractéristiques des murs de soutènement en béton armé au sous-sol

La hauteur du sous-sol de la tour Totem est de 5,00 m, essentiellement composée de murs porteurs périphériques en béton armé comme mur de soutènement dans les deux directions X et Y (Figure 5.5). Dans la direction X, l'épaisseur de la base du mur X est de 60 cm, dans la direction Y deux murs sont de 50 cm. Les murs porteurs intérieurs sont tous en briques spéciales Pouillon, ayant une épaisseur de 15 et 10 cm.

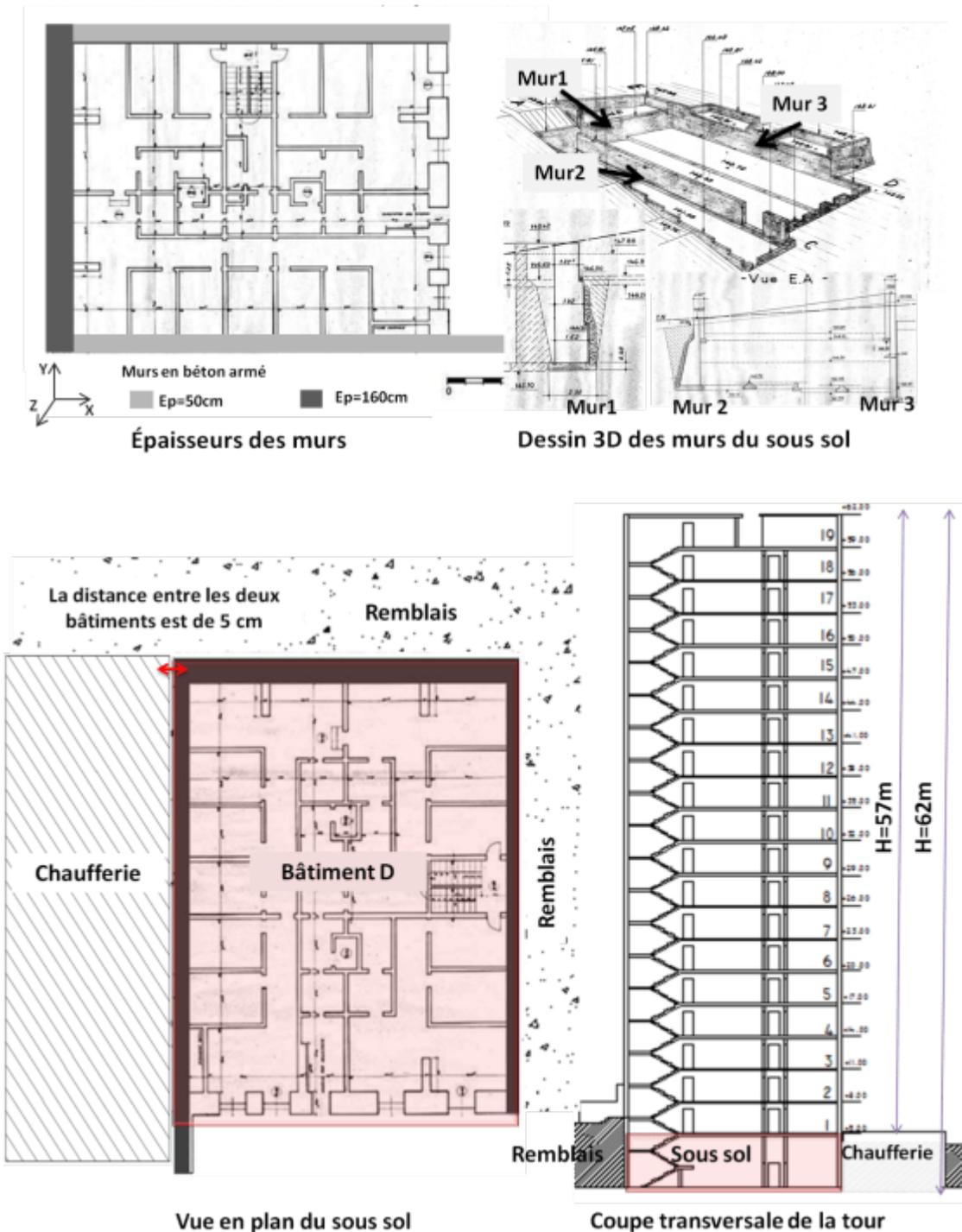


Figure 5. 5: Représentation du sous-sol en plan et en élévation.

4.4. Caractéristiques des niveaux supérieurs et de la loggia

Hormis le sous-sol, tous les niveaux supérieurs de la tour sont composés de murs porteurs extérieurs entièrement en maçonnerie de pierre, d'une épaisseur de 40 et 80 cm, et de murs porteurs intérieurs en maçonnerie de briques d'une épaisseur de 15 cm (Figure 5.6).

Le nombre d'étages a été modifié pendant la construction du bâtiment et un niveau a été ajouté. La façade frontale de la tour supporte une loggia de treize étages qui commence au septième étage. Les planchers reposent contre le mur de la façade latérale. La loggia est de forme rectangulaire avec une largeur de 7,00 m et une profondeur qui augmente d'un niveau à l'autre pour atteindre 3,00 m. Les dimensions des profondeurs de la loggia sont les suivantes : troisième niveau : 0,95 m, quatrième niveau : 1,50 m ; cinquième niveau : 2,05 m ; sixième niveau : 2,60 m ; septième niveau et plus : 3,00 m.

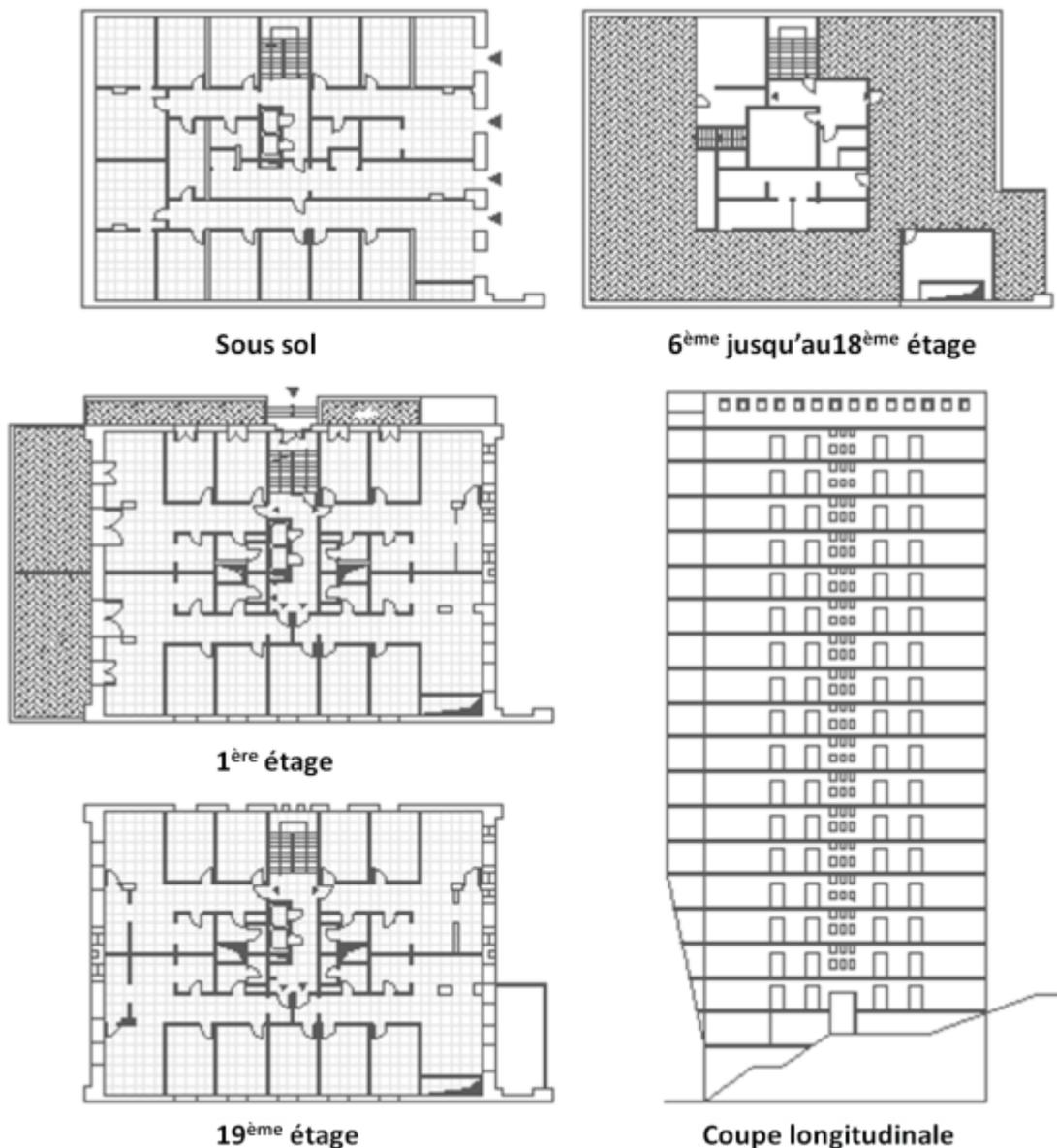


Figure 5. 6: Vues en plan et coupe verticale de la tour.

4.5. Systèmes structurels de la tour

4.5.1. Caractéristique des fondations de la structure

Les fondations de la tour Totem sont des semelles filantes en béton armé, conçus en tenant compte uniquement des actions statiques, et ses éléments sont le prolongement des murs en maçonnerie avec un évasement à la base. Chaque mur représente une forme et une dimension particulière. Au total, les fondations sont de six types (Figure 5.7) : type I, II, III, IV sous les murs en briques de maçonnerie non renforcée "URM" et type V, VI sous les murs en pierre URM. Le sol est défini comme un sol meuble (catégorie S3) selon le code RPA.

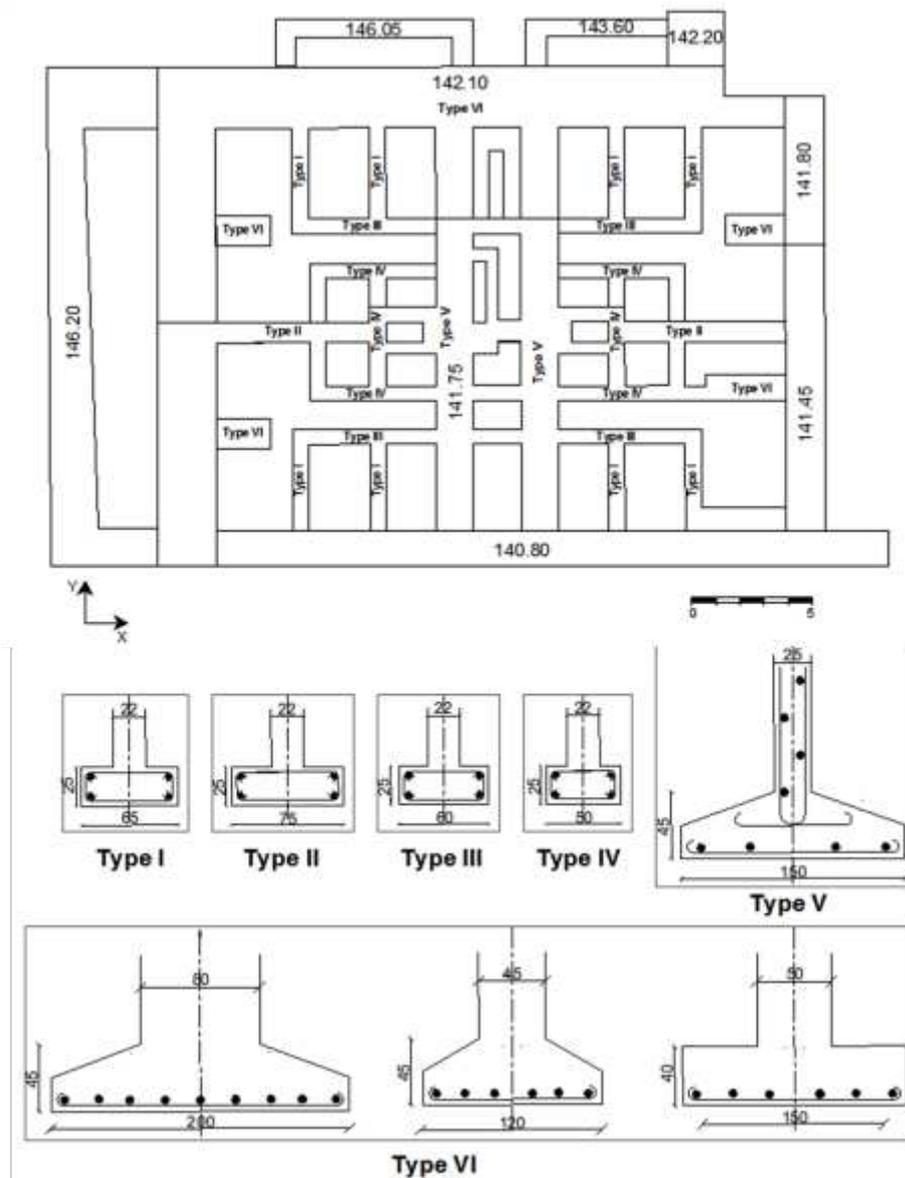
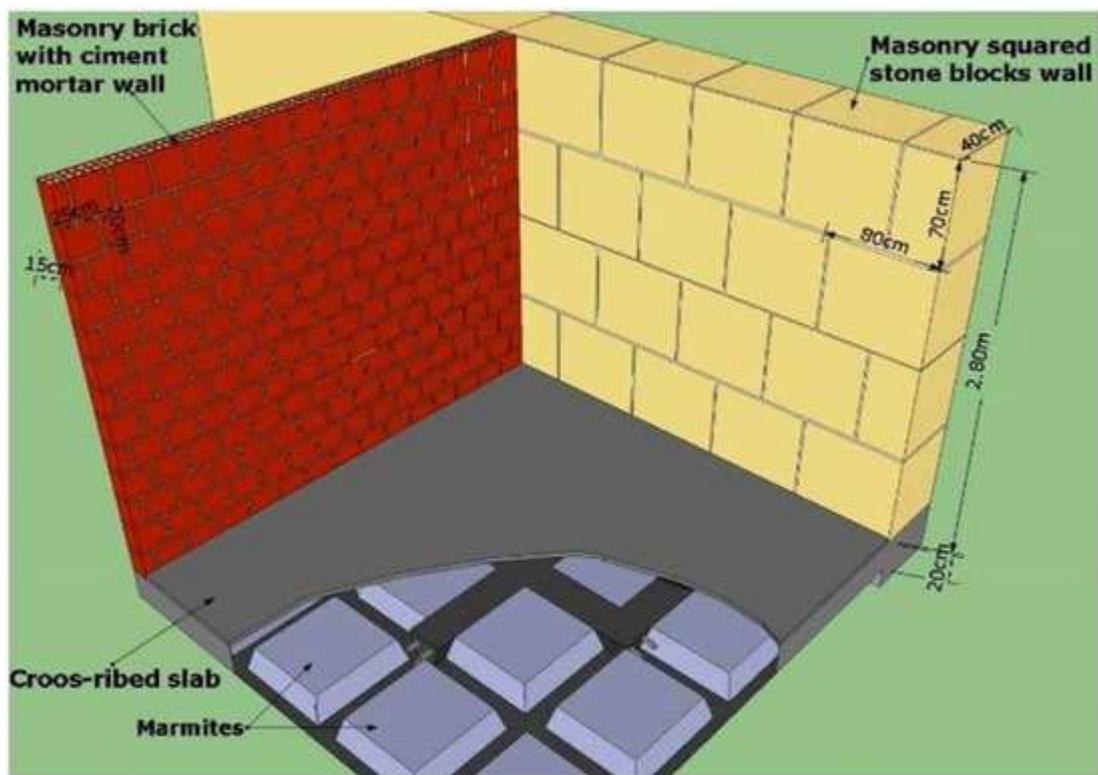


Figure 5. 7: Vue en plan et détail des fondations.

4.5.2. Murs porteurs en pierre pré taillée

Les murs porteurs périphériques (extérieurs) de la tour Totem sont constitués de blocs de maçonnerie en pierre reliés par un mortier de chaux. Ce matériau est importé des carrières de Paul Marcerou à Marseille (France) vers le port d'Alger par bateau. Les pierres importées spécialement pour la construction des grands ensembles de Diar es Saada. En effet, les dimensions de chaque bloc sont déterminées avec précision en fonction de la hauteur du mur, afin de réduire le temps nécessaire à la réalisation et de faciliter le travail des ouvriers de la construction non qualifiés dans ce domaine.

Comme le montre la figure 5.8, la hauteur de chaque pierre atteint 70 cm, et l'épaisseur varie de 40 à 80 cm et la largeur peut atteindre 2 m pour les pièces horizontales au-dessus des fenêtres. En effet, chaque niveau possède quatre rangées de blocs de pierre reliés par du mortier de chaux.



Modèle 3D

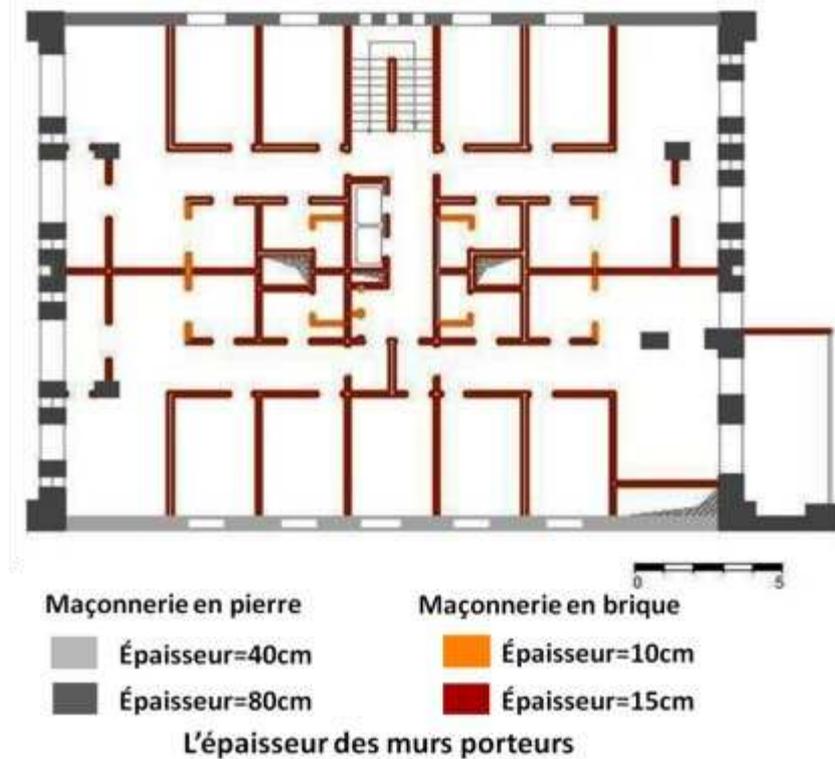


Figure 5. 8: Les systèmes constructifs de la tour.

Deux types de pierre des carrières de Provence sont employés dans la réalisation de la tour : la pierre de Fontvieille pour les murs porteurs et la pierre d'Estailade pour recouvrir la partie apparente du plancher, les revêtements de murs et piliers en béton armé et l'encadrement de portes et fenêtres. Comme le montre le tableau 5.1, le taux de porosité de la pierre d'Estailade est supérieur à celle de Fontvieille, ce qui justifiait le recours à ce type dans les revêtements des surfaces bétonnées.

Tableau 5. 1: Performances mécaniques de la pierre de Fontvieille et d'Estailade.

Type	Pierre de Fontvieille	Pierre d'Estailade
Caractéristique		
Type de Roche	Calcaire	Calcaire
Couleur dominante	Blanc à reflets blonds	Blanc
Aspect dominant	Compact à grains fins	Compact à grains fins
Masse Volumique	1890 kg/m ³	2010 kg/m ³
Porosité	30 %	25,5 %
Résistance à la flexion	2 MPa	3,3 MPa
Résistance à la compression	10 MPa	15,4 MPa

4.5.3. Cloisons porteuses en briques de terre cuite

Les murs porteurs intérieurs de la tour sont entièrement en maçonnerie de briques. "Murette porteuse" est le nom attribué à ces cloisons dans les rapports de chantier. Comme le montre la figure 5.9, ces murs de briques sont placés à la jonction des deux "Marmites" et non sous le creux. La particularité de ces briques réside dans leur mise en œuvre. Les briques sont travaillées verticalement (debout) afin d'obtenir les meilleures performances. Les trous de la brique sont posés verticalement, ce qui nécessite un peu plus de ciment, ainsi, augmente la sécurité de la résistance à l'écrasement et à la déformation sous pression.

Pouillon a suivi le même concept de disposition de la pierre avec les murs intérieurs en briques. En effet, chaque niveau est constitué de treize rangées de briques. De ce fait, les ouvriers ne sont pas obligés de couper la brique avec un marteau. Cette méthode permet d'économiser beaucoup de temps et d'argent et d'augmenter la résistance du mur. Les dimensions de la brique utilisée dans la construction de la tour : (25x20x15) et (25x20x10), reliée avec un mortier de ciment.

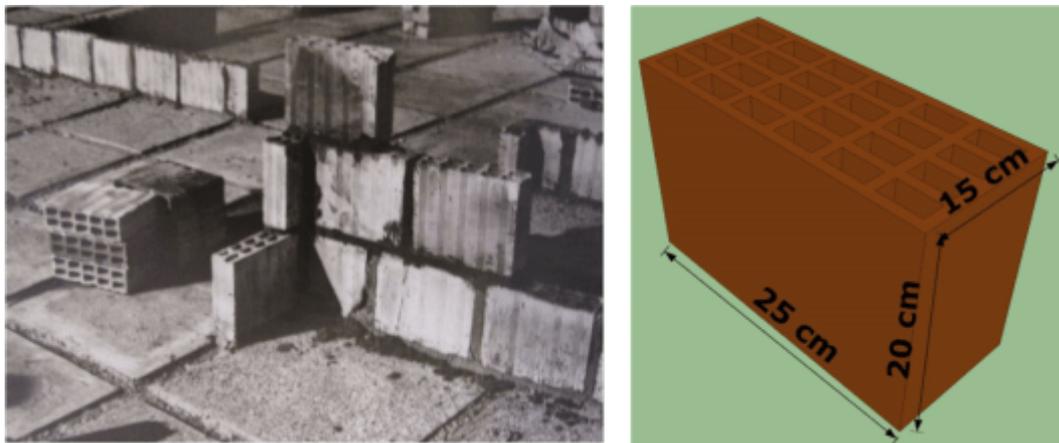


Figure 5. 9: La disposition et les dimensions de la brique spéciale Pouillon.

4.5.4. Plancher à caisson en béton armé (plancher spécial Pouillon)

Le plancher à caisson ou à nervures croisées est la plus adaptée à ce type de structure. Il se compose d'un réseau de nervures transversales et de caissons (Figure 5.10). "Marmites" sont le nom donné par Pouillon pour désigner les caissons de forme carrée, qui sert de coffrage perdu. Dans les grands ensembles

de Marseille, ces marmites sont réalisées en matériau composite de plâtre et de fibres végétales ou en terre cuite (200 logements d'Aix en Provence), mais pour la tour Totems, les planchers sont en béton armé.

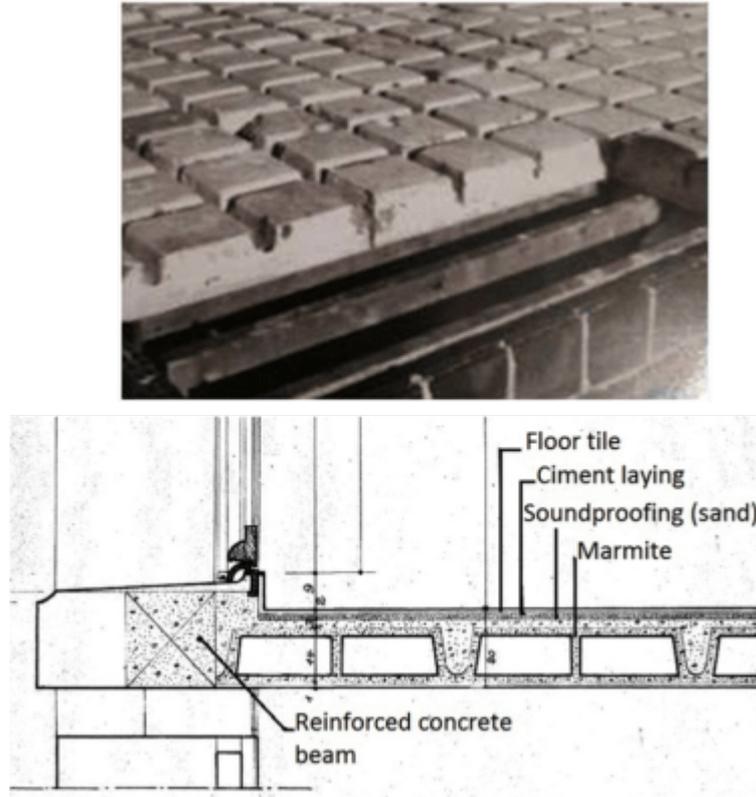
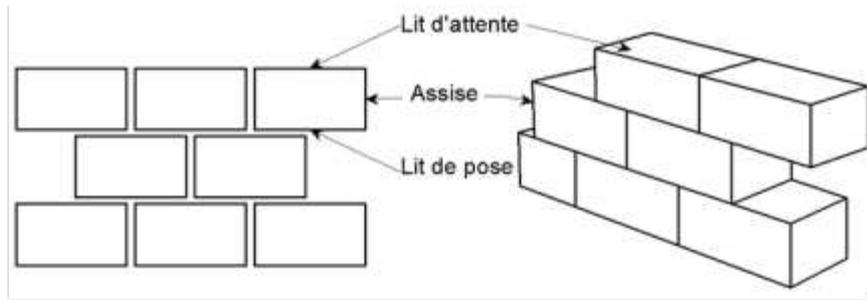


Figure 5. 10: Détails du plancher spéciale Pouillon.

4.5.5. Conception des murs de façade et appareillage de la pierre pré taillée

Pouillon s'est inspiré dans ses œuvres de plusieurs civilisations, de la rigueur de l'architecture romane, de l'audace des structures gothiques et de la pureté de l'art grec. De plus, ses influences remontent à la civilisation inca et l'architecture du Machu Picchu au Pérou, région où les séismes sont extrêmement fréquents : grandes pierres de taille, blocs monolithiques de plusieurs dizaines de tonnes et piliers spectaculaires. Pouillon a employé la conception des façades un appareillage régulier en pierre pré taillée (opus quadratum : une technique ancestrale de construction romaine) (Figure 5.11).



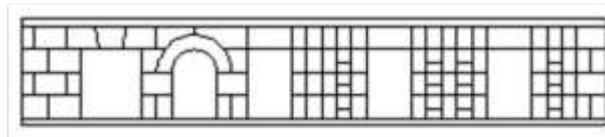
Appareillage régulier en pierre



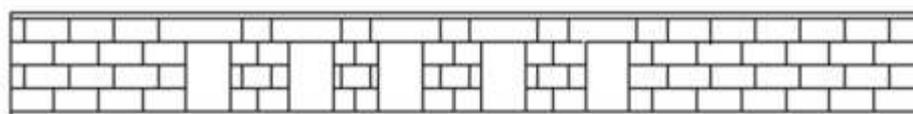
Façade sud-est



Façade sud-ouest



Façade sud-est



Façade sud-ouest

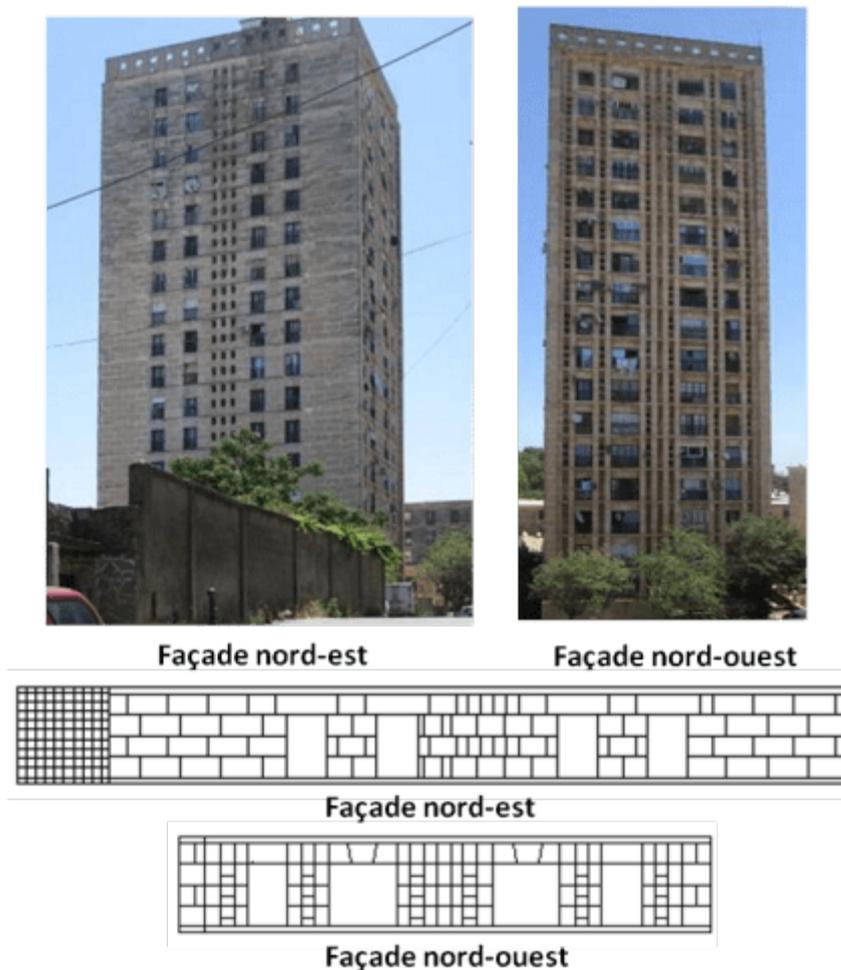


Figure 5. 11: Les façades de la tour et l'appareillage de pierre pour un niveau.

4.5.6. Propriétés mécaniques de la maçonnerie

Les caractéristiques utilisées pour la modélisation numérique par les deux programmes de modélisation numérique sont extraites du code parasismique italien[12], car il n'y a pas de section dédiée aux caractéristiques de la maçonnerie dans le code algérien. Le programme TreMuri comprend une bibliothèque riche et varie de la maçonnerie en brique et en pierre. À partir de cette base de données, nous avons sélectionné les valeurs les plus proches de notre étude de cas.

S'y ajoutent les documents d'archives non publiés de la période coloniale que nous avons consultés. Les rapports de chantier montrent que la construction et la mise en œuvre sur le chantier de l'immeuble est suivi par le bureau de SECURITAS (Société de contrôle technique et d'expertise en construction). Des essais au laboratoire du bâtiment et des travaux publics ont été menées pour

s'assurer de la qualité des matériaux et par la suite la qualité de l'exécution sur chantier. Par exemple, suite à des essais sur la brique spéciale Pouillon, un avis favorable a été donné par le bureau de contrôle SECURITAS pour la fabrication industrielle et l'utilisation de cette brique dans la construction de la tour.

Le tableau 5.2, résume les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux de construction de la tour Totem. Les valeurs indiquées dans le tableau sont tirées du code italien pour le calcul des structures.

Tableau 5. 2: Propriétés mécaniques des matériaux de construction.

Matériaux de construction	Module de young E [N/cm ²]	Module de cisaillement G [N/cm ²]	Poids volumique W [N/cm ³]	Résistance à la compression fk [N/cm ²]	Résistance à la traction T _r [N/cm ²]
Maçonnerie en blocs de pierre	280000	86000	0.022	311,11	9
Maçonnerie en brique avec mortier de ciment	455000	113750	0.015	259,26	24
Béton armé	Classe Béton: C25/30 Classe d'acier: B450 (fyk=45000 N/cm ²)				

5. Synthèse du diagnostic de l'état de conservation de la tour Totem

5.1. Désordres constatés

Lors de la visite sur terrain, les dégradations visuelles relevées concernent principalement l'enveloppe du bâtiment (Figure 5.12). Les causes principales de ces dégradations sont l'agressivité du milieu environnant (proche de la mer), mauvaise mise en œuvre, défauts de conception (épaisseur d'enrobage insuffisante), la mauvaise qualité du béton[156].

L'examen des parties visibles et accessibles de la tour a révélé les désordres suivants :

- Effondrement du béton d'enrobage avec l'apparition de l'acier d'armatures du plancher en béton armé et les taches de rouille au niveau de la loggia.

- Détachement de la céramique du Totem à un certain endroit de la sculpture.
- Détérioration du claustra en béton au niveau de la terrasse accessible.
- Détérioration du claustra de terre cuite au niveau de la terrasse la loggia.

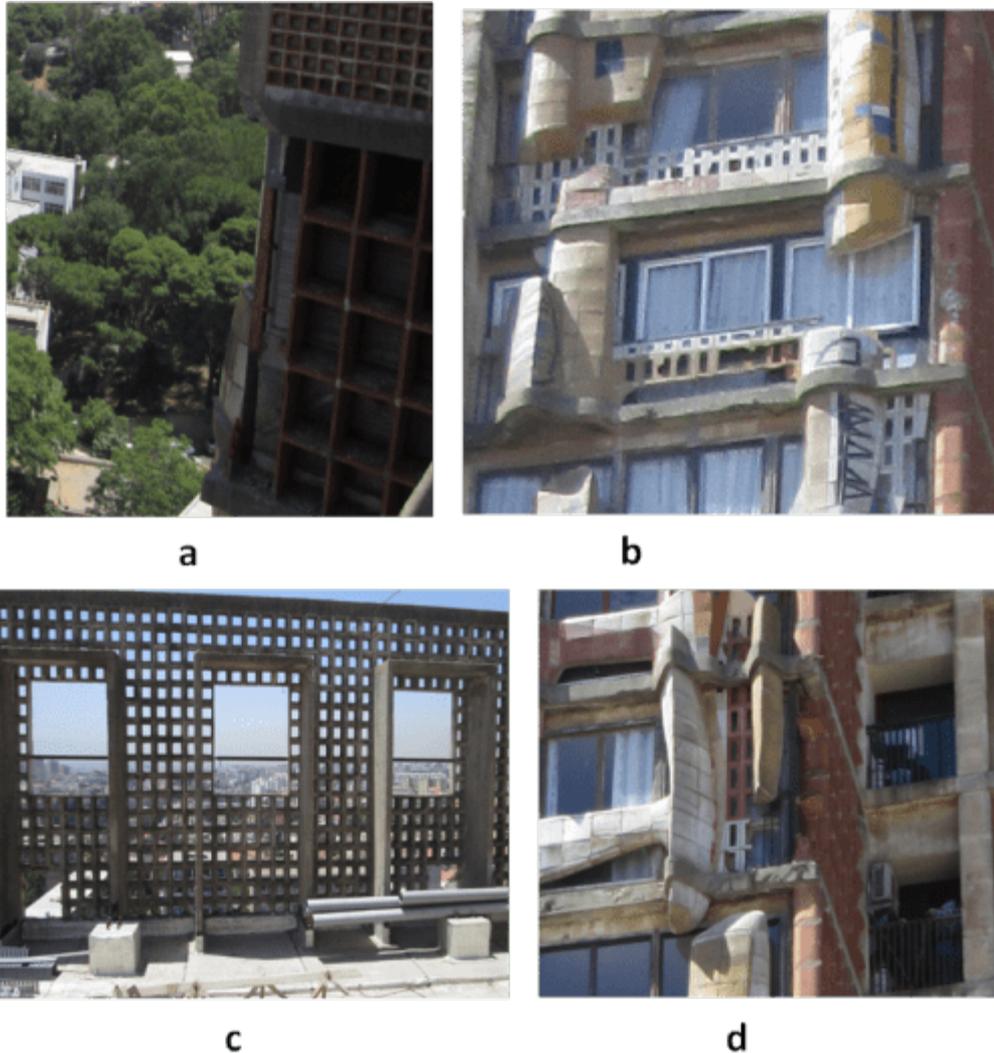


Figure 5. 12: Désordres constatés sur l'enveloppe de la tour.

5.2. Les modifications apportées au plan initial de la tour

5.2.1. Perforation des façades en pierre

Lors de la conception de la tour un vide sanitaire a été aménagé pour assurer le passage des différentes canalisations et branchements et canalisations (eau pluviale, eau potable et eaux usées). Malheureusement, les blocs de pierre ont été perforés par les habitants et les conduites de canalisation sont visibles sur

la façade (Figure 5.13). Ajoutant à cela, les percements des conduites de la climatisation et aussi de dépôt des paraboles. Cela peut sembler anodin, mais si ces perforations ne sont pas effectuées correctement, toute manipulation du matériau est susceptible d'engendrer des dégâts irréversibles.



Figure 5. 13: Les modifications apportées à la façade de la tour.

5.2.2. Modification apportée à la terrasse

On a constaté des modifications effectuées sur le plan de la terrasse accessible. En effet, une pièce a été ajoutée et une antenne parabolique haute performance est installée sur cette terrasse (Figure 5.14). À l'exception de la terrasse, aucune modification n'a été apportée aux autres étages.



Figure 5. 14: Les modifications apportées à la terrasse de la tour.

5.3. Les modes de détérioration des pierres de façade

D'après le diagnostic visuel établi sur les murs de pierre et en se basant sur la campagne d'investigation menée sur les morphologies d'altérations de la pierre de Diar el Mahçoul par N. Touloum, les façades de la tour Totem présentent quelque pathologie et détérioration.

Ainsi, les différentes formes d'altération de la pierre sont résumées dans la figure 5.13, à savoir les pertes de matière au niveau de la pierre, altération chromatique, assombrissement dû à l'humidité, piqûres, colonisations biologiques, décolorations et dépôts. Les images de la figure 5.15 ont été prises en 2017.

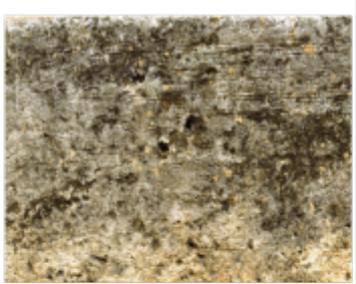
		
Figures induites par une perte de matière	Altération chromatique et dépôt	Colonisation biologique
Erosion Perte de constituants Pitting Perforation	Croûte noire Dépôts Altération chromatique Assombrissement dû à l'humidité Subflorescence	Lichen Mousse Moisissure Plante

Figure 5. 15: Formes d'altération observées sur la pierre.

6. Modélisation numérique de la tour

Les documents techniques utilisés pour les équations d'analyse sismique de la tour sont ceux actuellement en vigueur en Algérie, notamment :

- D.T.R.R.B.C.2.2 : charges permanentes et surcharges de fonctionnement.
- D.T.R.B.B.C.2.45 : règles de conception et de calcul de la maçonnerie.
- D.T.R.B.B.C.2.48 : réglementation sismique algérienne (RPA99 / VERSION 2003).

– DTR-B.C.-2.41 "CBA 93" : code algérien du béton armé.

6.1. Analyse dynamique linéaire

6.1.1. Détermination de l'action sismique selon le code RPA99/2003

L'action sismique est représentée par le spectre de réponse défini dans le règlement parasismique Algérien « RPA99/version 2003 », qui est une courbe de réponse maximale d'accélération (Sa/g) d'un système à un seul degré de liberté soumis à une excitation donnée pour des valeurs successives de périodes propres T .

$$Sa/g \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right)^{2/3} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3,0s \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) & T \geq 3,0s \end{cases} \quad (5.1)$$

Avec:

Sa : accélération spectrale

g : Accélération de la pesanteur

A : Coefficient d'accélération de zone, donné par le tableau 4.1 (RPA99/2003)

η : Coefficient de correction d'amortissement

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7 \quad (5.2)$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique donné par le tableau 4.2 (RPA99/2003)

Q : Facteur de qualité

T_1, T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site, données par le tableau 4.7 (RPA99/2003)

R : Coefficient de comportement de la structure, donné par le tableau 5.3 (RPA99/2003).

Pour notre cas d'étude, les valeurs caractérisant le spectre de réponse sont déterminées par les paramètres suivants :

Zone d'étude : zone III (sismicité élevée)

Site S3 : un site meuble.

Groupe d'usage : 1B ; ouvrages de grande importance

Matériaux constitutifs : voiles ou murs ; béton armé/maçonnerie

Système de contreventement : murs porteurs

Tableau 5. 3: Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique

A	Q	R	η	ξ	T1	T2
0,3	1,15	3,5	0,7	10	0,15	0,5

Le tracé du spectre de réponse élastique est représenté dans la figure suivante :

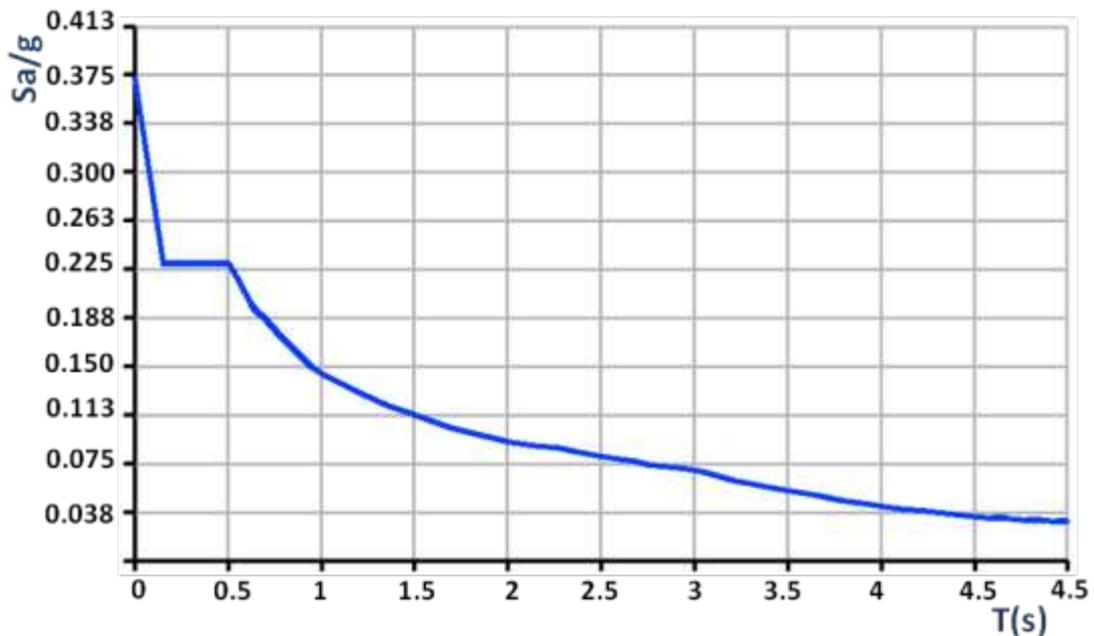


Figure 5. 16 : Représentation du spectre de réponse élastique Sa/g.

6.1.2. Détermination de la force sismique "V"

$$V_X = \frac{A Q D_X}{R} W \quad (5.3)$$

Calcul de la force sismique F_j à chaque niveau du bâtiment :

$$F_j = \frac{(V-F_t)}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} W_j h_j \quad (5.4)$$

Forces de cisaillement " T_{Xi} " :

$$T_{Xi} = F_{Xi} + \sum_{i+1}^n F_{Xj} \quad (5.5)$$

Calcul des moments " M_{Xi} " :

$$M_{Xi} = F_{tx}(H - h_i) + \sum_i^n (F_{Xi}(h_j + h_i)) \quad (5.6)$$

Avec :

V : la force globale à la base

A : coefficient d'accélération de la zone

W : poids total du bâtiment

Q : facteur de qualité

R : coefficient de comportement global de la structure

W_j : poids du niveau j

h_j : hauteur du niveau j par rapport à la base

D : facteur d'amplification dynamique moyen en fonction de la catégorie de site, du facteur de correction de l'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

$$D = 2.5\eta(T_2/T)^{2/3} \quad (5.7)$$

F_t : la force supplémentaire appliquée au sommet du bâtiment qui prend en compte les autres modes propres. La force concentrée F_t au sommet de la structure permet de prendre en compte l'influence des modes de vibration supérieurs. Elle est déterminée par la formule $F_t = 0,07 TV$ (T est la période fondamentale de la structure et V est la résultante des forces sismiques à la

base). La valeur de F_t ne dépassera en aucun cas 0,25 V et sera prise égale à 0 lorsque T est inférieur ou égal à 0,7 secondes.

6.1.2. Résultante de la période fondamentale de la structure

La tour a été modélisée en tant que structure monolithique qui correspond aux modèles éléments finis de type coque et cadre (shell and frame finite elements)[157]. Les modes de vibration et les valeurs de la participation des réponses modales sont déterminés par une discrétisation en éléments finis à l'aide du logiciel de calcul SAP 2000.

Pour la modélisation de la structure par éléments barres, nous avons adopté deux hypothèses fondamentales :

- La structure est parfaitement encastree à sa base.
- Les planchers sont infiniment rigides (les déplacements selon les axes X et Y et la rotation autour des axes Z sont les seuls degrés de liberté pour chaque niveau).

Selon le code sismique algérien, la période fondamentale T peut être calculée sur la base de la formule empirique simplifiée comme suit, dans l'Equation 5.8:

$$T_{RPA} = C_T h_N^{3/4} \quad (5.8)$$

Avec : h_N est la hauteur mesurée en mètres de la base au dernier niveau N et C_T est un coefficient dépendant du système de contreventement et du type de remplissage ($C_T = 0,05$ pour le cas des murs porteurs en maçonnerie).

Modèle A :

$$T_{RPA} = 0,05 \times 62^{3/4} = 1,1047s \text{ (code RPA)}$$

Modèle B :

$$T_{RPA} = 0,05 \times 57^{3/4} = 1,037s \text{ (code RPA)}$$

Pour les trois directions principales de la structure, les valeurs des périodes fondamentales calculées par le logiciel SAP 2000 sont :

Modèle A :

$T_1 = 1.25\text{s}$; $F = 0.79\text{Hz}$ pour la 1ère période

$T_2 = 1.10\text{s}$; $F = 0.90\text{Hz}$ pour la 2ème période

$T_3 = 0.86\text{s}$; $F = 1.16\text{Hz}$ pour la 3ème période.

Modèle B :

$T_1 = 1.213\text{s}$; $F = 0.824\text{Hz}$ pour la 1ère période

$T_2 = 1.044\text{s}$; $F = 0.957\text{Hz}$ pour la 2ème période

$T_3 = 0.85\text{s}$; $F = 1.175\text{Hz}$ pour la 3ème période.

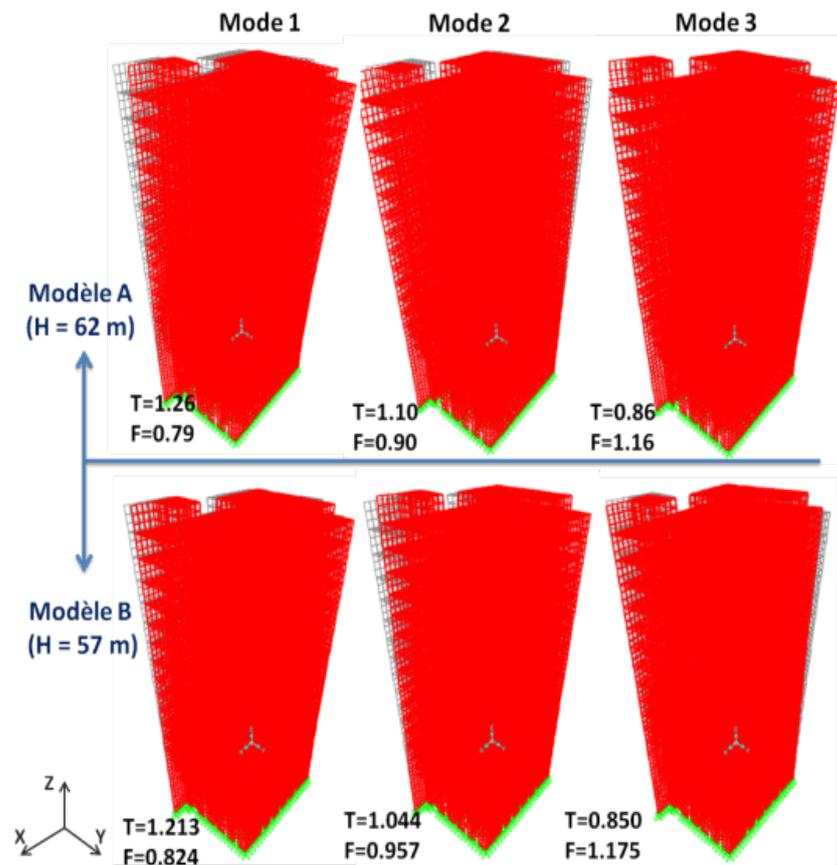


Figure 5. 17: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de chaque modèle A et B.

Les deux premiers modes sont des modes de translation, et le troisième mode est un mode de torsion (Figure 5.17). Selon la formule empirique du code algérien, ces périodes ne doivent pas dépasser la période fondamentale de la structure T_{RPA} augmentée de 30 %. Les résultats obtenus par le logiciel et la formule empirique pour les deux cas montrent que les périodes réelles dans les deux modèles sont inférieures à $1.3T_{RPA}$, et cette condition imposée par le code algérien est satisfaite pour les deux modèles A et B. Les détails de la vérification des valeurs de la période fondamentale sont présentés ci-dessous :

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (1.104) = 1.435 > T_{sap} = 1.26 \text{ (Modèle A)}$$

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (1.037) = 1.348 > T_{sap} = 1.21 \text{ (Modèle B)}$$

6.1.3. Vérification des déplacements de la structure

A chaque niveau de la structure "k", le déplacement horizontal Δ_k est déterminé à l'aide de l'équation 5.9.

$$\delta_k = R\delta_{ek} \quad (5.9)$$

Avec : δ_{ek} : représente le déplacement produit par les forces sismiques, et R indique le facteur de comportement.

En ce qui concerne le déplacement relatif entre les niveaux successifs (k et k-1), il est simplement calculé en utilisant l'équation 5.10.

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad (5.10)$$

Selon le code RPA, la valeur Δ_k ne doit pas dépasser 1% de la hauteur du plancher. Dans le cas présent, cette condition est vérifiée pour tous les niveaux et pour les deux modèles A et B (tableau 5.4).

Comme le montre le tableau 5.4, en comparant la différence de déplacement au sol des deux modèles A et B dans les directions longitudinale et transversale, on constate une augmentation des déplacements de la base de la tour au cinquième niveau selon l'axe X-X et au sixième niveau selon l'axe Y-Y pour les deux modèles, et une réduction des déplacements du septième niveau au sommet de la tour. Il convient de rappeler qu'à partir du cinquième niveau, les dimensions

de la loggia augmentent jusqu'à 3,00 m, de sorte que la variation des valeurs peut être liée à ce paramètre.

Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 5. 4: Les résultats des déplacements structurels pour le modèle A et B.

Niveau	Hauteur (m)	Modèle A		Hauteur (m)	Modèle B		Observation
		Δx (cm)	Δy (cm)		Δx (cm)	Δy (cm)	
20	62	1.470	2.100		/		Vérifiée
19	59	1.610	2.135	57	1.372	1.963	Vérifiée
18	56	1.715	2.275	54	1.526	2.093	Vérifiée
17	53	1.785	2.310	51	1.606	2.163	Vérifiée
16	50	1.820	2.380	48	1.676	2.229	Vérifiée
15	47	1.890	2.415	45	1.736	2.282	Vérifiée
14	44	1.890	2.415	42	1.788	2.317	Vérifiée
13	41	1.960	2.415	39	1.823	2.338	Vérifiée
12	38	1.925	2.415	36	1.844	2.341	Vérifiée
11	35	1.925	2.380	33	1.855	2.327	Vérifiée
10	32	1.925	2.310	30	1.848	2.292	Vérifiée
9	29	1.855	2.240	27	1.823	2.243	Vérifiée
8	26	1.820	2.170	24	1.788	2.170	Vérifiée
7	23	1.750	2.100	21	1.729	2.079	Vérifiée
6	20	1.645	1.855	18	1.634	1.963	Vérifiée
5	17	1.540	1.715	15	1.561	1.813	Vérifiée
4	14	1.400	1.505	12	1.414	1.638	Vérifiée
3	11	1.225	1,225	9	1.288	1.407	Vérifiée
2	8	0.525	0.805	6	1.088	1.113	Vérifiée
1	5	0.595	0.385	3	0.749	0.675	Vérifiée

6.1.4. Analyse des contraintes et des forces internes

Les résultats de l'analyse des forces internes et des contraintes de cisaillement (Figure 5.18) montrent la différence entre les résultats obtenus par les deux modèles. La valeur des contraintes de cisaillement minimales dans le modèle A est égale à zéro tandis que pour le modèle B elle est égale à 0,529, et la valeur maximale est environ 95 % supérieure à celle du modèle A. Les valeurs des forces internes minimales sont nulles pour les deux modèles A et B, et la valeur maximale est environ 95 % inférieure à celle du modèle B.

Les résultats analytiques sont résumés comme suit :

– Modèle A :

Les résultats de l'analyse (Figure 5.18) montrent que, à l'exception de la façade principale de la tour, aucun dommage visible n'a été constaté sur les autres façades. En effet, la façade Sud-Est présente quelques contraintes et des forces internes élevées par rapport aux autres façades. Cela peut être dû à la présence de la loggia dans ce mur ainsi qu'à la largeur de l'ouverture qui est de 1,80 m.

– Modèle B :

Les résultats de l'analyse montrent que les niveaux supérieurs de la tour sont soumis à des forces internes, notamment au niveau des ouvertures. Les quatre façades présentent plusieurs dommages, en particulier les éléments structuraux entourant les ouvertures et les pignons.

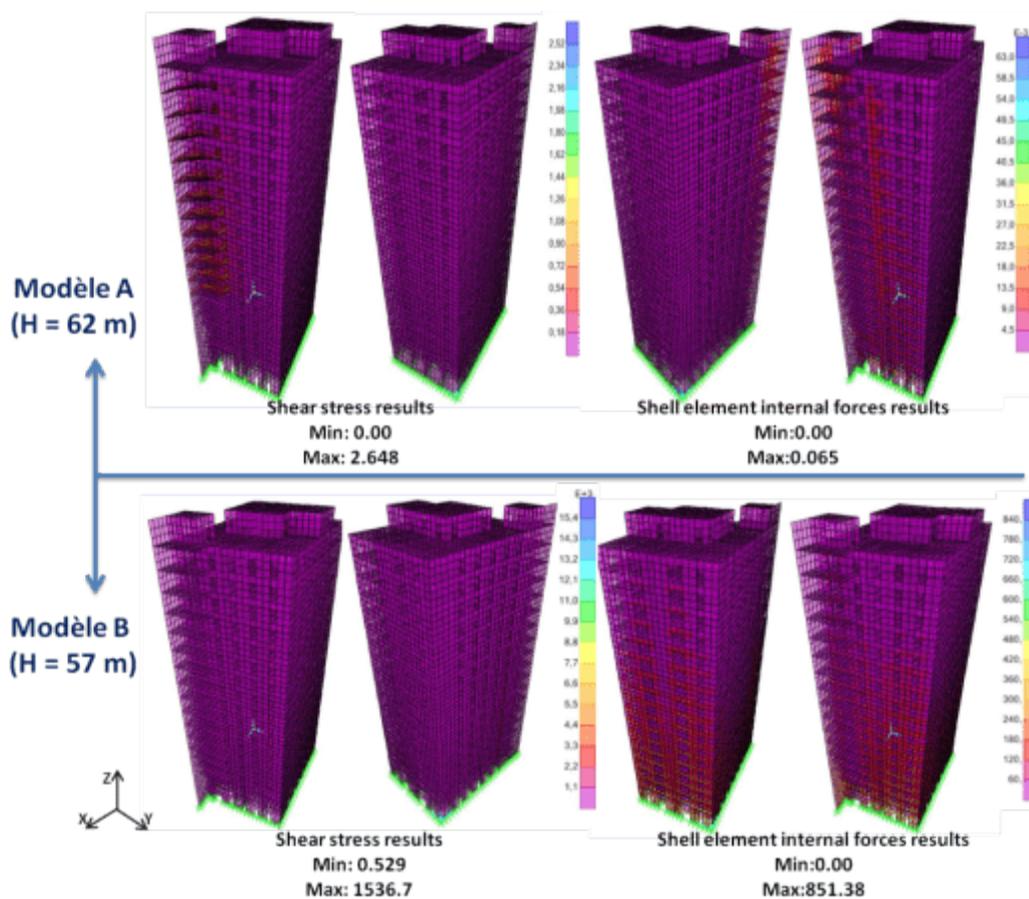


Figure 5. 18: Les résultats de l'analyse des contraintes et des forces internes, comparant l'influence du sous-sol dans les modèles A et B.

6.1.5. Résultats et discussion

L'analyse du spectre de réponse dynamique linéaire a permis d'avoir une vision globale du comportement de la structure et d'évaluer les éléments les plus sensibles de la structure. Après avoir évalué les différences de déplacement entre les différents niveaux, selon le code algérien, il a été conclu que la tour est bien conçue pour résister à l'action sismique malgré son gabarit.

6.2. Analyse statique non-linéaire

6.2.1. Modélisation numérique de la tour

De nombreuses méthodes ont été développées pour proposer des formulations simplifiées du comportement non linéaire du modèle macro-élémentaire pour la pratique courante de l'ingénierie. La méthode TreMuri est l'une d'entre elles, optimisée pour l'analyse sismique statique non linéaire.

Développé à l'origine pour la recherche et publié sous le nom de TreMuri[158], ce logiciel a été créé en tant que projet commun de S.T.A. DATA et le professeur Sergio Lagomarsino de la Faculté d'architecture de l'Université de Gênes. Il a été réalisé en collaboration avec d'autres spécialistes Andrea Penna Alessandro Galasco et Serena Cattari, pour finaliser les aspects théoriques du logiciel sur la base d'expériences en laboratoire et d'analyses de structures réelles.

TreMuri est le premier programme italien spécifiquement conçu pour le calcul sismique et statique des structures existantes en maçonnerie non renforcée selon le décret ministériel 14-1-2008 "Normes techniques pour la construction"[159], EC6, EC8, SIA. La particularité de ce programme est la méthode de calcul innovante (FME - Frame by Macro Element) qui schématise la structure à travers un cadre équivalent composé d'un type particulier d'éléments, appelés macro-éléments.

Parmi les raisons qui nous ont conduits à choisir TreMuri, est la bibliothèque des caractéristiques mécaniques pour différents types de maçonnerie (pierre, brique), qui est intégrée dans le programme.

Le tableau suivant présente les valeurs de référence des paramètres mécaniques (minimum et maximum) et le poids spécifique moyen pour différents types de maçonnerie, en se référant aux conditions suivantes : mauvaises caractéristiques du mortier, absence de recours (linteaux), murs simplement joints ou mal raccordés, maçonnerie non consolidée, texture (dans le cas d'éléments réguliers) artisanale ; f_m = résistance moyenne à la compression de la maçonnerie, τ_0 = résistance moyenne au cisaillement de la maçonnerie, E = valeur moyenne du module d'élasticité, G = valeur moyenne du module d'élasticité tangentielle, w = poids spécifique moyen de la maçonnerie.

Tableau 5. 5 : Caractéristique mécaniques pour différents types de maçonnerie

Type de maçonnerie	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	W (kN/m ³)
	min-max	Min-max	min-max	min-max	
Maçonnerie désordonnée (cailloux, pierres erratiques et irrégulières)	100	2,0	690	230	19
	180	3,2	1050	350	
Maçonnerie en pierre de taille, avec une face mince et un noyau intérieur.	200	3,5	1020	340	20
	300	5,1	1440	480	
Maçonnerie avec des blocs de pierre carrés	260	5,6	1500	500	21
	380	7,4	1980	660	
Maçonnerie de pierre tendre (tuf, calcarénite, etc.)	140	2,8	900	300	16
	240	4,2	1260	420	
Maçonnerie de blocs de pierre équarris	600	9,0	2400	780	22
	800	12,0	3200	940	
Maçonnerie en briques pleines et mortier de chaux	240	6,0	1200	400	18
	400	9,2	1800	600	
Maçonnerie semi-creuse avec mortier de ciment (par exemple : double perforation UNI \leq 40%)	500	24	3500	875	15
	800	32	5600	1400	
Maçonnerie en blocs de briques semi-creux (pourcentage de forage < 45%)	400	30,0	3900	1080	12
	600	40,0	5400	1620	
Maçonnerie en blocs de briques semi-creux, à joints secs verticaux (pourcentage de forage < 45%)	300	10,0	2700	810	11
	400	13,0	3600	1080	
Blocs de béton ou maçonnerie d'argile expansée (pourcentage de forage entre 45% et 65%)	150	9,5	1200-	300	12
	200	12,5	1600	400	
Maçonnerie constituée de blocs de béton semi-remplis (perforation < 45%)	300	18,0	2400	600	14
	440	24,0	3520	880	

- Modélisation de la tour à l'aide du logiciel TreMuri[158]

Afin d'évaluer le comportement sismique sous l'effet d'un tremblement de terre, nous avons créé deux modèles simplifiés de la tour entière à l'aide du logiciel TreMuri (Figure 5.19), en tenant compte du comportement non-linéaire de tous les éléments structurels.

Les modèles TreMuri de la tour Totem, à travers l'étude du comportement élastique-plastique des éléments, permettent d'évaluer à tout moment les conditions des éléments uniques et de la structure globale. Par conséquent, la vérification est obtenue en termes de performance, la capacité de la structure à subir des mouvements supérieurs à ce qui est requis par le code.

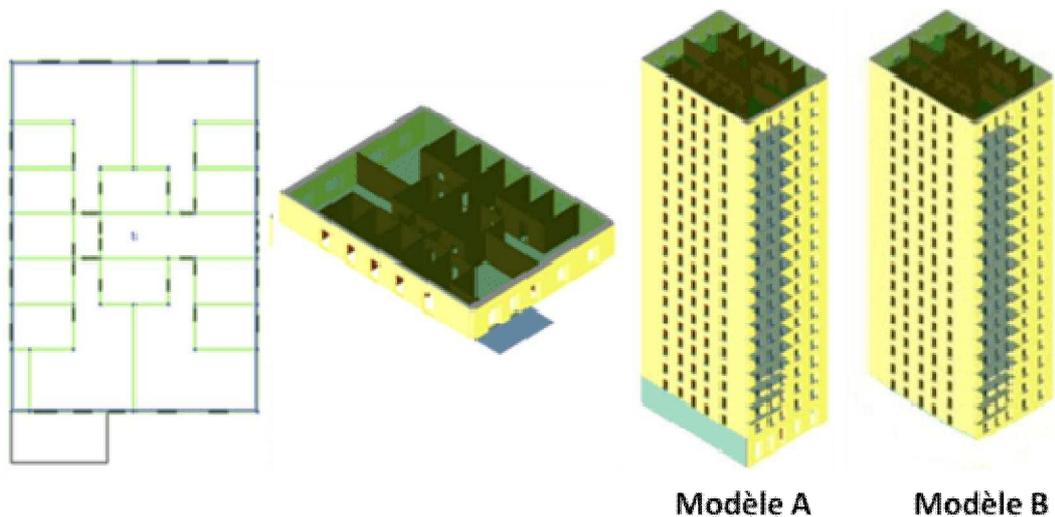


Figure 5. 19: Vue en plan et modèle A et B de la tour modélisé par TreMuri.

- Détermination de l'action sismique

Le tracé du spectre de réponse élastique est illustré dans la figure 5.20.

Tableau 5. 6 : Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique

A	Q	R	η	ξ	T1	T2
0,3	1,15	1	0,7	10	0,15	0,5

La prise en compte de la valeur unitaire du coefficient de comportement de la structure ($R=1$) est pour avoir un spectre de réponse élastique.

Le tracé du spectre de réponse élastique est comme suit :

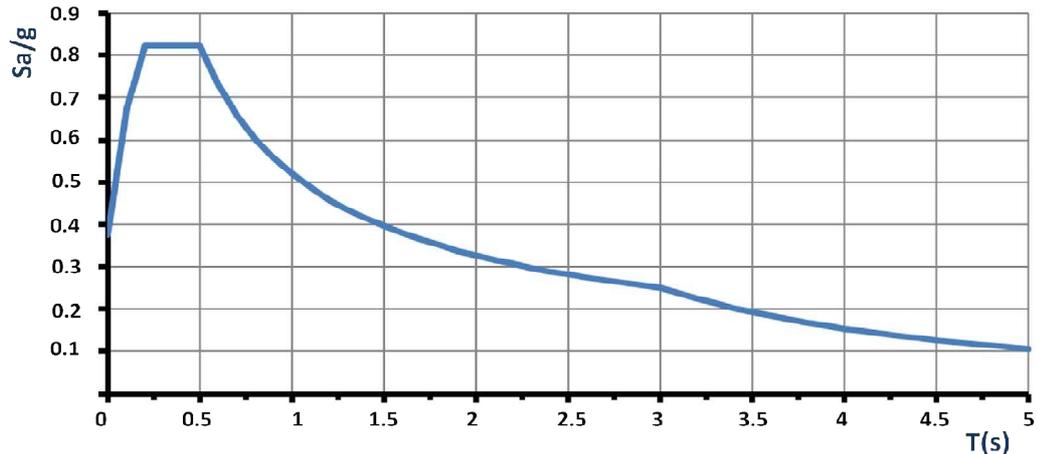


Figure 5. 20: Représentation du spectre de réponse élastique S_a/g .

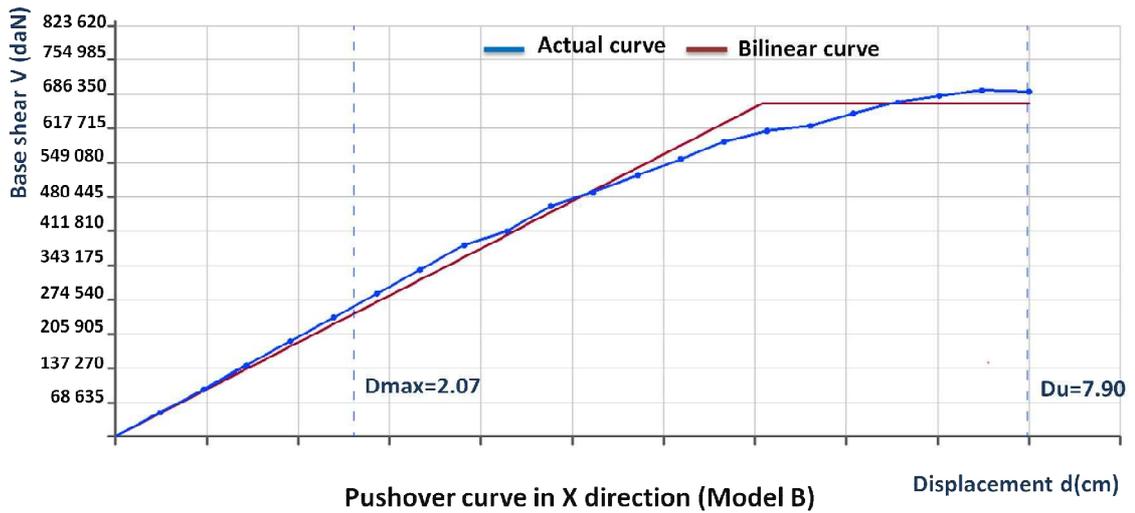
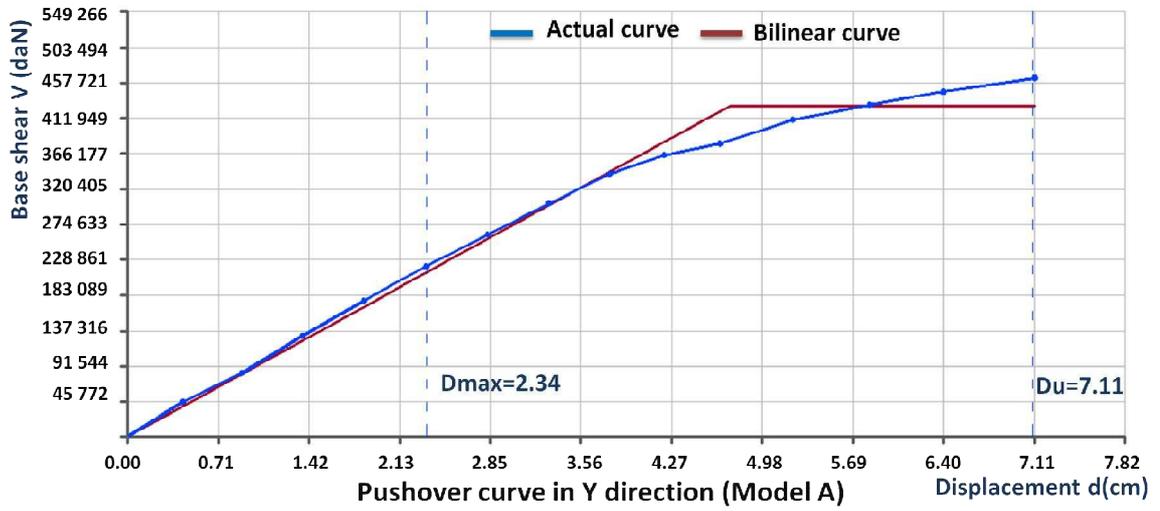
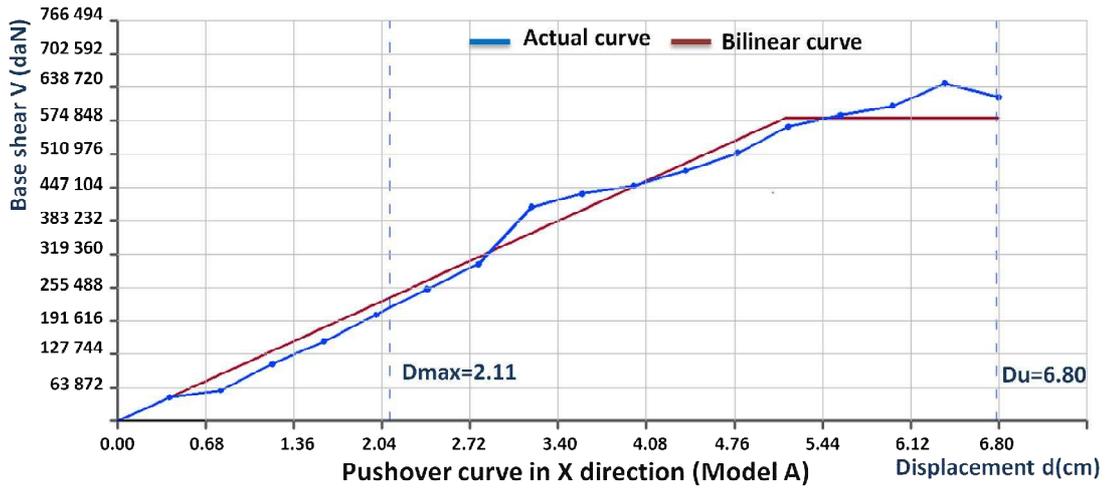
6.2.2. Représentation de la courbe contrainte-déformation

Le graphique illustre la courbe contrainte-déformation, avec en abscisse les déplacements d'un point significatif de la structure (nœud de contrôle) et selon l'axe Y, les forces correspondantes. La courbe représente donc le comportement global de la structure lorsque la charge augmente, mettant en évidence son comportement non-linéaire.

Le nœud de contrôle est le nœud situé au sommet du bâtiment. Il sert de point de référence pour le calcul des déplacements de la structure. Le choix du nœud de contrôle a un rôle fondamental dans le système de vérification : Il est évident que, en changeant le nœud de contrôle, peut modifier la courbe pushover.

La courbe en bleu de la figure 5.21 représente le rapport entre la valeur du cisaillement de base V (daN) et le déplacement D (cm). La limite de la courbe à droite indique le déplacement fourni par la structure. La barre bleue verticale indique le déplacement minimal requis par le code. Si cette valeur est inférieure à la limite droite de la courbe, la structure est vérifiée.

Les résultats de l'analyse sont montrés dans la Figure 5.19, et les valeurs de D_u , D_{max} , et V dans le tableau 5.7, la courbe pushover est représentée en bleu, en brun l'équivalent bilinéaire.



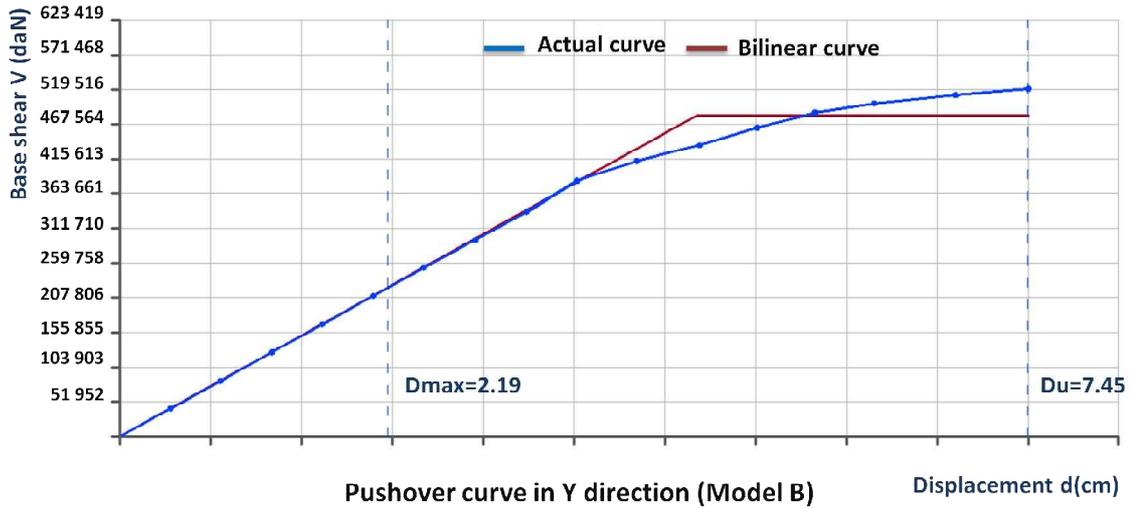


Figure 5. 21: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de la tour avec le logiciel TreMuri.

6.2.3. Déplacements de la structure

Le tableau 5.7 montre les valeurs de déplacement pour chaque modèle. La condition du code exige que D_{max} soit inférieur ou égal à D_u . Alors, après avoir vérifié les deux valeurs, on peut conclure que le modèle A et le modèle B satisfont tous deux cette condition selon les axes X et Y.

$$D_{max-x} = 2,11 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 6,80\text{cm} \text{ et } D_{max-y} = 2,34 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 7,11\text{cm} \text{ (modèle A).}$$

$$D_{max-x} = 2,07 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 7,90 \text{ cm} \text{ et } D_{max-y} = 2,19 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 7,45 \text{ cm} \text{ (modèle B).}$$

Avec : D_{max} : Déplacement maximal requis par la réglementation (displacement demand of the seism). D_u : Déplacement assuré par la structure (Offered displacement of the structure).

D'après l'analyse du tableau 5.7, on peut noter que les valeurs des déplacements D_{max} et D_u sont proches pour les deux modèles A et B.

Tableau 5. 7: Valeurs de D_{max} et D_u pour les modèles A et B.

	$D_{max}(\text{cm})$		$D_u (\text{cm})$	
	X	Y	X	Y
Modèle A	2.11	2.34	6.80	7.11
Modèle B	2.07	2.19	7.90	7.45

6.2.4. Résultats et discussion

Comme le montre la Figure 5.22, les résultats obtenus sur la distribution des dommages de chaque mur et du bâtiment dans son ensemble sont représentés par les couleurs diverses, qui mettent en évidence la progression des dommages dans les différents macro-éléments. En observant les couleurs sur les murs déformés, il est facile de déterminer les macro-éléments endommagés et la cause du dommage, au moyen d'une légende qui détermine la signification de chaque couleur.

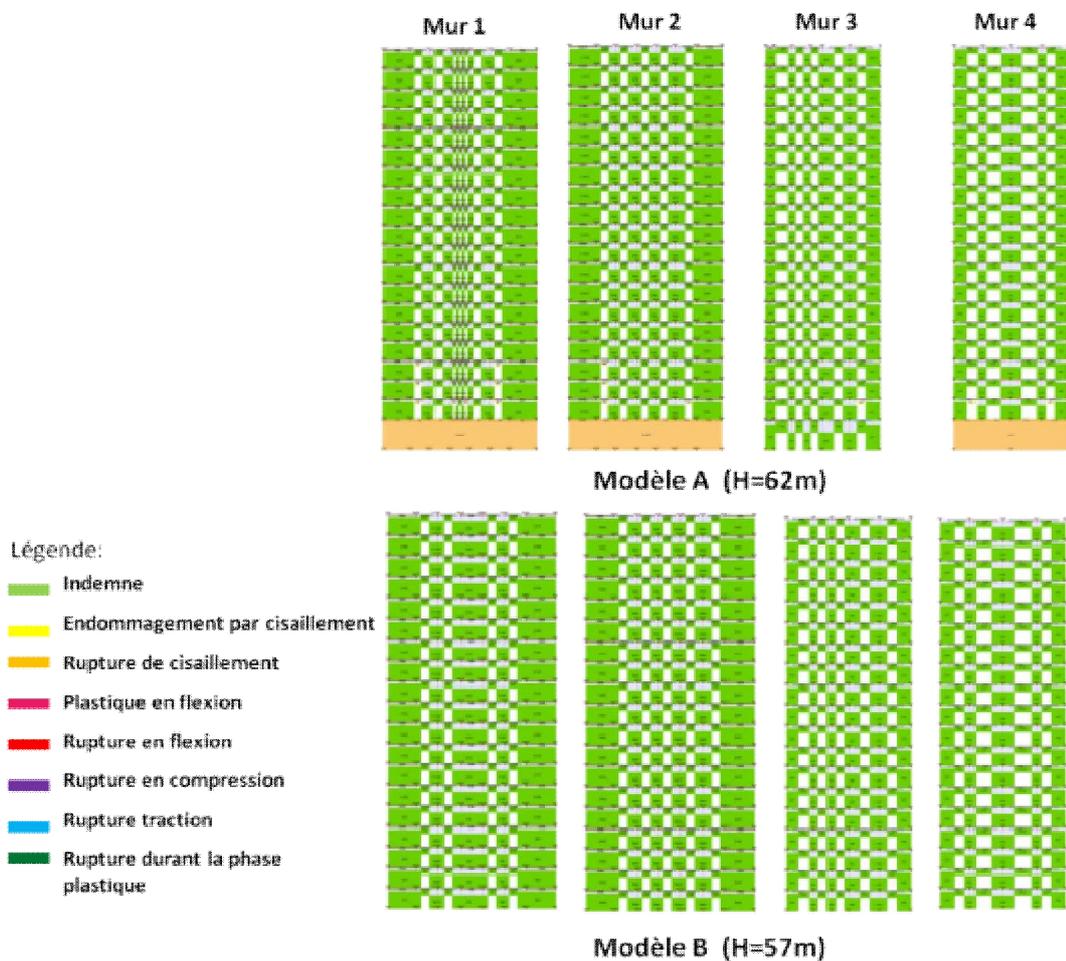


Figure 5. 22. Les résultats de l'analyse avec TreMuri.

En effet, deux modèles des différents murs qui composent la structure ont été sélectionnés, afin de visualiser les déformations du bâtiment. Dans les deux modèles, on peut voir que les quatre murs en maçonnerie restent en majeure partie intacts et non endommagés (illustrés par la couleur verte) tandis que les murs en béton armé du premier niveau subissent des cisaillements (couleur jaune). Le

modèle TreMuri obtenu ne montre pas de dommages importants bien au contraire la structure monolithique en maçonnerie de blocs de pierres reste intacte avec quelques dommages subentiels au niveau de l'entresol en béton armé. Ainsi, sur la base des résultats de l'analyse, il a été conclu que l'ensemble de la structure a un bon comportement vis à vis d'un séisme de la même intensité que celui de Boumerdès de 2003.

6.3. L'impact de la loggia sur le comportement sismique de la tour

Afin de comprendre l'influence de la présence de la loggia sur le comportement de la tour, nous avons modélisé la structure avec le logiciel SAP 2000 en tenant compte et sans tenir compte de la loggia. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 5.8.

Tableau 5. 8: Les résultats des déplacements de la structure avec et sans la loggia.

Niveau	Hauteur (m)	Axe X-X			Axe Y-Y		
		Δx (cm) Avec la loggia	Δx (cm) Sans la loggia	Différence %	Δy (cm) Avec la loggia	Δy (cm) Sans la loggia	Différence %
20	62	1.470	1.428	2.85	2.100	2.051	2.33
19	59	1.610	1.556	3.35	2.135	2.107	1.30
18	56	1.715	1.680	2.04	2.275	2.201	3.25
17	53	1.785	1.758	1.51	2.310	2.268	1.81
16	50	1.820	1.784	1.97	2.380	2.306	3.10
15	47	1.890	1.795	5.02	2.415	2.331	3.47
14	43	1.890	1.781	5.82	2.415	2.341	3.06
13	41	1.960	1.849	5.66	2.415	2.334	3.35
12	38	1.925	1.820	5.45	2.415	2.313	4.22
11	35	1.925	1.871	2.8	2.380	2.271	4.57
10	32	1.925	1.822	5.35	2.310	2.212	4.24
9	29	1.855	1.744	5.98	2.240	2.135	4.68
8	26	1.820	1.711	5.98	2.170	2.037	6.12
7	23	1.750	1.670	4.75	2.100	1.918	8.66
6	20	1.645	1.569	4.6	1.855	1.764	4.90
5	17	1.540	1.447	6.03	1.715	1.564	8.8
4	14	1.400	1.310	6.42	1.505	1.386	7.9
3	11	1.225	1.151	6.04	1.225	1.085	11.42
2	8	0.525	0.490	6.66	0.805	0.699	13.16
1	5	0.595	0,556	6.55	0.385	0.326	15.32

En comparant la différence des déplacements de niveau entre les deux structures sans et avec une loggia d'une largeur de 3,00 m dans les deux directions (longitudinale et transversale), nous remarquons une diminution des valeurs des déplacements de bas en haut pour le modèle sans loggia ; avec un pourcentage allant jusqu'à un maximum de 7 % dans la direction X-X et 16 % dans la direction Y-Y. Il faut noter que le plancher de la loggia repose sur le mur de la façade latérale. Ce qui explique également, les déviations en plan et en élévation créées par la loggia et donc un phénomène de torsion dû à l'excentricité du centre de masse de la structure.

7. Discussion des résultats des deux analyses

Dans cette étude, une méthode simple d'analyse du comportement sismique de la tour Totem a été présentée. Ces méthodes peuvent être utilisées pour d'autres structures similaires telles que les lotissements conçus et construits avec la même maçonnerie de pierre par Pouillon en Algérie et aussi en France.

Les résultats obtenus après avoir effectué l'analyse avec les méthodes dynamiques spectrales linéaires et non-linéaires statiques au moyen des logiciels SAP2000 et TreMuri montrent que la structure peut résister aux actions sismiques dépendant des nouvelles données sismiques de la région. Les résultats de l'analyse des déplacements par les deux méthodes d'analyse dynamique linéaire et statique non-linéaire sont résumés comme suit :

- Analyse dynamique linéaire (avec le programme SAP2000)

$$D_{\max-x} = 1.96 \text{ cm et } D_{\max-y} = 2.41 \text{ cm (Modèle A)}$$

$$D_{\max-x} = 1.85 \text{ cm et } D_{\max-y} = 2.34 \text{ cm (Modèle B)}$$

- Analyse statique non-linéaire (avec le programme TreMuri)

$$D_{\max-x} = 2.11 \text{ cm et } D_{\max-y} = 2.34 \text{ cm (Modèle A)}$$

$$D_{\max-x} = 2.07 \text{ cm et } D_{\max-y} = 2.19 \text{ cm (Modèle B)}$$

Par la comparaison entre les résultats des deux méthodes, nous pouvons conclure que les valeurs maximales des déplacements de la structure obtenues,

dans les deux directions X et Y, avec SAP2000 sont très proches de celles obtenues avec le logiciel TreMuri pour le modèle A et B.

En effet, selon les résultats obtenus, on peut conclure que cette tour présente des conditions de sécurité structurelle pour leur utilisation normale et peut être considérée comme sûre et suffisamment solide pour résister à l'action sismique élevée avec des niveaux de dommages acceptables.

8. Conclusion

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la performance sismique des grands ensembles de Pouillon, en utilisant le spectre de réponse dynamique linéaire et les méthodes statiques non-linéaires. La tour Totem, située dans la cité de Diar es Saada, a été prise comme cas de référence.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de la présente étude :

- La conception originale de cette tour contraste avec les autres structures construites à la même époque, et témoigne du génie exceptionnel de cet architecte qui a réussi, avant l'avènement du code sismique algérien, à construire une structure parasismique basée uniquement sur le système structurel en maçonnerie monolithique de blocs de pierres taillées ainsi qu'à la qualité des matériaux utilisés et un bon sens inné en matière de conception et d'exécution.
- L'architecture en maçonnerie non renforcée de Fernand Pouillon présente un potentiel parasismique important qui est resté relativement méconnu jusqu'à aujourd'hui. En effet, il existe un manque flagrant d'informations concernant les caractéristiques parasismiques de ce patrimoine.
- La conception architecturale de la tour Totem a joué un rôle majeur dans le comportement de la structure lors d'un séisme. La géométrie de la tour, le choix de la structure, l'épaisseur des murs extérieurs en maçonnerie de pierre non armée (80 cm dans la direction X et 40 cm dans la direction Y), le choix judicieux des matériaux et leur qualité, l'appareillage et le chaînage de la pierre, la disposition de l'intérieur, les murs porteurs en brique, la technique de pose, la superposition des plans, la symétrie et la simplicité de l'élévation, ainsi que l'alignement des fenêtres, sont autant de paramètres qui contribuent au bon comportement sismique de l'ensemble du bâtiment.

– Les résultats de cette recherche montrent que la tour Totem possède des systèmes de construction parasismiques remarquables, à la fois originaux et traditionnels. Une telle combinaison invite à l'intérêt et à l'étude, et justifie son classement comme l'un des éléments les plus importants du patrimoine architectural du XXe siècle en Algérie. À travers ce projet architectural et structurel, nous pouvons donc conclure que Pouillon n'était pas seulement un architecte : il avait les compétences d'un ingénieur.

– Selon le paragraphe C de l'article 3.4 du Code sismique algérien RPA 99/2003, les constructions en maçonnerie porteuse ordinaire sont interdites dans les zones sismiques ; seules les maçonneries porteuses chaînées sont autorisées. Il s'agit de structures de maçonnerie constituées de moellons, ou de petits éléments manufacturés, renforcés par un chaînage en béton après achèvement de la structure. Ces structures peuvent résister aux charges verticales et horizontales. Selon le code sismique algérien, ces bâtiments ne doivent pas avoir plus de cinq étages, ou 17 m, de hauteur dans la zone I ; quatre étages, ou 14 m, de hauteur dans la zone IIa ; et trois étages, ou 11 m, de hauteur dans les zones IIb et III. Néanmoins, notre étude de cas, une tour en maçonnerie non chaînée de 62 m de haut, située dans une zone de forte sismicité, a résisté aux impacts des séismes passés qui ont été ressentis à Alger et en particulier le séisme du 21 mai 2003 de Boumerdès.

– Les résultats numériques obtenus au moyen des logiciels SAP2000 et TreMuri en utilisant la méthode spectrale linéaire ($D_{\max-X}=1.96$ cm et $D_{\max-Y}=2.41$ cm pour le modèle A ; et $D_{\max-X}=1.85$ cm et $D_{\max-Y}=2.34$ cm pour le modèle B) et la méthode statique dynamique non-linéaire ($D_{\max-X}=2.11$ cm et $D_{\max-Y}=2.34$ cm pour le modèle A ; et $D_{\max-X}=2.07$ cm et $D_{\max-Y}=2.19$ cm pour le modèle B) confirment l'affirmation de Pouillon concernant la résistance sismique des systèmes de construction utilisés dans les lotissements d'Alger.

– La présence de la loggia de 3 m de large provoque une excentricité du centre de masse à chaque étage de la structure, tant horizontalement que verticalement. Par conséquent, cela provoque une augmentation des forces sismiques entraînant un déplacement plus important à chaque niveau, qui pourrait atteindre 7 % dans la direction X-X et 16 % dans la direction Y-Y.

Il est très difficile d'évaluer complètement le comportement sismique de ce type de structure, mais il a été prouvé que la conception adoptée par Pouillon peut résister à un séisme correspondant à celui de 2003. La tour est restée stable pendant près de 66 ans, et a survécu jusqu'à aujourd'hui sans dommage ni altération majeure.

Nous avons l'intention d'effectuer des travaux futurs sous forme de tests expérimentaux, à la fois in situ et en laboratoire, en utilisant une table vibrante et des modèles réduits. De telles recherches permettraient de déterminer l'exactitude des résultats de cette étude, qui sont essentiellement basés sur la simulation numérique.

CHAPITRE 06

CONCEPTION ET PERFORMANCE SISMIQUE DES IMMEUBLES DE DIAR ES SAADA

1. Introduction

En plus de la typologie tours de grande hauteur, la cité Diar es Saada est composée de plusieurs configurations de bâtiment, différentes et variées, que ce soit en plan ou en élévation :

- Configuration en plan : immeubles linéaires, immeubles en L, bâtiments isolés et bâtiments associés (voir chapitre 03).
- Configuration en élévation : hauteur basse (LOW rise), moyenne (MID rise), grande (HIGH rise).

Ainsi, trois autres typologies ont été sélectionnées en se basant sur certains critères qui sont liés à la forme, la configuration et le gabarit de bâtiment. Il s'agit de bâtiment R, E et L.

Après l'étude comparative entre les normes parasismiques Algériennes et les dispositions constructives adoptées dans les trois typologies, détaillée dans le chapitre trois, dans le présent chapitre les trois exemples de bâtiments sélectionnés seront analysés avec la même méthode qui a été employée dans la modélisation de la tour « D » ; à savoir la méthode d'analyse dynamique linéaire et statique non-linéaire et « Pushover ».

2. Critères de choix des cas d'étude

De nombreuses études basées sur le retour d'expérience sismique ont démontrées que la vulnérabilité sismique des constructions est régie par un certain nombre de paramètres. Effectivement, la forme, le gabarit et la configuration de la construction ont une influence sur le comportement sismique des structures en maçonnerie[125]. À cette fin, on a choisi des bâtiments présentant trois configurations différentes.

En se référant aux précédentes études, notre analyse considère trois formes type, comme le montre la Figure 6.1 :

- La forme linéaire associée (bâtiment R).
- La forme en L (bâtiment E).
- La forme linéaire isolée (bâtiment L).

Dans la même optique, notre analyse considère trois hauteurs type :

- Les constructions à faible hauteur appelés « LOWER rise » qui correspondent à des immeubles jusqu'en R+2 (nous avons pris un R+2).
- Les constructions de moyenne hauteur appelées « MID rise » qui correspondent à des immeubles jusqu'en R+4 (nous avons pris un R+4).
- Les constructions de grande hauteur appelés « HIGH rise » qui correspondent à des immeubles de plus R+4 (nous avons pris un R+5).



Figure 6. 1: Emplacement des bâtiments R, E et L de la cité de Diar es Saada.

3. Méthodologie d'analyse

Dans l'analyse des bâtiments R, E et L, les méthodes utilisées sont celles recommandées par le règlement parasismique algérien RPA99/2003[90]. Il s'agit aussi de la même méthodologie suivie pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique de la tour Totem, le bâtiment « D ».

Afin d'effectuer une modélisation aussi proche que possible de la réalité et efficace pour la vérification sismique, il est essentiel de se concentrer sur les caractéristiques fondamentales de la réponse des bâtiments en maçonnerie à l'action sismique.

La méthodologie d'évaluation de la performance sismique des cas d'étude est représentée dans l'organigramme suivant (Figure 6.2) :

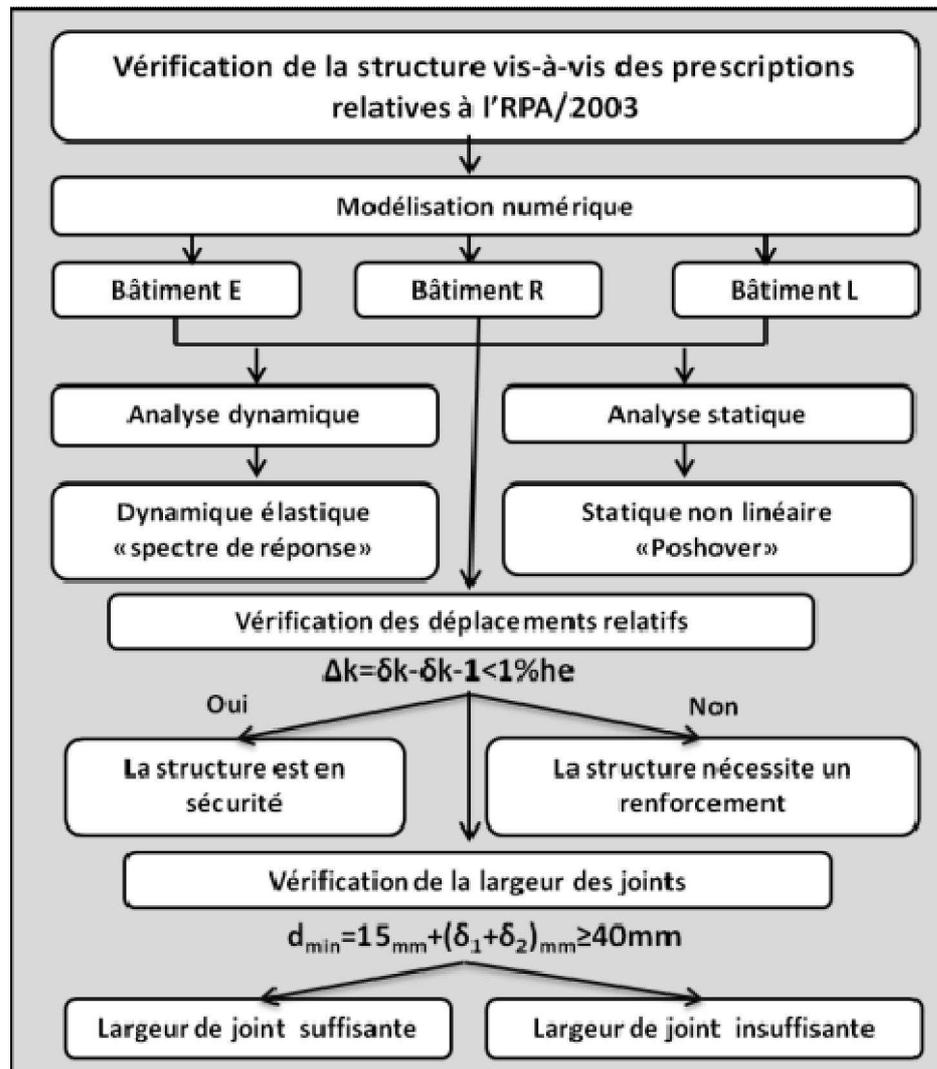


Figure 6. 2: Méthodologie d'évaluation de la performance sismique : bâtiments E, R et L.

Les principales méthodes d'analyse et de vérification sont décrites dans le chapitre 05. Ainsi, les méthodes d'analyses statiques et dynamiques (linéaires et non linéaires) ont été choisies afin d'évaluer l'état structural de la tour Totem dans

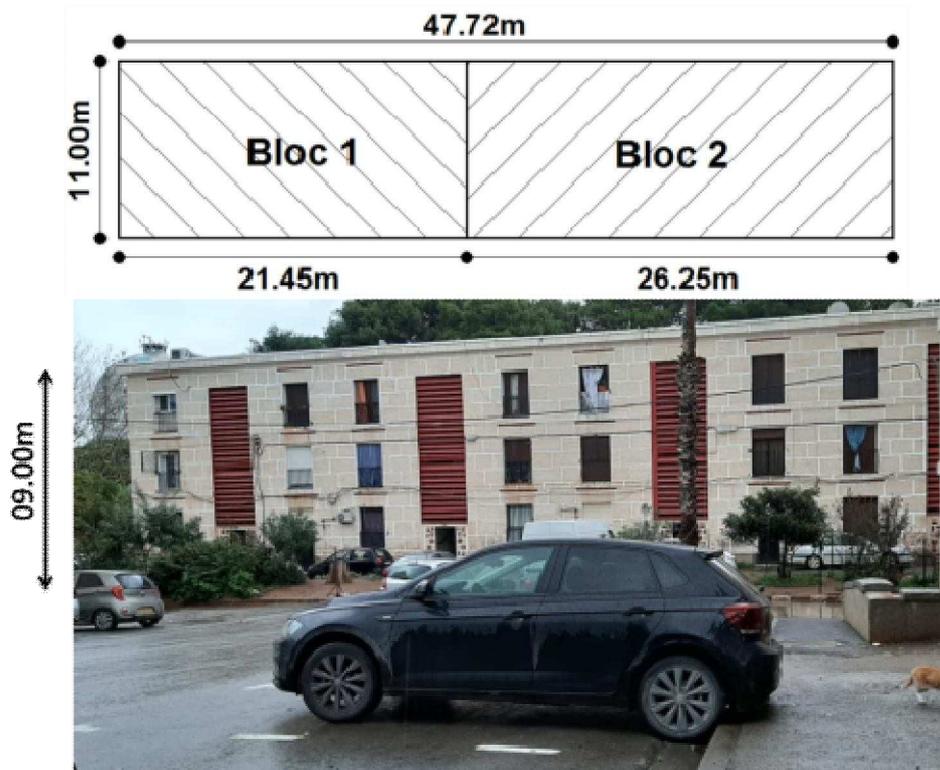
le domaine sismique, en utilisant des modèles numériques construits dans deux programmes commerciaux : SAP2000[9] et 3Muri/ TreMuri[10, 154].

Néanmoins, les bâtiments R et E présentent une particularité au niveau de la configuration linéaire et en L, ce qui implique la présence de joint sismique, disposer de façon à limiter la longueur des immeubles dans le cas de bâtiment R, ou à simplifier les formes en plan des bâtiments présentant des configurations complexes telles que le bâtiment E. La disposition des joints assure l'indépendance complète des blocs, et permet de larges mouvements multidirectionnels et le libre déplacement des structures afin d'éviter les entrechoquements et assurer la pérennité des constructions.

4. Bâtiment R

4.1. Description géométrique et structurelle

Le bâtiment R est composé de deux blocs adjacents séparés par un joint. Il occupe une surface au sol de 524,92 m² ($S_{\text{Bloc 1}}=235.95 \text{ m}^2$ et $S_{\text{Bloc 2}}=288.75 \text{ m}^2$). Les dimensions du bloc sont de 47,72 m de longueur, 11,00 m de largeur pour 09 m de hauteur (Figure 6.3).



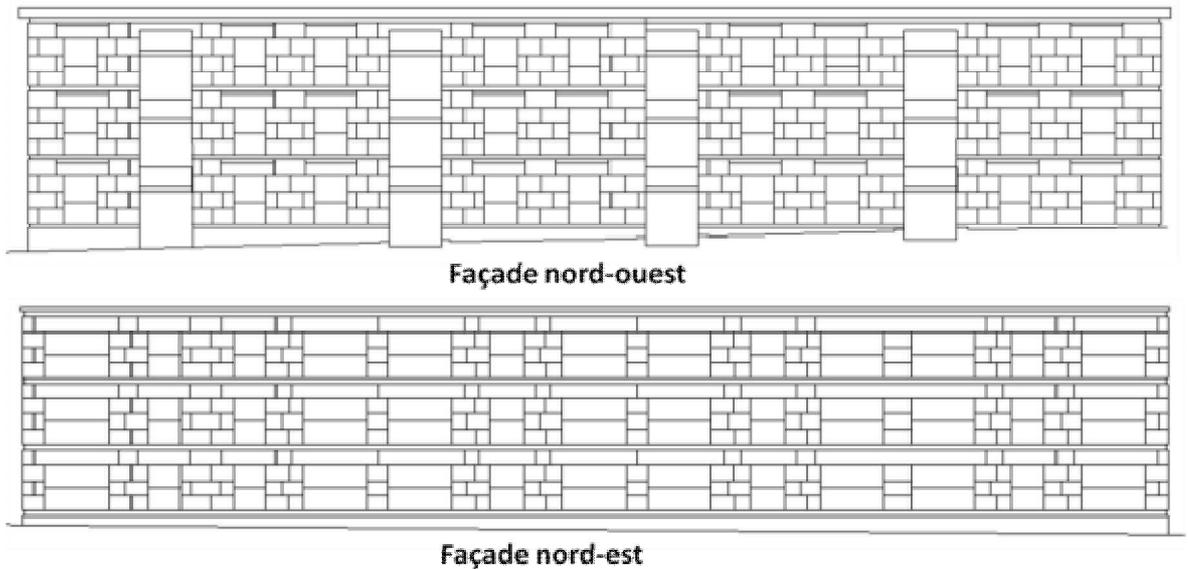


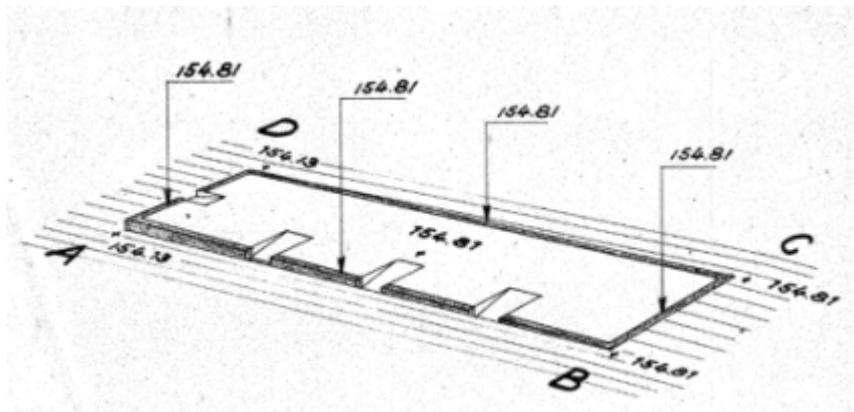
Figure 6. 3: Configuration en plan, en élévation et vue d'ensemble de bâtiment R.

Le bâtiment présente une forme régulière en plan et en élévation, sans décrochement, comme le montrent le plan et les élévations ci-dessus (Figure 6.3). L'immeuble abrite au total 22 logements répartis comme suit :

- Bloc 1 : 09 logements de type F2 et F3.
- Bloc 2 : 13 logements de type F2 et F3.

4.2. Caractéristiques des fondations de la structure

Les fondations de bâtiment R sont des semelles filantes en béton armé, continues sous mur, conçus en tenant compte uniquement des actions statiques et ses éléments sont le prolongement des murs en maçonnerie avec un évasement à la base (Figure 6.4). Chaque semelle présente des dimensions particulières selon les épaisseurs des murs porteurs.



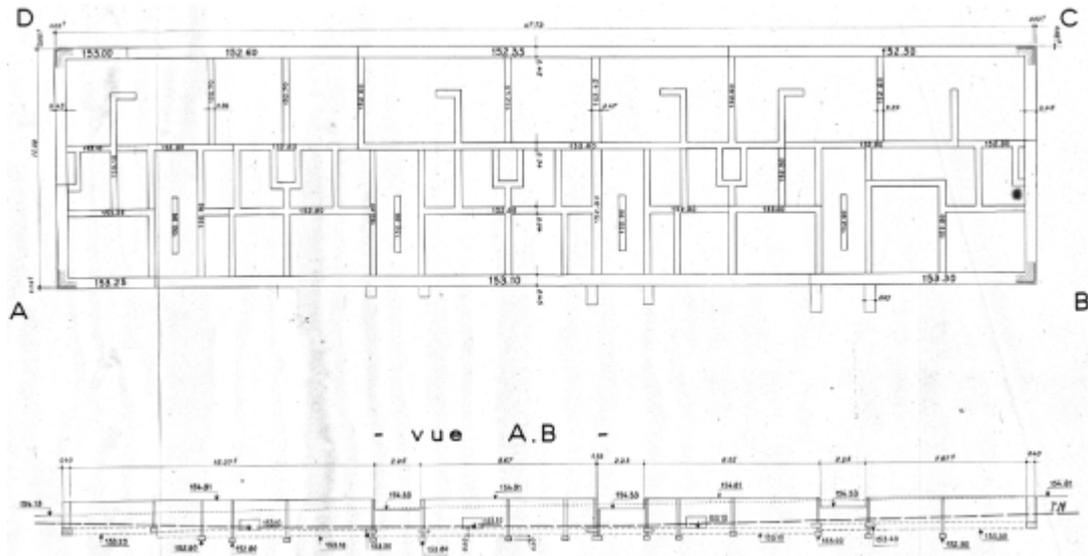


Figure 6. 4: Vue en plan, en coupe et 3D des fondations bâtiment R[19].

4.3. Caractéristiques des murs porteurs

Il s'agit d'un bâtiment d'une forme rectangulaire linéaire. Il est composé de trois niveaux (R+2) à usage d'habitation et une terrasse inaccessible. Tous les niveaux sont composés de murs porteurs périphériques en maçonnerie, avec une épaisseur de 40 cm dans les deux directions X et Y pour les murs en pierre de Fontvieille, et de 15 cm pour les murs semi-porteurs intérieurs en briques spéciales Pouillon (Figure 6.5)[36, 107]. Il est important de rappeler que les systèmes constructifs du bâtiment sont les mêmes utilisés dans tous les immeubles de Diar es Saada.

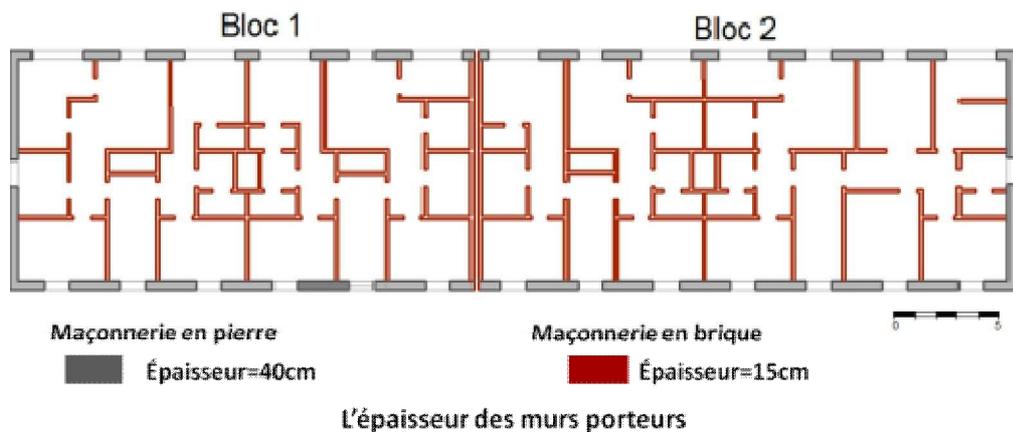


Figure 6. 5: Les systèmes constructifs de bâtiment R.

4.4. Modélisation numérique

4.4.1. Analyse dynamique linéaire

- Détermination de l'action sismique selon le code RPA99/2003

Dans cette étude, pour le calcul de la force latérale de conception ou l'effort tranchant à la base de conception, nous utilisons la méthode du spectre de réponse (méthode d'analyse modale spectrale)

Conformément au RPA2003[90], le spectre de calcul représentant l'action sismique est représenté comme suit :

$$Sa/g \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right)^{2/3} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3,0s \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) & T \geq 3,0s \end{cases}$$

Où :

Sa : accélération spectrale

g : Accélération de la pesanteur

A : Coefficient d'accélération de zone

η : Coefficient de correction d'amortissement

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique donné par le tableau 4.2 (RPA99/2003)

Q : Facteur de qualité

T1, T2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site

R : Coefficient de comportement de la structure

- Résultante de la période fondamentale de la structure

Conformément à la réglementation parasismique algérienne, la valeur de T la période fondamentale de la structure, calculée à partir des formules de Rayleigh « T_{rpa} » ou de méthodes numériques « T_{sap} » ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30% ($T_{sap} < 30\% T_{rpa}$).

$$T_{RPA} = C_T h_N^{3/4}$$

$$T_{RPA} = 0,05 \times 9^{3/4} = 0.259 \text{ s (code RPA99/2003)}$$

Pour les trois directions principales de la structure, les valeurs des périodes fondamentales calculées par le logiciel SAP 2000 sont (Figure 6.6) :

Bloc 1 :

T1= 0.115s ; F=8.65Hz pour la 1ère période.

T2= 0.102s ; F=9.781Hz pour la 2ème période.

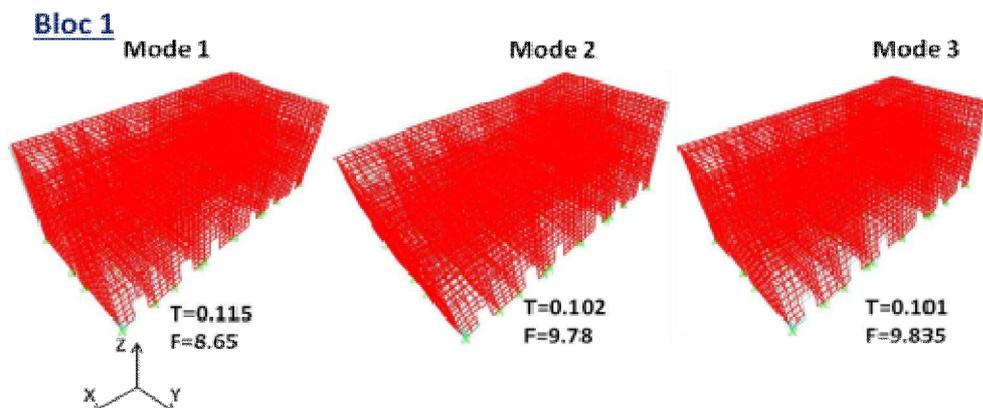
T3= 0.101s ; F=9.835Hz pour la 3ème période.

Bloc 2 :

T1= 0.115s ; F=8.65Hz pour la 1ère période.

T2= 0.099s ; F=10.04Hz pour la 2ème période.

T3= 0.099s ; F=10.08Hz pour la 3ème période.



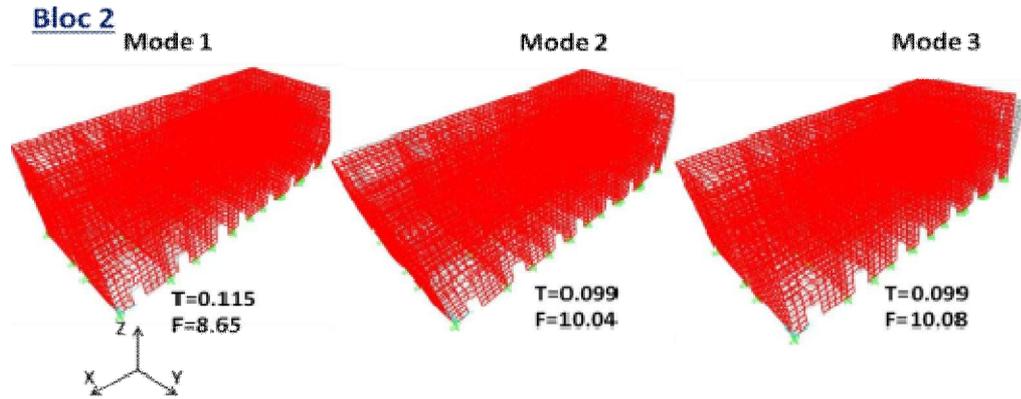


Figure 6. 6: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment R (bloc 1 et 2).

Les deux premiers modes sont des modes de translation et le troisième mode est un mode de torsion (Figure 6.6). Selon la formule empirique du code algérien, ces périodes ne doivent pas dépasser la période fondamentale de la structure T_{RPA} augmentée de 30 %. Les résultats obtenus par le logiciel et la formule empirique pour les deux blocs montrent que la condition imposée par le code algérien est satisfaite. Les détails de la vérification des valeurs de la période fondamentale sont présentés ci-dessous :

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (0.259) = 0.336 > T_{sap}=0.115 \text{ (Bloc 1)}$$

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (0.259) = 0.336 > T_{sap}=0.115 \text{ (Bloc 2)}$$

- Vérification des déplacements de la structure

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit

$$\delta_k = R \delta_{ek} \quad \delta_{ek} : \text{déplacement dû aux forces sismiques } F_i \text{ (y compris l'effet de torsion)}$$

R : coefficient de comportement

Selon le code RPA (article 4.43), la valeur Δk (le déplacement relatif entre les niveaux successifs (k et k-1)) ne doit pas dépasser 1% de la hauteur du plancher. Dans le cas présent, cette condition est vérifiée pour tous les niveaux et pour les deux blocs 1 et 2 (tableau 6.1). Les principaux résultats des déplacements structurels sont donnés dans le tableau suivant :

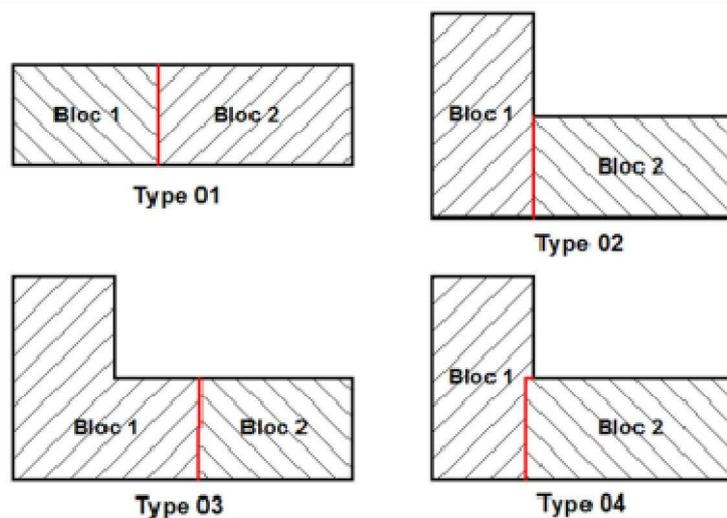
Tableau 6. 1: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment R.

N	h	μ_1	μ_2	81	82	Δ_1	Δ_2	Observation
Bloc 1								
3	9	0,124	0,141	0,434	0,493	0,090	0,140	Vérifiée
2	6	0,098	0,101	0,344	0,353	0,141	0,168	Vérifiée
1	3	0,057	0,053	0,202	0,185	0,202	0,185	Vérifiée
Bloc 2								
3	9	0,117	0,142	0,410	0,498	0,084	0,141	Vérifiée
2	6	0,093	0,101	0,326	0,356	0,136	0,171	Vérifiée
1	3	0,054	0,052	0,190	0,185	0,190	0,185	Vérifiée

- Le joint sismique
 - Disposition des joints dans les immeubles de la cité Diar es Saada

Les joints sismiques sont prévus pour les constructions réalisées en plusieurs blocs dans une zone sismique[121]. On prévoit ces joints lorsque la construction présente une forme irrégulière (Figure 6.7) qui se traduit par une différence de rigidité dans les deux sens.

Ils sont disposés de façon à, limiter les longueurs des bâtiments trop importantes (ex : bâtiment R) ou simplifier en plan de bâtiments présentant des configurations complexes (ex : bâtiment E). Dans les immeubles de Diar es Saada, on distingue quatre types de disposition des joints dans les bâtiments qui présentent une forme complexe, voir les exemples de vues en plan dans la figure suivante.

**Figure 6. 7:** Les types de disposition des joints dans les immeubles de Pouillon.

– Caractéristiques des joints des immeubles de Diar es Saada

A l'instar de la cité Diar es Daada, les bâtiments construits avant l'introduction des codes parasismiques n'ont pas bénéficié de la réglementation en vigueur[90]. En effet, d'après la lecture des rapports de chantier de la cité, on a constaté qu'à cette époque, il existait un seul type de joint qui est le joint de dilatation.

Les joints de la cité de Diar es Saada ont une largeur de 02 cm (Figure 6.8), et descendent jusqu'aux fondations (la semelle n'est pas fractionnée). La figure suivante montre les détails de ce joint.

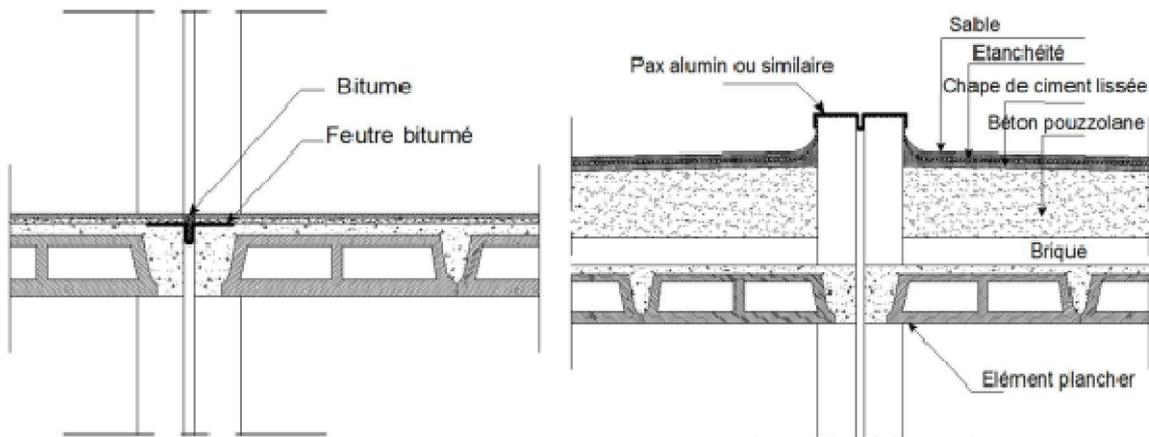


Figure 6. 8: Détails constructifs des joints, immeubles de Diar es Saada

– Vérification du largeur des joints selon RPA99/2003

Selon l'article 5.8 de code RPA99/2003 concernant la justification de la largeur des joints sismiques, deux blocs adjacents doivent être séparés par des joints sismiques dont la largeur minimale d_{\min} satisfait la condition suivante (Figure 6.9) :

$$d_{\min} = 15_{\text{mm}} + (\delta_1 + \delta_2)_{\text{mm}} \geq 40_{\text{mm}}$$

δ_1 et δ_2 : déplacements maximaux des deux blocs, calculés calculé selon l'article 4.43, au niveau du sommet du bloc le moins élevé incluant les composantes dues à la torsion et éventuellement celles dues à la rotation des fondations.

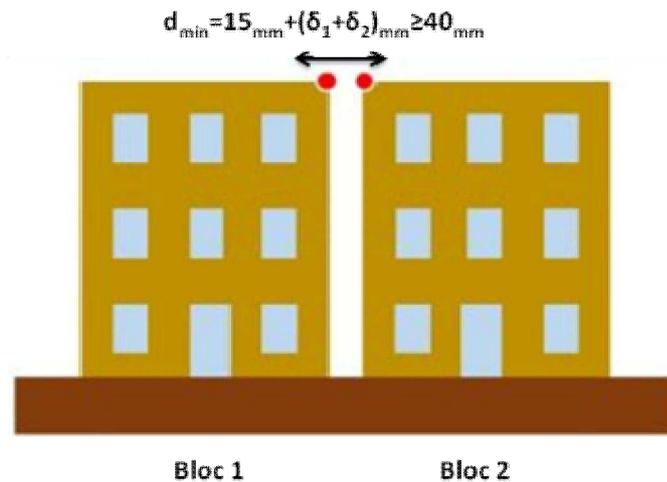


Figure 6. 9: Justification de la largeur de joint sismique selon RPA99/2003.

$$\delta_1 = 4,34 \text{ mm} ; \delta_2 = 4,102 \text{ mm}$$

$$d_{\min} = 15_{\text{mm}} + (4,34 + 4,102)_{\text{mm}} = 23,442 < 40_{\text{mm}} \text{ donc la condition n'est pas vérifiée.}$$

- Calcul de la largeur de joint sismique

La réglementation parasismique exige une largeur de joint au moins égale à la somme quadratique des déplacements (racine carrée de la somme des carrés des déplacements) des planchers des blocs adjacents, selon l'équation suivante :

$$d_{\min} = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)} = \sqrt{(04,47^2 + 4,102^2)} = 6,066 \text{ mm}$$

Les résultats obtenus en appliquant les deux équations, montrent que la condition exigée par RPA99/2003[90] n'est pas vérifiée pour le bâtiment R. La largeur minimale fixée par la réglementation égale à 04 cm. Néanmoins, la largeur minimale est égale à 06mm, donc largement inférieur à la largeur existante entre les deux blocs 1 et 2 qui est de 20 mm[38, 39].

4.4.2. Analyse statique non-linéaire

- Modélisation numérique du bloc linéaire R dans TreMuri

Afin d'évaluer le comportement sismique sous l'action du séisme, nous avons utilisé le logiciel TreMuri [10, 154] pour modéliser les deux blocs de bâtiment R (Figure 6.10), en tenant compte du comportement non linéaire de tous les éléments structurels. TreMuri est le premier programme italien spécifiquement conçu pour les calculs sismiques et statiques des structures existantes en

maçonnerie non armée URM conformément à l'arrêté ministériel 14-1-2008 "Normes techniques pour la construction"[12], EC6, EC8, SIA. Le programme se caractérise par des méthodes de calcul innovantes.

Le logiciel 3muri permet la détermination automatique de la structure équivalente, une fois la géométrie du bâtiment définie, grâce à un algorithme qui reconnaît les connexions entre les panneaux muraux et les subdivise en éléments piliers (piers), écoinçon (spandre), nœuds (nodes) et créant la structure à analyser. Grâce à un outil de maillage avancé, conçu spécifiquement pour la maçonnerie, même pour les formes complexes peuvent être examinées, avec des résultats toujours corrects et fiables sur le plan technique.

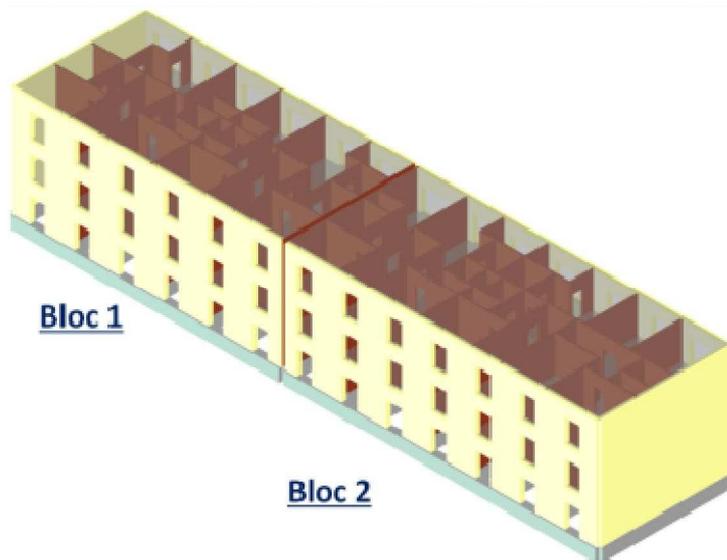


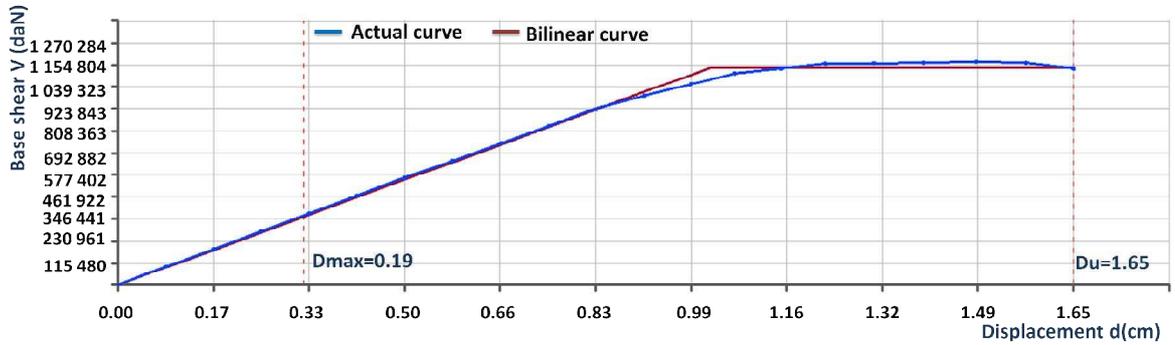
Figure 6. 10 : Vue en 3D de bâtiment R modélisé par TreMuri.

- Représentation de la courbe contrainte-déformation

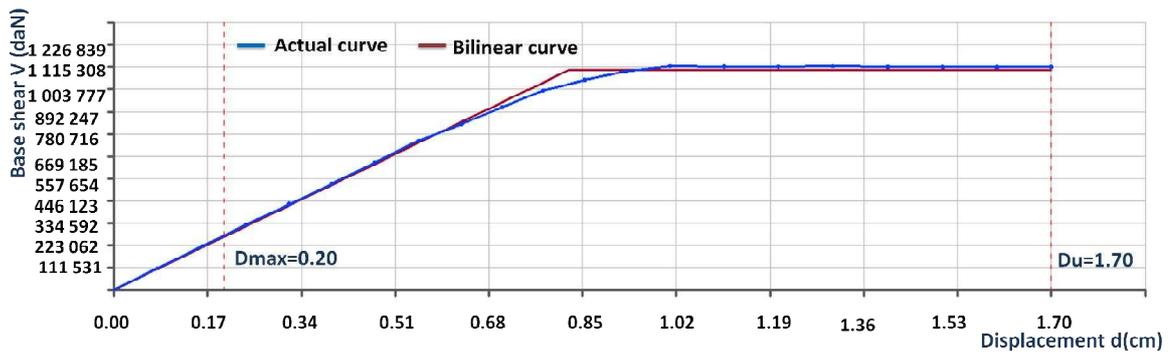
Concernant la représentation de la courbe contrainte-déformation, la limite de la courbe à droite représente les déplacements fournis par la structure. La barre rouge verticale indique le déplacement maximal requis par la réglementation. Si cette valeur est inférieure à la limite droite de la courbe, la structure est vérifiée. En revanche, si la structure n'est pas vérifiée, il est possible d'apporter des améliorations au moyen de placage ou d'injections, ou en insérant de nouveaux éléments avec des matériaux différents, par exemple des cloisons en béton armé, des poutres, des colonnes, etc.

La figure suivante montre la courbe pushover (actual curve) en bleu, et la courbe bilinéaire équivalente (bilinear curve) en rouge.

– Bloc1

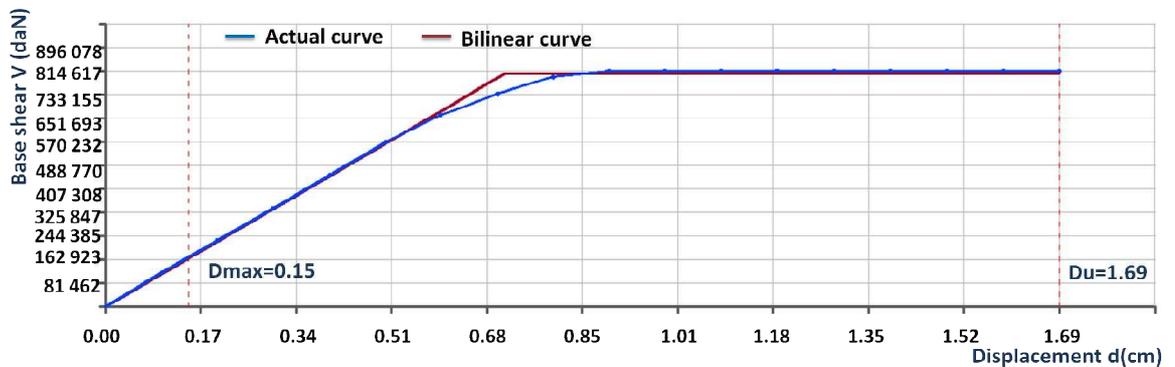


La courbe Pushover direction X-X

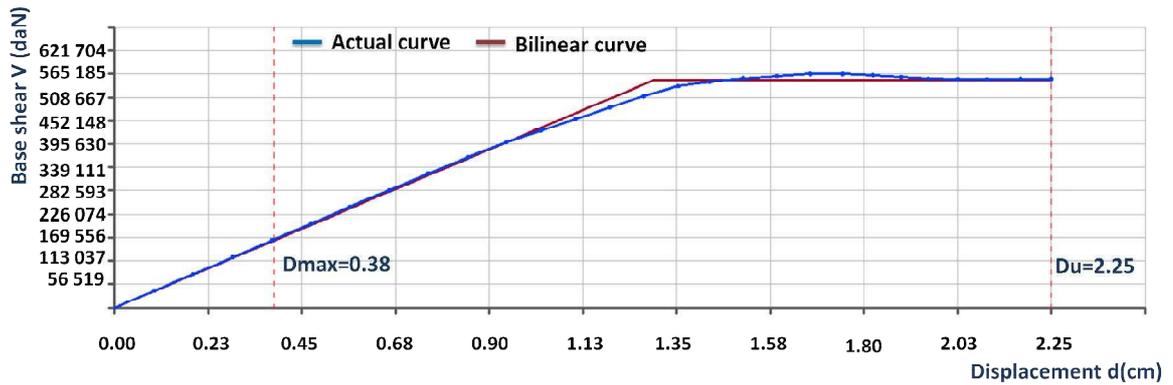


La courbe Pushover direction Y-Y

– Bloc 2



La courbe Pushover direction X-X



La courbe Pushover direction Y-Y

Figure 6. 11: Courbe Pushover de bâtiment R, dans les directions principales (X et Y) avec le logiciel TreMuri.

Après la création du modèle et l'exécution du calcul, il est possible de définir les états de détérioration de chaque élément structural pour chaque mur comme indiqué ci-dessous. Ainsi, avoir une indication des éléments endommagés, qui permet de prendre les prévisions nécessaires lors d'intervention.

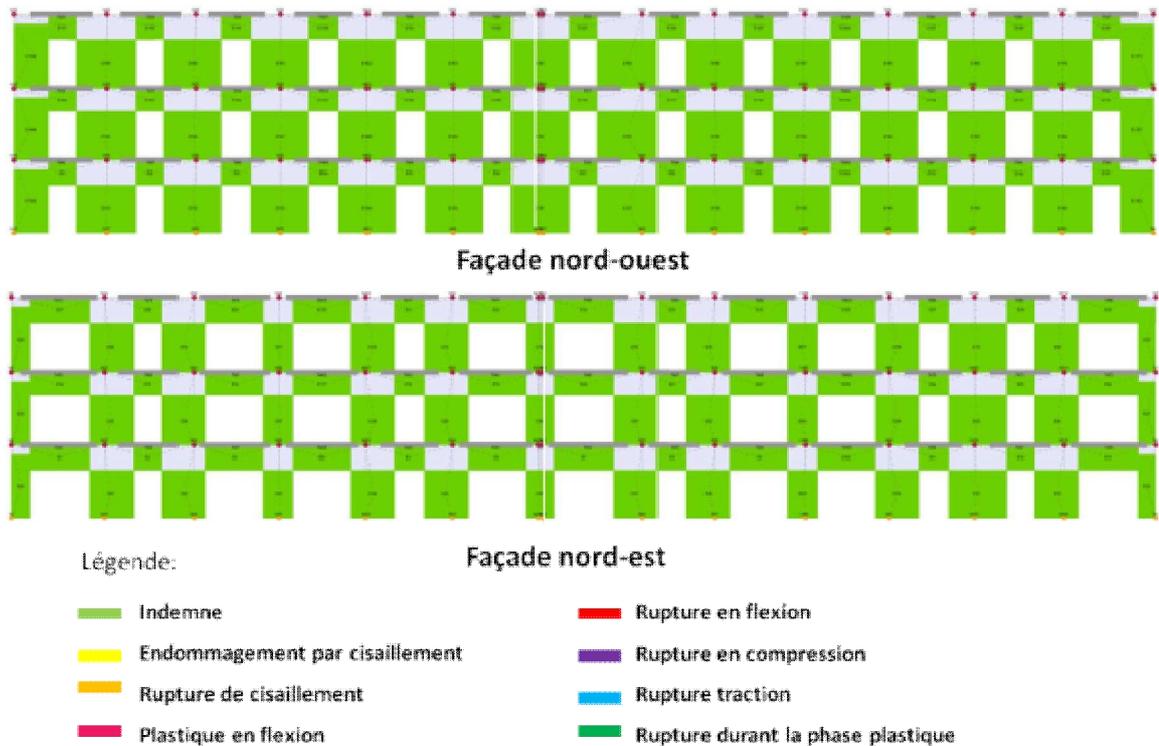


Figure 6. 12. Les résultats de l'analyse avec TreMuri

Les éléments du mur changent de couleur en fonction du niveau de dégradation de chaque élément. Les différentes couleurs présentées dans la légende indiquent l'état dans lequel se trouve chaque élément : indemne ou endommagé. Ces couleurs indiquent également les causes des dommages structurels (cisaillement, flambage).

Dans la figure 6. 12, la couleur verte désigne que la structure est en bon état (indemne).

- Déplacements de la structure

Le tableau 6.2 montre les valeurs de déplacement pour chaque modèle. La condition du code exige que D_{max} soit inférieur ou égal à D_u . Alors, après avoir vérifié les deux valeurs, on peut conclure que le bloc 1 et le bloc 2 satisfont tous deux cette condition selon les axes X et Y.

La condition $D_{max} < D_u$ est vérifiée pour les deux directions.

$$D_{max-x} = 0,13 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 2,84 \text{ cm} \text{ et } D_{max-y} = 0,08 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 0,95 \text{ cm} \text{ (bloc 1).}$$

$$D_{max-x} = 0,11 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 2,04 \text{ cm} \text{ et } D_{max-y} = 0,10 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 1,62 \text{ cm} \text{ (bloc 2).}$$

Avec : D_{max} : Déplacement maximal requis par la réglementation.

D_u : Déplacement assuré par la structure.

D'après l'analyse du tableau 6.2, on peut noter que les valeurs des déplacements D_{max} et D_u sont proches pour les deux blocs 1 et 2.

Tableau 6. 2: Valeurs de D_{max} et D_u pour les blocs 1 et 2.

	$D_{max}(\text{cm})$		$D_u (\text{cm})$	
	X	Y	X	Y
Bloc 1	0,13	0,08	2.84	0,95
Bloc 2	0,11	0,10	2.04	1,62

- Résultats et discussion

L'analyse du spectre de réponse dynamique linéaire et statique non linéaire a permis d'avoir une vue globale du comportement structurel et d'évaluer les

éléments les plus sensibles de la structure. Après avoir évalué la différence de déplacement entre les différents niveaux, selon le code algérien, il a été conclu que le bâtiment R composé de deux blocs 1 et 2 est bien conçu pour résister aux tremblements de terre.

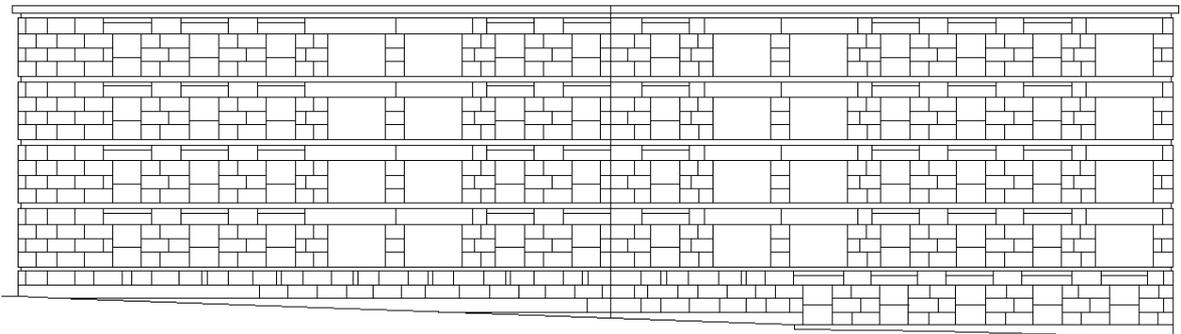
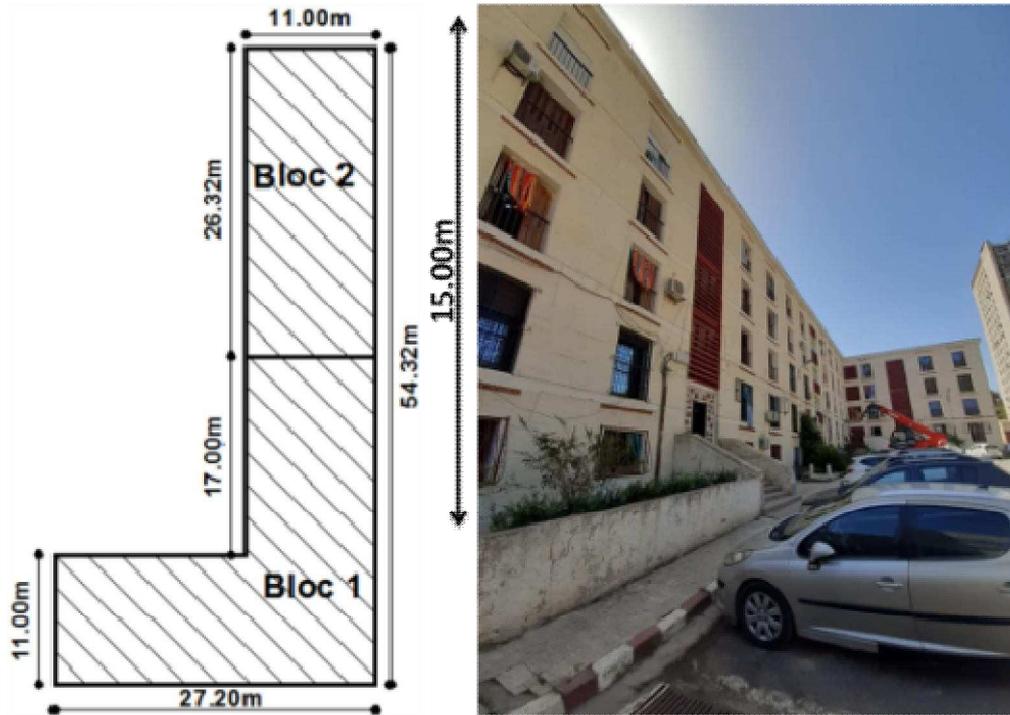
Ensuite, l'étude est suivie d'une analyse statique non linéaire afin de visualiser les déformations dans les murs en maçonnerie. Les résultats de la distribution des dommages de l'ensemble du bâtiment sont représentés par des couleurs différentes, mettant en évidence la progression des dommages dans les différents macro-éléments. Dans l'analyse de bâtiment R, on peut voir que les murs restent intacts et n'ont subi aucun dommage. Par conséquent, sur la base des résultats de l'analyse, il est conclu que le comportement de l'ensemble de la structure répond aux recommandations sismiques exigées par la réglementation.

Concernant les résultats de la vérification de la conformité de la largeur de joint entre les deux blocs, on a constaté que la largeur est insuffisante comparé à celle exigé par la réglementation[90]. Donc, la condition n'est pas satisfaite pour le bâtiment R, mais après le calcul de la largeur de joint conforme de bâtiment il s'est avéré que la largeur spécifique calculé est inférieur à celle fixée par RPA99/2003. Cependant, la largeur de joint existante est suffisante par rapport aux déplacements de la structure.

5. Bâtiment E

5. 1. Description géométrique et structurelle

Le bâtiment E présente une forme L en plan et régulière en élévation, sans décrochement. Il est composé de deux blocs adjacents séparés par un joint. Les deux blocs occupent une surface au sol de 775,72 m² ($S_{\text{Bloc 1}}=481,20 \text{ m}^2$ et $S_{\text{Bloc 2}}=289,52 \text{ m}^2$). Les dimensions du bloc sont de 54,32 m de longueur, 11,00 m de largeur pour 15 m de hauteur (Figure 6.13), comme le montrent le plan et l'élévation ci-dessous.



Façade sud-est

Figure 6. 13: Configuration en plan, en élévation et vue d'ensemble de bâtiment E.

L'immeuble abrite au total 31 logements répartis comme suit :

- Bloc 1 : 17 logements de type F2 et F3.
- Bloc 2 : 14 logements de type F2 et F3.

5.2. Caractéristiques des fondations de la structure

Les fondations de bâtiment E sont des semelles filantes en béton armé (Figure 6.14), qui fait office de relais entre la structure et le sol, et servent à répartir les charges sur une plus grande surface afin que la construction ne s'enfonce pas dans le sol. Chaque semelle a une taille spécifique selon les épaisseurs des murs en maçonnerie.

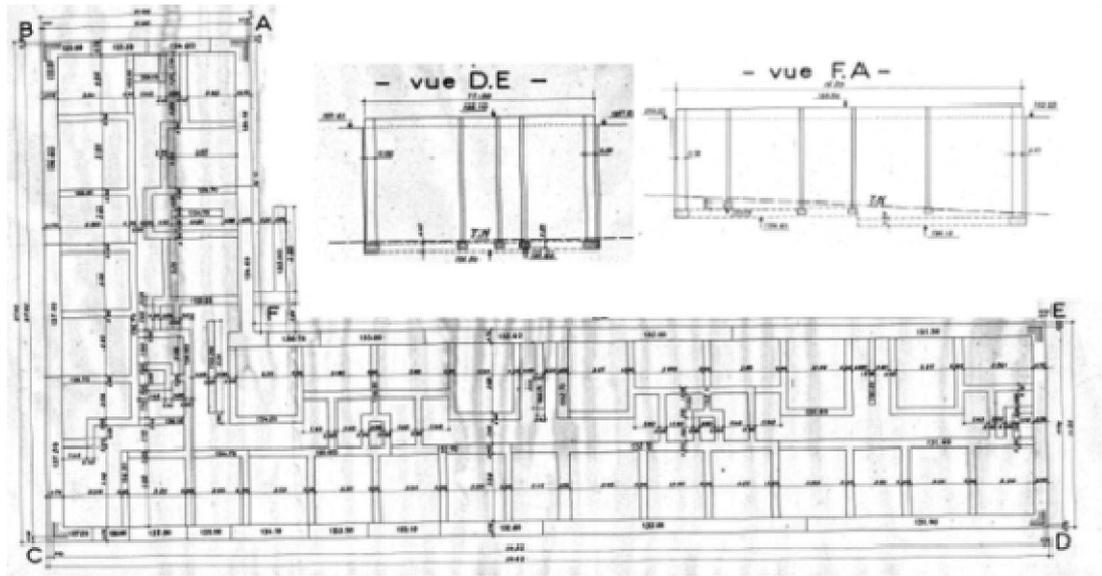


Figure 6. 14: Vue en plan et en coupe des fondations bâtiment E [19].

5.3. Caractéristiques des murs porteurs

Le bâtiment E a une forme rectangulaire en L composé d'immeubles d'habitation et commerce de cinq niveaux (R+3). Chaque étage est composé de murs extérieurs porteurs en maçonnerie : murs en pierre de Fontvieille de 40 cm d'épaisseur dans les deux directions X et Y, et cloison en brique spéciale Pouillon appareillées verticalement de 15cm [36] (Figure 6.15). Tous les bâtiments de Diar es Saada sont en maçonnerie avec les mêmes matériaux de construction.

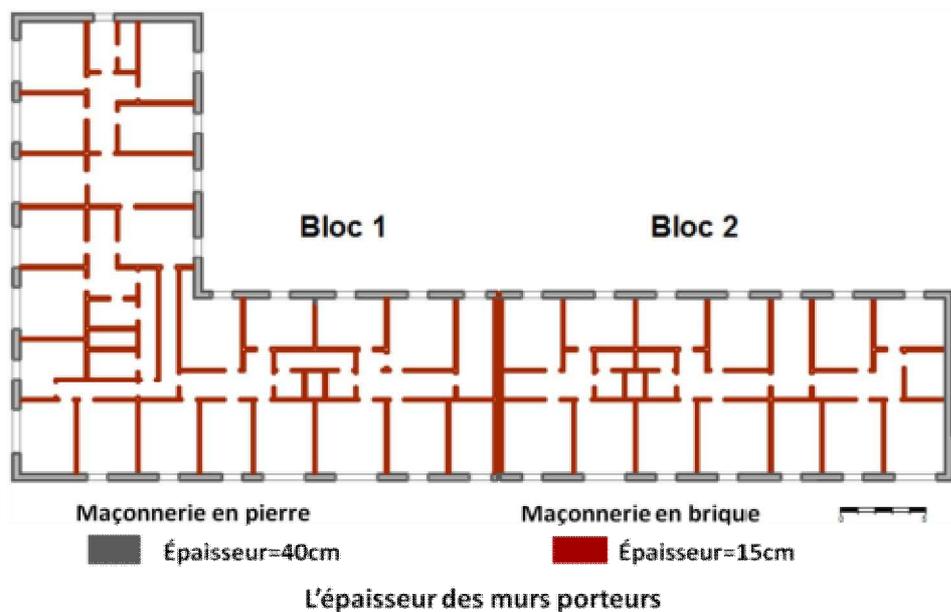


Figure 6. 15: Les systèmes constructifs de bâtiment E.

5.4. Modélisation numérique

5.4.1. Analyse dynamique linéaire

- Détermination de l'action sismique selon le code RPA99/2003

Dans cette étude, pour le calcul de la force latérale de conception ou l'effort tranchant à la base de conception, nous utilisons la méthode du spectre de réponse (méthode d'analyse modale spectrale)[150].

Conformément au RPA99/2003[90], le spectre de calcul représentant l'action sismique est représenté comme suit :

$$Sa/g \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1} (2,5\eta \frac{Q}{R} - 1)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right)^{2/3} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3,0s \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) & T \geq 3,0s \end{cases}$$

Où :

Sa : accélération spectrale

g : Accélération de la pesanteur

A : Coefficient d'accélération de zone

η : Coefficient de correction d'amortissement

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique donné par le tableau 4.2 (RPA99/2003)

Q : Facteur de qualité

T1, T2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site

R : Coefficient de comportement de la structure

- Résultante de la période fondamentale de la structure

Conformément à la réglementation parasismique algérienne, Les valeurs de T , calculées à partir des formules de Rayleigh ou de méthodes numériques ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30%.

$$T_{RPA} = C_T h_N^{3/4}$$

$$T_{RPA} = 0,05 \times 15^{3/4} = 0.381 \text{ s (code RPA99/2003)}$$

Pour les trois directions principales de la structure, les valeurs des périodes fondamentales calculées par le logiciel SAP 2000[9] sont (Figure 6.16):

Bloc 1 :

$T_1 = 0.158 \text{ s}$; $F = 6.325 \text{ Hz}$ pour la 1ère période

$T_2 = 0.140 \text{ s}$; $F = 7.109 \text{ Hz}$ pour la 2ème période

$T_3 = 0.120 \text{ s}$; $F = 8.291 \text{ Hz}$ pour la 3ème période

Bloc 2 :

$T_1 = 0.192 \text{ s}$; $F = 5.185 \text{ Hz}$ pour la 1ère période

$T_2 = 0.167 \text{ s}$; $F = 5.957 \text{ Hz}$ pour la 2ème période

$T_3 = 0.137 \text{ s}$; $F = 7.293 \text{ Hz}$ pour la 3ème période



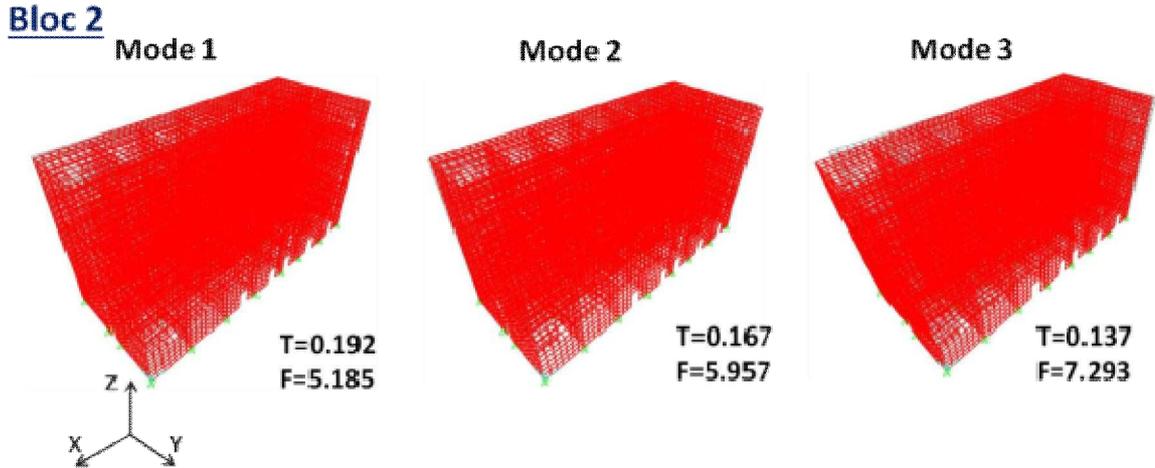


Figure 6. 16: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment E (bloc 1 et 2).

Les deux premiers modes sont des modes de translation, et le troisième mode est un mode de torsion (Figure 6.16). Selon la formule empirique du code algérien[90], ces périodes ne doivent pas dépasser la période fondamentale de la structure T_{RPA} augmentée de 30 %. Les résultats obtenus par le logiciel et la formule empirique pour les deux blocs montrent que la condition imposée par le code algérien est satisfaite. Les détails de la vérification des valeurs de la période fondamentale sont présentés ci-dessous :

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (0.381) = 0.336 > T_{sap}=0.158 \text{ (Bloc 1)}$$

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (0.381) = 0.336 > T_{sap}=0.192 \text{ (Bloc 2)}$$

- Vérification des déplacements de la structure

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit :

$$\delta_k = \mathbf{R} \delta_{ek}$$

δ_{ek} : déplacement dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement

L'une des vérifications préconisées par le RPA99 /V2003[90], concerne les déplacements latéraux inter- étages. En effet, selon, l'équation ci-dessous doit nécessairement être vérifiée.

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} < 1 \text{ \% de la hauteur d'étage.}$$

Dans le cas présent, cette condition est vérifiée pour tous les niveaux et pour les deux blocs 1 et 2. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant (tableau 6.3) :

Tableau 6. 3: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment E.

n	h	μ_1	μ_2	81	82	Δ_1	Δ_2	Observation
Bloc 1								
5	15	0,305	0,305	1,068	1,068	0,204	0,218	Vérifiée
4	12	0,246	0,243	0,864	0,850	0,255	0,261	Vérifiée
3	9	0,173	0,168	0,608	0,589	0,276	0,273	Vérifiée
2	6	0,094	0,090	0,331	0,316	0,208	0,191	Vérifiée
1	3	0,035	0,035	0,123	0,124	0,123	0,124	Vérifiée
Bloc 2								
5	15	0,231	0,529	0,810	1,852	0,120	0,333	Vérifiée
4	12	0,197	0,434	0,690	1,519	0,147	0,389	Vérifiée
3	9	0,155	0,322	0,543	1,129	0,169	0,402	Vérifiée
2	6	0,106	0,207	0,373	0,727	0,173	0,364	Vérifiée
1	3	0,057	0,103	0,200	0,362	0,200	0,362	Vérifiée

- Vérification du largeur des joints

Deux blocs voisins doivent être séparés par des joints sismiques dont la largeur minimale satisfait la condition suivante :

$$d_{\min} = 15_{\text{mm}} + (\delta_1 + \delta_2)_{\text{mm}} \geq 40_{\text{mm}}$$

δ_1, δ_2 : déplacements maximaux des deux blocs, calculés selon : (l'article 4.4.3 RPA99/V2003) au niveau du sommet du bloc le moins élevé incluant les composantes dues à la torsion et éventuellement celles dues à la rotation des fondations.

$$\delta_1 = 10,682 \text{ mm} ; \delta_2 = 8,106 \text{ mm}$$

La largeur de joint existant entre les deux blocs est de 20mm ($d = 20 \text{ mm}$).

$d_{\min} = 15_{\text{mm}} + (10,682 + 8,106)_{\text{mm}} \geq 40 \text{ mm}$ $33,788 < 40 \text{ mm}$ donc la condition n'est pas vérifiée.

- Calcul de la largeur de joint sismique

La réglementation parasismique exige une largeur de joint au moins égale à la somme quadratique des déplacements (racine carrée de la somme des carrés des déplacements) des planchers des blocs adjacents, selon l'équation suivante :

$$d_{\min} = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)} = \sqrt{(10,682^2 + 8,106^2)} = 13,409 \text{ mm}$$

Les résultats obtenus en appliquant les deux équations, montrent que la condition fixée par la réglementation n'est pas validée pour le bâtiment E et la largeur de joint doit être égale ou supérieur à 40 mm. Néanmoins, la largeur minimale du joint est égale à 13.409 mm, donc largement inférieur à la largeur existante entre les deux blocs 1 et 2 qui est de 20 mm.

5.4.2. Analyse statique non-linéaire

- Modélisation numérique du bloc E, de forme L dans TreMuri

Afin d'évaluer le comportement sismique sous l'action du séisme, nous avons utilisé le logiciel TreMuri pour modéliser les deux blocs de bâtiment E (Figure 6.17), en tenant compte du comportement non linéaire de tous les éléments structurels.

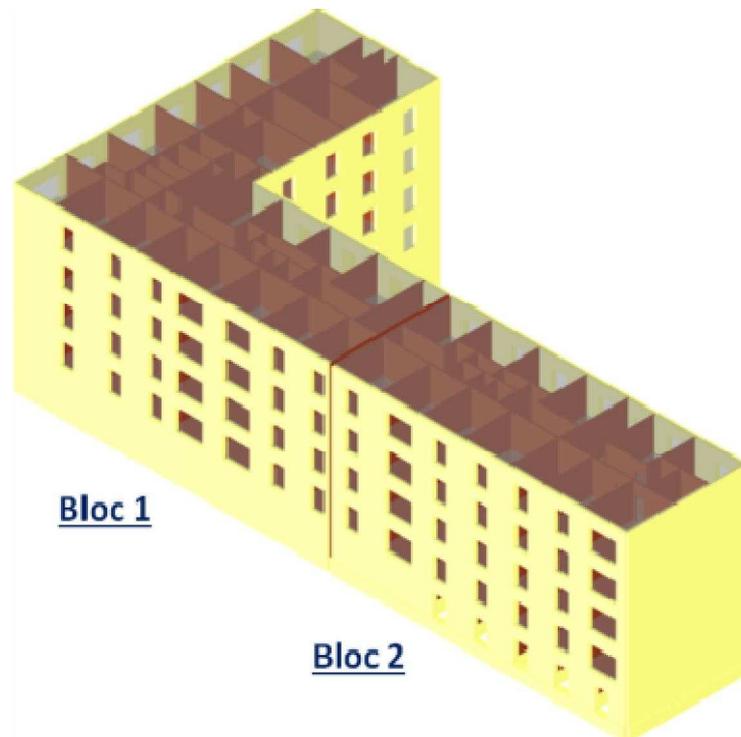


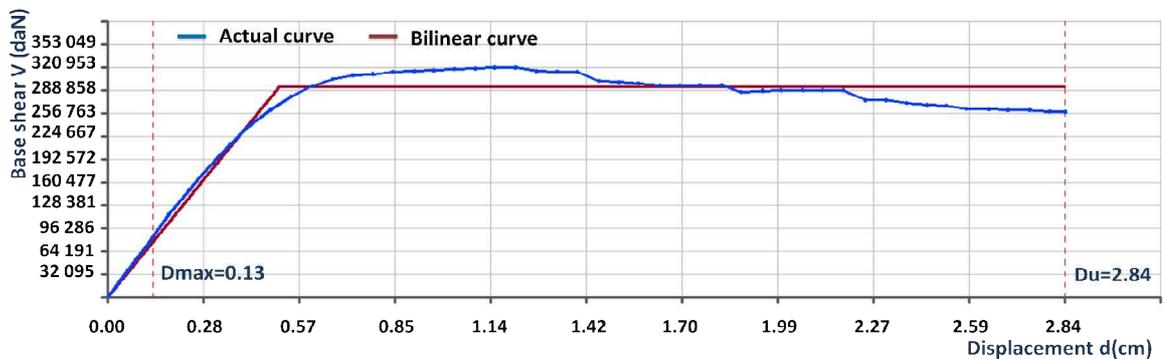
Figure 6. 17: Vue en 3D de bâtiment E modélisé par TreMuri.

TreMuri [10] est un programme italien spécifiquement conçu pour les calculs sismiques et statiques des structures existantes en maçonnerie non armée URM conformément à l'arrêté ministériel 14-1-2008 "Normes techniques pour la construction"[12], EC6, EC8, SIA. Le programme se caractérise par des méthodes de calcul innovantes.

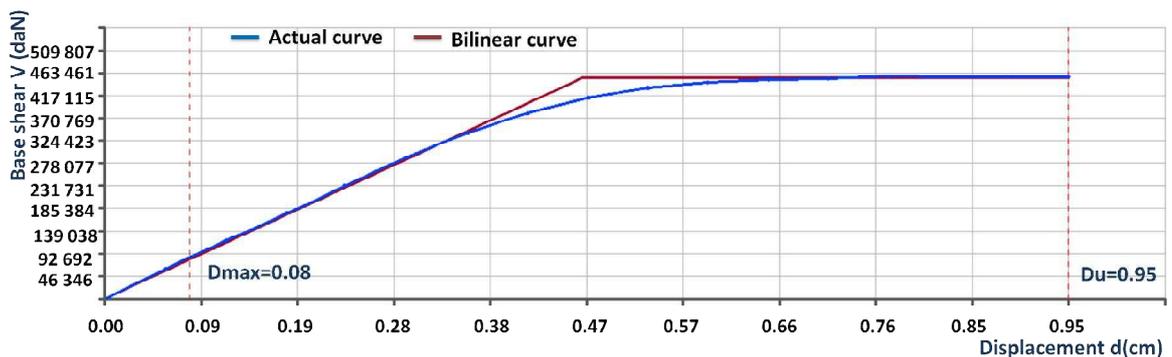
- Représentation de la courbe contrainte-déformation

La figure suivante montre la courbe pushover (actual curve) en bleu, et la courbe bilinéaire équivalente (bilinear curve) en rouge.

- Bloc 1

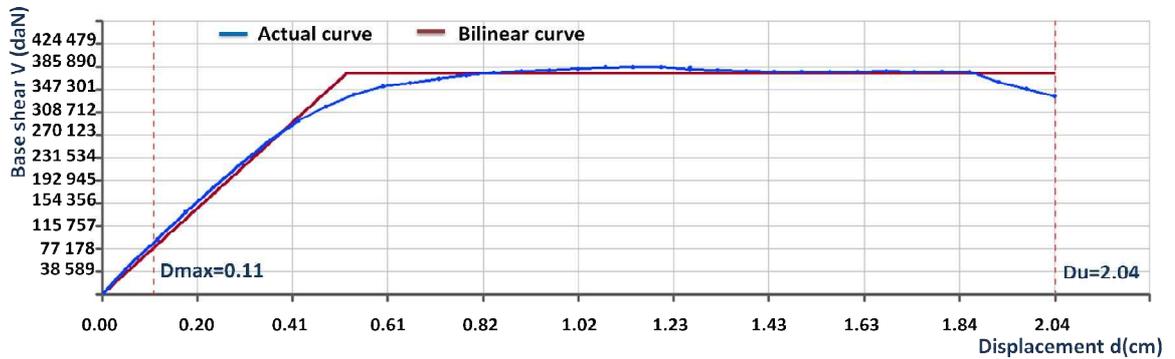


La courbe Pushover direction X-X

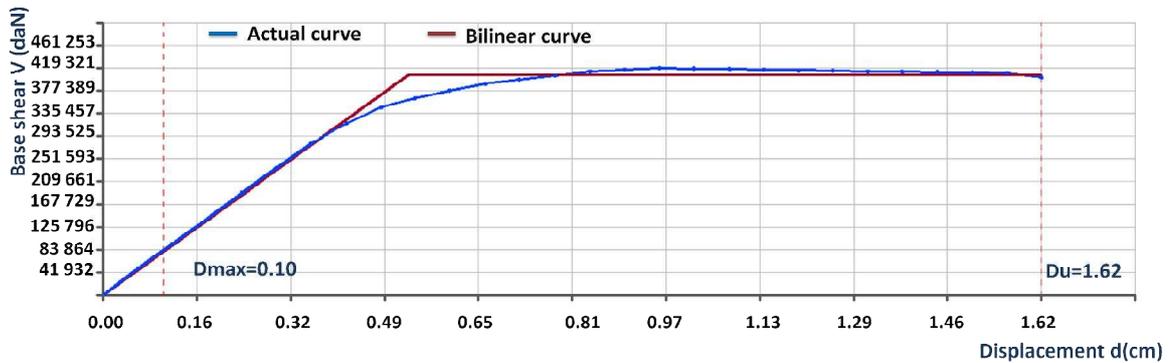


La courbe Pushover direction Y-Y

– Bloc 2



La courbe Pushover direction X-X



La courbe Pushover direction Y-Y

Figure 6. 18: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de bâtiment E avec le logiciel TreMuri.

Une fois le modèle de bâtiment E créé et les calculs effectués, l'état de dégradation de chaque élément structural est défini pour chaque mur, comme indiqué ci-dessous, afin d'identifier les zones nécessitant une mise à niveau sismique dans lesquelles il faut intervenir. Les différentes couleurs présentées dans la légende indiquent l'état de chaque mur : intact ou endommagé.

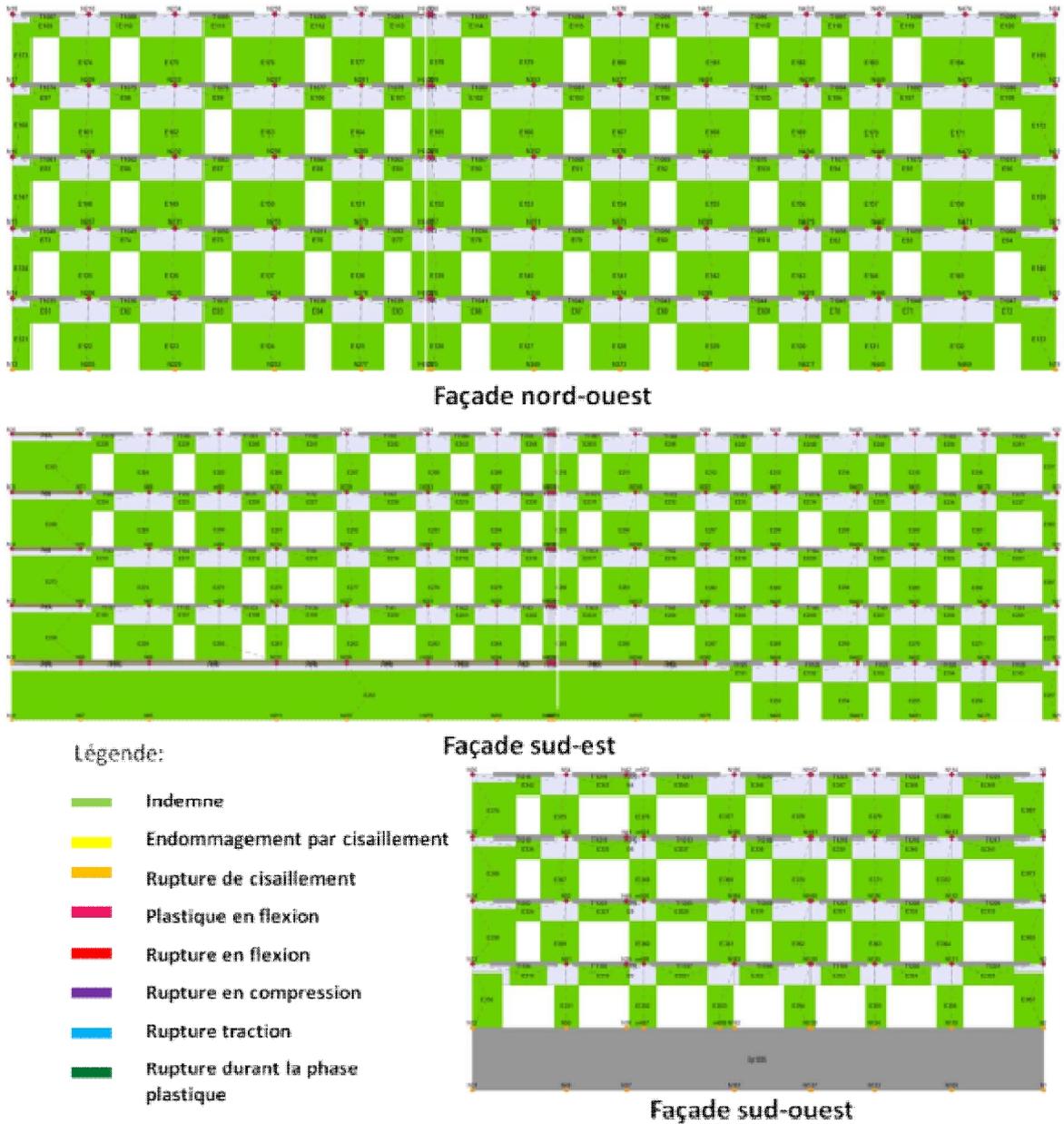


Figure 6. 19. Les résultats de l'analyse avec TreMuri.

Les éléments du mur changent de couleur en fonction du degré de dégradation de chaque élément. Il ne concerne pas seulement les éléments de mur en maçonnerie mais aussi ceux en béton armé. Ces couleurs indiquent également la cause des dommages structurels (cisaillement, flambement). Sur la figure 6.19, le vert indique que la structure est indemne.

- Déplacements de la structure

Le tableau 6.4 montre les valeurs de déplacement pour chaque modèle. La condition du code exige que D_{max} soit inférieur ou égal à D_u . Alors, après avoir

vérifié les deux valeurs, on peut conclure que le bloc 1 et le bloc 2 satisfont tous deux cette condition selon les axes X et Y.

$$D_{\max-x} = 0,19 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 1,65 \text{ cm} \text{ et } D_{\max-y} = 0,2 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 1,70 \text{ cm} \text{ (bloc 1).}$$

$$D_{\max-x} = 0,38 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 2,25 \text{ cm} \text{ et } D_{\max-y} = 0,15 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 1,69 \text{ cm} \text{ (bloc 2).}$$

Avec : D_{\max} : Déplacement maximal requis par la réglementation.

D_u : Déplacement assuré par la structure.

La condition $D_{\max} < D_u$ est vérifiée pour les deux directions dans les deux blocs.

D'après les résultats du tableau 6.4, on peut noter que les valeurs des déplacements D_{\max} et D_u sont proches pour les deux blocs 1 et 2.

Tableau 6. 4: Valeurs de D_{\max} et D_u pour les blocs 1 et 2.

	$D_{\max}(\text{cm})$		$D_u (\text{cm})$	
	X	Y	X	Y
Bloc 1	0,19	0,20	1,65	1,70
Bloc 2	0,38	0,15	2,25	1,69

- Résultats et discussion

Les résultats des deux analyses (dynamique linéaire et statique non linéaire) ont permis d'évaluer les éléments les plus sensibles de la structure, ainsi d'avoir une vue globale du comportement structurel. Après avoir évalué la différence de déplacement entre les différents niveaux, selon le code algérien, il a été conclu que le bâtiment E composé de deux bloc 1 et 2 perpendiculaire entre eux, formant un L est bien conçu pour résister aux tremblements de terre.

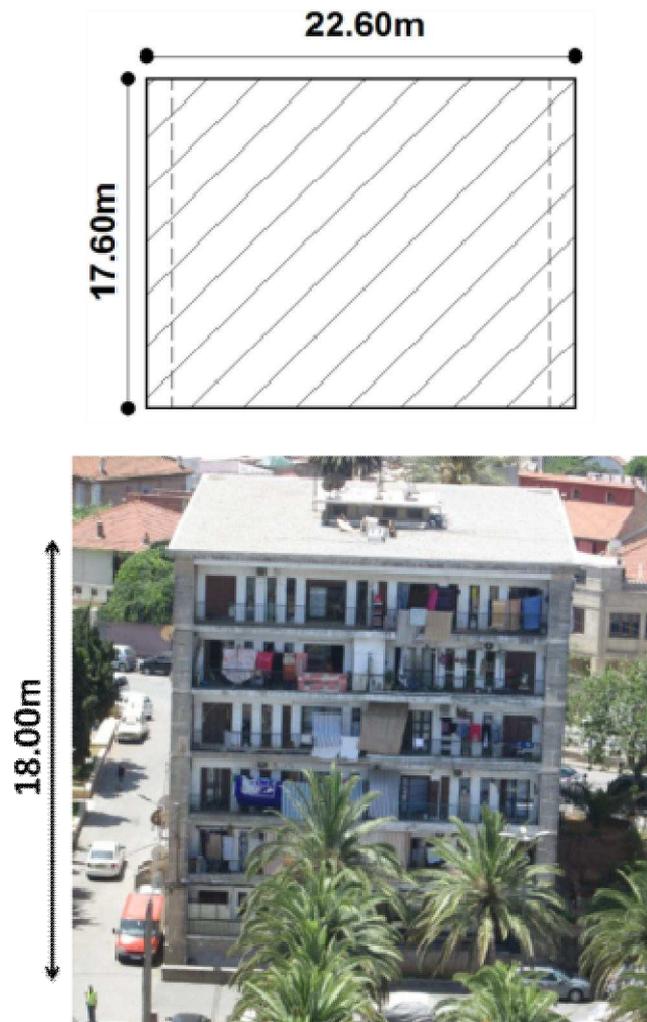
Une analyse statique non linéaire a été réalisée, par la suite, afin d'évaluer la déformation des murs en maçonnerie. Les résultats de la répartition des dommages de chaque mur sont représentés par différentes couleurs. Il ressort de l'analyse du bâtiment E que ces murs sont intacts. Par conséquent, sur la base des résultats de l'analyse, il peut être conclu que le comportement de l'ensemble de la structure est conforme aux recommandations sismiques requises par le règlement parasismique.

La vérification de la conformité de la largeur de joint entre les blocs 1 et 2 a démontrée que le joint de 20mm[38, 39, 160] est donc adapté d'un point de vue sismique pour éviter le risque de martèlement car sa largeur est supérieure à celle calculée (14 mm), mais reste non conforme à la réglementation RPA99/2003[90].

6. Bâtiment L

6. 1. Description géométrique et structurelle

Le bâtiment L présente une forme rectangulaire régulière en plan, avec un décrochement en élévation sous forme de loggia sur les cinq niveaux. Il se compose d'un seul bloc isolé et couvre une superficie de 352,00 m². Les dimensions du bloc sont de 22,60 m de longueur, 17,60 m de largeur et 18 m de hauteur comme le montrent les vues en plan et en élévation ci-dessous (Figure 6.20). Le bâtiment dispose d'un total de 24 logements (04 logements par palier).



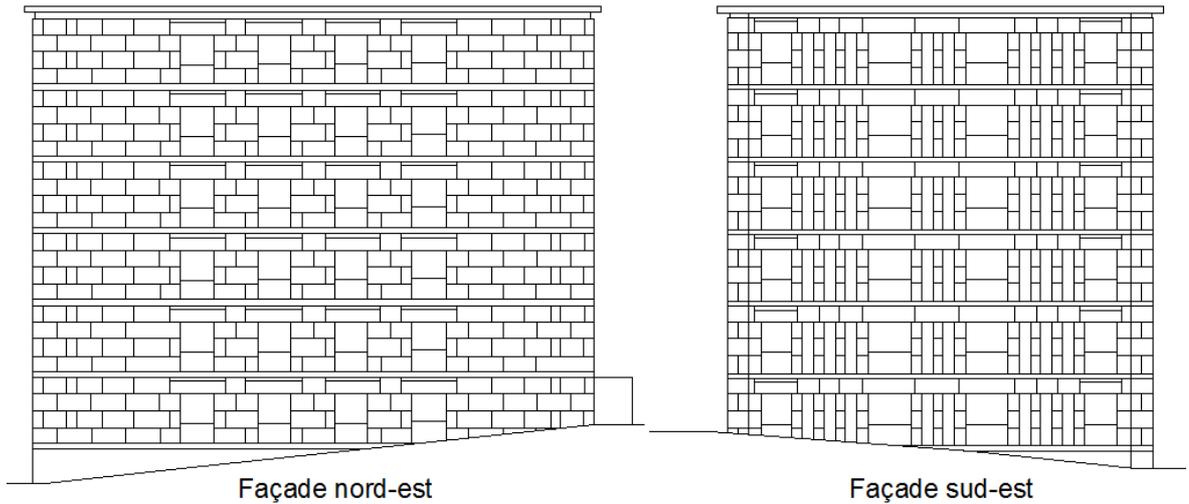


Figure 6. 20: Configuration en plan et vue d'ensemble de bâtiment L.

6.2. Caractéristiques des fondations de la structure

Comme la plupart des immeubles de la cité Diar es Saada, les fondations des murs porteurs du bâtiment L est aussi constituée de fondation superficielle, des semelles filantes en béton armé (Figure 6.21). Chaque semelle a une épaisseur spécifique selon les dimensions des murs. Les fondations reposent sur un sol défini comme un sol meuble (catégorie S3) selon le code RPA[90].

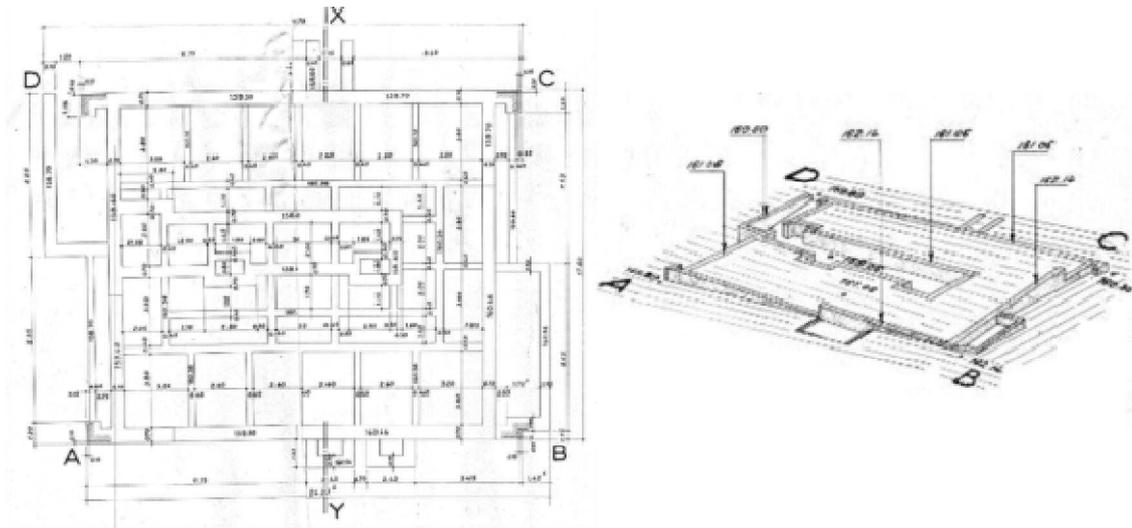


Figure 6. 21: Vue en plan et la 3D des fondations bâtiment L [19].

6.3. Caractéristiques des murs porteurs

Le bâtiment L a une forme rectangulaire, composé de logements d'habitation répartie sur six niveaux (R+5). Chaque étage est composé de murs extérieurs

porteurs en maçonnerie : murs en pierre de Fontvieille de 40 cm d'épaisseur dans les deux directions X et Y, et cloison en brique spéciale Pouillon appareillée debout de 15 cm [36, 107] (Figure 6.22). Tous les bâtiments de Diar es Saada sont en maçonnerie et ont les mêmes systèmes constructifs.

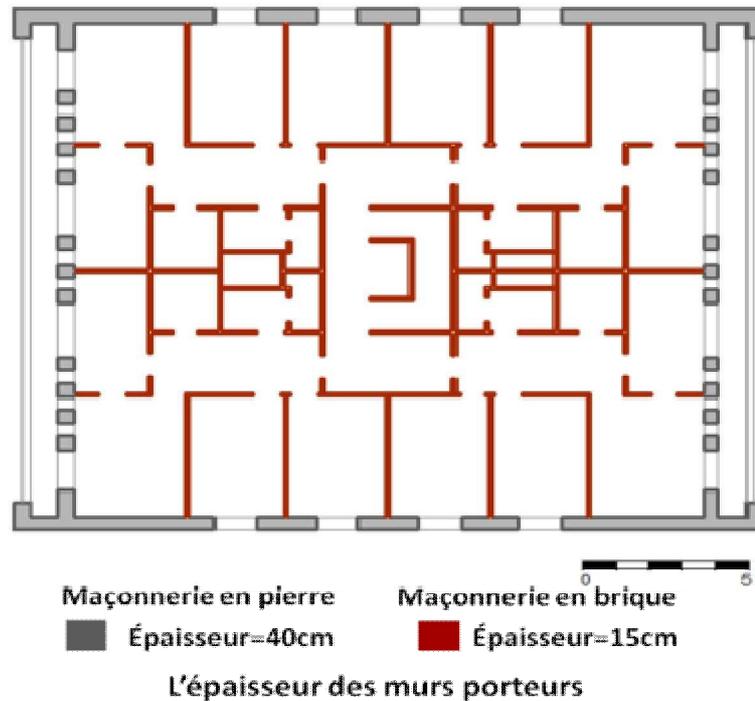


Figure 6. 22: Les systèmes constructifs de bâtiment L.

6.4. Modélisation numérique

6.4.1. Analyse dynamique linéaire

- Détermination de l'action sismique selon le code RPA99/2003

Dans cette étude, pour le calcul de la force latérale de conception ou l'effort tranchant à la base de conception, nous utilisons la méthode du spectre de réponse (méthode d'analyse modale spectrale)[9, 149].

Conformément au RPA99/2003[90], le spectre de calcul représentant l'action sismique est représenté comme suit :

$$Sa/g \begin{cases} 1,25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right)^{2/3} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{Q}{R}\right) \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3,0s \\ 2,5\eta (1,25A) \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R}\right) & T \geq 3,0s \end{cases}$$

Où :

S_a : Accélération spectrale

g : Accélération de la pesanteur

A : Coefficient d'accélération de zone

η : Coefficient de correction d'amortissement

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$$

ξ : Pourcentage d'amortissement critique donné par le tableau 4.2 (RPA99/2003)

Q : Facteur de qualité

T_1, T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site

R : Coefficient de comportement de la structure

- Résultante de la période fondamentale de la structure

Conformément à la réglementation parasismique algérienne, la valeur de T la période fondamentale de la structure, calculée à partir des formules de Rayleigh « T_{rap} » ou de méthodes numériques « T_{sap} » ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30%. $T_{sap} < 30\% T_{rpa}$.

$$T_{RPA} = C_T h_N^{3/4}$$

$$T_{RPA} = 0,05 \times 18^{3/4} = 0.234 \text{ s (code RPA)}$$

Pour les trois directions principales de la structure, les valeurs des périodes fondamentales calculées par le logiciel SAP 2000[55] sont (Figure 6.23) :

$T_1 = 0.234\text{s}$; $F = 4.260\text{Hz}$ pour la 1ère période

$T_2 = 0.231\text{s}$; $F = 4.317\text{Hz}$ pour la 2ème période

$T_3 = 0.224\text{s}$; $F = 4.462\text{Hz}$ pour la 3ème période.

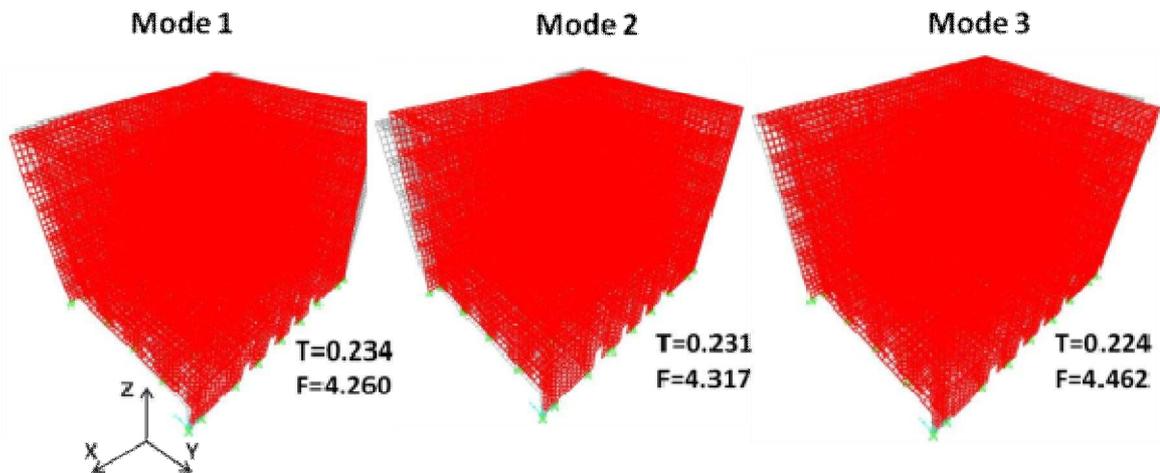


Figure 6. 23: Les modes et fréquences associées en Hz pour les trois premiers modes de bâtiment L.

Les deux premiers modes sont des modes de translation, et le troisième mode est un mode de torsion (Figure 6.23). Selon la formule empirique du code algérien, ces périodes ne doivent pas dépasser la période fondamentale de la structure T_{RPA} augmentée de 30 %. Les résultats obtenus par le logiciel et la formule empirique pour le bâtiment montrent que la condition imposée par le code algérien est satisfaite. Les détails de la vérification des valeurs de la période fondamentale sont présentés ci-dessous :

$$1.3T_{rpa} = 1.3 (0.234) = 0.336 > T_{sap} = 0.234$$

- Vérification des déplacements de la structure

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit : $\delta_k = R \delta_{ek}$

δ_{ek} : déplacement dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement

Selon le code RPA (article 4.43), la valeur Δk (le déplacement relatif entre les niveaux successifs (k et $k-1$)) ne doit pas dépasser 1% de la hauteur du plancher. Dans le cas présent, cette condition est vérifiée pour tous les niveaux (tableau 6.5). Les principaux résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 6. 5: Les résultats des déplacements structurels de bâtiment L.

n	h	$\mu 1$	$\mu 2$	81	82	$\Delta 1$	$\Delta 2$	Observation
6	18	0,569	0,538	1,992	1,886	0,255	0,269	Vérifiée
5	15	0,496	0,462	1,737	1,617	0,303	0,306	Vérifiée
4	12	0,4098	0,374	1,434	1,310	0,337	0,325	Vérifiée
3	9	0,313	0,281	1,096	0,984	0,353	0,329	Vérifiée
2	6	0,212	0,187	0,743	0,654	0,351	0,315	Vérifiée
1	3	0,111	0,097	0,391	0,339	0,391	0,339	Vérifiée

6.4.2. Analyse statique non-linéaire

- Modélisation numérique du bâtiment L, de forme rectangulaire dans TreMuri

Afin d'évaluer le comportement sismique sous l'action du séisme, nous avons utilisé le logiciel TreMuri[10, 154] pour modéliser le bâtiment L (Figure 6. 24), en tenant compte du comportement non linéaire de tous les éléments structurels.

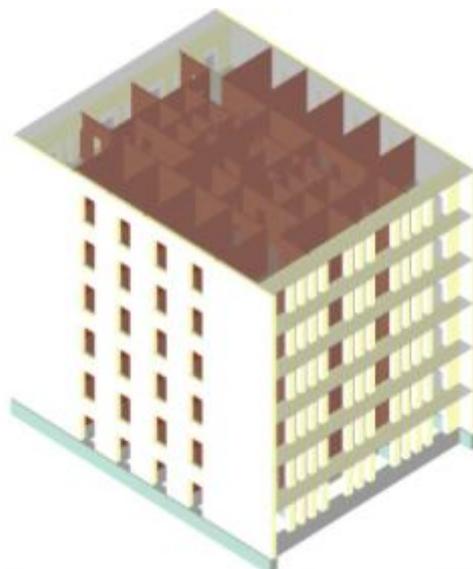
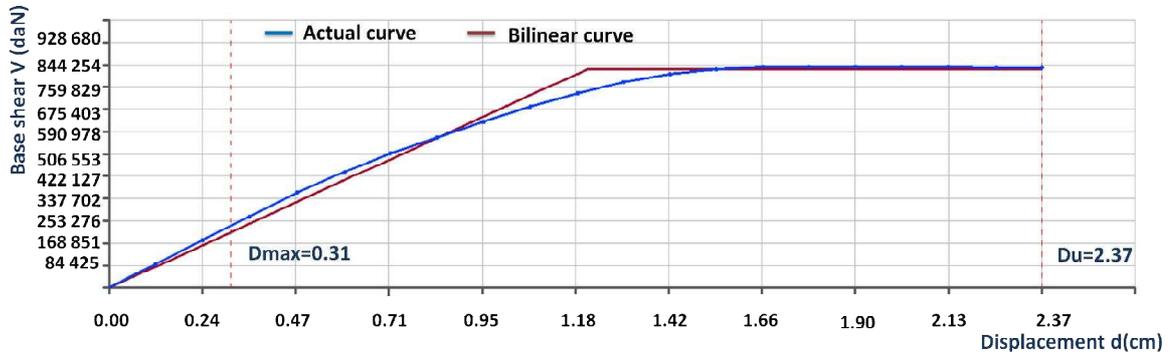


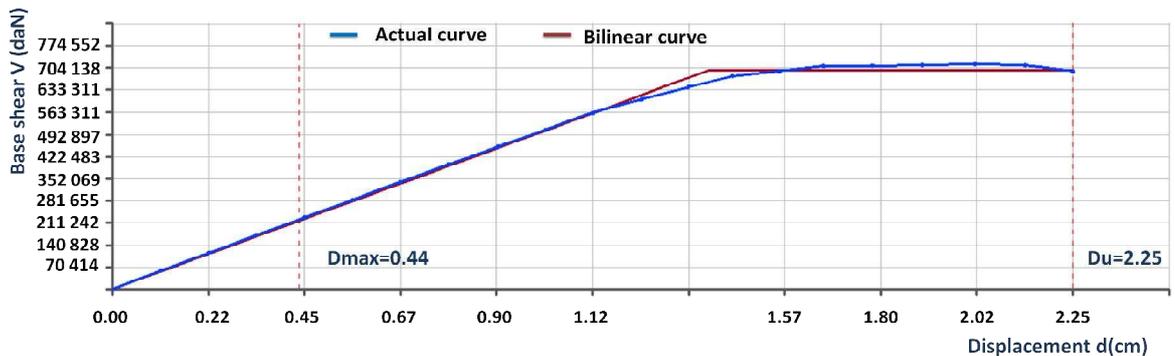
Figure 6. 24: Vue en 3D de bâtiment L modélisé par TreMuri.

- Représentation de la courbe contrainte-déformation

La figure suivante montre la courbe pushover (actual curve) en bleu, et la courbe bilinéaire équivalente (bilinear curve) en rouge (Figure 6.25).



La courbe Pushover direction X-X



La courbe Pushover direction Y-Y

Figure 6. 25: Courbe Pushover dans les directions principales (X et Y) de bâtiment R avec le logiciel TreMuri[11].

La modélisation numérique de la structure globale de bâtiment L a permis de déterminer les états de détérioration de chaque paroi, et d'indiquer les éléments endommagés pour entreprendre les interventions nécessaires. Elle a également permis d'évaluer l'endommagement de la structure, en distinguant s'il entre dans le champ plastique par cisaillement ou par flexion.

Différentes couleurs mettent en évidence la progression des dommages dans les différents éléments structurels. En observant les nuances de couleur présentes dans la légende de la paroi déformée, il est possible de déterminer les zones endommagées et la cause des dommages.

Comme la montre la figure ci-dessous, la structure de bâtiment L ne présente aucun risque d'endommagement.

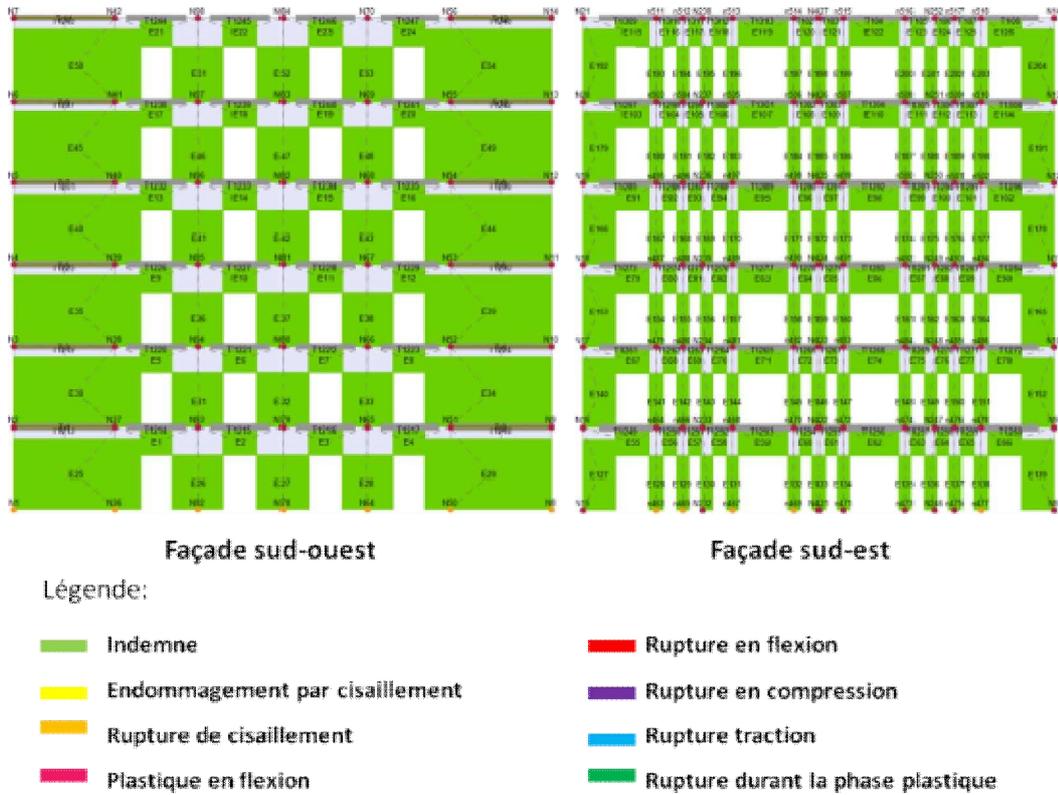


Figure 6. 26. Les résultats de l'analyse avec TreMuri.

- Déplacements de la structure

Le tableau suivant montre les valeurs de déplacement pour chaque modèle. La condition du code exige que D_{max} soit inférieur ou égal à D_u . Alors, après avoir vérifié les deux valeurs, on peut conclure que le bâtiment L satisfait cette condition selon les axes X et Y.

$$D_{max-x} = 0,31 \text{ cm} \leq D_{u-x} = 2.37 \text{ cm} \text{ et } D_{max-y} = 0,44 \text{ cm} \leq D_{u-y} = 2.25 \text{ cm.}$$

Avec : D_{max} : Déplacement maximal requis par la réglementation.

D_u : Déplacement assuré par la structure.

La condition $D_{max} < D_u$ est vérifiée pour les deux directions dans les deux blocs.

D'après l'analyse du tableau 6.6, on peut noter que les valeurs des déplacements D_{max} et D_u sont proches.

Tableau 6. 6: Valeurs de D_{max} et D_u pour le bâtiment L.

$D_{max}(cm)$		$D_u (cm)$	
X	Y	X	Y
0,31	0.44	2.37	2.25

- Résultats et discussion

A partir de l'analyse et l'interprétation des résultats de la vérification de comportement sismique de bâtiment L, obtenus à partir des deux méthodes d'analyses (dynamique linéaire et statique non linéaire), on peut conclure que la structure répond aux normes parasismiques exigées par la réglementation parasismique algérienne et elle est bien conçue pour résister aux tremblements de terre. En effet, les valeurs des déplacements inter étages entre les différents niveaux satisfont les conditions de RPA99/2003[90].

7. Résultats et discussion de l'analyse des bâtiments R, E et L

Les bâtiments objet de la présente étude constituent un exemple représentatif de chaque typologie. Ils ont été sélectionnés sur la base de certaines particularités de forme, d'élévation et de disposition. Chacun des bâtiments choisis à une valeur représentative d'une typologie de bâtiment

Il est bien connu que le comportement sismique d'une structure est fortement lié à sa géométrie et à la distribution des masses, en particulier les structures régulières et symétriques, tant en plan qu'en hauteur, ont une réponse aux événements sismiques certainement meilleure que les structures avec une distribution non régulière, ce qui justifié les résultats obtenus dans cette étude.

Suite aux analyses effectuées pour chacun des bâtiments analysés, une comparaison a été faite entre les différentes hauteurs (D, R, E, L) de chacun d'entre eux ; en se référant aux données obtenues à partir des analyses effectuées avec le logiciel TreMuri (méthode statique non linéaire) et Sap 2000 (méthode dynamique linéaire), on peut constater que la valeur des déplacements est plus importante dans le bâtiment tour D (Super HIGH rise), puis le bâtiment L (HIGH rise), le bâtiment E (MID rise), et enfin le bâtiment R (Low rise).

Généralement, lorsqu'on effectue une comparaison du comportement sismique entre deux structures, les deux doivent avoir les mêmes dimensions pour

faire ce genre de conclusion, deux structures identiques avec un seul paramètre différent). Les cas d'étude analysés présentent les mêmes caractéristiques structurelles avec des configurations différentes.

Effectivement, on peut conclure que la hauteur de bâtiments est un paramètre qui influe grandement sur le comportement sismique. La réponse aux événements sismiques de bâtiment R à faible hauteur (Low rise) est certainement meilleure que celle des autres bâtiments de grande hauteur.

Les conditions fixées par le règlement parasismique algérien RPA99/2003 sont vérifiées pour tous les blocs composant chaque bâtiment. Concernant la largeur des joints des bâtiments R et E. Ces derniers, étant construits avant l'apparition des recommandations parasismique AS54, les joints sont calculés en tenant en compte des effets des variations de la température pour les éléments compris entre les deux joints dans les bâtiments de grande longueur. Il s'agit alors d'un joint de dilatation.

Dans la plupart des immeubles de la période coloniale, on se retrouve avec des joints de dilatation traditionnels de 02 cm. De nos jours, la réglementation exige une mise à niveau sismique pour les bâtiments qui ont une faible largeur de joint entre les blocs. La largeur des joints des immeubles de Pouillon est de 02cm, donc inférieur à la valeur minimale fixée par l'RPA99/2003.

8. Conclusion

L'objectif principal de l'analyse était d'évaluer la vulnérabilité sismique et mettre en évidence les performances et le comportement sismique favorable des ensembles de Diar es Saada. Dans ce chapitre, en plus de la typologie tour, trois autres immeubles types ont été également examinés. Le choix des bâtiments repose sur certains critères principalement liés à la forme, la géométrie, la disposition des joints sismiques, et surtout, la hauteur des blocs qui composent chaque bâtiment. Chaque cas d'étude représente une typologie spécifique (LOW rise, MID rise, HIGH rise et Super HIGH rise) dans le but d'avoir une vision globale autour de l'architecture parasismique de Fernand Pouillon.

L'analyse sismique de chaque bâtiment à l'aide des logiciels de modélisation SAP2000 et TreMuri permet de vérifier si la structure répond aux conditions

requis par le code sismique algérien RPA99/2003. Ainsi, répondre à notre problématique de départ, qui est peut-on qualifier l'architecture des grands ensembles de Fernand Pouillon à Alger de parasismique ?

Les calculs sismiques de chaque structure (bâtiments R, E et L) ont à nouveau confirmé les résultats de l'analyse sismique détaillée de la tour (Chapitre 05). A travers l'évaluation sismique de différentes configurations, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le choix convenable de configuration en plan et en élévation, telle que la géométrie globale de bâtiments joue un rôle important dans le comportement parasismique de la structure. A titre d'exemple, en se référant aux données obtenues à partir des analyses effectuées, les déplacements relatifs de la structure de l'immeuble tour (bâtiment D) sont supérieurs comparés aux autres configurations, et cela est essentiellement dû au gabarit et la hauteur importante de la tour.
- La réponse sismique est meilleure ou pire indépendamment des caractéristiques mécaniques des matériaux, ce qui signifie qu'à caractéristiques mécaniques égales, les structures régulières et symétriques ont un bien meilleur comportement dynamique. Les matériaux et systèmes constructifs employés dans la modélisation des bâtiments R, E, L et D ont les mêmes caractéristiques, mais d'autres paramètres font en sorte que les quatre structures n'ont pas le même comportement sismique.
- En ce qui concerne la réglementation parasismique algérienne, comme cela a déjà été souligné dans le chapitre 05, la maçonnerie non armée URM n'est pas autorisée dans les zones à forte sismicité telle que la ville d'Alger, ce qui rend la tâche de vérification plus complexe. Citons à titre d'exemples, la condition de calcul de la largeur de joint sismique est la même pour tous les types de structure maçonnerie ou en béton armé.
- Comme le montrent les résultats de modélisation numérique, la conception architecturale des grands ensembles Diar es Saada et Diar el Mahçoul a permis à l'architecture de Pouillon de rester debout pendant plus de 68 ans depuis son inauguration, de survivre aux différents impacts des

événements sismiques qui ont marqués la ville d'Alger, ainsi, de témoigner de l'efficacité et la résistance ces structures face aux séismes.

- Le choix minutieux des matériaux de construction, des systèmes constructifs, le bon savoir-faire, la bonne qualité d'exécution, de la disposition des immeubles, des formes simples, etc. Ces paramètres contribuent grandement à l'amélioration de la performance sismique de la structure du bâtiment.

Au final, les investigations à grande échelle menées sur le patrimoine de Pouillon ont montré que malgré les quelques altérations, est globalement préservé. Aujourd'hui, les cités d'habitation sont relativement en bon état et des réparations mineures suffisent à leur redonner leur image d'origine.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail présenté dans cette thèse s'est porté sur l'aspect parasismique des réalisations architecturales de Fernand Pouillon en Algérie, en particulier celles réalisées avant l'apparition des recommandations parasismiques AS55.

Fernand Pouillon est une figure éminente de l'architecture du XXe siècle. Son génie se traduit dans son aptitude à associer des différentes échelles. Son architecture se distingue des chapelles du mouvement moderne par la singularité et le caractère expérimental innovant. Notamment, la conception des grands ensembles d'Alger présente un grand intérêt, urbain, architectural, paysager et technique.

Dans ce travail de thèse, la recherche documentaire, le diagnostic, l'observation in-situ et la modélisation numérique à l'aide des logiciels de calculs, sont les outils de recherches employés afin d'évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments. Les caractéristiques techniques et technologiques des immeubles d'Alger (Diar es Saada et Diar el Mahçoul) ont été décrites, dans l'intention d'encadrer le contexte historique dans lequel ils ont été conçus, et d'énumérer certaines des nombreuses innovations spéciales Pouillon en particulier la brique qu'il a utilisé et qui a été homologuée par SECURITAS.

Ce travail de thèse par la participation à des événements scientifiques a donné naissance à plusieurs publications dont les principales sont la publication d'un article de rang A selon la catégorisation DGRSDT 2020 publié dans le journal « Journal of Building Engineering » et deux autres de rang B actes de proceedings publiés dans « International Journal of Conservation Science IJCS et REHABEND 2018».

Une attention particulière a été portée sur les exigences imposées par le cadre réglementaire en vigueur dans les zones sismiques, dans le contexte de l'évaluation de la sécurité des bâtiments existants, qui actuellement est davantage l'une des questions sur lesquelles de nombreuses études portent leur attention. Les différentes approches d'analyse sismique selon le règlement parasismique algérien RPA99/V2003 ont été décrites, avec quelques exemples d'application sur le patrimoine bâti, dans le contexte local.

En ce qui concerne l'étude de cas, l'analyse sismique de la structure en maçonnerie non armée de la tour Totem et des autres types de bâtiments LOW rise, MID rise, HIGH rise et Super high rise est réalisée au moyen de deux approches : dynamique linéaire et statique non-linéaire. Diverses simulations ont été réalisées pour ces différents cas d'étude, dans le but d'identifier les façades les plus affectées par la réponse sismique.

La conception parasismique est généralement perçue comme le domaine de l'ingénieur, puisque c'est lui qui analyse le comportement des structures en appliquant les règles de calcul sismique. Toutefois, il ne faut pas ignorer le fait qu'une simple application des règles parasismiques à un projet dont le parti architectural et constructif, ne peut assurer la survie de la construction à un séisme dévastateur. Les observations et les études posts sismiques confirment qu'une construction basée uniquement sur des calculs et dont la conception n'est pas parasismique ne peut pas résister aux tremblements de terre majeurs.

L'architecte, dont le rôle apparaît comme déterminant, doit posséder un bagage de connaissances suffisant dans le domaine parasismique pour être en mesure d'opérer, en amont des calculs, des choix qui garantiront les conditions optimales de résistance aux séismes à la construction, d'autant plus que la vie de personnes est en jeu.

À l'issue de ce travail, nous pouvons confirmer Fernand Pouillon est un architecte dans le sens le plus large du terme : un maître d'œuvre soucieux de la qualité architecturale du bâtiment jusqu'aux moindres détails, doté des compétences d'un ingénieur soucieux de la qualité d'exécution des matériaux.

À travers nos recherches, nous avons remarqué que contrairement aux années précédentes que l'architecture de Pouillon en Algérie est de plus en plus enseignée dans les établissements d'architecture, et prend de l'intérêt dans les travaux de recherche récents. Aujourd'hui, son nom et ses œuvres figurent dans de nombreux ouvrages d'histoire de l'architecture. Lui, qui a débuté dans le métier par la construction des camps pour les prisonniers, a fini par concevoir quelques-uns des plus remarquables logements sociaux en Algérie.

« A supposer qu'un jour, il me soit reconnu du génie, ce sera beaucoup plus tard, à la lumière des influences, des sensations, des réflexions que j'aurai provoquées dans le domaine de l'art. » Disait-il dans ces mémoires.

Une architecture parasismique requiert une conception architecturale favorisant un bon comportement sous les séismes, une application efficace des réglementations parasismiques, et surtout une bonne qualité d'exécution. Bien qu'il s'agisse d'un bâtiment existant, malgré les avancées dans l'étude des structures sismiques, ces paramètres restent difficiles à vérifier et les résultats sont généralement relatifs.

Toutefois, dans le cas des immeubles de Pouillon, il est bien évident que ce sont des structures résistantes aux séismes, puisqu'ils ont survécu à de nombreux tremblements de terre survenus dans les régions environnantes, tel que le séisme de Boumerdes en 2003. En d'autres termes, ces structures ont été déjà testées sous l'action d'un séisme modéré.

Les résultats de la modélisation numérique de la tour Totem de Diar es Saada et des autres bâtiments constituant une réponse à notre problématique, à savoir, peut-on qualifier l'architecture de Pouillon de parasismique ? Néanmoins, toute recherche scientifique comporte une part d'insuffisance, que ce soit dans la collecte des données ou dans leur traitement. Cependant, nous ne prétendons pas présenter un travail sans faille ni même avoir clarifié dans les détails tout ce qui se rattache à notre problématique.

Les perspectives envisageables à l'issue de cette étude sont au préalable d'ordre expérimental. D'abord, nous proposons d'effectuer une analyse plus approfondie des propriétés mécaniques de la maçonnerie de Pouillon, vu la particularité des matériaux employés (Ex : les briques appareillées verticalement). Dans notre étude, ces données ont été extraites du code sismique Italien. Nous suggérons, de réaliser aussi des essais en laboratoire sur la table vibrante.

Par la suite, il sera intéressant d'élargir le champ des recherches en incluant les immeubles réalisés après l'apparition des recommandations AS55. Il serait intéressant dans de futures recherches d'essayer aussi d'analyser le

comportement sismique des équipements publics, tels que la Mosquée Bachir Ibrahimi (ex église Saint-Jean-Baptiste).

Les projets de Pouillon sont des chefs-d'œuvre architecturaux. Comme témoignent les nombreuses études menées à ce sujet, ses réalisations sont remarquables tant par la maîtrise de l'échelle du bâti que par l'aménagement des perspectives. Un soin tout particulier est accordé à la composition urbaine, à l'espace piéton, aux aménagements intérieurs, aux détails constructifs, au choix des matériaux de construction, etc.

De ce fait, ces dernières années, le label de l'Architecture Contemporaine Remarquable, qui succède au label Patrimoine du XXe siècle depuis 2016, a été décerné aux réalisations de Pouillon en France : immeuble Palais Albert 1er d'Aix-en-Provence; immeuble Palais Victor Hugo ; ensemble de logements La Tourette à Marseille ; usine Nestlé à Marseille, Bouches-du-Rhône ; bibliothèque de la faculté de droit à Aix-en-Provence ; immeuble Les 200 logements ; résidence du parc de Meudon-la-Forêt, etc. Ces derniers jours les projets architecturaux de Pouillon en Algérie en l'occurrence cinq hotels ont été promus au classement national. Il serait temps que les grands ensembles d'Alger le soient aussi au vu des différentes études qui ont été menées dessus et des résultats concluants obtenus.

REFERENCES

1. Abdessemed-Foufa, A., "Fernand Pouillon in Algeria: the art of building and designing for seismic risk", Colloquium 2: To compose is to construct: a question of professional ethic, in: 2nd International Meeting: "Entretients Fernand Pouillon", Marseille, France, pp. 41-13. (2016).
2. Sayen, C., "l'Architecture par Fernand Pouillon", Edition: Aux Edition Transversales-France (2014).
3. Ministère de la culture. "Les édifices labellisés Architecture contemporaine remarquable". (15 Mars 2019) <https://www.culture.gouv.fr/>.
4. Dubor, B. F., "Fernand Pouillon", Electa Moniteur, Paris, (1986).
5. Sayen, C., "Fernand Pouillon / Dates clés", Édition d'architecture, (15 Mars 2019) <https://www.editions-architecture.com/f-pouillon.html>.
6. Lejeune, J.-F. and Sabatino, M., "Modern architecture and the Mediterranean: vernacular dialogues and contested identities", Routledge, (2009).
7. Voldman, D., "Fernand Pouillon, architecte", Payot, (2006).
8. Pouillon, F., "Les pierres sauvages", Média Diffusion, Paris, (1964).
9. Pouillon, F., "Ordonnances", édition Le Jardin de Flore, Paris, (1953).
10. Roy, H., "Entretien avec Fernand Pouillon", Vie des arts 22(1977), 54-59.
11. Petruccioli, A., "Fernand Pouillon ou le génie de la construction", entretien de Fernand Pouillon avec Attilio Petruccioli, Architettura nei paesi islamici. Second mostra internazionale di architettura, Venise, Edizioni La Biennale di Venezia", (1982).
12. Choisy, A., "Histoire de l'architecture", Rouveyre, (1903).
13. Merzelkad, R., "L'ensemble immobilier «Climat de France» à Alger: contribution à l'histoire de la pensée urbaine et architecturale de Fernand Pouillon en Algérie", Paris 10, (2011).
14. Lucan, J., "Fernand Pouillon, architecte: Pantin, Montrouge, Boulogne-Billancourt, Meudon-la-forêt", Picard, (2003).
15. Merzelkad, R., "Fernand Pouillon dans la ville d'Alger: connaissance et reconnaissance d'un habitat intégré: Cas de l'ensemble de Climat de France", Editions universitaires europeennes, (2011).
16. Pouillon, F., "Mémoires d'un architecte", (1968).
17. Maachi Maïza, M., "L'architecture de Fernand Pouillon en Algérie", Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales (2008), 13-26.
18. Maïza, M. M. and Kacemi, M., "Fernand Pouillon en Algérie ou quand la composition devient pittoresque", Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography (2021), 75-82.
19. Sayen, C., " L'association "Les Pierres Sauvages de Belcastel", L'architecte. (15 Mars 2019) <https://www.fernandpouillon.com/lassociation.html>.
20. "Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement (CNAM), Ensembles urbains, 1940-1977. Les ressorts de l'innovation constructive". Rapport réalisé dans le cadre de l'axe de recherche "Technique, territoire, architecture" du Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement sous la direction de Guy Lambert et Valérie Nègre avec la collaboration d'Emmanuelle Gallo, (2009).
21. Tehami, M., "La qualité architecturale entre conception et construction: cas des cités d'habitation algériennes de Fernand Pouillon", Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ..., (2018).
22. Nogue, N., "La reconstruction des ingénieurs 1942-1958", Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine (2014), 37-54.
23. Bulletin d'information, Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux, Paris. (15/03/2019) <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9606912f/f4.item.r=pr%C3%A9fabrication%20en%20France#>, (1945).

24. Lucan, J., "Architecture en France (1940-2000). Histoire et théories", Paris, Le Moniteur, (2001).
25. Lacroix, R., "Eugène Freyssinet: une révolution dans l'art de construire", Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, (2004).
26. Delemontey, Y., "Le béton assemblé: préfabriquer la France de l'après-guerre (1940-1955) ", Paris 8, (2009).
27. "Association pour la mémoire et le rayonnement des travaux d'Eugène Freyssinet, Eugène Freyssinet: A Revolution in the Art of Construction", Presses des Ponts, (2004).
28. Revue Architecture d'aujourd'hui, "l'habitation collective", n°4, (Janvier 1946).
29. Revue Chantiers ; Organe technique de l'Architecture d'aujourd'hui, "Etude sur la rationalisation méthodes de construction standard dans le bâtiment", n°2, (Mars 1933).
30. Revue Chantiers ; Organe technique de l'Architecture d'aujourd'hui, "Groupe d'habitations a Maisons-Alfort pour l'office public d'habitations du département de la seine", n°3, (Avril-Mai 1933).
31. Revue mensuelle Architecture d'aujourd'hui, "Le chantier expérimental d'Orléans", n°9, (Novembre-Décembre 1946).
32. Revue Science et Industrie, Edition mensuelle Construction et Travaux publics, "Office Public d'habitations du département de la Seine La Cité de la « Muette » à Drancy", N°10", (Octobre 1933).
33. Berland-Berthon, A., "La démolition des immeubles de logements sociaux. L'urbanisme entre scènes et coulisses", Université Michel de Montaigne-Bordeaux III, (2004).
34. Formige, J., "Techniques et Architecture, Construire : doctrine et programmes, Le problème du passé dans la reconstruction", par Jules Formige, N°07, (1944).
35. Contal, M. H., "Fernand Pouillon. Portrait", CREE-Architecture intérieurs, n°209, entretien de Fernand Pouillon avec Marie-Hélène Contal, présentation de Marie-Hélène Contal, (Janvier 1986).
36. Mohammedi, L., Abdessemed-Foufa, A. and Ceikh-Zouaoui, M., "Fernand Pouillon's heritage: Modernization of old construction methods ", International Journal of Human Settlements, Vol. 2 . Nr.3 . 2018, ISSN : 2588-1779 (Accepted: 21 December2018).
37. Pouillon, F., Gillon, P. and Alluin, P., "Fernand Pouillon à Meudon-la-Forêt: la résidence Le Parc, 1961-2011: genèse d'une opération exemplaire", Éd. du Linteau, (2011).
38. P.V. 05 : Chantier Diar Es Saada_OPHLM_ réunion de chantier du 08-12-1953.
39. P.V. 14 : Chantier Diar Es Saada_OPHLM_ réunion de chantier du 09-02-1954.
40. Bertero, V. V. and Shah, H. C., "El-Asnam Algeria Earthquake Oktober 10, 1980: A Reconnaissance and Engineeringreport", EERI, (1983).
41. Aucouturuier, A., "Le Corbusier, Fernand Pouillon et les céramiques de Philippe Sourdive Le claustra Sourdive, témoin de l'évolution de l'architecture durant la reconstruction". Mémoire de master en architecture, sous direction de Philippe Simon. ENSA Paris Val de Seine", (Avril 2017).
42. Leborgne, V., "Les Sablettes de Fernand Pouillon", Mémoire, Séminaire La Fabrique; Harold Klinger, (2016/2017).
43. Abdessemed-Foufa, A. A. and Benouar, D., "Investigation of the 1716 Algiers (Algeria) Earthquake from historical sources: effect, damages, and vulnerability", International Journal of Architectural Heritage 4(2010), 270-293.
44. Cohen, J.-L., Oulebsir, N., Kanoun, Y. and Delaunay, D., "Alger: paysage urbain et architectures, 1800-2000", Les éditions de l'Imprimeur, (2003).
45. Bonillo, J.-L., "Fernand Pouillon, architecte méditerranéen", Imbernon, (2001).
46. Pouillon, F. and Zoellner, P., "Brevet d'invention n°1.110.750. Ministère de l'industrie et du commerce : service de la propriété industrielle. Vide-ordures ménagères à réceptacle sphérique tournant sur son axe ", (19 Octobre 1955).
47. Beldjoudi, H., "Etude de la sismicité du Nord Algerien", (2011).
48. Abdessemed-Foufa, A., "Contribution pour la redécouverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes adoptées dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis)

durant le XVIIIème siècle". Thèse de doctorat en Architecture, spécialité architecture et environnement. E.P.A.U d'Alger, (2007).

49. Victor, D., "Conception construction parasismique", Préface de Jean-Armand Calgareo, Introductions de Michel Kahan, Joseph Attias et Jérôme Stubler, collection Eurocode, édition Afnor, Eyrolles, (2016).

50. Milne, J., Burton, W. K. and Ogawa, K., "The great earthquake in Japan, 1891", (1892).

51. Ellsworth, W., Lindh, A., Prescott, W. and Herd, D., "The 1906 San Francisco earthquake and the seismic cycle", *Earthquake prediction: An international review* 4(1981), 126-140.

52. Neri, G., Barberi, G., Oliva, G. and Orecchio, B., "Tectonic stress and seismogenic faulting in the area of the 1908 Messina earthquake, south Italy", *Geophysical research letters* 31(2004).

53. Flament-Hennebique, M. G., "Le béton armé et les tremblements de terre, Revue Le béton armé ; Organe des Concessionnaires et Agents du Système HENNEBIQUE", Numéro 131, (Avril 1909).

54. Filiatrault, A., "Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures". Editions: Montréal: Editions de l'Ecole polytechnique de Montréal, (1996).

55. Sjoerd, N., "Seismic Building Codes", Global and Regional Overview, (November 2015).

56. Milan, Z., "Conception parasismique, niveau avant-projet", Cahier 1(2003).

57. Davidovici, V., "La construction en zone sismique: approche réglementaire, modèles d'analyse des structures, diagnostic des bâtiments existants, exemple de calculs", *Le moniteur*, (1999).

58. Billard, A., "Risque sismique et patrimoine bâti, comment réduire la vulnérabilité ; savoirs et savoir-faire", Edition EYROLLES, (2014).

59. Billard, A., "Confortement du patrimoine bâti: 13 études de cas sur le risque sismique", Eyrolles; 1er édition, (2016). ISBN-10 : 2212142676.

60. Nakahara, K., Hisatoku, T., Nagase, T. and Takahashi, Y., "Earthquake response of ancient five-story pagoda structure of Horyu-Ji temple in Japan", *Proceedings of the WCEE* (2000).

61. Hammond, P. C., "The Temple of the Winged Lions: Petra, Jordan, 1974-1990", (1996).

62. Zayadine, F., Larché, F. and Dentzer-Feydy, J., "Le Qasr al-Bint de Pétra: l'architecture, le décor, la chronologie et les dieux", Éd. Recherche sur les Civilisations, (2003).

63. Thomson, H., "A row of cedar beams". *Palestine Exploration Quarterly*, 92:57-63, (1960).

64. Kienzle, P., "Conservation and reconstruction at the Palace of Minos at Knossos", University of York, (1998).

65. Rababeh, S. M., "Construction techniques of the Nabataean freestanding buildings and rock-cut monuments in Petra, Jordan", University of Oxford, (2005).

66. Wiefel, W., "Shiloh, Y.: The Proto-Aeolic Capital and Israelite Ashlar Masonry (Book Review)", *Orientalistische Literaturzeitung* 79(1984), 40.

67. Grossmann, P., "Holzbewehrung in römischen und spätantiken Mauerwerk", Mainz: von Zabern, *Ägypten Bautechnik der Antike* (1991), 56-62.

68. Chassinat, E., "Fouilles à baouit". Chassinat: MIFAQ; (1911).

69. King, G., "The traditional architecture of Saudi Arabia", (1998).

70. Cleuziou, S., "Besenval (R.)-Technologie de la voûte dans l'Orient ancien", *Nouvelles de l'Archéologie* 19(1985), 115-116.

71. Abdessemed-Foufa, A., "Contribution pour la redécouverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes adoptées dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis) durant le XVIIIème siècle", PhD in Architecture, option: architecture and environment. EPAU of Algiers (2007).

72. Augé, C., Borel, L., Dentzer-Feydy, J., March, C., Renel, F. and Tholbecq, L., "Le sanctuaire du Qasr al-Bint et ses abords", *Syria. Archéologie, art et histoire* (2016), 255-310.

73. Rababeh, S., Al Qablan, H., Abu-Khafajah, S. and El-Mashaleh, M., "Structural utilization of wooden beams as anti-seismic and stabilising techniques in stone masonry in Qasr el-Bint, Petra, Jordan", *Construction and Building Materials* 54(2014), 60-69.

74. "Machu Picchu, Pérou, XVe siècle, Des constructions antisismiques". http://passerelles.bnf.fr/techniques/macchu_03.php (15 mars 2019).

75. Abdessemed-Foufa, A. and Benouar, D., "Les techniques constructives sismo résistantes dans la Casbah d'Alger, L'urgence de se réapproprier notre patrimoine", revue Vies de villes, N°5, 58-60, (Mai 2006). <https://viesdevilles.net/pvdy/92/les-techniques-constructives-sismo-resistantes-dans-la-casbah-dalger>.
76. Picard, A., "Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962)", Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée 73(1994), 121-136.
77. Mokrane, A., Ait Messaoud, A., Sebai, A., Menia, N., Ayadi, A., Bezzeghoud, M. and Benhallou, H., "Les séismes en Algérie de 1365 à 1992", Publication du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Département: Etudes et Surveillance Sismique, ESS, CRAAG, Alger-Bouzaréah 277(1994).
78. Guidoboni, E., Comastri, A., Traina, G. and Geofisica, R. I. N. d., "Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th Century", Istituto nazionale di geofisica Rome, (1994).
79. Ambraseys, N., "The seismicity of North Africa: the earthquake of 1856 at Jijeli, Algeria", (1982).
80. Ambraseys, N. and Vogt, J., "Material for the investigation of the seismicity of the region of Algiers", European Earthquake Engineering 3(1988), 16-29.
81. Marinas, J. M. L. and Salord, R., "El periodo sismico oranes de 1790 a la luz de la documentacion de los archivos espanoles", Instituto Geográfico Nacional, (1990).
82. Rothé, J.-P., Dechevoy, N. and Seltzer, P., "Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie", Pauc, (1950).
83. Ambraseys, N., Vogt, J. and Adams, R., "Seismicity of the Central Cheliff Valley in Algeria", (1991).
84. Oulebsir, N., "Les usages du patrimoine: monuments, musées et politique coloniale en Algérie, 1830-1930", Les Editions de la MSH, (2004).
85. Ayadi, A. and Bezzeghoud, M., "Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum observed intensity map (MOI2014)", Seismological Research Letters 86(2015), 236-244.
86. Centre national de recherche appliquée en génie parasismique., "Le risque sismique en Algérie", Ministère de l'habitat, 109p.
87. "Evolution de la réglementation parasismique au Maghreb". <http://www.structureparasismic.com/HistoricRegleMaghreb.html> (15 mars 2019).
88. Fuentes, A., "Bâtiments en zone sismique", (1998).
89. Zeghichi, L., Merzougui, A. and Mezghiche, B., "Lecture Dans Le Règlement Parasismique Algérien", Courrier du Savoir (2005), 67-69.
90. Règles Parasismique Algérienne RPA99, Ministère de l'habitat, document technique réglementaire DTR BC 2 48, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.
91. Pouillon, F., "Ville d'Alger. Office public d'habitations à loyer modéré de la ville d'Alger", Réunion de chantier: Climat de France, 1954/56.
92. Pouillon, F., "Ville d'Alger. Office public d'habitations à loyer modéré de la ville d'Alger", Réunion de coordination : commission de coordination des chantiers OPHLM, Climat de France (réf : 31P), le 12-12-1955.
93. Pouillon, F., "Les cités d'Alger Capitale : les Eucalyptus. Revue illustrée de la construction en Afrique du nord", Alger capitale II, n°23, 1956.
94. Gandini, J., ""Alger de ma jeunesse, 1950-1962", Gandini Jacques Eds, (juin 2003).
95. Pouillon, F., ""Plan d'aménagement: les projets : Diar El Mahçoul et Diar Es Saada", Alger Revue Municipale n°3 (1954) ".
96. Çelik, Z., "Urban forms and colonial confrontation: Algiers under French rule", (1997).
97. Mouaziz-Bouchentouf, N., "Le logement social à Oran. Conception, usages et ébauche d'évaluation", Revue Géographique de l'Est 54(2014).
98. Bertho, R., "Les grands ensembles. Cinquante ans d'une politique-fiction française", Études photographiques (2014).
99. Rotival, M., "Les grands ensembles", L'Architecture d'Aujourd'hui 1(1935), 57.

100. Fourcaut, A., "Les grands ensembles ont-ils été conçus comme des villes nouvelles?", *Histoire urbaine* (2006), 7-25.
101. Mengin, C., "La solution des grands ensembles", *Vingtième siècle. Revue d'histoire* (1999), 105-111.
102. Lacoste, Y., "Un problème complexe et débattu: les grands ensembles", *Bulletin de l'Association de géographes français* 40(1963), 37-46.
103. Canteux, C., "Les grands ensembles en images", *Histoire urbaine* (2007), 55-76.
104. Mercier, G., "Le développement et les constructions de la ville d'Alger jusqu'à 1960", *Revue Algérienne* (1960).
105. Hadjerès, S., "Le bidonville Mahieddine, il y a 63 ans", *Socialgerie*, 28 mars 2013. <https://www.socialgerie.net/spip.php?article1136>.
106. Gruet, S., Marfaing, J.-L., Pouillon, F. and Sayen, C., "Fernand Pouillon: humanité et grandeur d'un habitat pour tous", Éd. Poïésis, (2013).
107. Mohammedi, L., Abdessemed-Foufa, A. and Ceikh-Zouaoui, M., "Fernand Pouillon design: combination between traditional knowledge and constructive innovation", *REHABEND 2018: Euro-American congress on construction pathology, rehabilitation technology and heritage management, Caceres, Spain 15 -18 Mai 2018* (2018).
108. Agency, F. E. M., "HAZUS Earthquake loss estimation methodology", *Technical Manual* (1999).
109. Loeckx, A. and Vermeulen, P., "L'habitat moderne à Alger (1925-1975). Etude et évaluation de cités et quartiers du patrimoine moderne en vue d'une rénovation urgente, Deuxième partie : 15 cités modernes à Alger, présentation d'un échantillon", *Centre post graduat établissement humains, département architecture, urbanisme et aménagement du territoire KULeuven-HEVERLEE- Belgique, en collaboration avec bureau d'étude de rénovation et préservation des quartiers anciens MATUC-Alger-Algérie*.
110. Deluz, J.-J., "L'urbanisme et l'architecture d'Alger: aperçu critique", (1988).
111. Lamraoui, S. and Boussoualim, A., "Les ambiances vécues dans les espaces publics de Fernand Pouillon: une référence ambiante", *International Ambiances Network*, (2012), 755-758.
112. Tehami, M. and Anouche, K., "Présences des préoccupations énergétiques dans l'approche conceptuelle de Fernand Pouillon dans les années 50 Cas d'étude de la cite Climat de France de Pouillon à Alger", *Revue des Energies Renouvelables* 20(2017), 11-24.
113. Torelli, G., D'Ayala, D., Betti, M. and Bartoli, G., "Analytical and numerical seismic assessment of heritage masonry towers", *Bulletin of Earthquake Engineering* 18(2020), 969-1008.
114. Behloul, A., "Les grands ensembles urbains essai de réhabilitation" étude de deux cas à Alger: cité Diar El Mahçoul (El-Madania) & 08 Mai 1945 (Bab-Ezzouar)", (2008).
115. Oukrif, Y., "Approche structurelle comme facteur d'analyse du projet de Diar El Mahçoul de Fernand Pouillon", *Master en architecture, Laboratoire architecture et environnement, Ecole Polytechnique d'architecture et d'urbanisme EPAU*, (2016).
116. Irnatene, A., Zeggagh, H. and Habba, A., "Diar Es Saada 2.0 : Achever l'œuvre de Pouillon, Alger, Algérie". *École Polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger. Concours International arturbain.fr 2018 / 2019. Revitaliser les centres des villes petites et moyennes.* <https://www.arturbain.fr/arturbain/concours/2019/>.
117. Mohammedi, L., Abdessemed-Foufa, A. and Ceikh-Zouaoui, M., "Contribution à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des grands ensembles de Fernand Pouillon à Alger", *VUREST 2018 : the 1st international conference on vulnerability and rehabilitation of structures, university of sciences and technology Houari Boumediene, 07-08 Mai 2018. ISBN : 978-9931-9481-0-0* (2018).
118. Touloum, N. and Brara, A., "Diagnostic, morphologies et mécanismes d'altération des pierres de construction du parc bâti de l'algérois".
119. Touloum, N. and Brara, A., "État du patrimoine bâti en pierre cinquantenaire de l'Algérois", dans Roland May, Philippe Bromblet, Marie-Brigitte Carre et al., *5e Rencontres internationales du patrimoine architectural méditerranéen, Spécificités du patrimoine architectural Méditerranéen*,

actes du colloque (Marseille, Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine, 2013), Marseille (2013).

120. Lestuzzi, P. and Badoux, M., "Evaluation parasismique des constructions existantes: Bâtiments en maçonnerie et en béton armé", PPUR Presses polytechniques, (2013).

121. Zacek, M., "Construire parasismique: risque sismique, conception parasismique des bâtiments, réglementation", Editions Parenthèses, (1996).

122. Combesure, D., Guéguen, P. and Lebrun, B., "Vulnérabilité sismique du bâti existant: approche d'ensemble", Cahier technique AFPS, n°25, juillet 2005, 121 pages, (2005).

123. Mallardo, V., Malvezzi, R., Milani, E. and Milani, G., "Seismic vulnerability of historical masonry buildings: a case study in Ferrara", Engineering Structures 30(2008), 2223-2241.

124. Gavarini, C., "Seismic risk in historical centers", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21(2001), 459-466.

125. Ghribi, Z., "Modélisation des paramètres influant sur la vulnérabilité des constructions en maçonnerie", Blida, (2015).

126. Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F. and Crowley, H., "Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years", ISET Journal of Earthquake Technology 43(2006), 75-104.

127. Boubi, M., "Détermination de l'index de vulnérabilité pour les constructions maçonnerie de la ville d'Alger", Université Blida1-Saad Dahlab, (2003).

128. Athmani, A. E., "Seismic vulnerability and risk assessment of Annaba region (Algeria), sous la direction de Gouasmia Abdelhacine Université Badji Mokhtar, Annaba", (2015).

129. Grunthal, G. and Levret, A., "L'échelle macrosismique européenne", Conseil de l'Europe-Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 19(2001).

130. Shabani, A., Kioumars, M. and Zucconi, M., "State of the art of simplified analytical methods for seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry buildings", Engineering Structures 239(2021), 112280.

131. Sabeur, B., "Application de la méthode RISK-UE sur les constructions mostaganémoises", Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis, (2013).

132. Michel, C., "Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville-Apport des techniques expérimentales in situ-Application à Grenoble", Université Joseph-Fourier-Grenoble I, (2007).

133. D'ayala, D. and Speranza, E., "An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings", disp 3(2002), 3-3.

134. GHRIBI, M. M. S. E., "Développement des fonctions de vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie", UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, (2012).

135. Agency, F. E. M., "Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook", Government Printing Office, (2017).

136. GNDT. "Rischio Sismico di Edifici Pubblici - Parte I: aspetti metodologici", Cento Servizi Quasco, Bologna (1993).

137. des Bâtiments, C. P. and Guide, A., "Association française du génie parasismique", Editions Eyrolles (2004).

138. Lebon, G., "Analyse de l'endommagement des structures de génie civil: techniques de sous-structuration hybride couplées à un modèle d'endommagement anisotrope", École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, (2011).

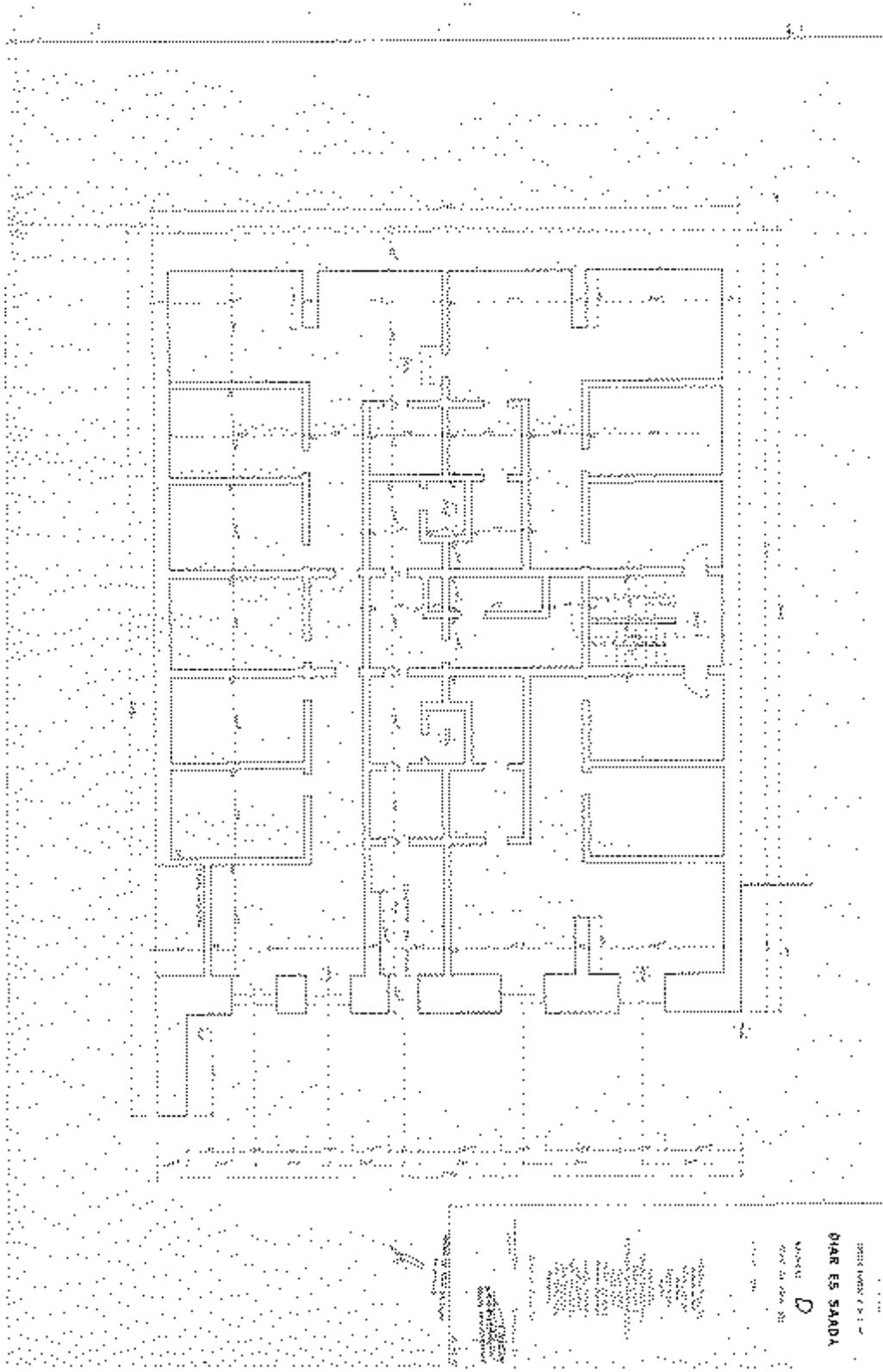
139. Drouna, D., "Evaluation des performances parasismiques des portiques en BA renforcés par chemisage en béton armé et par bandage en CFRP", (2017).

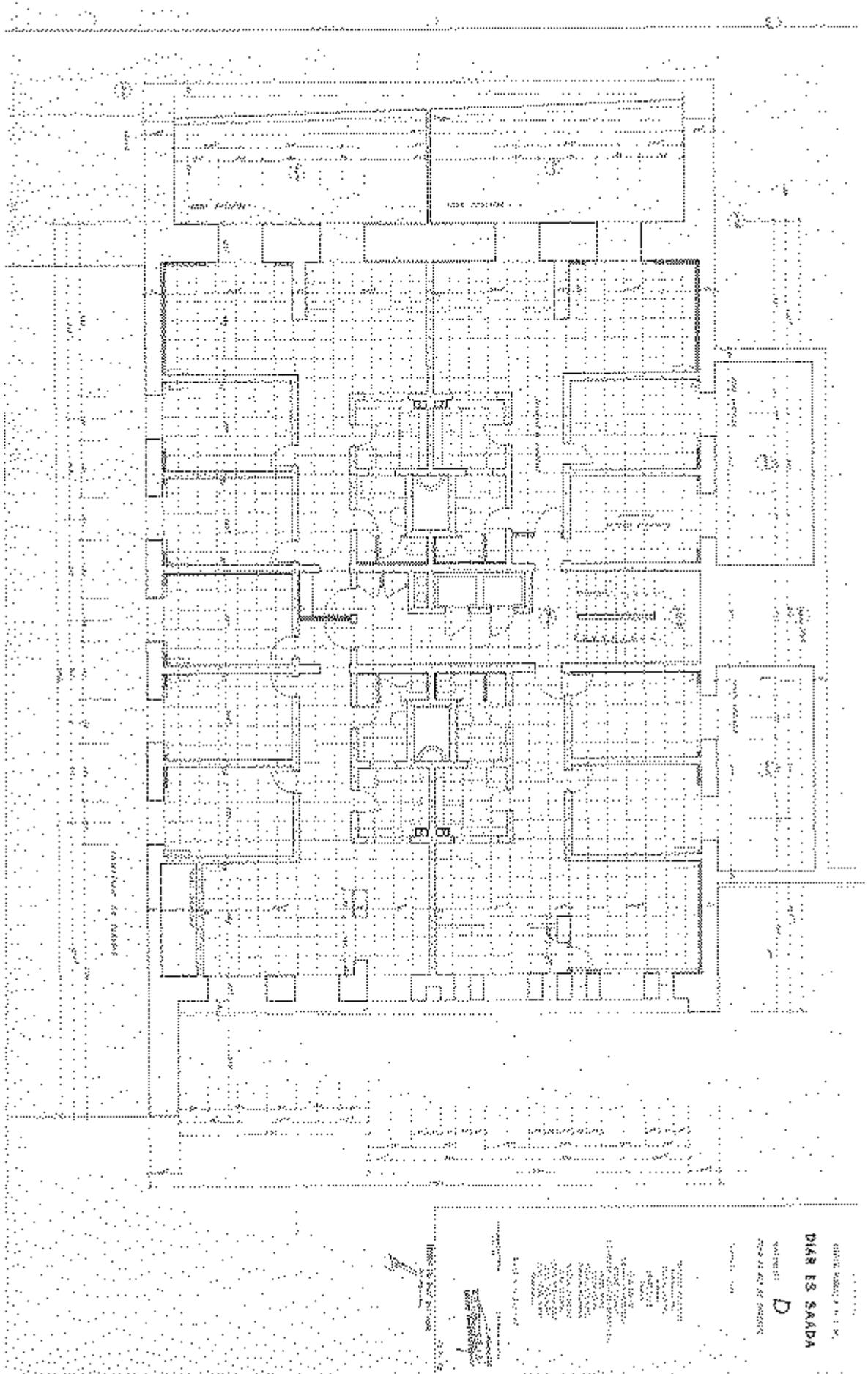
140. Bartoli, G., Betti, M. and Monchetti, S., "Seismic risk assessment of historic masonry towers: comparison of four case studies", Journal of Performance of Constructed Facilities 31(2017), 04017039.

141. Bartoli, G., Betti, M. and Vignoli, A., "A numerical study on seismic risk assessment of historic masonry towers: a case study in San Gimignano", *Bulletin of Earthquake Engineering* 14(2016), 1475-1518.
142. Remki, M., "Developpement d'une méthodologie d'étude de l'endommagement et de la vulnérabilité sismiques des bâtiments en maçonnerie (diagnostic et renforcement)", Alger, (2010).
143. Bourahla, N., Taфраout, S. and Allal, N., "Seismic strengthening of old masonry building using steel ties system—case study".
144. Abdessemed, F. A., Misseri, A. and Rovero, G. L., "Effects of the Boumerdès earthquake of May 21st, 2003 on the Great Mosque of Dellys (Algeria) and Solutions of the Restoration Project", In *Proceedings of the Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vienna, Austria, 28–30 August 2013, (2013).
145. Chaibedra, B., Benanane, A. and Boutaraa, Z., "Numerical multi-modeling and seismic analysis of historical URM building", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)* 18(2017), 1341-1351.
146. Remki, M., Kehila, F., Khelfi, M., Kibboua, A. and Mehani, Y., "Evaluation de l'endommagement et de la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie", *Algérie équipement* Juin 2020, N° 63 : 43-57. e-ISSN: 2716-7801 (2020).
147. Balez, S. and Rigazi, V., "Introduction aux technologies de construction et à l'architecture", (2016).
148. Roca, P., Cervera, M. and Gariup, G., "Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches", *Archives of computational methods in engineering* 17(2010), 299-325.
149. Arangio, S., Bucchi, F. and Bontempi, F., "Pushover seismic analysis of masonry buildings with different commercial codes", *Proceedings of built heritage monitoring conservation management*, November (2013), 18-20.
150. Peña, F., Lourenço, P. B., Mendes, N. and Oliveira, D. V., "Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower", *Engineering Structures* 32(2010), 1466-1478.
151. Casolo, S., Milani, G., Uva, G. and Alessandri, C., "Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy", *Engineering Structures* 49(2013), 465-490.
152. Pasticier, L., Amadio, C. and Fragiaco, M., "Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V. 10 code", *Earthquake engineering & structural dynamics* 37(2008), 467-485.
153. Animas, H., Navarro, M., Pacheco-Martínez, J., García, J., Cordero, T., Esparza, C. and Ortiz-Lozano, J., "Structural analysis of the temple of San Antonio in Aguascalientes, Mexico", *Structural Analysis of Historical Cnstructions* (2014).
154. Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. and Cattari, S., "TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings", *Engineering Structures* 56(2013), 1787-1799.
155. Mohammedi, L., Abdessemed Foufa, A. and Cheikh Zouaoui, M., "Assessment of the seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling: a study of Fernand Pouillon's Totem Tower in Algiers, Algeria", *Journal of Building Engineering* (2021), 102183.
156. Mohammedi, L., Abdessemed-Foufa, A. and Ceikh-Zouaoui, M., "Analyse and repair of stone masonry building in Mediterranean areas: case of Pouillon's housing estates in Algiers, Algeria", *International Journal of Conservation Science*, programmed for Issue 4, vol. 11 (2020).
157. Ferrito, T., Milosevic, J. and Bento, R., "Seismic vulnerability assessment of a mixed masonry–RC building aggregate by linear and nonlinear analyses", *Bulletin of Earthquake Engineering* 14(2016), 2299-2327.
158. TREMURI/3Muri Software. <http://www.tremuri.com/>.
159. NTC 2018: Italian Code for Strutural Design (Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC). D.M. 17/1/2018 (in Italian).
160. P.V. 20 : Chantier Diar Es Saada_OPHLM_ réunion de chantier du 23-03-1954.

ANNEXES

A. Le dossier graphique de la tour Totem avant l'ajout d'un étage (source : les archives de l'association Les Pierres Sauvages de Belcastel en France)





DIAR ES SAABA

NO. 1

NO. 2

NO. 3

NO. 4

NO. 5

NO. 6

NO. 7

NO. 8

NO. 9

NO. 10

NO. 11

NO. 12

NO. 13

NO. 14

NO. 15

NO. 16

NO. 17

NO. 18

NO. 19

NO. 20

NO. 21

NO. 22

NO. 23

NO. 24

NO. 25

NO. 26

NO. 27

NO. 28

NO. 29

NO. 30

NO. 31

NO. 32

NO. 33

NO. 34

NO. 35

NO. 36

NO. 37

NO. 38

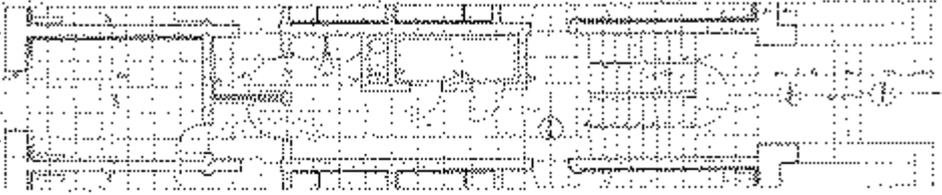
NO. 39

NO. 40

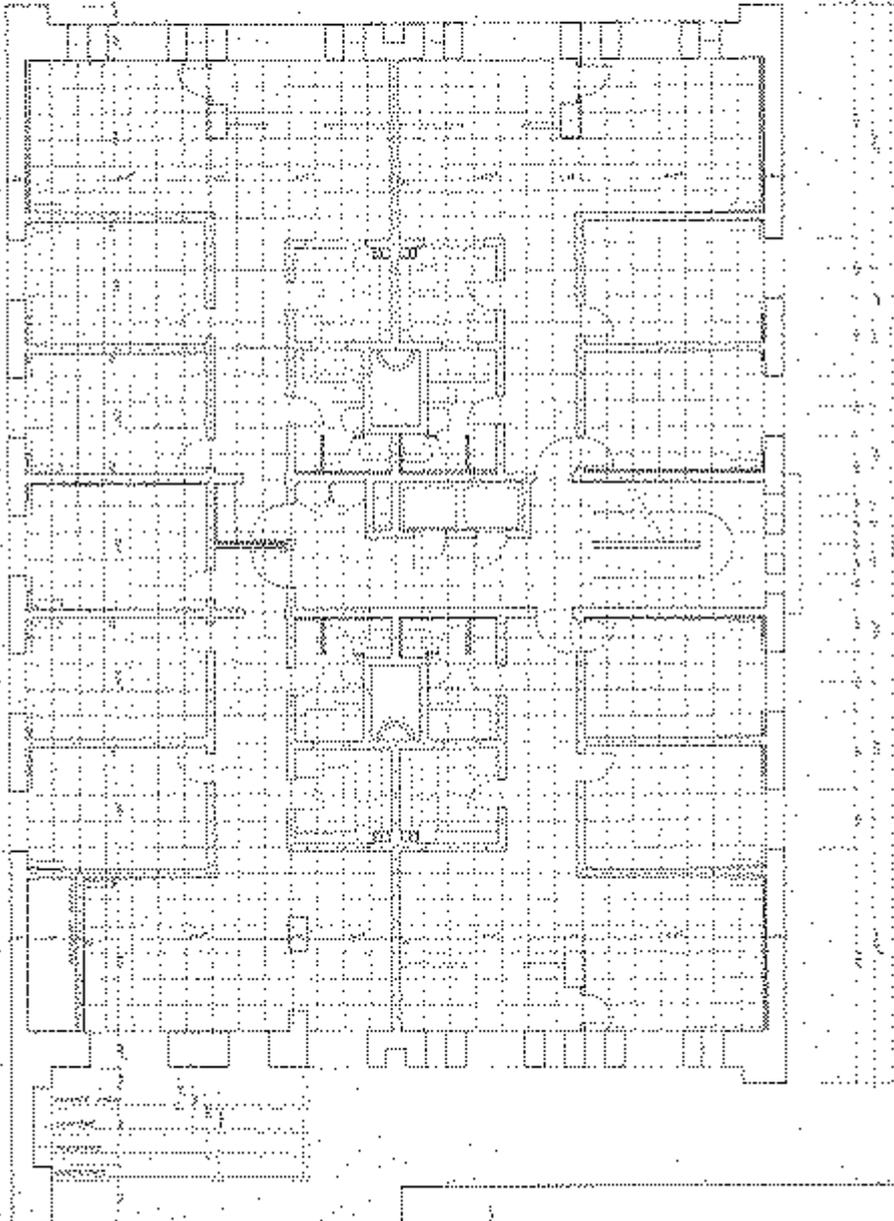
NO. 41

NO. 42

DETAIL OF WINDOW ELEVATION



PLAN AND SECTION THROUGH THE ENTRANCE DOOR

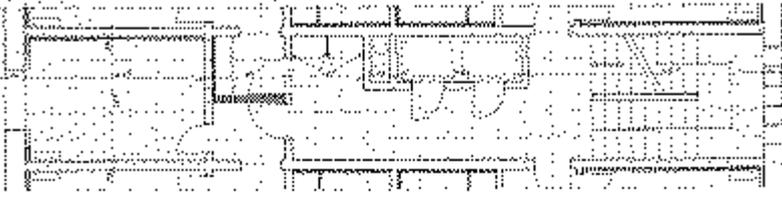


6/2/2011 10:00 AM
DIAR ES SAADA

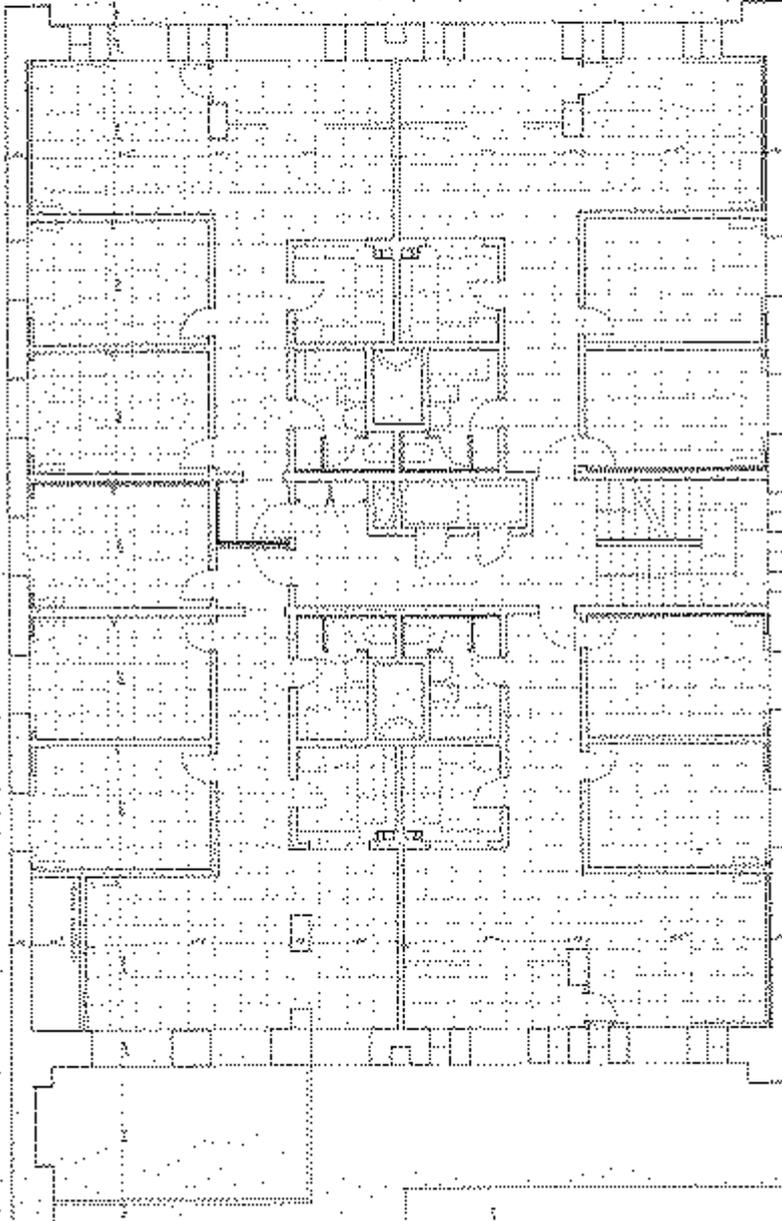
DATE: 2011/02/06
BY: ES SAADA

Architectural notes and specifications in Arabic, including project name, location, and technical details.

كشيف المرحاض من الطابق



كشيف المرحاض من الطابق من المرحاض



0400 ES SAADA

D

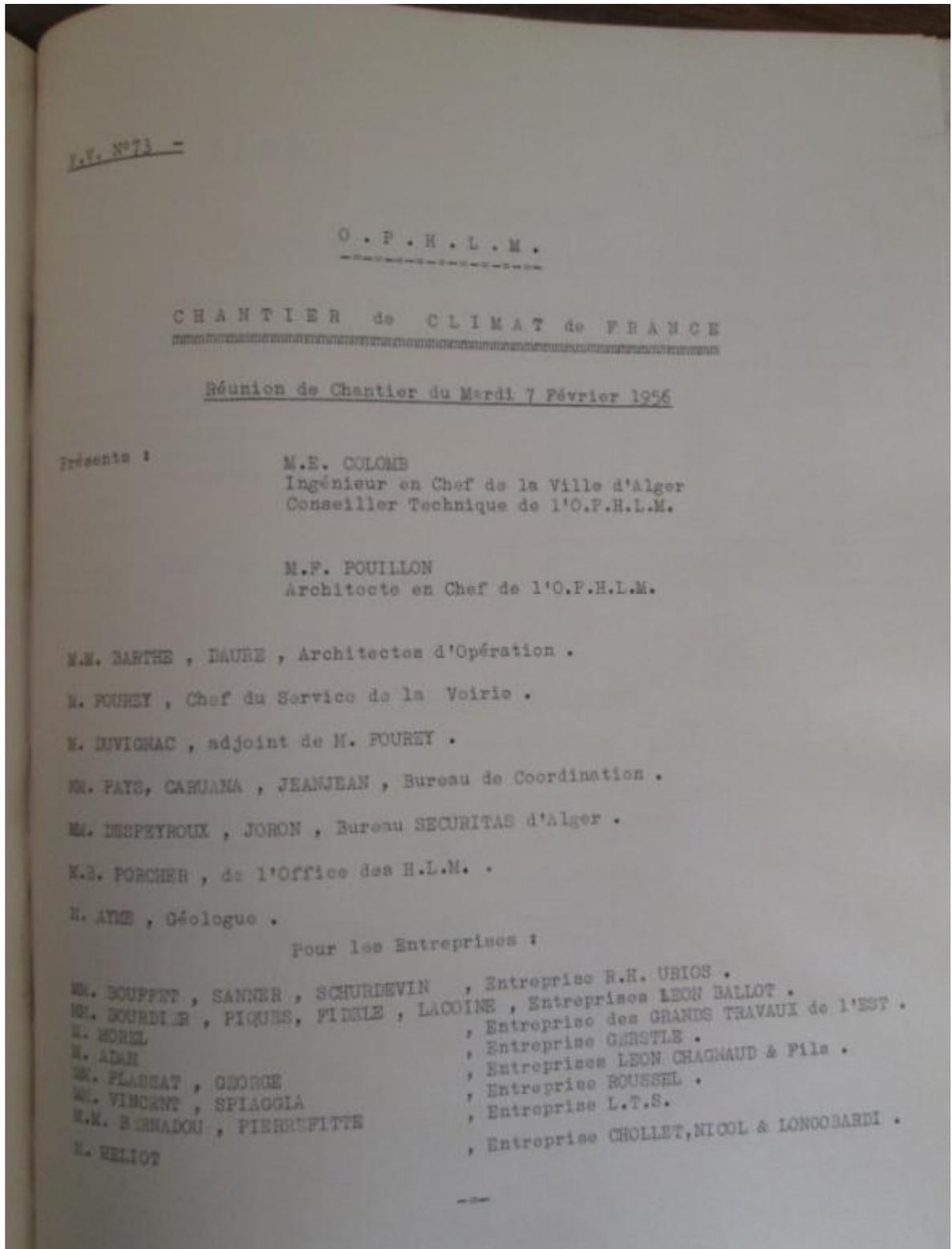
PROJ. NO. 0400
1/1/2013

AL-SAYED
ARCHITECTS

0400 ES SAADA

B. Extraits des rapports et P.V de chantier de l'Office Public d'Habitation à Loyer
Modéré de la ville d'Alger

– P.V.N°73 : Chantier de Climat de France du 07-02-1956



- ANTISISMIE -

En ce qui concerne les mesures envisagées pour améliorer la résistance aux séismes, M. DESPEYROUX informe M. POUILLON que les bâtiments ont été classés par types car chaque bâtiment représente un cas particulier .

Un avant-projet par bâtiment devra être remis aux Entrepreneurs .

En ce qui concerne les plans d'exécution, M. DESPEYROUX demande à M. POUILLON de permettre au Bureau SECURITAS de faire ces études sur la planche à dessin avec les Entreprises .

M. POUILLON estime qu'il serait préférable de faire une planche de prototypes qui serait reportée sur les autres en autant de jeux nécessaires à la réalisation , ce qui permettrait de faire tout de suite les estimations .

Ce projet ne soulève aucune objection de la part des Entreprises.

Il est donc décidé qu'un projet type sera préparé par le Bureau SECURITAS puis mis à jour par le Bureau d'Etudes de l'Architecte en Chef et qui sera donné à chaque Entreprise pour les bâtiments la concernant .

- LIAISON -

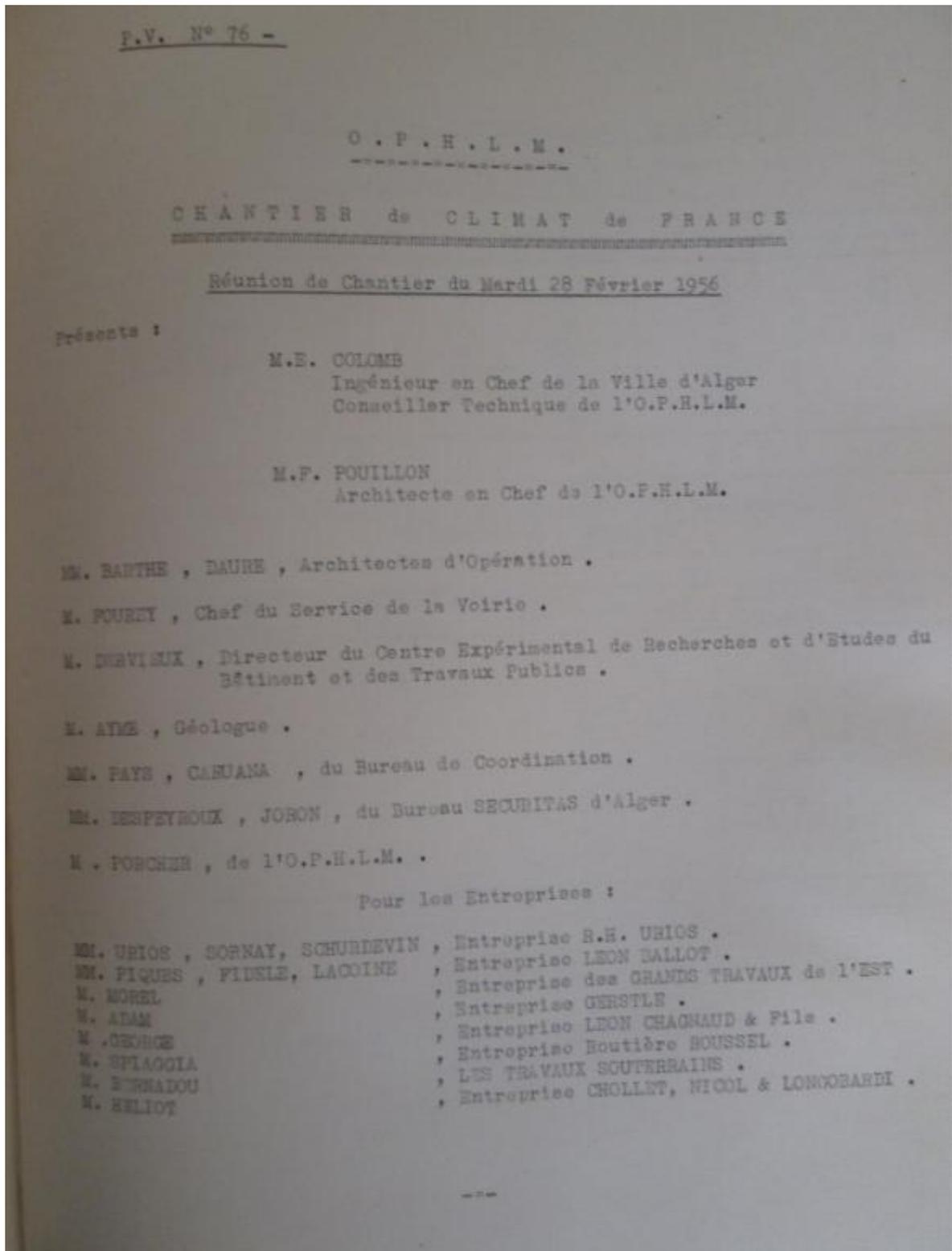
Pour la liaison entre infrastructure et superstructure des parties de travaux déjà exécutées , il est impossible d'ancrer les poteaux .

En ce qui concerne les bâtiments futurs , il y a lieu de prévoir des attentes pour les potelets en question . La prise des potelets dans les planchers telle qu'elle est prévue n'est pas suffisante , car la liaison ne serait faite que par frottement . Il sera donc placé des scières en attente dans les infrastructures , ancrés d'un mètre dans les bétons .

M. POUILLON précise que les Entreprises exécuteront leurs infrastructures suivant les plans initiaux et ne mettront les fers en attente que lorsque les indications auront été données par SECURITAS .

.../

– P.V.N°76 : Chantier de Climat de France du 28-02-1956



La réunion commence à 8 heures .

2

Monsieur POUILLON donne lecture du procès-verbal de la précédente séance .

- OBSERVATION -

-Egoût Birtraria - M. COLOMB précise que le remplissage des horsprofile du collecteur a été exécuté en pierre sèche et non en maçonnerie .

-°-

- ASISME -

M. POUILLON donne lecture de deux lettres de l'Entreprise URIOS (jointes au présent P.V.) , dans lesquelles celle-ci fait savoir , d'une part , qu'elle n'a encore aucune instruction sur les dispositions asismiques à adopter et, d'autre part, que les mesures envisagées par l'Architecte ne satisfont pas aux recommandations A.S.55 .

M. POUILLON souligne que les dispositions envisagées sont celles préconisées par la Direction du Bureau SECURITAS et s'étonne que l'on revienne sur cette question .

M. URIOS communique les plans qui lui ont été remis par SECURITAS . M. POUILLON constate que ces plans ne correspondent pas aux décisions adoptées à PARIS et décide qu'une réunion aura lieu mardi prochain , réunion à laquelle il demande que des Représentants qualifiés de SOCOTEC soient présents .

M. POUILLON précise au Bureau SECURITAS qu'aucune réunion ne doit avoir lieu avec les Entreprises en dehors du Bureau de l'Architecte en Chef auquel toutes les dispositions doivent être soumises .

M. DESPEYROUX fait remarquer que contrairement aux termes de la lettre de l'Entreprise URIOS et suivant les termes du Cahier des Charges Particulières , il appartient à l'Entreprise d'établir des plans et de les soumettre à SECURITAS pour approbation .

.../

3

M. POUILLON fait remarquer à SECURITAS qu'étant donné que l'essai a été demandé par le Bureau SOCOTEC, il appartient à SOCOTEC de faire ses calculs et de donner toutes instructions aux Entreprises pour l'établissement de leurs plans.

- VISITE de M. MERCY -

M. DEPEYBROUX informe M. POUILLON qu'il ignore toujours la date de l'arrivée de M. MERCY.

M. POUILLON adresse une lettre au Directeur de SOCOTEC à PARIS pour fixer la date de la réunion au 6 Mars et demander la présence indispensable de ses Représentants.

Au cours de cette réunion seront débattues les questions du sol et de l'essai.

- DRAINS HORIZONTAUX -

M. BERNADOU signale qu'à la suite des pluies, certains drains horizontaux ont débité à nouveau, ce qui prouve qu'ils n'étaient pas colmatés.

Il signale également que certains drains et piézomètres ont disparu par suite de terrassements.

M. COLOMB estime que cela n'est pas tolérable et exige que l'Entreprise responsable les recherche et les remette en état ou fasse faire ces travaux à sa charge.

M. FIGUERE promet de voir cette question avec L.T.S.

M. COLOMB précise qu'un état des drains disparus ou cassés devra être établi d'ici 8 jours et les réparations effectuées d'ici 15 jours.

- FISSURES -

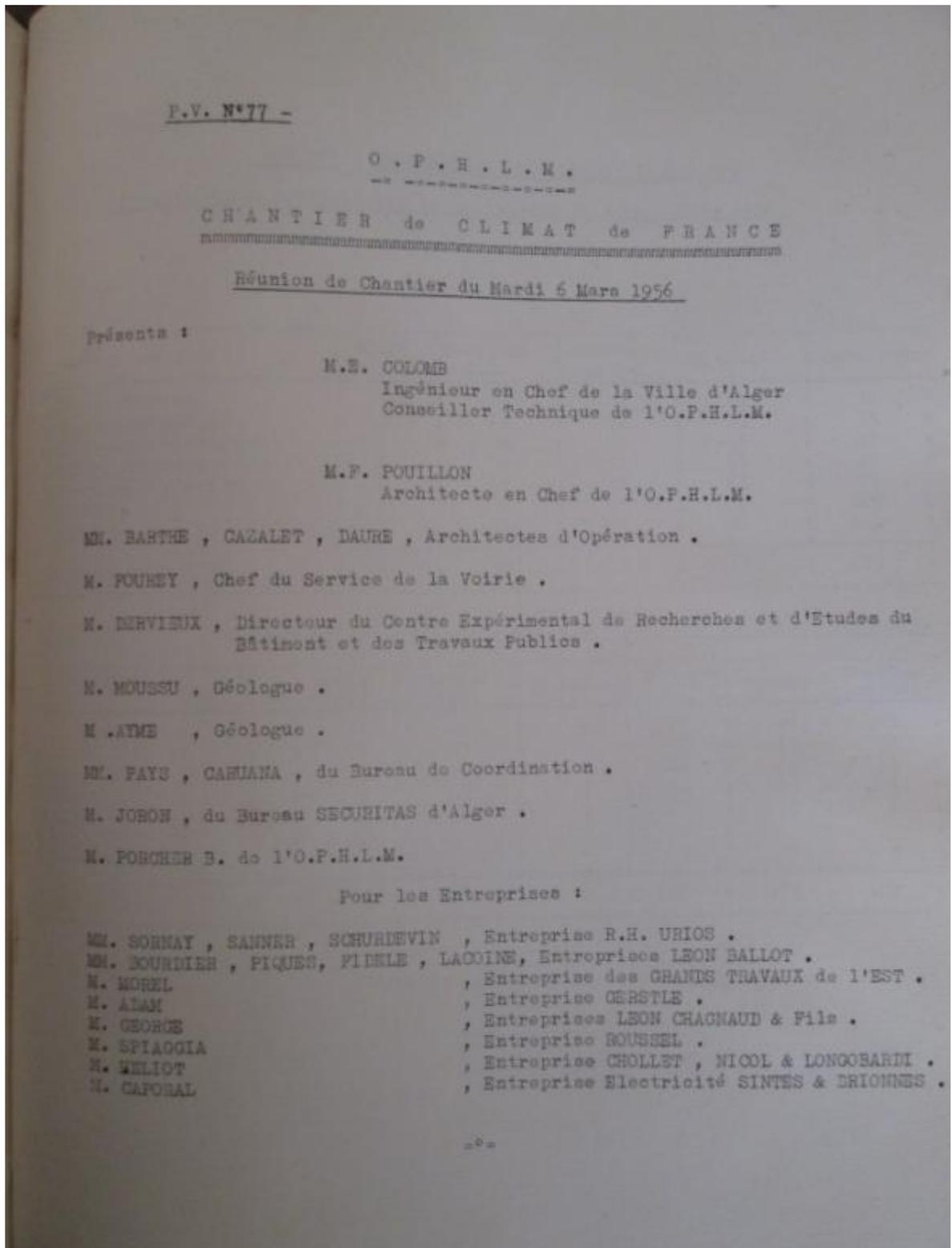
M. DERVIEUX remet à M. POUILLON un rapport, inclus au présent P.V., qui prouve que les tassements ne sont pas complètement terminés, et que les mouvements sont absolument semblables dans les bâtiments B 9 et B 10 quoique beaucoup moins importants au B 9.

Il est signalé des fissures au Bâtiment B 21.

Au cours de la visite de chantier, il est constaté que les fissures du B 21 sont de simples fissures de retrait et qu'il en est

.../

- P.V.N°77 : Chantier de Climat de France du 06-03-1956



...

La réunion commence à 8 heures .

2

Mr. POUILLON donne lecture du Procès-Verbal de la précédente séance.

- Observation au précédent P.V. -

- Fissures B 9 - B 10 -

Il est précisé par M. POUILLON qu'en ce qui concerne le B 9 , il semble qu'il n'agisse de fissures de retrait quoique le rapport de M. DERVIEUX ait relevé les mêmes mouvements dans le B 9 et le B 10 .

-°-

- ASISME -

M. POUILLON signale que M. ROUQUETTE sera à ALGER avant la fin de la semaine et qu'il prendra contact avec MM. DERVIEUX, MOUSSU et la Coordination pour préparer le voyage de M. MERCY .

Il sera demandé aux Entreprises de faire quelques travaux de nettoyage, et à chacun d'aider M. ROUQUETTE en donnant tous renseignements utiles pour la préparation de son rapport à l'intention de M. MERCY .

- RÉSERVE SOCOTEC -

M. POUILLON fait remarquer à SECURITAS Alger que la réserve faite au sujet de l'antisisme hors de l'approbation des plans paraît inutile étant donné que les plans ont été faits sur les principes donnés par M. MERCY et mis au point par M. ROUQUETTE en compagnie de M. GALLOTTI .

Les bâtiments commencés par les Entreprises seront continués sans tenir compte des réserves de SOCOTEC puisqu'exécutés suivant les plans SOCOTEC .

- APPROBATION PLANS -

Les Entreprises signalent le retard apporté par SOCOTEC pour l'approbation des plans d'infrastructure .

Or, il faut faire les fondations dans le plus bref délai .

Il est décidé , à dater d'aujourd'hui , que tous les plans sur lesquels aucune observation ne serait faite dans un délai de 8 jours après leur remise à SECURITAS , seront considérés comme approuvés par lui .

.../

...
- ELECTRICITE -

- 4

Une proposition est faite par l'Electricien en ce qui concerne les exigences de l'E.C.A. au sujet de la sécurité des colonnes montantes en mettant un coffret étanche dont l'échantillon est soumis à M. POUILLON .
Les prix seront vérifiés .

- COLLECTEUR -

Il reste 30 mètres de galerie à ouvrir , le bétonnage suit normalement .

- PALIERES INTERMEDIAIRES -

Pour les paliers intermédiaires , M. POUILLON autorise les Entreprises à faire une dalle en béton en remplacement du plancher à marmites .

- INTEMPÉRIES -

Lot 1 : L'Entreprise BALLOT justifie de 2 jours d'arrêt des travaux par suite d'un jour d'intempérie et d'un jour de suite d'intempérie , ce qui porte le total à : $51 + 1 = 52$ jours d'intempéries réelles
et $30 + 1 = 31$ jours pour suites d'intempéries
soit : 83 jours au total .

Lot 1 A : L'Entreprise R.H. UNIOS justifie de 2 jours d'arrêt des travaux par suite d'un jour d'intempérie réelle et d'un jour de suite d'intempérie , ce qui porte le total à :
 $16 + 1 = 17$ jours pour intempéries réelles
et $6 + 1 = 7$ jours pour suites d'intempéries .
soit : 24 journées au total .

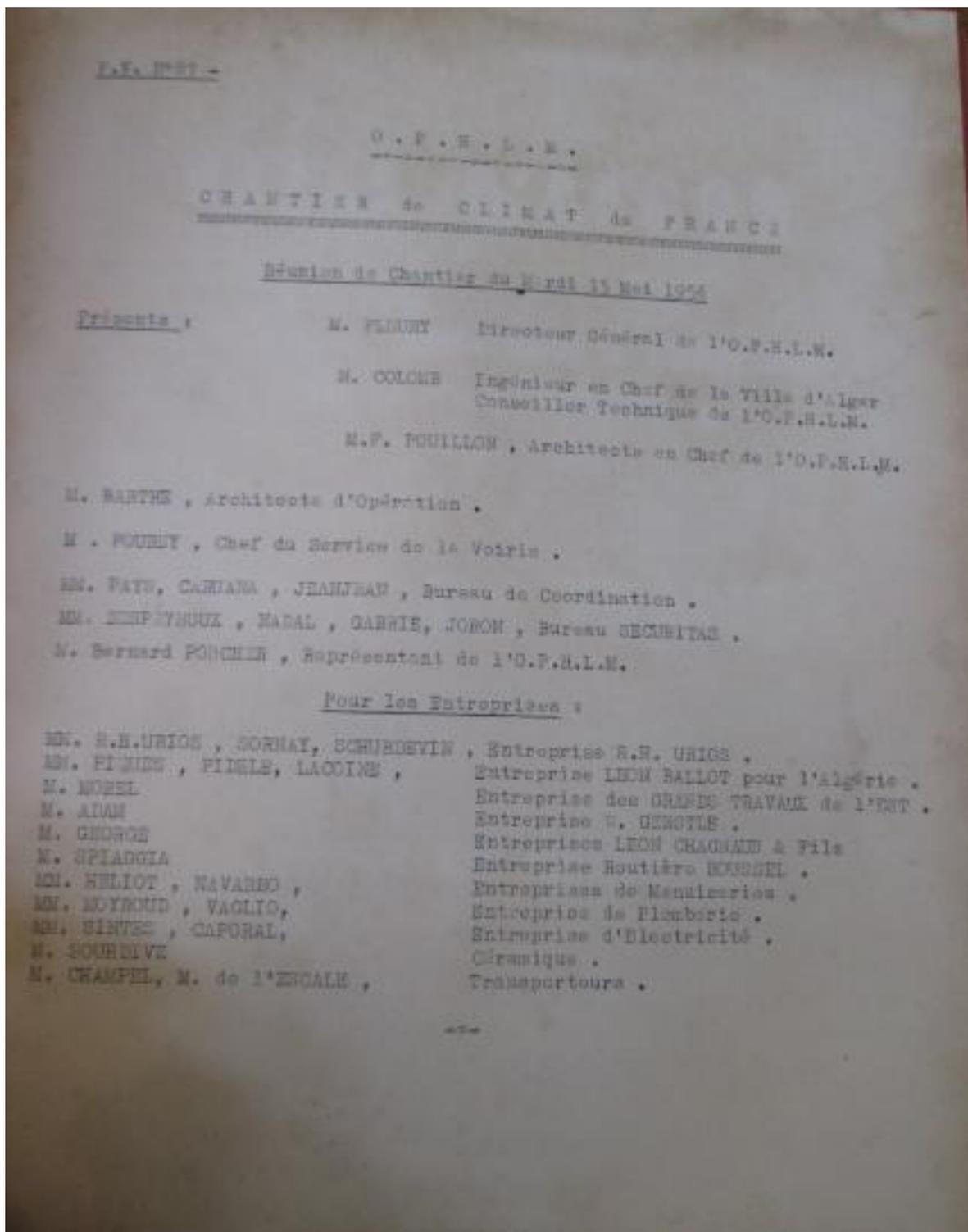
...=

Les questions à l'ordre du jour étant épuisées, la séance est levée à 10 heures .

ALGER, le 6 Mars 1956 .

.../

– P.V.N°87 : Chantier de Climat de France du 15-05-1956



M. NADAL répond que L.T.S. ne peut faire que des rapports annuels car il faut un délai assez long pour voir le comportement des drains .

Il propose de faire deux rapports : un rapport mensuel pour le petit entretien et une étude générale qui sera remise une fois par an sur l'hydrologie elle-même .

Suivant l'importance des travaux d'entretien à effectuer, et si ceux-ci nécessitent une intervention immédiate, SOCOPEC le signalera et L.T.S. sera convoqué .

- DEPLACEMENT DES POMPES -

M. LACONNE précise que le déplacement de ces pompes devient urgent .

M. PORCHER signale qu'il a écrit à L.T.S. en lui adressant un plan afin d'avoir leur accord .

Les TRAVAUX SOUTERRAINS seront convoqués demain matin .

- POMPE N°IV -

À la suite des terrassements, la pompe N°IV se trouve à 3 mètres de hauteur . Cela risque d'amener un accident en cas de pluie .

Après visite sur le chantier, il est décidé d'exécuter immédiatement le tronçon du mur de soutènement dans lequel cette pompe aura sa place définitive .

- DEBLAI -

M. COLOMB exige que les déblais pierreux réemployables soient conservés et qu'ils ne soient en aucun cas envoyés à la décharge .

M. POUILLON demande qu'ils soient stockés à l'intérieur du marché A o .

POINTS IMPORTANTS SUR CHANTIER

- 1°) M. POUILLON fait remarquer aux entreprises que les briques sont mal montées ; les joints sont trop forts (ils doivent être en moyenne de 1 cm/2 à 2 cm maximum) .
- 2°) Les dessous de planchers au bâtiment B 4 sont à reprendre entièrement ainsi que les liaisons sismiques : potelets pierre-murette.

.../

En ce qui concerne la pierre, M. FOUILLON sollicite les
 Entreprises sur la façon de la monter.

- 3°) Poteaux antisismiques - Il serait nécessaire d'avoir des
 renseignements sur le prix de revient des poteaux antisismi-
 ques le plus rapidement possible.

- 4°) Fondations S 4 - Pour ce bâtiment qui se trouve moitié sur
 rocher et moitié sur une marne bleue très compacte, M. FOUILLON
 demande à SECURITAS d'étudier le remplacement des armatures de
 sautelles et murs ainsi que du premier chaînage.

..

Les questions à l'ordre du jour étant épuisées, la séance est
 levée à 13 heures.

ALGER, le 15 Mai 1955

..

.../