

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil
Spécialité : Construction Civile et Industrielle

Thème

Evaluation de la vulnérabilité sismique d'une structure existante à usage hospitalier

Présenté par :

M^{elle} HAOUCHINE Amina Ouiza

Devant le jury composé de :

Mme BELHASSANI Ouarda

Mme SMAHI Rebiha

Mr KHELIL Nacim

Mr AKKOUCHE Karim

Présidente.

Examinatrice.

Encadrant.

Invité.

Année universitaire: **2024/2025**

REMERCIEMENTS

En premier lieu, Je remercie DIEU le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires à la réalisation de ce travail dans les meilleures conditions.

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à mon encadrant, Monsieur KHELIL Nacim, et à mon co-encadrant, Monsieur AKKOUCHE Karim, pour leur disponibilité ; leurs précieux conseils et leurs suggestions.

Un grand merci également à l'ingénieure KHELOUAT Samia, dont l'encadrement et l'aide m'ont été d'une valeur inestimable. Je remercie chaleureusement les architectes MOHAND AHMED Tamazouzt et HACHEMI Kenza, qui m'ont gracieusement autorisé à utiliser leurs projets pour mener mon étude.

Mes remerciements s'étendent à l'ensemble des enseignants de la faculté, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je remercie les membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner et d'enrichir ce projet de fin d'études par leurs remarques et leurs commentaires.

DEDICACES

Je dédie humblement ce travail, fruit de longs efforts, à ceux qui comptent le plus pour moi :

À ma mère, merci d'être mon pilier. Tu as été à la fois une mère, une sœur et une amie. Merci de m'avoir toujours encouragée à suivre mes passions et à ne jamais abandonner.

À mon père, pour m'avoir enseigné les valeurs de la persévérance et du courage. Merci de m'avoir appris à toujours avancer, peu importe les obstacles. Ta sagesse et ton éducation ont forgé la personne que je suis aujourd'hui.

Tout ce que j'espéré c'est que vous soyez fiers de moi.

A mes frères et sœurs Hakim, Lina, Samy pour votre amour et votre présence qui éclairent ma vie.

À tous mes amis et à ma famille qui m'ont tant donné et qui m'ont soutenue à chaque étape de mon parcours.

Enfin, je dédie ce travail aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font d'examiner et d'enrichir ce projet de fin d'études par leurs précieux conseils.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la vulnérabilité sismique d'une structure existante à usage hospitalier, à savoir une polyclinique située à Assi Youcef (wilaya de Tizi-Ouzou), une infrastructure stratégique dont la résistance est essentielle en cas de catastrophe. Le travail visait à vérifier la capacité de l'ouvrage à satisfaire les exigences fondamentales de la nouvelle Réglementation Parasismique Algérienne (RPA 2024), enrichie par les retours d'expérience des séismes passés et les avancées scientifiques récentes.

La méthodologie adoptée repose sur une modélisation numérique détaillée et sur l'application d'une méthode d'analyse avancée, « l'Analyse Statique Non Linéaire (Pushover) ». Cet outil a permis d'évaluer la capacité réelle de la structure face à un séisme de référence.

Les résultats obtenus montrent que la structure satisfait globalement les exigences du RPA 2024, avec des déplacements inter-étages inférieurs aux limites réglementaires et une capacité portante supérieure à la demande sismique. Le comportement global reste majoritairement élastique, confirmant une bonne rigidité et une résistance satisfaisante face aux sollicitations sismiques, tout en soulignant un point de vigilance concernant l'effort normal réduit dans certains poteaux, nécessitant une attention particulière pour d'éventuelles interventions de renforcement. Ce travail met ainsi en évidence l'importance de la conception parasismique et de la mise à jour des normes pour garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures vitales.

Mots clés :

Vulnérabilité sismique, RPA 2024, Analyse statique non linéaire, Méthode Pushover, Rotules plastiques, Performance sismique, Génie Parasismique.

Abstract

This present research aims to assess the seismic vulnerability of an existing hospital structure, namely a polyclinic located in Assi Youcef (Tizi-Ouzou province), a strategic infrastructure whose strength is essential in the event of a disaster. The study sought to verify the building's ability to meet the fundamental requirements of the new Algerian Seismic Regulation (RPA 2024), which has been enhanced by feedback from past earthquakes and recent scientific advances.

The adopted methodology is based on detailed numerical modeling and the application of an advanced analysis method, the Nonlinear Static Analysis (Pushover). This tool made it possible to evaluate the actual capacity of the structure when subjected to a reference earthquake.

The results obtained show that the structure generally meets the RPA 2024 requirements, with inter-story drifts below the regulatory limits and a load-bearing capacity higher than the seismic demand. The overall behavior remains predominantly elastic, confirming good rigidity and satisfactory resistance to seismic loads, while highlighting a point of concern regarding the reduced axial load in certain columns, which requires particular attention for potential strengthening interventions. This work thus highlights the importance of seismic design and the continuous updating of standards to ensure the safety and durability of vital infrastructures.

Keywords

Seismic Vulnerability, RPA 2024 (Algerian Seismic Code 2024), Nonlinear Static Analysis, Pushover Method, Plastic Hinges, Seismic Performance, Earthquake Engineering.

Liste des figures

Figure1. 1	Effondrement d'un immeuble de quatre étages (Pancake-collapse). Suite au séisme de Boumerdes 2003	4
Figure1. 2	Histogramme du nombre de séismes en fonction de la magnitude en Algérie nord occidentale pour la période 1790 – 2016.	5
Figure1. 3	Schéma illustratif d'un séisme : foyer, épicentre, faille et intensité.	8
Figure1. 4	Illustration d'un séisme d'origine tectonique et de la propagation des ondes sismiques.	9
Figure1. 5	Séismes volcaniques : mouvements de terrain associé à un volcan en éruption...9	
Figure1. 6	Grottes de Gueldaman à Béjaïa : cavité karstique.	10
Figure1. 7	Mine de charbon d'Ouenza à Tébessa : cavité artificielle.	11
Figure1.8	Causes des séismes d'origine humaine.	11
Figure1. 9	Distribution des foyers sismiques en fonction de la profondeur le long du plan de Wadati-Beniof.....	12
Figure1. 10	Échelle de magnitudes sismiques de Richter.	13
Figure1. 11	Domages causés par le séisme de Chlef (ex-El Asnam) en 1980.	14
Figure1. 12	Dégâts importants causés par le séisme de Boumerdes en 2003.....	15
Figure1. 13	Ondes Primaires (P) et Secondaires (S).	17
Figure1. 14	Ondes sismiques surfaciques de Love (L) et Rayleigh	18
Figure 2. 1	Classification sismique des wilayas d'Algérie.	23
Figure 2.2	Représentation schématique du risque sismique.	24
Figure 2.3	Domages sur un bâtiment en maçonnerie dans la Casbah d'Alger après un séisme	27
Figure 2.4	Bâtiment en maçonnerie en pierres brutes, endommagé lors du séisme de 1979 au Monténégro, Yougoslavie.....	27
Figure 2.5	Poutres en bois endommagées, révélant la dégradation des matériaux	28
Figure 2.6	Détachement du bardage de façade (Séisme Coalinga Californie, 1983).....	28
Figure 2.7	Déplacement transversal du tablier et destruction des butées d'un pont (séisme d'El Asnam « Algérie » 1980).	29
Figure 2.8	Effondrement du Viaduc Cypress Street à Oakland, (séisme de Loma Prieta « Californie, 1989 »).....	29
Figure 2.9	Illustrations de poteaux endommagés par le séisme de Boumerdes	30

<i>Figure 2.10</i>	<i>Cisaillement des poteaux d'une construction à Bordj el bahri. Séisme de 2003 Boumerdes, Algérie</i>	<i>31</i>
<i>Figure 2.11</i>	<i>Illustration du concept d'étage souple (soft storey)</i>	<i>32</i>
<i>Figure 2.12</i>	<i>Effondrement complet du rez-de-chaussée (étage souple) dans plusieurs blocs résidentiels à Corso. Séisme de Boumerdes 2003, Algérie</i>	<i>32</i>
<i>Figure 2.13</i>	<i>Effondrement complet d'une construction au niveau I Séisme de Boumerdes 2003, Algérie</i>	<i>33</i>
<i>Figure 2.14</i>	<i>Domages dus à la liquéfaction des sols : Effondrement d'un immeuble par affaissement du sol lors du séisme d'Izmir (Turquie) en 1999.</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2.15</i>	<i>Poinçonnement de la fondation suite à la liquéfaction du sol. Séisme de Kocaeli en Turquie</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2.16</i>	<i>Principe de la méthode d'analyse Pushover</i>	<i>38</i>
<i>Figure 3.1</i>	<i>Façade principale de la polyclinique.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 3.2</i>	<i>Vue en 3D des éléments de la structure.</i>	<i>56</i>
<i>Figure 3.3</i>	<i>Spectre de réponse.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4.1</i>	<i>Courbe de capacité (V base – D Sommet) - Direction X -.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 4.2</i>	<i>Courbe de capacité (V base – D Sommet) - Direction Y -.</i>	<i>75</i>
<i>Figure 4.3</i>	<i>Spectre de réponse élastique RPA2024.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 4.4</i>	<i>Représentation du spectre élastique (S a – T).....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 4.5</i>	<i>Représentation du spectre de demande ADRS (S a – S d).....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 4.6</i>	<i>Spectre de capacité (S a – S d) - Direction X -.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 4.7</i>	<i>Spectre de capacité (S a – S d) - Direction X -.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 4.8</i>	<i>Détermination du point de performance du système équivalent, Direction - X -.80</i>	
<i>Figure 4.9</i>	<i>Détermination du point de performance du système équivalent, Direction - Y -.80</i>	
<i>Figure 4.10</i>	<i>Déplacements maximaux par étage - Direction X-.</i>	<i>81</i>
<i>Figure 4.11</i>	<i>Déplacements maximaux par étage - Direction - Y-.</i>	<i>82</i>

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Echelle des intensités EMS 98.	6
Tableau 3. 1	Modes propres de la structure.....	64
Tableau 3. 2	Effort normal réduit dans les poteaux.....	65
Tableau 3. 3	Efforts tranchants à la base données par la méthode modale et statique équivalente.	66
Tableau 3. 4	déplacements inter-étages dans le sens XX.	67
Tableau 3. 5	déplacements inter-étages dans le sens YY.	67
Tableau 3. 6	Efforts tranchants à la base données par la méthode modale et statique équivalente.	68
Tableau 3. 7	Justification Vis à Vis De l'effet $P\Delta$	68
Tableau 4. 1	déplacements inter-étages dans le sens XX.	83
Tableau 4. 2	déplacements inter-étages dans le sens YY.	84

SOMMAIRE

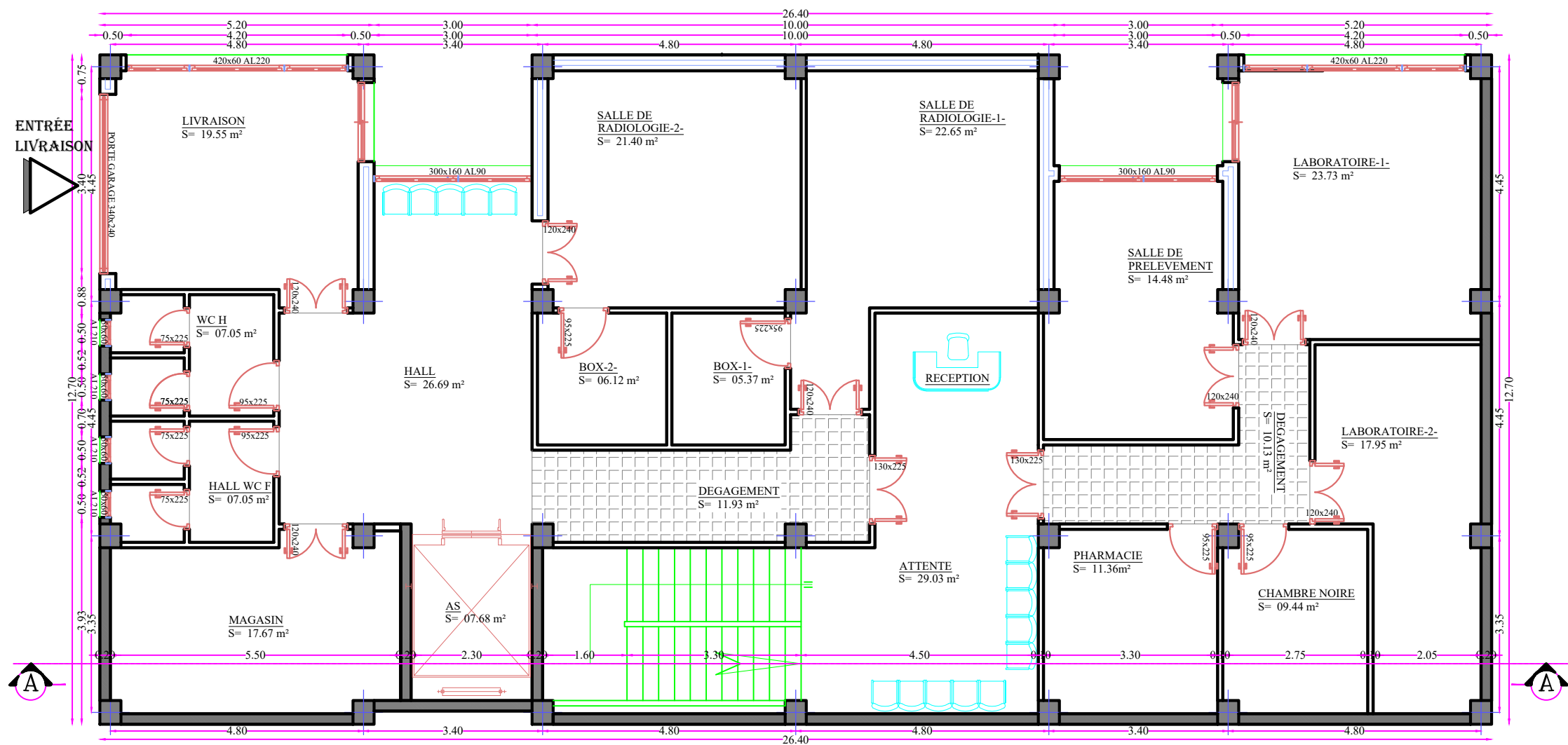
Liste de figure

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
1.1. INTRODUCTION.....	3
1.2. LE SEISME.....	3
1.3. ORIGINE DU SEISME	4
1.4. CARACTERISTIQUES D'UN SEISME	4
1.4.1. Magnitude (M)	4
1.4.2. Intensité (I)	5
1.4.3. Foyer (hypocentre)	7
1.4.4. Épicentre.....	7
1.4.5. Faille.....	7
1.5. CATEGORIES DE SEISMES	8
1.5.1. Classification selon l'origine.....	8
1.5.1.1. Séismes tectoniques	8
1.5.1.2. Séismes volcaniques	9
1.5.1.3. Séismes d'effondrement	10
1.5.1.4. Séismes artificielles (induits ou provoqués)	11
1.5.2. Classification selon la profondeur	12
1.5.2.1. Séismes superficiels.....	12
1.5.2.2. Séismes intermédiaires.....	12
1.5.2.3. Séismes profonds	13
1.5.3. Classification selon la magnitude.....	13
1.5.3.1. Microséismes	13
1.5.3.2. Séismes légers à modérés.....	14
1.5.3.3. Séismes forts à majeurs.....	14
1.5.3.4. Séismes catastrophiques.....	15
1.5.4. Classification selon l'intensité (mesure des effets ressentis à la surface).....	15
1.6. ONDES SISMIQUES	16
1.6.1. Ondes de volume	16

1.6.1.1.	Ondes P (primaires ou de compression)	16
1.6.1.2.	Ondes S (secondaires ou de cisaillement).....	16
1.6.2.	Ondes de surface	17
1.6.2.1.	Les ondes de Love :	17
1.6.2.2.	Les ondes de Rayleigh :	17
1.7.	LA REGLEMENTATION PARASISMIQUE	18
1.7.1.	Historique et évolution des règles parasismiques Algériennes (RPA).....	18
1.7.2.	Objectifs	19
1.7.3.	Domaine D'application.....	19
1.7.4.	Conditions D'application.....	19
1.8.	CONCLUSION	20
2.1.	INTRODUCTION.....	22
2.2.	DEFINITIONS	22
2.2.1.	Aléa sismique	22
2.2.2.	Vulnérabilité.....	23
2.2.3.	Risque sismique.....	24
2.2.4.	Enjeux.....	24
2.3.	FACTEURS DE VULNERABILITE	25
2.4.	CLASSIFICATION DES STRUCTURES VULNERABLES	26
2.4.1.	Bâtiments en Maçonnerie.....	26
2.4.2.	Structures Métalliques et en Bois	27
2.4.3.	Ponts et Infrastructures Non Renforcés.....	28
2.4.4.	Structures en Béton Armé	29
2.5.	METHODES D’EVALUATION DU NIVEAU DE VULNERABILITE.....	34
2.5.1.	Méthodes qualitatives.....	35
2.5.1.1.	Méthode GNDT	35
2.5.1.2.	Méthode RISK-UE	35
2.5.1.3.	Méthode VULNERALP.....	35
2.5.2.	Méthodes quantitatives.....	36
2.5.2.1.	Les méthodes d’analyse linéaires	36
2.5.2.2.	Les méthodes d’analyse non-linéaires	37
2.6.	CONCLUSION	41
3.3.	INTRODUCTION.....	43
3.4.	PRESENTATION DE L'OUVRAGE	43

3.5.	DESCRIPTION DE L'OUVRAGE.....	44
3.5.1.	Caractéristiques géométriques.....	44
3.5.2.	Caractéristiques structurales.....	44
3.5.3.	Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	45
3.5.4.	Evaluation des charges et des surcharges.....	47
3.6.	MODELISATION.....	48
3.6.1.	Description du logiciel ETABS.....	48
3.6.2.	Les étapes de calcul.....	48
3.7.	CONCLUSION	73
4.1.	INTRODUCTION.....	75
4.2.	PRESENTATION DES RESULTATS.....	75
4.2.1.	Courbes de capacité ($V_{base} - D_{Sommet}$).....	75
4.2.2.	Spectre de réponse RPA 2024.....	76
4.2.3.	Spectre de capacité ($S_a - S_d$)	77
4.2.4.	Détermination du point de performance.....	79
4.2.5.	Vérification des déplacements	81
4.2.6.	Vérifications des déplacements inter étages.....	83
4.3.	CONCLUSION	84
	Conclusion Générale	
	Bibliographie	



PLAN DE SOUS SOL -5,78 M
ECH; 1/50 È

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil

Promotion 2024/2025

Constructions Civiles et Industrielles (CCI)

PROJET

CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL
WILAYA DE TIZI OUZOU
DAIRA DE BOGHNI
COMMUNE DE ASSI YUCEF
AIT HIDJA

PLAN

ECHELLE

PLAN DE SOUS-SOL -1-

1/50È

PLAN D'ARCHITECTURE

PLANCHE-1-

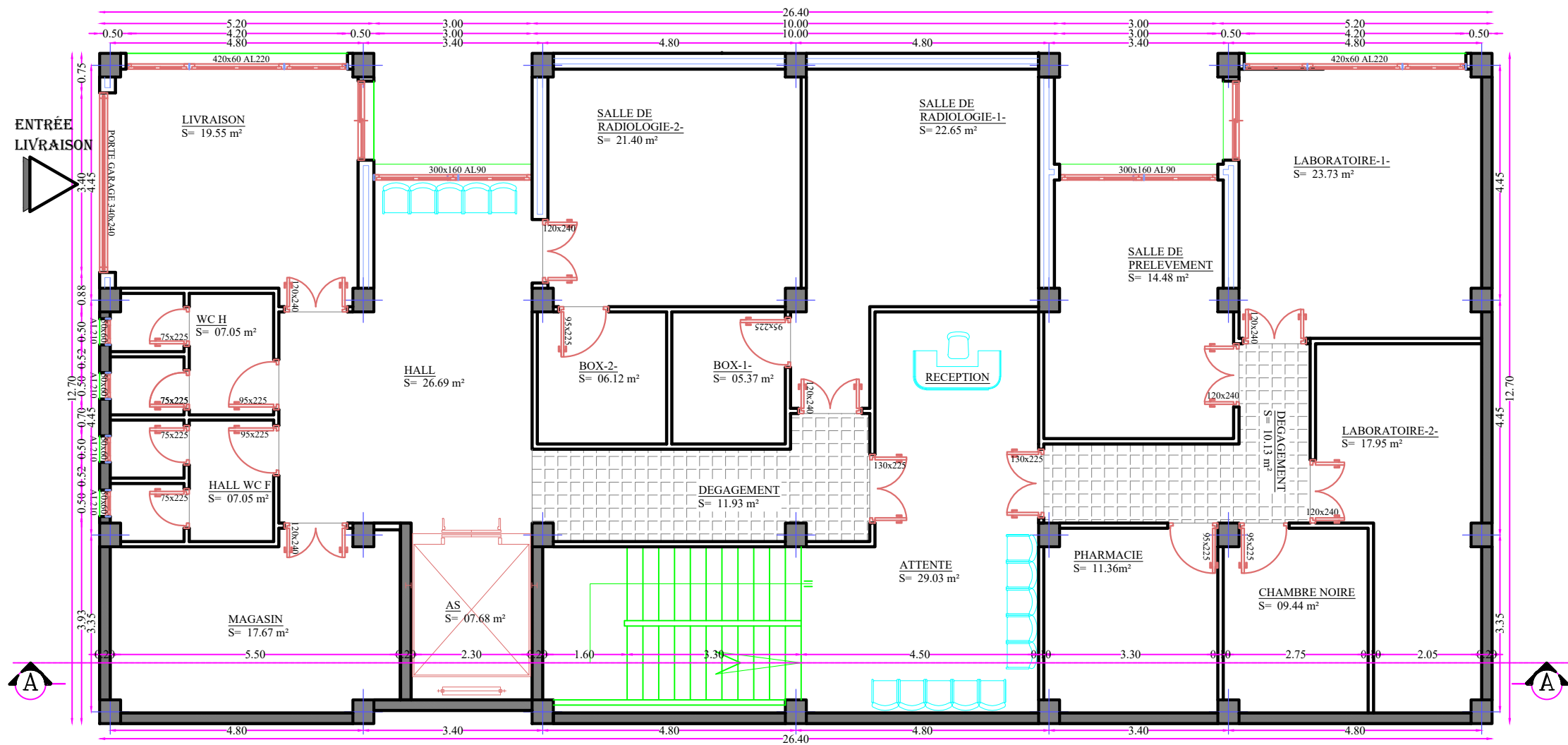
ENCADRANT:

Mr KHELIL Nacim

REEALISEE PAR:

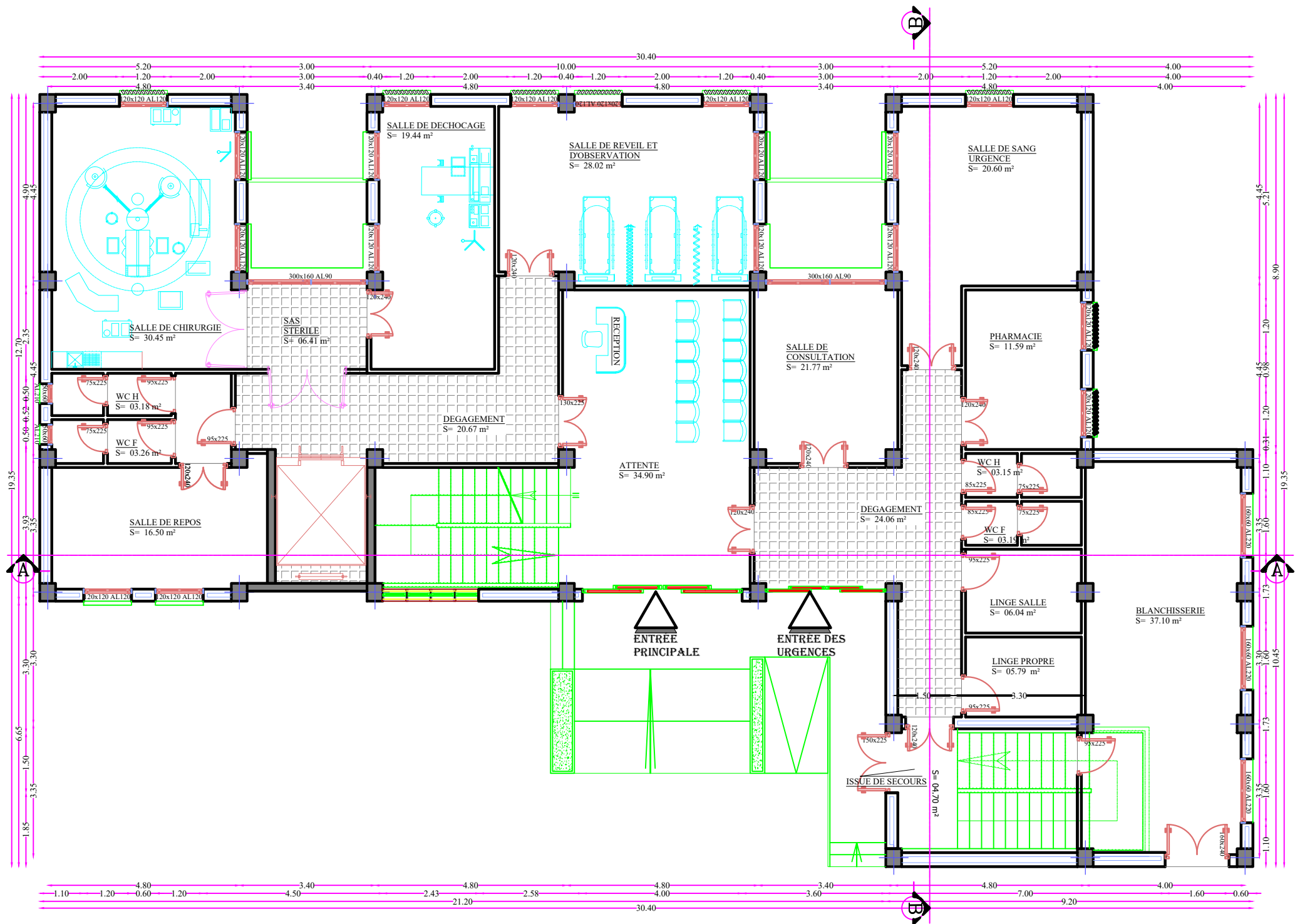
HAOUCHINE

Amina Ouiza



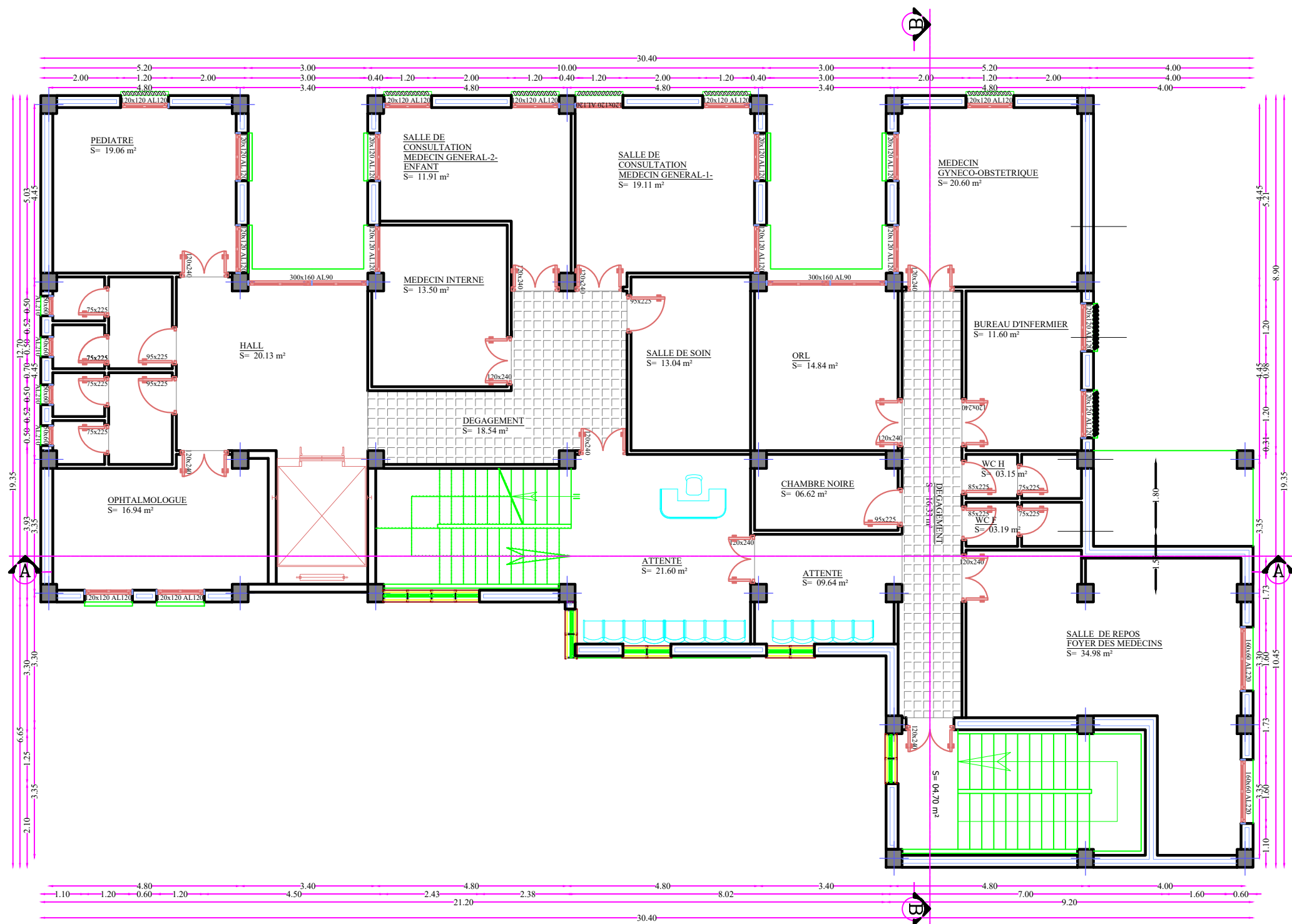
PLAN DE SOUS SOL -2.89 M
ECH: 1/50 È

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL		
WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
PLAN DE SOUS-SOL -2-	1/50È	
PLAN	D'ARCHITECTURE	PLANCHE-2-
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza	



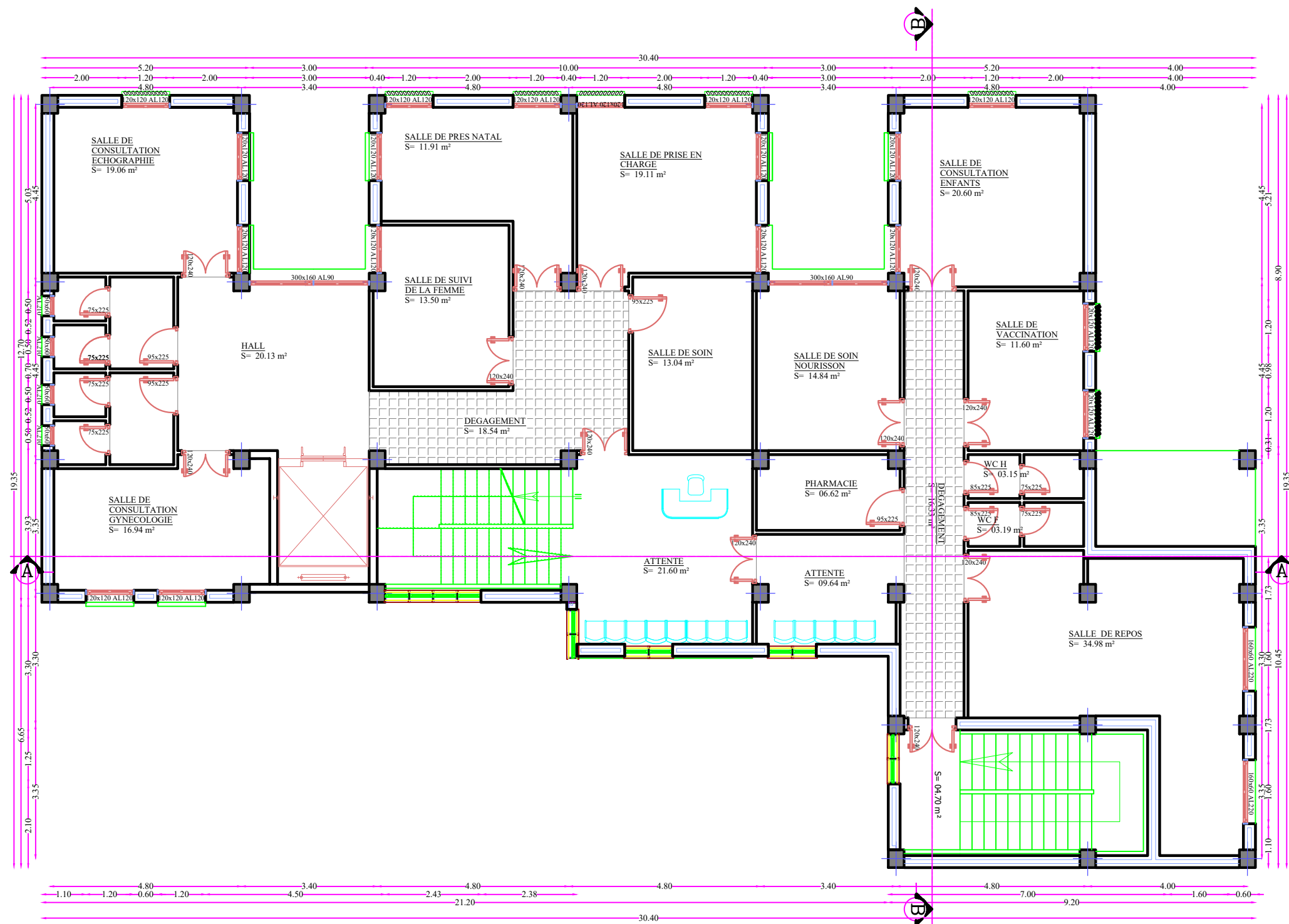
PLAN DE REZ DE CHAUSÉE +0.51
ECH: 1/50

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE	
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE	
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil	
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)	
PROJET	
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL	
WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA	
PLAN	ECHELLE
PLAN DE REZ DE CHAUSÉE	1/50È
PLAN	D'ARCHITECTURE
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza



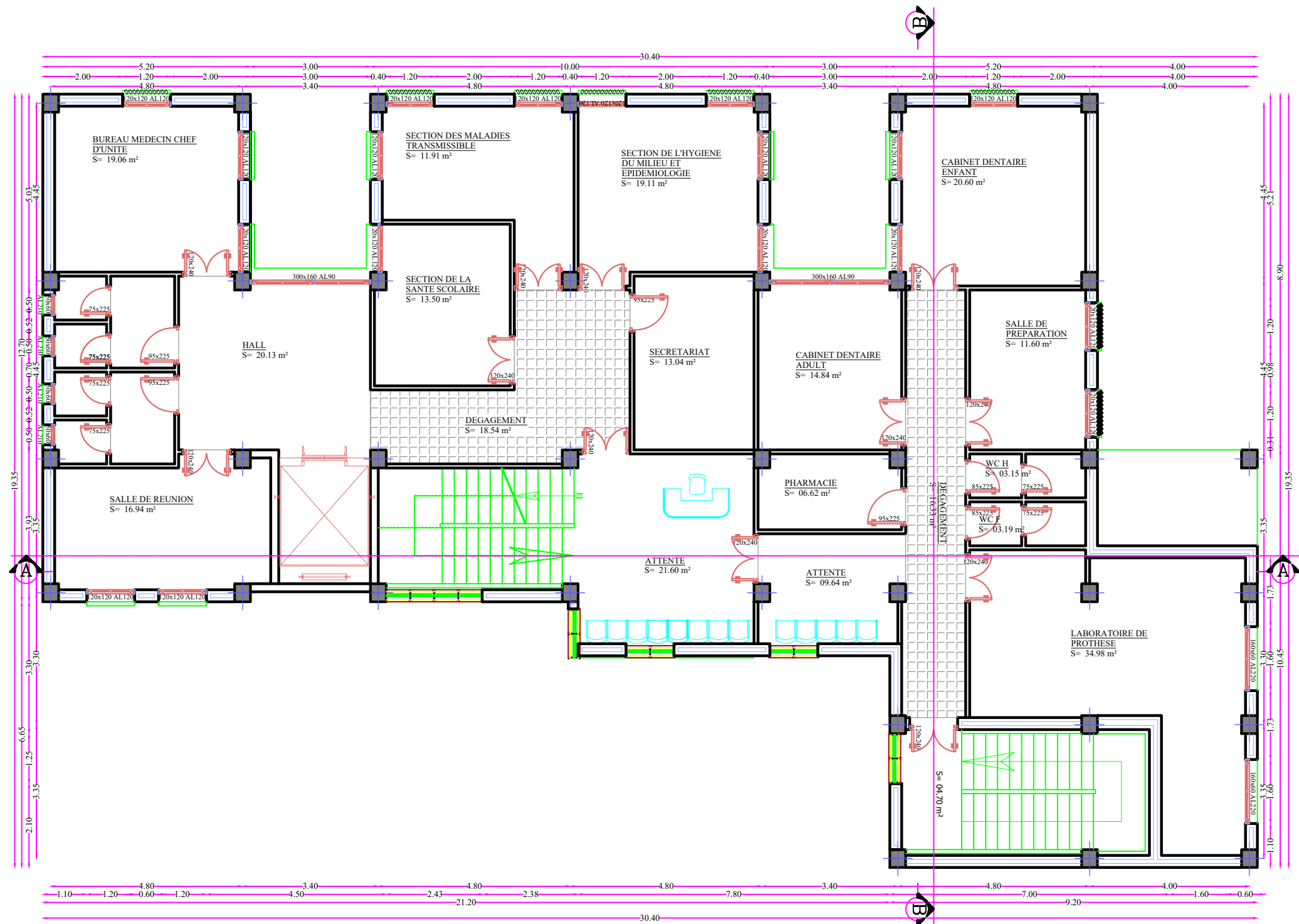
PLAN DE L'ÉTAGE-1- +4.59
ECH; 1/50 È

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE	
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE	
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	
Faculté du Génie de la Construction	
Département de Génie Civil	
Promotion 2024/2025	
Constructions Civiles et Industrielles (CCI)	
PROJET	
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL	
WILAYA DE TIZI OUZOU	
DAIRA DE BOGHNI	
COMMUNE DE ASSI YUCEF	
AIT HIDJA	
PLAN	ECHELLE
PLAN DE L'ETAGE-1-	1/50È
PLAN	D'ARCHITECTURE
PLANCHE-4-	
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE
	Amina Ouiza



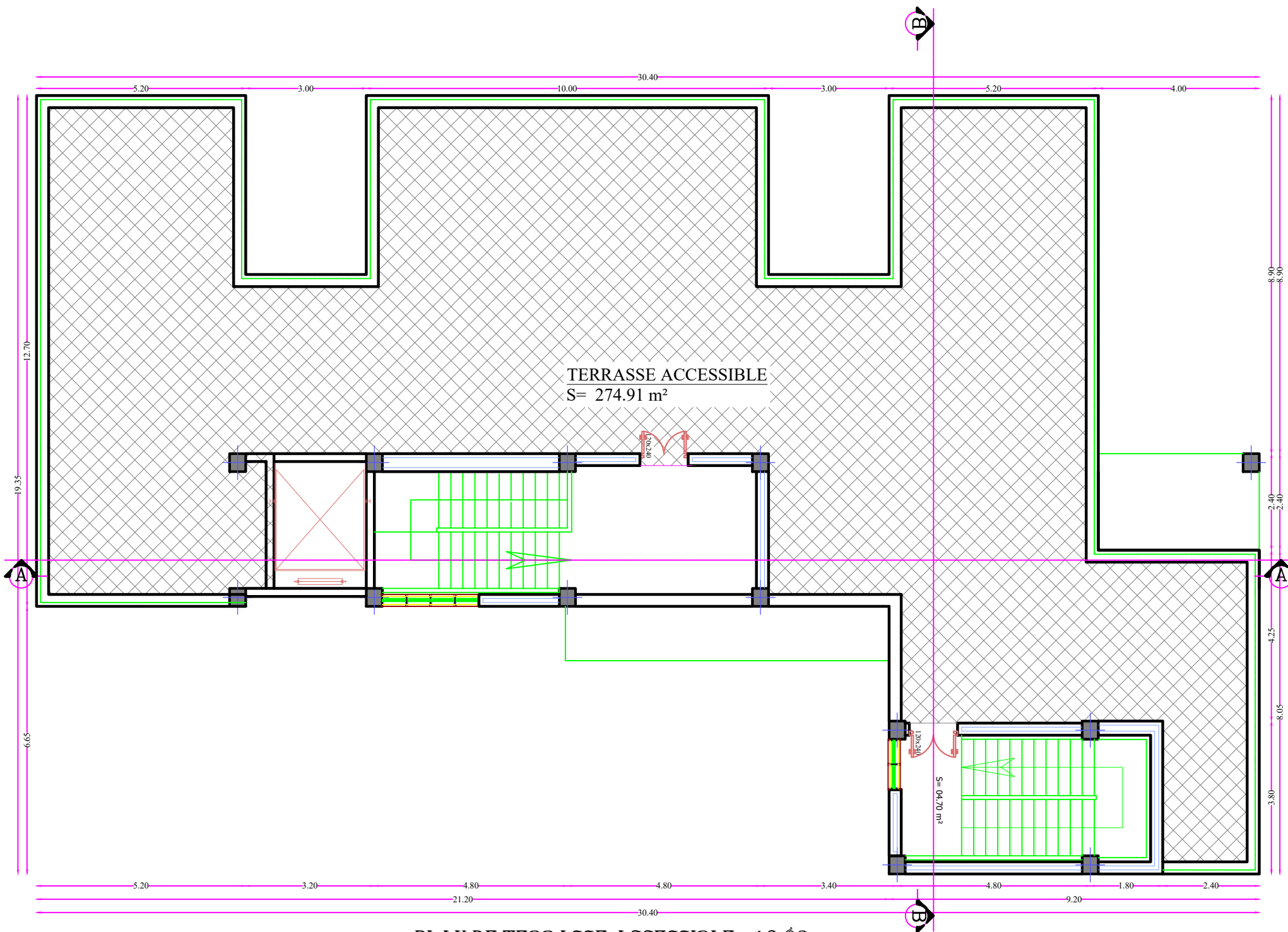
PLAN DE L'ÉTAGE-2- +8.67
ECH; 1/50 È

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL		
WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
PLAN DE L'ETAGE-2-	1/50È	
PLAN	D'ARCHITECTURE	PLANCHE-5-
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza	



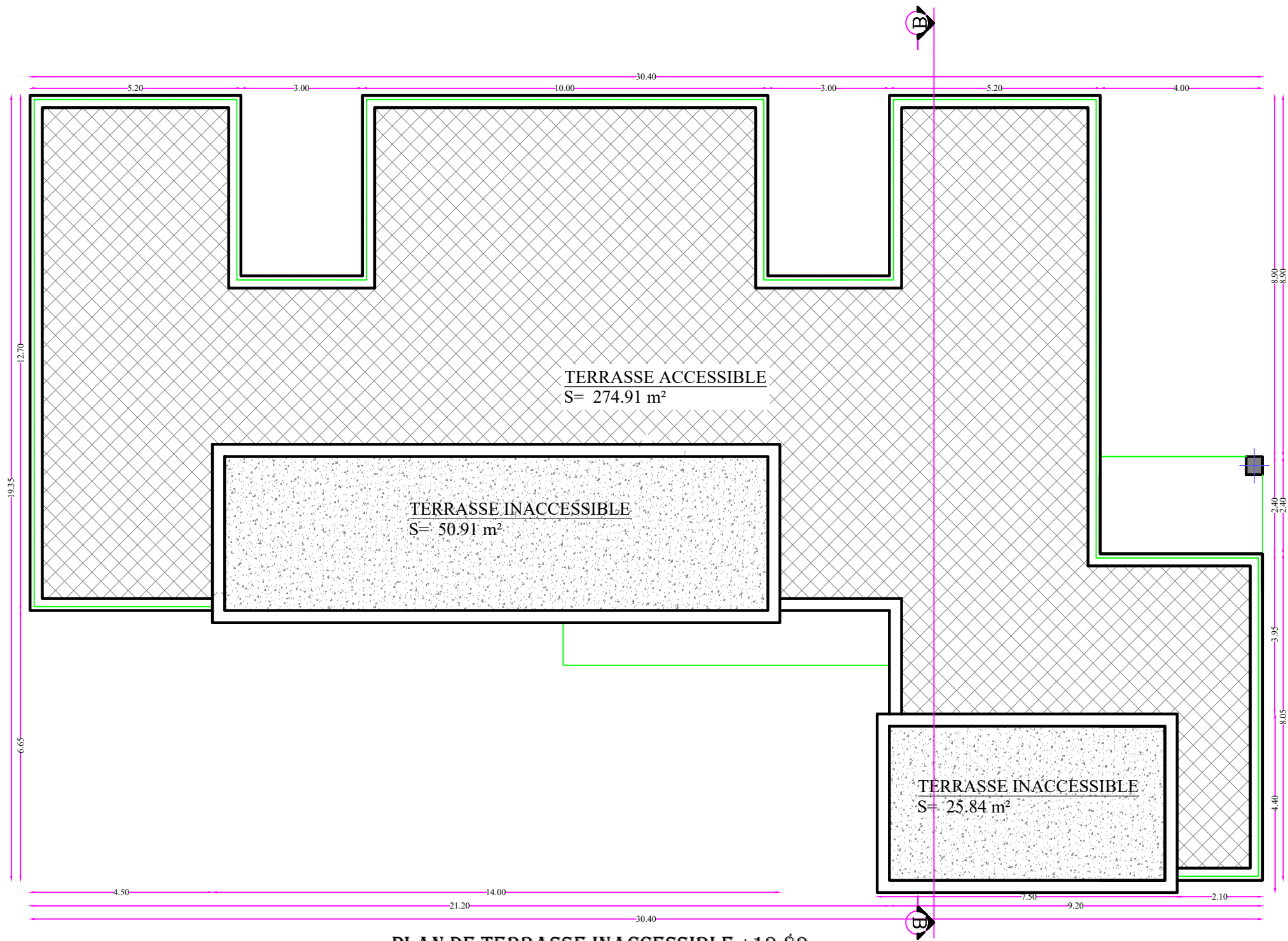
PLAN DE L'ÉTAGE-3- +12.75
ECH; 1/50

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE	
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil	
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)	
PROJET	
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA	
PLAN	ECHELLE
PLAN DE L'ETAGE-3-	1/50È
PLAN	D'ARCHITECTURE
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza

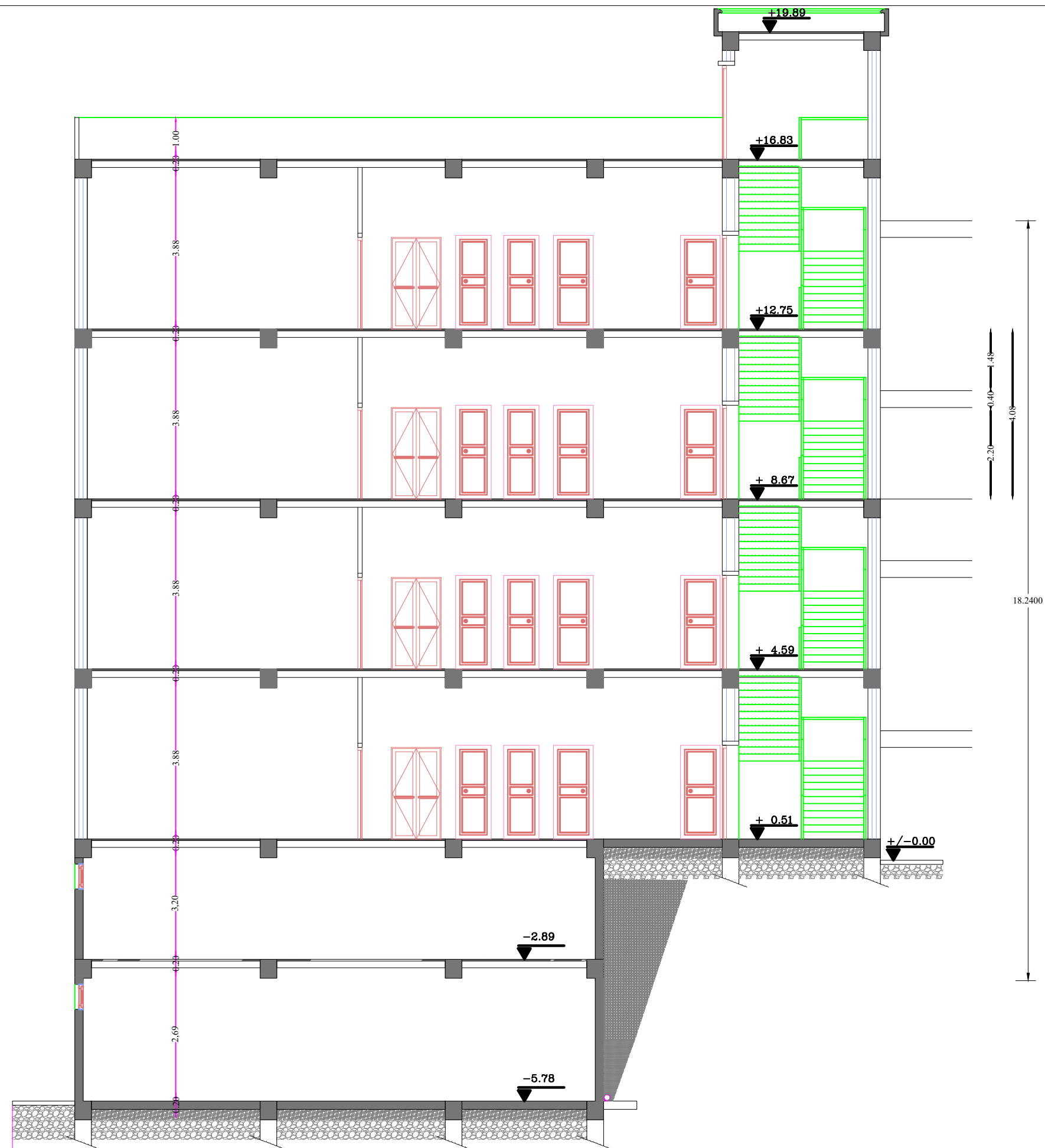


PLAN DE TERRASSE ACCESSIBLE +16.83
ECH: 1/50

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
PLAN DE TERRASSE ACCESSIBLE	1/50È	
PLAN	D'ARCHITECTURE	PLANCHE-7-
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza	



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YUCEF AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
PLAN DE TERRASSE INACCESSIBLE	1/50È	
PLAN	D'ARCHITECTURE	PLANCHE-6-
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE Amina Ouiza	



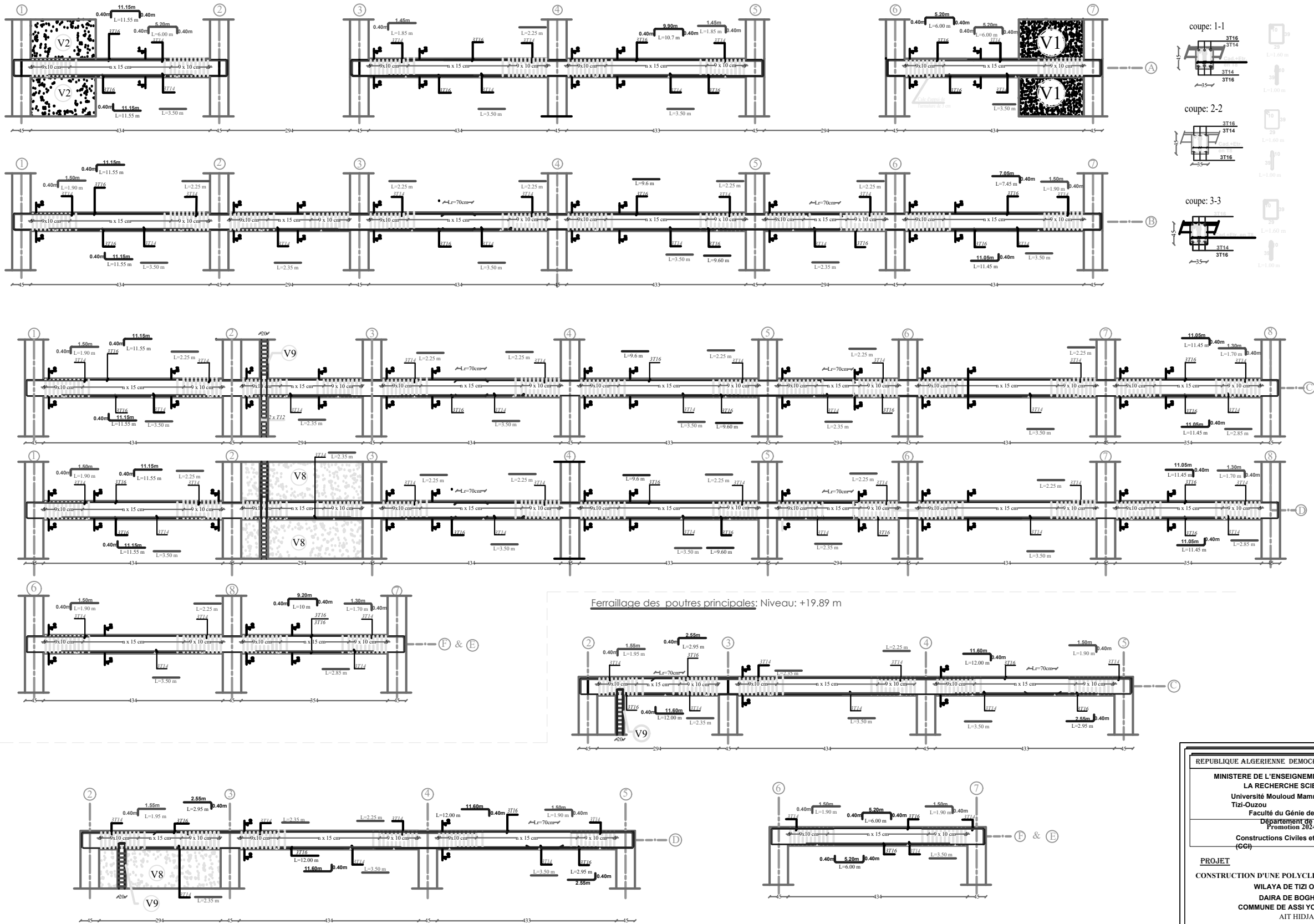
COUPE-BB-
ECH: 1/50 È



FAÇADE PRINCIPALE

ECH: 1/50 È

Ferrailage des poutres principales: Niveaux: +4.59, +8.67, +12.75 et +16.83 m



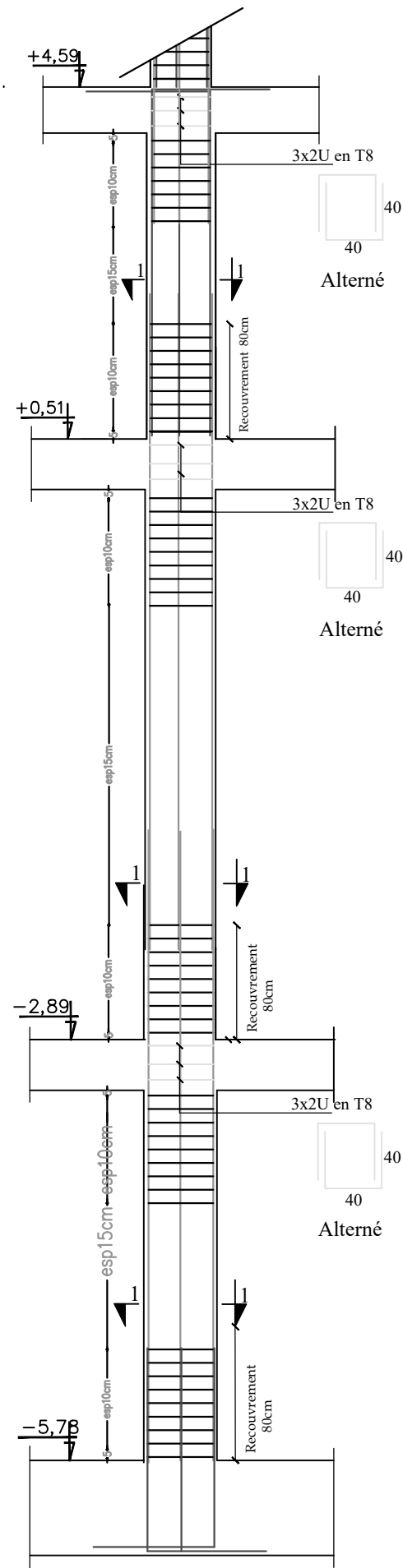
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou		
Faculté du Génie de la Construction		
Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025		
Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL		
WILAYA DE TIZI OUZOU		
DAIRA DE BOGHNİ		
COMMUNE DE ASSI YOUCF		
AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
POUTRES PRINCIPALES	1/50È	
PLAN	GINIE CIVIL	PLANCHE-1-
ENCADRANT:	REELISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE	
	Amina Ouiza	

Technical drawing of a square plate. The plate has a width of 30 and a height of 40. It features four mounting holes, each with a diameter of 3T16. The distance between the centers of the holes is 24. The plate is labeled with 'L=1.40 m' and 'L=0.90 m'.

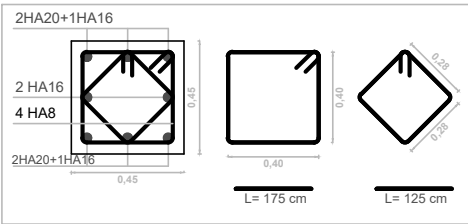
Technical drawing of a cable tray cross-section. The drawing shows a U-shaped tray with a central support. Labels include: 3T16 (top flange), 3T12 (bottom flange), 3T16 (bottom flange), and 3T12 (bottom flange). A dimension line indicates a height of 100. A note 'Cad. + Etr. on T8' is present. A dimension line indicates a width of 30. A dimension line indicates a length of 1.80 m. A dimension line indicates a length of 0.90 m.

Figure 10 consists of two diagrams showing the layout of the main structure for the 1000 m² building. The top diagram is for the '1000 m² - 1000 m²' building, and the bottom diagram is for the '1000 m² - 1000 m²' building. Both diagrams show a long horizontal structure with various dimensions and labels. The top diagram has a total length of 1000 m, with segments of 280 m, 444 m, and 280 m. The bottom diagram has a total length of 1000 m, with segments of 116 m, 280 m, 444 m, and 160 m. The diagrams include labels for columns (A, B, C, D), dimensions (e.g., 11.15m, 1.80m, 1.45m), and structural details (e.g., 3/16, 3/12, 3/10). The diagrams are oriented horizontally, with columns A, B, C, and D labeled from right to left. The top diagram shows a structure with a total length of 1000 m, with segments of 280 m, 444 m, and 280 m. The bottom diagram shows a structure with a total length of 1000 m, with segments of 116 m, 280 m, 444 m, and 160 m. The diagrams include labels for columns (A, B, C, D), dimensions (e.g., 11.15m, 1.80m, 1.45m), and structural details (e.g., 3/16, 3/12, 3/10). The diagrams are oriented horizontally, with columns A, B, C, and D labeled from right to left.

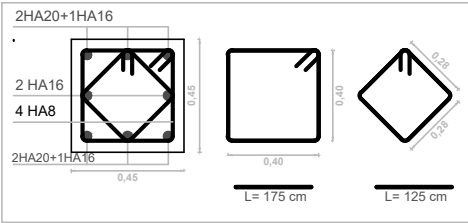
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE	
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université Mouloud Marméri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (GC1)	
<u>PROJET</u>	
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YOUSCEF AIT HIDJA	
<u>PLAN</u>	<u>ECELLE</u>
POUTRES SECONDAIRES	1/50È
<u>PLAN</u>	<u>GINIE CIVIL</u>
<u>PLANCHE 2:</u>	
ENCADRANT: Mr KHELIL Nacim	REALISEE PAR: HAOUCHINE Amina Ouiza



FERRAILLAGE DES POTEaux 45X45



Coupe 1-1

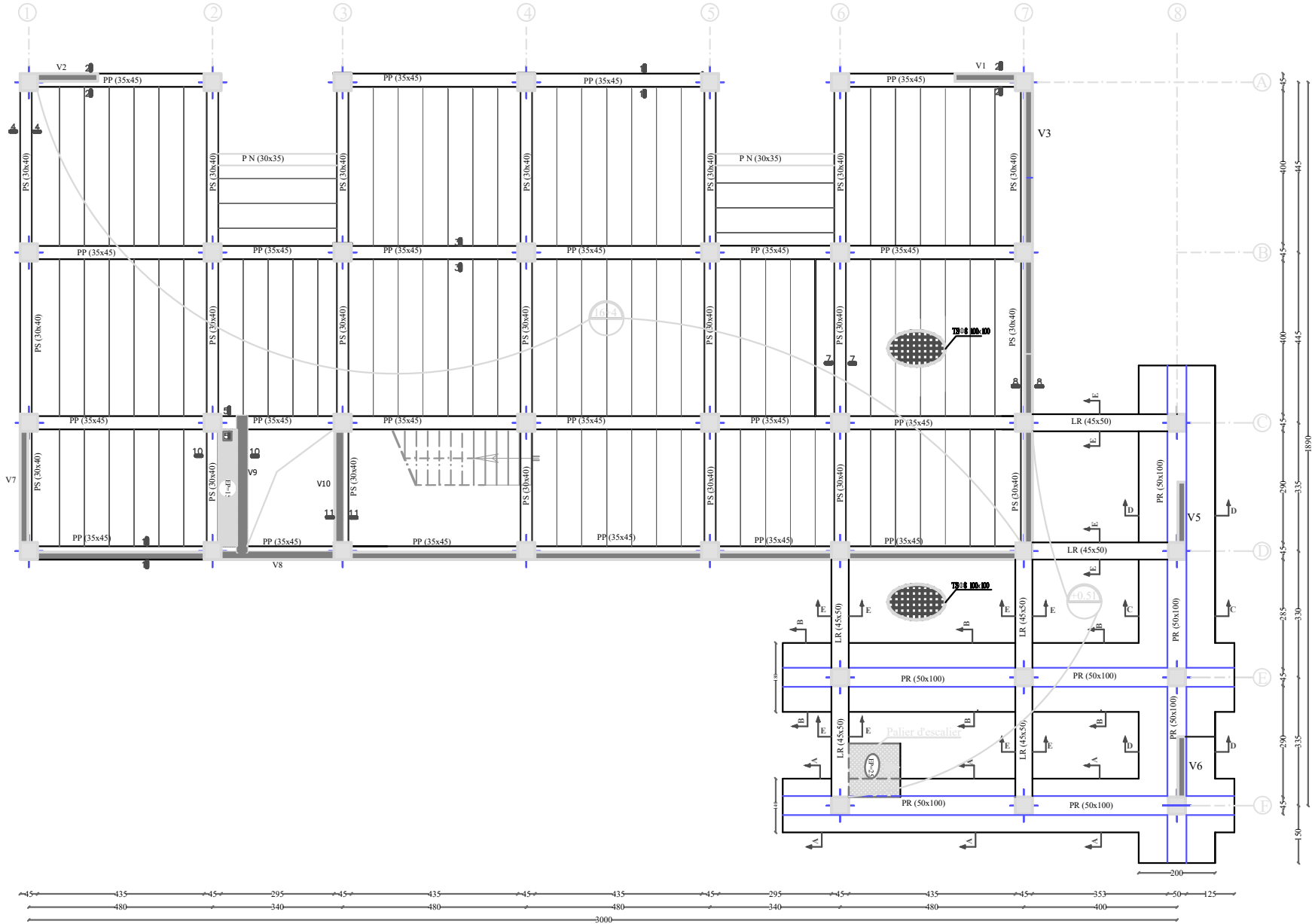


Coupe 2-2

Coupe 2-2

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou		
Faculté du Génie de la Construction		
Département de Génie Civil Promotion 2024/2025		
Constructions Civiles et Industrielles (CCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL		
WILAYA DE TIZI OUZOU		
DAIRA DE BOGHNI		
COMMUNE DE ASSI YUCEF		
AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
POTEAUX	1/50È	
PLAN	GINIE CIVIL	PLANCHE-3-
ENCADRANT:	REEALISEE PAR:	
Mr KHELIL Nacim	HAOUCHINE	
	Amina Ouiza	

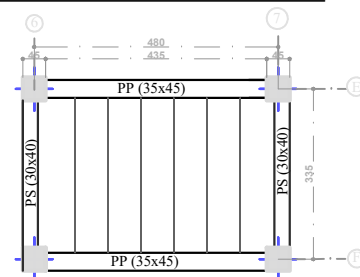
COFFRAGE PLANCHER ET FONDATION: Niv. +0.51 m



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE		
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE		
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou		
Faculté du Génie de la Construction		
Département de Génie Civil		
Promotion 2024/2025		
Constructions Civiles et Industrielles (GCI)		
PROJET		
CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL		
WILAYA DE TIZI OUZOU		
DAIRA DE BOGHNI		
COMMUNE DE ASSI YUCEF		
AIT HIDJA		
PLAN	ECHELLE	
COFFRAGE DU PLANCHER ET FONDATIONS Niv. +0.51m.		1/50È
PLAN	GINIE CIVIL	PLANCHE-4-
ENCADRANT:		REEALISEE PAR:
Mr KHELIL Nacim		HAOUCHINE
		Amina Ouiza



COFFRAGE PLANCHER NIVEAU 19.89M (PARTIE
ASCENCEUR)



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil Promotion 2024/2025 Constructions Civiles et Industrielles (GGI)	
<u>PROJET</u> CONSTRUCTION D'UNE POLYCLINIQUE EN R+3+SOUS-SOL WILAYA DE TIZI OUZOU DAIRA DE BOGHNI COMMUNE DE ASSI YOUNEF AIT HIDJA	
<u>PLAN</u> - COFFRAGE DU PLANCHER Niveaux: +4.59, +8.67, +12.75, +16.83. - COFFRAGE DU PLANCHER Niv: 19.89m.	<u>ECHELLE</u> 1/50^È
PLAN	GINIE CIVIL
ENCADRANT: Mr KHELIL Nacim	REEALISEE PAR: HAOUCHINE Amina Ouiza

Introduction Générale

L'Algérie, située en zone de convergence entre la plaque africaine et la plaque eurasienne, demeure exposée à un risque sismique élevé. Les séismes majeurs constatés au fil des années ont révélé la grande vulnérabilité du bâti algérien, dont une part importante n'a pas été conçue pour résister efficacement aux sollicitations sismiques.

Face à ces constats, le Règlement Parasismique Algérien (RPA), introduit en 1981, a connu une révision majeure en 2003 après le séisme de Boumerdès. Bien que significative, cette version présentait encore des insuffisances. Ces limites ont conduit à une nouvelle mise à jour en 2024, intégrant les retours d'expérience, les progrès scientifiques et les méthodes modernes d'analyse, afin de renforcer la sécurité et la résilience des constructions.

Le présent mémoire porte sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'une structure à usage hospitalier « polyclinique » considérée comme une infrastructure stratégique et réfléchie, dont le rôle est essentiel en situation de catastrophe. L'objectif est de vérifier sa capacité à satisfaire les exigences du RPA 2024 à travers une modélisation détaillée et l'application de méthodes d'analyse avancées, notamment l'analyse pushover, afin de diagnostiquer ses éventuelles faiblesses, d'estimer son point de performance et d'étudier son comportement sismique pour garantir sa sécurité et sa fonctionnalité en cas de crise.

Notre travail se compose de quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente les notions générales sur le phénomène sismique ainsi que l'évolution des règles parasismiques algériennes (RPA). Il expose les caractéristiques des séismes, leurs effets sur les constructions, et souligne les limites du RPA 2003 qui ont motivé sa révision et l'élaboration du RPA 2024, intégrant les retours d'expérience et les évolutions scientifiques récentes.

Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes. Il définit les notions d'aléa, de vulnérabilité et de risque sismique, détaille les principaux facteurs influençant le comportement des bâtiments et présente les différentes méthodes qualitatives et quantitatives d'évaluation, en mettant l'accent sur l'analyse pushover comme outil de diagnostic réaliste.

Dans le troisième chapitre, nous procédons à la présentation du cas d'étude, à savoir une polyclinique considérée comme une structure stratégique et réfléchie. Ce chapitre décrit la modélisation numérique de l'ouvrage, les paramètres retenus pour l'analyse ainsi que l'application des méthodes de calcul prescrites par le RPA 2024.

Enfin, le quatrième chapitre expose et analyse les résultats obtenus, permettant d'étudier le comportement sismique de cette structure, d'identifier ses points faibles et d'évaluer son niveau de performance afin de garantir sa sécurité et sa fonctionnalité en situation de crise.

Chapitre I

Notions générales sur le séisme et les
règlements parasismiques algériens

1.1. INTRODUCTION

Positionnée à la jonction de plaques tectoniques en mouvement, de plaques tectoniques en mouvement, à la limite de la plaque africaine, l'Algérie est souvent menacée par des séismes, l'un des dangers naturels les plus dévastateurs et mortels au niveau mondial. Malgré les avancées importantes réalisées dans la compréhension des mécanismes liés aux séismes depuis les premières initiatives humaines pour améliorer l'habitat, notamment l'introduction du béton armé au début du XXe siècle, il reste encore impossible de prédire ces événements à l'heure actuelle.

Les tremblements de terre dévastateurs qui ont touché l'Algérie, tel que celui d'El Asnam (aujourd'hui Chlef) en 1980 ou celui de Boumerdes en 2003 (*Figure 1.1*), ont révélé la vulnérabilité des structures dans le pays et la nécessité de revoir et réévaluer les techniques de construction.

En effet, même si le béton armé ait contribué à une amélioration rapide du comportement des structures dans un environnement d'urbanisation croissant, son utilisation incorrecte ou inappropriée peut sérieusement intensifier les conséquences néfastes des séismes. À la suite de ces événements, l'Algérie a progressivement pris conscience des risques sismiques, ce qui a conduit à la mise en place de normes parasismiques de plus en plus strictes.

1.2. LE SEISME

Un séisme ou « tremblement de terre » est une vibration du sol provoquée par la rupture soudaine de roches en profondeur. Cette rupture, due à une accumulation de tensions tectoniques, libère une grande quantité d'énergie sous forme d'ondes sismiques. L'accumulation de tensions tectoniques est la cause de ce phénomène, lorsque ces tensions atteignent un point critique, une énorme quantité d'énergie est libérée. Cette énergie se propage ensuite sous forme d'ondes sismiques depuis l'intérieur de la Terre jusqu'à la surface, créant les secousses ressenties. L'intensité de ces secousses dépend essentiellement, de la profondeur de son foyer et de la distance à l'épicentre. Elles peuvent être à peine perceptibles ou, au contraire, si violentes qu'elles entraînent la destruction massive de bâtiments, d'infrastructures et causent des pertes humaines. [1] (*Figure 1.1*).



Figure1. 1 Effondrement d'un immeuble de quatre étages (Pancake-collapse). Suite au séisme de Boumerdes 2003. [2]

1.3. ORIGINE DU SEISME

Les séismes sont principalement causés par le mouvement des plaques tectoniques, entraînées par les courants de convection dans le manteau terrestre. Lorsque ces mouvements créent une pression excessive (des contraintes) sur les failles, les roches finissent par se rompre brusquement, libérant ainsi une grande quantité d'énergie sous forme d'ondes sismiques. Ce processus naturel est à l'origine des séismes les plus puissants. Toutefois, certaines activités humaines, comme les forages, l'exploitation minière ou les essais nucléaires souterrains, peuvent aussi déclencher des séismes dits induits, généralement de plus faible magnitude. [3] [4]

1.4. CARACTERISTIQUES D'UN SEISME

Pour mieux comprendre les séismes, il est essentiel d'examiner leurs caractéristiques fondamentales :

1.4.1. Magnitude (M)

Introduite en 1935 par le sismologue américain Charles F. Richter [5], la magnitude est une mesure de l'énergie libérée au foyer (hypocentre) d'un séisme. Elle est calculée à partir de l'amplitude ou de la durée des ondes sismiques enregistrées par les sismomètres, et exprimée sur une échelle logarithmique. [6] [7]

Quand la magnitude d'un séisme augmente d'une seule unité, l'énergie qu'il libère est multipliée par un facteur de 32, et les vibrations enregistrées sont dix fois plus fortes. La magnitude d'un séisme est une valeur unique, qui reste la même quel que soit le lieu où elle est mesurée.

Aujourd'hui, pour les séismes importants, on utilise plutôt la magnitude de moment (M_w) (Figure 1.2), plus précise que l'échelle initiale de Richter,

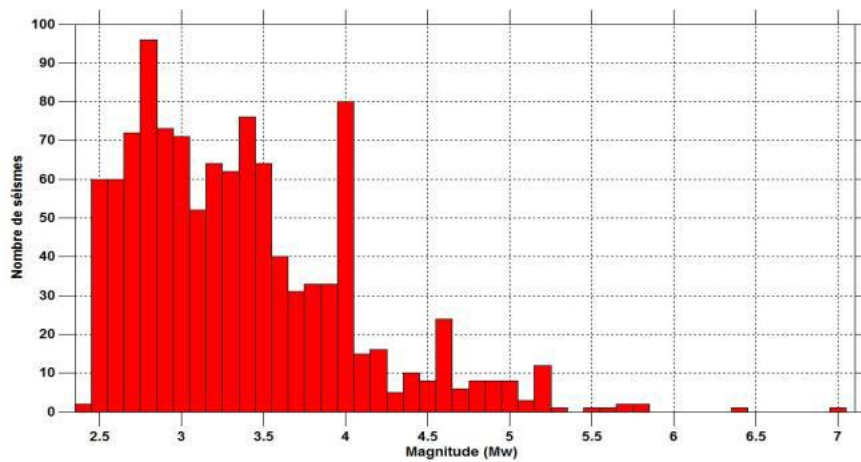


Figure1.2 *Histogramme du nombre de séismes en fonction de la magnitude en Algérie nord occidentale pour la période 1790 – 2016. [8]*

Son calcul prend en compte plusieurs paramètres : type de sismographe utilisé, distance à l'épicentre, profondeur du foyer, ainsi que la nature géologique du sous-sol. En Algérie, cette méthode est utilisée par le CRAAG « Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique » [9], notamment dans les bulletins officiels et les publications scientifiques. Cette mesure fondamentale de l'énergie libérée est une caractéristique essentielle des séismes, et les détails de son application pour leur classification, à travers différentes magnitudes, seront explorés plus en profondeur dans la section dédiée à la classification selon la magnitude. [10]

1.4.2. Intensité (I)

L'intensité sismique correspond aux effets d'un séisme ressentis localement par les populations et observés sur les constructions. Contrairement à la magnitude, qui est une valeur unique pour un séisme donné, l'intensité varie d'un lieu à l'autre. Elle dépend notamment de la distance à l'épicentre, de la profondeur du foyer, de la nature du sol et de la vulnérabilité des bâtiments.

Elle est évaluée à partir d'échelles descriptives comme l'échelle de Mercalli ou l'EMS-98 (Échelle Macrosismique Européenne 1998) [11] présentée dans le (Tableau 1.1), qui se fondent sur les dégâts observés et sur le ressenti des personnes, ce qui peut introduire une certaine subjectivité dans les évaluations. L'intensité représente en conséquence, un outil majeur pour l'étude des séismes qu'ils soient historiques ou futurs, notamment dans les régions où les données instrumentales sont limitées ou inexistantes. [7]

Tableau 1.1 Echelle des intensités EMS 98. [11]

Intensité EMS	Définition	Description des effets typiques observés
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons.
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.
IV	Largement observé	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent et se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étages. De nombreuses maisons ordinaires bien construites des dégâts modérés : petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées, des bâtiments anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent de difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.

IX	Destructions	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écoulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants : défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.
X	Destructions importantes	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Catastrophe généralisée	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.

1.4.3. Foyer (hypocentre)

Le foyer, également appelé hypocentre, est le point d'origine d'un séisme à l'intérieur de la Terre, là où la rupture des roches se produit en premier, libérant l'énergie sismique [12] [7]. Sa profondeur peut varier de quelques kilomètres à environ 700 km, ce qui permet de classer les séismes en trois catégories : superficiels (moins de 60 km), intermédiaires (60 à 300 km) et profonds (plus de 300 km). Aucun foyer n'a été observé au-delà de 700 km de profondeur. [13]

Les ondes sismiques se propagent à partir de ce point dans toutes les directions. L'épicentre correspond à la projection verticale du foyer à la surface du sol, et c'est souvent dans cette zone que les secousses sont les plus intenses. [14]

1.4.4. Épicentre

L'épicentre, comme susmentionné, est le point situé à la surface de la Terre directement à la verticale de l'hypocentre (ou foyer), qui constitue le lieu de la rupture en profondeur et de la libération de l'énergie sismique. Bien que l'épicentre soit souvent la zone où l'intensité du séisme est la plus forte en raison de sa proximité avec la source, l'intensité ressentie en ce point peut varier en fonction de la profondeur du foyer, des caractéristiques géologiques du sol et de la nature des structures bâties. En tant que projection verticale du foyer à la surface, l'épicentre représente un point de référence essentiel pour localiser et comprendre l'impact d'un tremblement de terre. [14]

1.4.5. Faille

Une faille sismique est une zone fracturée de la croûte terrestre où des blocs rocheux glissent sous l'effet de contraintes tectoniques accumulées. Cette rupture soudaine libère des ondes sismiques, causant un séisme. La magnitude d'un séisme dépend notamment de la

longueur de la faille activée, de la surface rompue et du type de mouvement observé (normal, inverse ou décrochant). [1]

En Algérie, la convergence entre les plaques africaine et eurasienne engendre de nombreuses failles actives, notamment dans la région du Tell, le long de la côte méditerranéenne. D'autres structures sismogènes sont également présentes dans les Atlas sahariens, et plus rarement dans le Sahara central [15]. L'étude des failles est importante afin de comprendre l'activité sismique d'une région, mais aussi pour évaluer les aléas sismiques et mettre en place des stratégies efficaces de prévention et de réduction des risques.

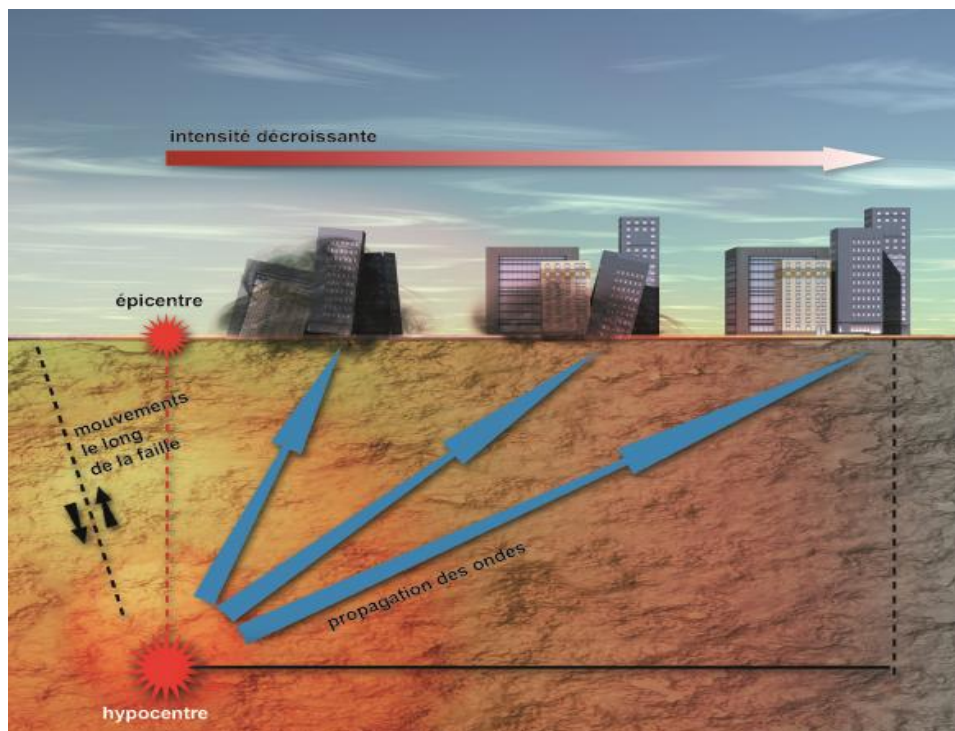


Figure 1. 3 Schéma illustratif d'un séisme : foyer, épicentre, faille et intensité. [12]

1.5. CATEGORIES DE SEISMES

Les séismes peuvent être classés selon différents paramètres que cela soit : leur origine, leur profondeur, leur magnitude, ou encore leur intensité.

1.5.1. Classification selon l'origine

On distingue quatre catégories de séismes en fonction de leur origine : Tectonique, volcanique, d'effondrement et artificielle.

1.5.1.1. Séismes tectoniques

Les séismes tectoniques sont les plus fréquents et les plus puissants. Ils se produisent aux frontières des plaques lithosphériques, où celles-ci, en mouvement constant, accumulent des

contraintes. Lorsque la pression devient trop forte, une rupture soudaine survient le long d'une faille existante ou par la formation d'une nouvelle faille. Cette libération brutale d'énergie génère des ondes sismiques, provoquant les secousses ressenties en surface (voir *Figure 1.4*). En raison de leur lien avec les grands mouvements géologiques, ces séismes sont particulièrement dangereux et restent difficiles à prévoir. [1] [6]

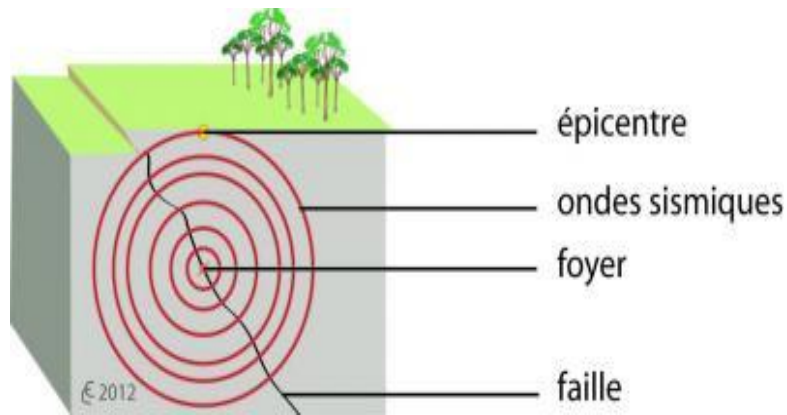


Figure 1. 4 Illustration d'un séisme d'origine tectonique et de la propagation des ondes sismiques. [16]

1.5.1.2. Séismes volcaniques

Les séismes volcaniques sont directement liés à l'activité des volcans. Ils sont causés par la montée du magma, l'ouverture de fissures, la pression exercée sur les roches ou l'effondrement de structures volcaniques. Ces processus libèrent de l'énergie sous forme de secousses (voir *Figure 1.5*), parfois appelées "trémors". Moins puissants et plus localisés que les séismes tectoniques, ils jouent un rôle essentiel dans la surveillance volcanique, car ils peuvent annoncer une éruption imminente. [6]

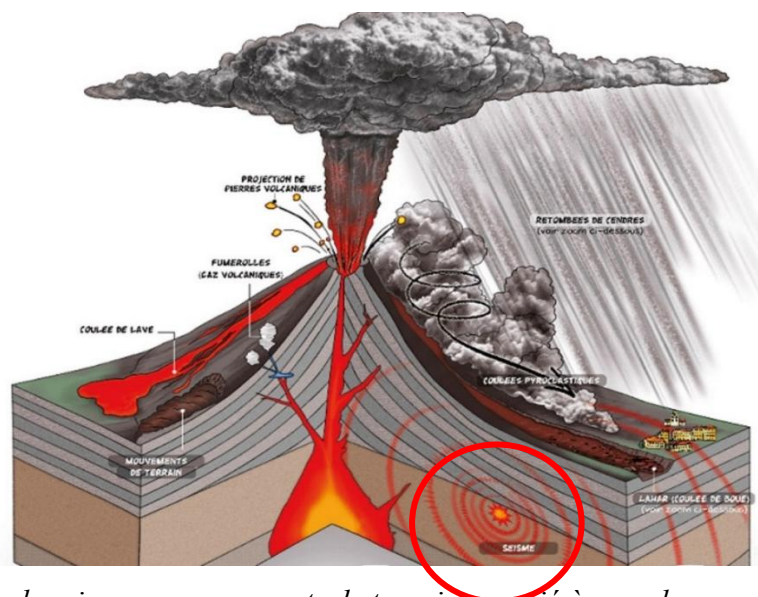


Figure 1. 5 Séismes volcaniques : mouvements de terrain associé à un volcan en éruption. [17]

1.5.1.3. Séismes d'effondrement

Les séismes d'effondrement, également appelés séismes de cavité, sont des tremblements de terre localisés et de faible magnitude, causés par l'effondrement soudain de cavités souterraines. Contrairement aux séismes tectoniques, ne résultent pas du mouvement des plaques terrestres, mais de la rupture du toit de cavités naturelles, souvent présentes dans les terrains karstiques où l'eau dissout la roche calcaire. Un exemple en est les grottes de Gueldaman (Béjaïa) secousses (voir *Figure 1.6*), qui font partie d'un réseau karstique partiellement exploré. Il existe aussi des cavités artificielles, comme celles créées par l'exploitation minière ou les carrières abandonnées, telles que les mines de charbon à Ouenza (Tébessa) (voir *Figure 1.7*). Lorsque l'exploitation cesse, certaines galeries sont abandonnées sans être comblées, et le temps, l'érosion ainsi que le poids des sols peuvent provoquer leur effondrement, engendrant ainsi des secousses ressenties en surface.

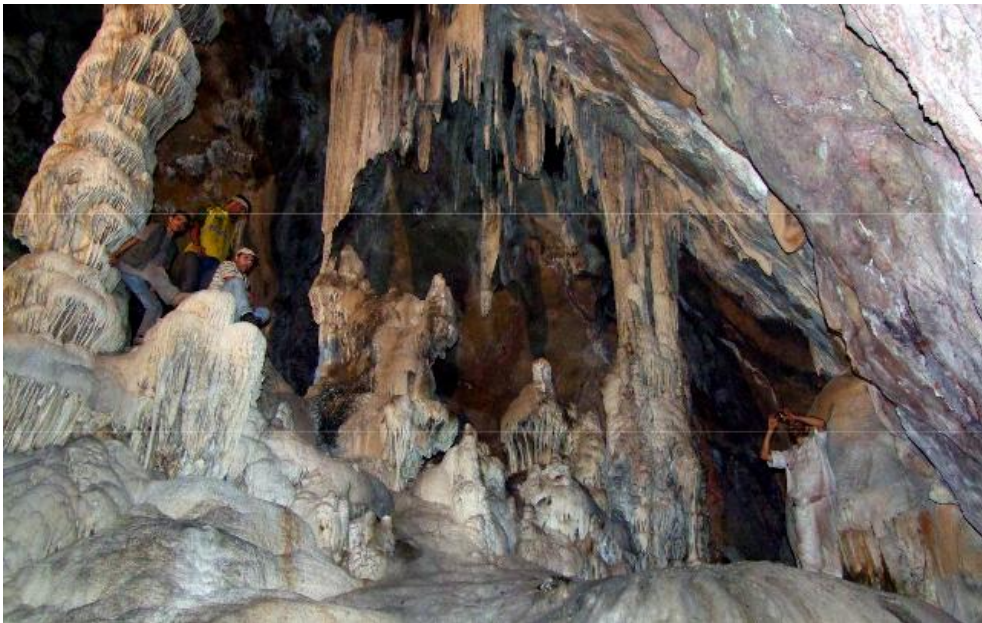


Figure1. 6 Grottes de Gueldaman à Béjaïa : cavité karstique. [18]

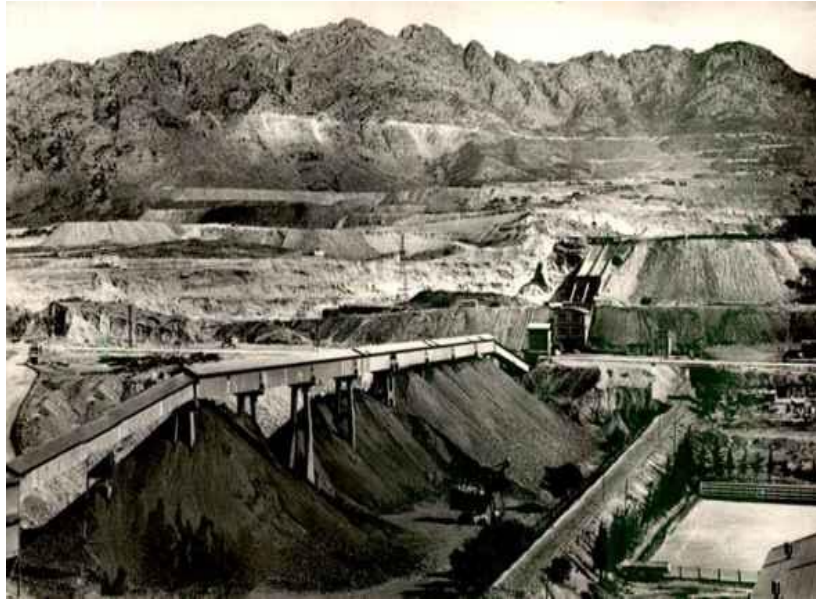


Figure 1. 7 Mine de charbon d'Ouenza à Tébessa : cavité artificielle. [19]

1.5.1.4. Séismes artificielles (induits ou provoqués)

Les séismes artificiels, aussi appelés séismes induits ou provoqués, sont des secousses sismiques déclenchées par certaines activités humaines modifiant les équilibres naturels du sous-sol, comme l'exploitation minière, la fracturation hydraulique (fracking), la géothermie, l'extraction d'hydrocarbures, le remplissage de barrages et les explosions souterraines (voir Figure 1.7). En Algérie, l'utilisation du fracking pour l'extraction de gaz de schiste a soulevé des inquiétudes concernant des séismes induits, notamment dans des zones géologiquement fragiles. Bien que souvent de faible magnitude, ces événements démontrent la capacité humaine à déclencher des mouvements sismiques, nécessitant en conséquence, une surveillance active et attentive. [20]

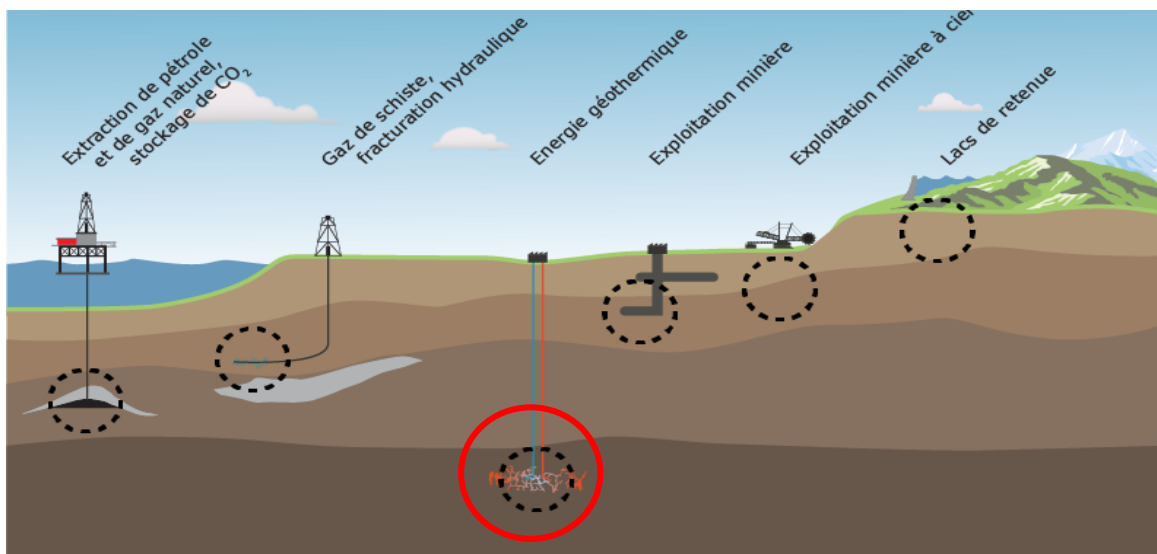


Figure 1. 8 Causes des séismes d'origine humaine. [21]

1.5.2. Classification selon la profondeur

Les séismes peuvent être aussi classés en fonction de leur profondeur, ce qui influence leur impact et leur propagation. Voici les trois principales catégories :

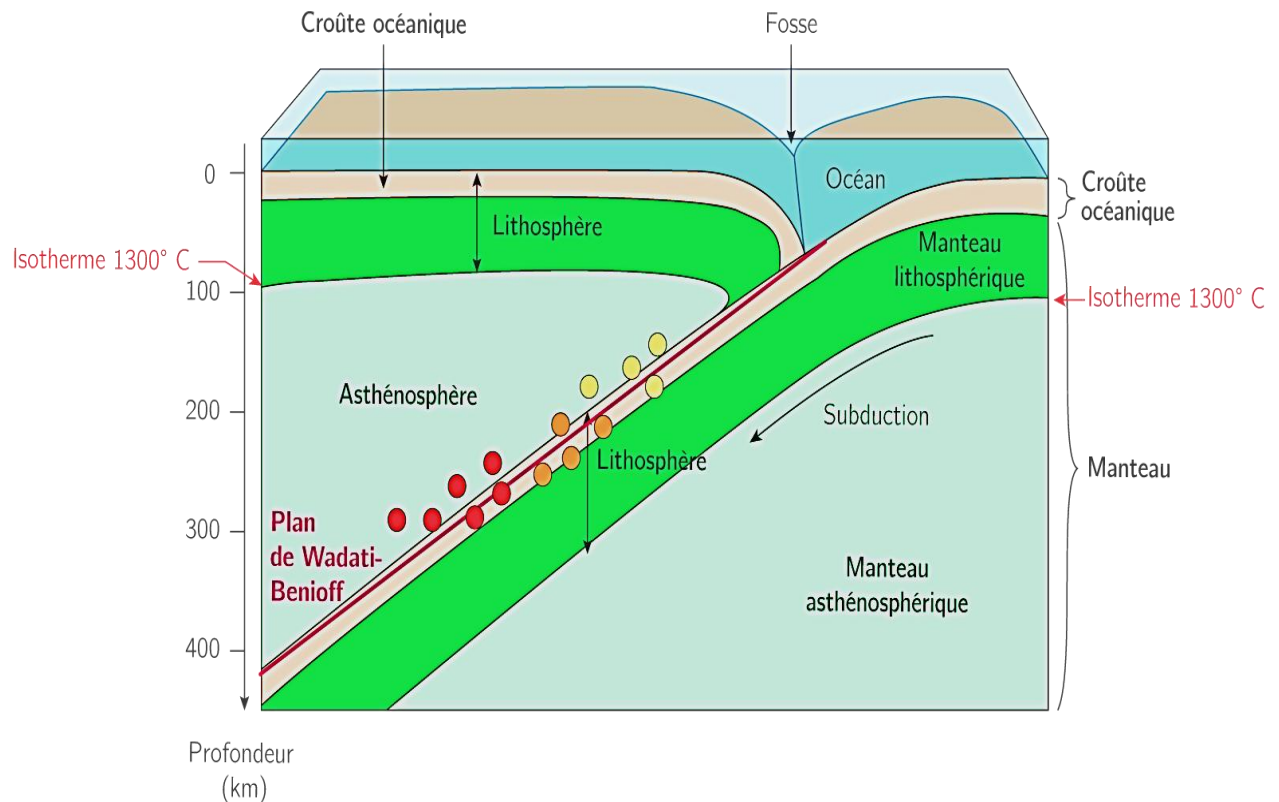


Figure 1. 9 Distribution des foyers sismiques en fonction de la profondeur le long du plan de Wadati-Benioff

1.5.2.1. Séismes superficiels

Les séismes superficiels sont les plus fréquents et souvent les plus destructeurs, car leur foyer se situe à moins de 70 kilomètres de profondeur. Ils se produisent généralement dans les zones de divergence des plaques tectoniques, où la croûte terrestre est plus fine. L'énergie libérée atteint rapidement la surface, provoquant des secousses intenses. [22]

1.5.2.2. Séismes intermédiaires

Les séismes intermédiaires se produisent à une profondeur comprise entre 70 et 300 kilomètres, souvent dans des zones de subduction (zone d'enfoncement d'une plaque tectonique sous une autre plaque de densité plus faible). Leur foyer, ou hypocentre, est plus profond, ce qui atténue leur impact à la surface, bien que leur énergie puisse être ressentie sur de grandes distances. Ils sont généralement moins destructeurs que les séismes superficiels. [22]

1.5.2.3. Séismes profonds

Les séismes profonds se produisent à plus de 300 kilomètres de profondeur, principalement dans les zones de subduction, le long du plan de Wadati-Benioff comme on peut le constater dans la (Figure 1.9), une région de sismicité profonde et inclinée. Bien que moins fréquents et encore mal compris, ces séismes ont un impact réduit à la surface, car l'énergie doit parcourir une grande distance. Leur foyer peut atteindre jusqu'à 645 kilomètres de profondeur. [22]

1.5.3. Classification selon la magnitude

La magnitude, telle que définie précédemment, sert à la classification des séismes en différentes catégories.

Magnitude	Effets engendrés
9	Destruction totale à l'épicentre, et possible sur plusieurs milliers de km
8	Dégâts majeurs à l'épicentre, et sur plusieurs centaines de km
7	Importants dégâts à l'épicentre, secousse ressentie à plusieurs centaines de km
6	Dégâts à l'épicentre dont l'ampleur dépend de la qualité des constructions
5	Tremblement fortement ressenti, dommages mineurs près de l'épicentre
4	Secousse sensible, mais pas de dégâts
3	Seuil à partir duquel la secousse devient sensible pour la plupart des gens
2	Secousse ressentie uniquement par des gens au repos
1	Secousse imperceptible

Figure1. 10 Échelle de magnitudes sismiques de Richter. [6]

1.5.3.1. Microséismes

Les microséismes sont de légers tremblements de terre de faible magnitude, généralement inférieure à 2 sur l'échelle de Richter (Figure 1.10) [5]. Bien que principalement d'origine naturelle, résultant de petites fractures dans la croûte terrestre, ils peuvent également être induits par des activités humaines telles que l'exploitation minière, la géothermie ou le fracking. Ces microséismes rarement ressentis par l'être humain bien que fréquents, ils sont cependant vastement étudiés par les sismologues, qui en surveille l'activité tectonique subtile.

1.5.3.2. Séismes légers à modérés

Les séismes de faible à moyenne magnitude, généralement compris entre 4,0 et 5,9 sur l'échelle de Richter (*Figure 1.10*) [5], sont des événements fréquents qui résultent de la libération d'énergie due aux mouvements tectoniques. Ces secousses sont suffisamment importantes pour être ressenties par la population, provoquant souvent la panique, sans toutefois causer de dommages importants sur les constructions résistantes. Leur impact dépend de plusieurs facteurs, notamment la profondeur du foyer, la densité de population et la qualité des infrastructures. En Algérie, par exemple, un séisme de magnitude 5,1 a été ressenti dans plusieurs villes du nord, dont Alger et Tizi Ouzou, le 18 mars 2025, sans causer de dégâts majeurs [23] . Plus récemment, une secousse de magnitude 4,0 a frappé la wilaya de Médéa le 20 mars 2025 [24].

1.5.3.3. Séismes forts à majeurs

Les séismes forts à majeurs, de magnitude supérieure à 6,0 (*Figure 1.10*) [5], libèrent une énergie considérable lors de mouvements de faille, provoquant des dommages importants à très graves, notamment en zones urbaines, avec des risques d'effondrement de bâtiments, de rupture d'infrastructures ou encore des tsunamis. Leur intensité dépend de plusieurs facteurs, notamment la profondeur du foyer, la distance à l'épicentre et le niveau de préparation au séisme. L'Algérie a connu dans un passé récent, de tels événements dévastateurs, comme le séisme de Chlef (ex-El Asnam) en 1980, de magnitude 7,3, qui a détruit la ville et fait plus de 2 600 morts (*Figure 1.11*), et celui de Boumerdes en 2003, de magnitude 6,8, qui a fait plus de 2 300 morts et causé d'importants dégâts dans la région du centre nord (*Figure 1.12*).



Figure1. 11 Dommages causés par le séisme de Chlef (ex-El Asnam) en 1980. [25]



Figure 1. 12 Dégâts importants causés par le séisme de Boumerdes en 2003 [26]

1.5.3.4. Séismes catastrophiques

Les séismes dont la magnitude atteint 8,0 ou plus sont considérés comme catastrophiques en raison de leur potentiel de destruction massive à l'échelle régionale (*Figure 1.10*) [5]. Bien qu'ils soient rares vis-à-vis des centaines de milliers de séismes enregistrés chaque année, leurs conséquences peuvent être dramatiques, notamment en termes de pertes humaines, de dégâts matériels et de bouleversements économiques. Ces séismes peuvent remodeler le paysage et provoquer l'effondrement généralisé des bâtiments. Malgré leur faible fréquence d'occurrence, ils représentent une menace naturelle majeure. Leur étude approfondie par des organismes comme l'ISC (Centre Sismologique International) [27], permet de mieux comprendre ces événements et anticiper leurs effets futurs.

1.5.4. Classification selon l'intensité (mesure des effets ressentis à la surface)

En Algérie, la classification des séismes selon l'intensité s'appuie sur l'échelle macrosismique européenne EMS-98 [11], utilisée pour mesurer les effets ressentis à la surface terrestre, par opposition à la magnitude qui évalue l'énergie libérée à la source. Cette échelle comporte 12 degrés, allant de I (non ressenti) à XII (destruction totale), et permet d'estimer les dommages matériels, les réactions humaines ainsi que l'impact environnemental (voir le *Tableau 1.1*) présenté précédemment en détail. Par exemple, le séisme de Boumerdes en 2003, de magnitude 6,8, a atteint une intensité maximale de IX (destructeur) [28], provoquant l'effondrement de nombreux bâtiments et causant plus de 2 300 morts. Ces évaluations ont été établies à partir d'études macrosismiques menées par le CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique) [9], à partir d'observations collectées sur le

terrain. Ainsi, la mesure de l'intensité constitue un outil essentiel dans la gestion du risque sismique en Algérie, en complément des données de magnitude.

1.6. ONDES SISMIQUES

Un séisme libère de l'énergie au niveau du foyer, situé sous la surface terrestre, provoquant la propagation d'ondes sismiques dans toutes les directions. Ces ondes, qui se déplacent sans altérer durablement les roches traversées, se divisent en deux grandes catégories : les ondes de volume (ondes P et S) (*Figure 1.13*), qui se propagent à l'intérieur de la Terre, et les ondes de surface (ondes de Love et de Rayleigh), qui se déplacent le long de la croûte terrestre et causent les plus fortes secousses. Comprendre leurs caractéristiques permet d'évaluer leur impact sur les sols et les bâtiments, en tenant compte de la nature du terrain et de la distance au foyer. L'analyse de ces ondes permet aussi aux sismologues de localiser les séismes, d'estimer leur puissance et d'explorer la structure interne de la planète. [6] [22]

1.6.1. Ondes de volume

Les ondes de volume se propagent à l'intérieur de la Terre depuis le foyer du séisme, traversant différentes couches géologiques. Elles peuvent être réfléchies ou réfractées par les limites de ces couches. Ces ondes, sont responsables des déformations des bâtiments, en raison de leurs fréquences proches de celles des structures humaines. Leur étude permet de localiser le foyer du séisme et de mieux comprendre la structure interne de la Terre. [6] [29]

Il existe deux types d'ondes de volume :

1.6.1.1. Ondes P (primaires ou de compression)

Les ondes P sont des ondes longitudinales, comparables aux ondes sonores, capables de se propager dans tous les états de la matière. Elles provoquent une compression et une dilatation des roches dans le sens de leur propagation, ce qui donne un mouvement de va-et-vient. Ce sont les ondes sismiques les plus rapides, avec une vitesse généralement comprise entre 5 et 7 km/s, ce qui explique qu'elles soient les premières à être détectées par les sismographes. [22] [29] (*Figure 1.13*)

1.6.1.2. Ondes S (secondaires ou de cisaillement)

Les ondes S qui sont des ondes transversales, arrivent après les ondes P car elles sont plus lentes, avec une vitesse de propagation de 3 à 4 km/s dans la croûte terrestre. Contrairement aux ondes P, elles déplacent les particules perpendiculairement à la direction de propagation, dans un plan vertical, produisant un mouvement de cisaillement (de haut en bas ou de gauche à

droite) et ces ondes ne peuvent se propager que dans les solides, ce qui a permis aux scientifiques de déduire l'existence d'un noyau externe liquide. Leur comportement fournit donc des informations précieuses sur la composition interne de la planète. (*Figure 1.13*)

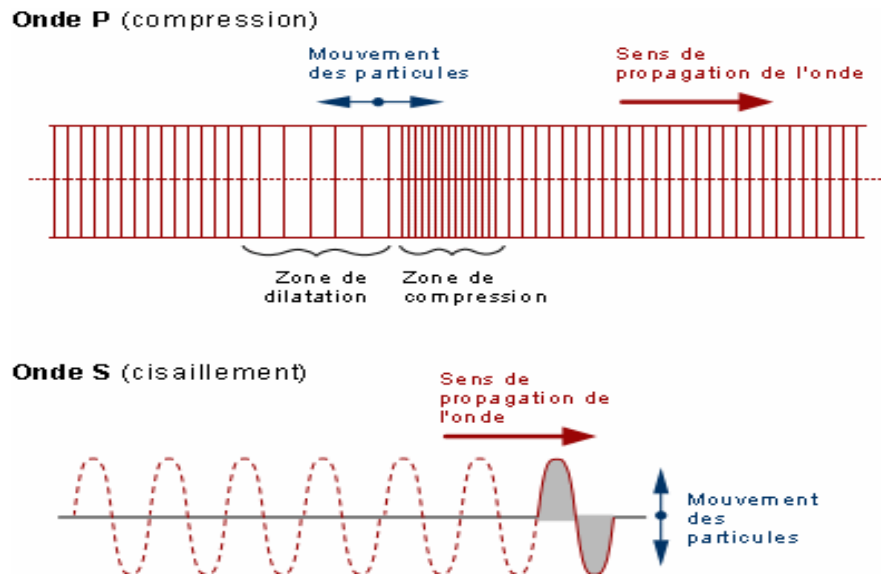


Figure 1. 13 Ondes Primaires (P) et Secondaires (S). [30]

1.6.2. Ondes de surface

Les ondes de surface, qui se propagent le long de la surface terrestre suite à l'interaction des ondes P et S, sont les principales causes des dommages sismiques, surtout loin de l'épicentre. Plus lentes que les ondes de volume, leur vitesse dépend des couches superficielles, et bien que superficielles, elles concentrent l'énergie et peuvent impacter significativement les constructions. Il existe principalement deux types d'ondes de surface :

1.6.2.1. Les ondes de Love

Les ondes de Love (L), mises en évidence par Augustus E. Love en 1911 [29], sont des ondes sismiques de surface à mouvement horizontal transversal. Similaires aux ondes S mais sans composante verticale, elles se propagent horizontalement et causent d'importants dommages latéraux aux structures. Leur existence dépend des couches superficielles et leur vitesse varie avec la fréquence. Comprendre ces ondes est essentiel en sismologie pour évaluer les risques de dommages horizontaux lors des séismes. (*Figure 1.14*)

1.6.2.2. Les ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh sont des ondes sismiques de surface qui se propagent près de la surface terrestre en induisant un mouvement elliptique rétrograde, semblable à celui des vagues à la

surface de l'eau. Plus lentes que les ondes S, elles sont principalement responsables des effets de roulement et des secousses verticales ressentis lors des séismes. [29] (*Figure 1.14*)

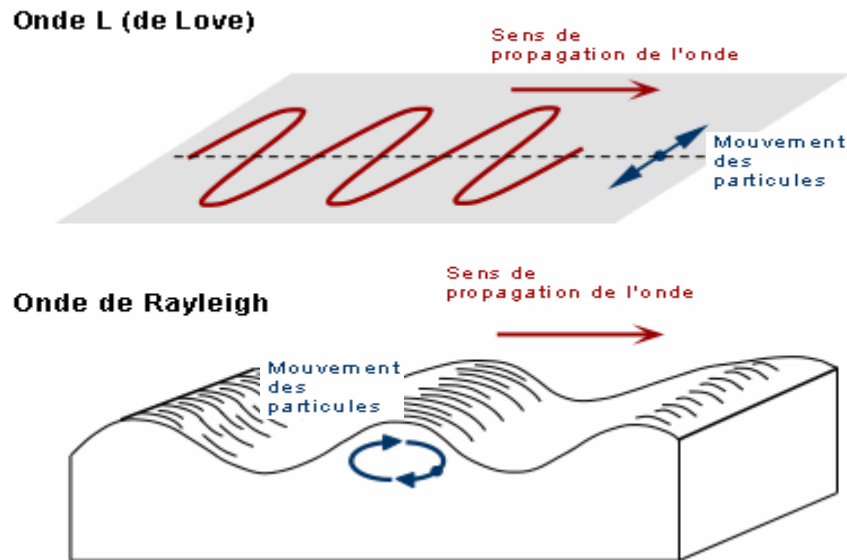


Figure 1. 14 Ondes sismiques surfaciques de Love (L) et Rayleigh.

1.7. LA REGLEMENTATION PARASISMIQUE

1.7.1. Historique et évolution des règles parasismiques Algériennes (RPA)

Le Document Technique Règlementaire « D.T.R-BC 2.48 », portant sur les « Règles Parasismiques Algériennes RPA 2024 » [31], a été approuvé par la Commission Technique Permanente pour le contrôle technique de la construction (CTC) [32] lors de sa réunion du 15 mai 2024. Cette nouvelle réglementation marque une évolution importante, s'inscrivant dans la continuité des précédents documents tels que le RPA 81, sa version de 1983, le RPA 88, et le RPA 99, actualisé en 2003.

Cette mise à jour, rendue nécessaire après près de vingt ans de pratique enrichissante des experts algériens, intègre également les enseignements tirés des récents séismes en Algérie, notamment ceux de Bejaia, Mila, Alger et Médéa, ainsi que d'événements marquants à l'international, tels que ceux du Sichuan en Chine (2008), de Tohoku au Japon (2011), et de Turquie et Syrie en 2023. [31]

Les RPA 2024 introduisent des modifications significatives, comme l'ajout de nouveaux types de sols, témoignant d'une volonté d'améliorer la résilience des constructions face aux aléas sismiques.

1.7.2. Objectifs

Ce document réglementaire fixe les normes essentielles pour la conception et le calcul des constructions en zones sismiques, visant à garantir la sécurité des vies humaines et la durabilité des bâtiments.

Il a pour but de prévenir l'effondrement des structures et de réduire les dommages des éléments non structuraux, tout en assurant une capacité de déformation et de dissipation d'énergie pour résister aux forces sismiques.

Les Règles Parasismiques Algériennes sont d'importance, de par le fait qu'elles établissent des exigences minimales pour les constructions, encouragent des pratiques de construction sûres, sensibilisent aux risques sismiques et adaptent continuellement les normes aux avancées scientifiques et aux leçons des événements passés.

1.7.3. Domaine D'application

Les Règles Parasismiques Algériennes s'appliquent principalement aux nouvelles constructions, englobant divers types de bâtiments, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou industriels. Elles incluent également les projets de rénovation et de renforcement visant à accroître la résistance sismique des structures existantes. [31]

Les RPA s'étendent aux infrastructures publiques, telles que routes, ponts et barrages, qui doivent respecter des normes spécifiques. Cependant, elles ne s'appliquent pas aux constructions spéciales où des dommages, même minimes, pourraient entraîner des conséquences graves, comme les centrales nucléaires ou les installations de stockage de matériaux dangereux, qui suivent des normes particulières.

De plus, les RPA ne concernent pas les zones classées en sismicité négligeable. En somme, ces règles visent à garantir la sécurité et la durabilité des constructions face aux séismes moyens ou de grandes importances, tout en promouvant des pratiques de construction responsables et en formant les professionnels du secteur.

1.7.4. Conditions D'application

Ce document technique réglementaire s'applique de manière complémentaire à toutes les autres réglementations en vigueur pour la conception, le calcul et l'exécution des constructions, en fonction de leurs systèmes de contreventement et des matériaux utilisés.

Les exigences et limitations établies par ce DTR s'ajoutent à celles des autres documents techniques existants. Une mise en œuvre efficace de ce règlement nécessite une collaboration

et une coordination étroites entre les différents acteurs impliqués à chaque étape du projet, de la conception à la réalisation

De plus, bien que les constructions doivent respecter simultanément les règles de conception, de calcul et d'exécution habituelles, il est impératif de considérer les sollicitations les plus défavorables comme les effets du vent, celles-ci doivent être prioritaires pour vérifier la résistance et la stabilité de l'ouvrage, tout en veillant à respecter les dispositions des RPA [31].

1.8. CONCLUSION

En conclusion, ce premier chapitre a souligné la double importance de la compréhension des séismes et de l'application rigoureuse des normes parasismiques. Il a mis en lumière l'évolution proactive des Règles Parasismiques Algériennes (RPA) en réponse aux tragiques événements passés, leur rôle essentiel dans la conception et la construction de bâtiments sûrs, adaptant les exigences de protection aux spécificités du zonage sismique national et aux typologies d'ouvrages, contribuant ainsi de manière fondamentale à la sauvegarde des vies humaines et du patrimoine bâti.

Simultanément, il a rappelé la complexité des phénomènes sismiques, leurs diverses caractéristiques (magnitude, intensité, foyer, épicentre, etc.) et la menace constante qu'ils représentent, particulièrement en Algérie. La combinaison de ces deux aspects, connaissance scientifique et cadre réglementaire, est cruciale pour une gestion efficace des risques sismiques et la protection des vies et des biens.

Afin de mieux comprendre ce tragique phénomène et son impact sur les structures, le chapitre suivant se propose d'examiner l'impact de l'aléa sismique sur la vulnérabilité du bâti ainsi que les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique.

Chapitre II

Évaluation de la Vulnérabilité Sismique
des Structures Existantes.

2.1. INTRODUCTION

Les récents séismes ont mis en évidence la vulnérabilité des structures existantes, souvent due à des déficiences parasismiques ou au vieillissement. La réhabilitation parasismique est indispensable pour réduire les dommages, et elle repose sur une analyse minutieuse de la fragilité des bâtiments et l'usage de méthodes et techniques de renforcement.

Ce chapitre détaillera les notions d'aléa, de vulnérabilité et de risque sismique, analysera les facteurs qui influencent la vulnérabilité des structures, et exposera les méthodes d'évaluation. Compte tenu de la complexité du comportement des structures existantes, une attention particulière sera donnée aux méthodes non linéaires, et notamment à l'analyse "pushover", qui offre une estimation réaliste de la capacité et de la performance sismique des structures existantes.

2.2. DEFINITIONS

2.2.1. Aléa sismique

L'aléa sismique désigne la probabilité qu'un séisme d'une certaine intensité à se produire dans une zone géographique particulière sur une période définie. Cette évaluation s'appuie sur l'analyse de la fréquence, de la magnitude, de la profondeur et de la localisation des événements sismiques passés, extraits de catalogues sismologiques et complétés par des études géologiques. Ces données permettent de produire des cartes de zonage sismique, comme celles qu'on peut retrouver dans les Règles Parasismiques Algériennes (RPA) (*Figure 2.1*), qui classent le territoire en plusieurs zones [31]. Comme l'indique le *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) [33], l'aléa est considéré relativement stable à long terme, en raison des processus géologiques sous-jacents qui évoluent sur de très longues échelles de temps. Toutefois, les méthodes de modélisation probabiliste ont connu d'importantes avancées récemment, grâce à l'intelligence artificielle et aux données satellitaires, permettant une meilleure évaluation de l'aléa à l'échelle locale. Une bonne compréhension de l'aléa est indispensable pour concevoir des infrastructures résilientes et orienter les politiques de prévention dans les zones à fort potentiel sismogénique.

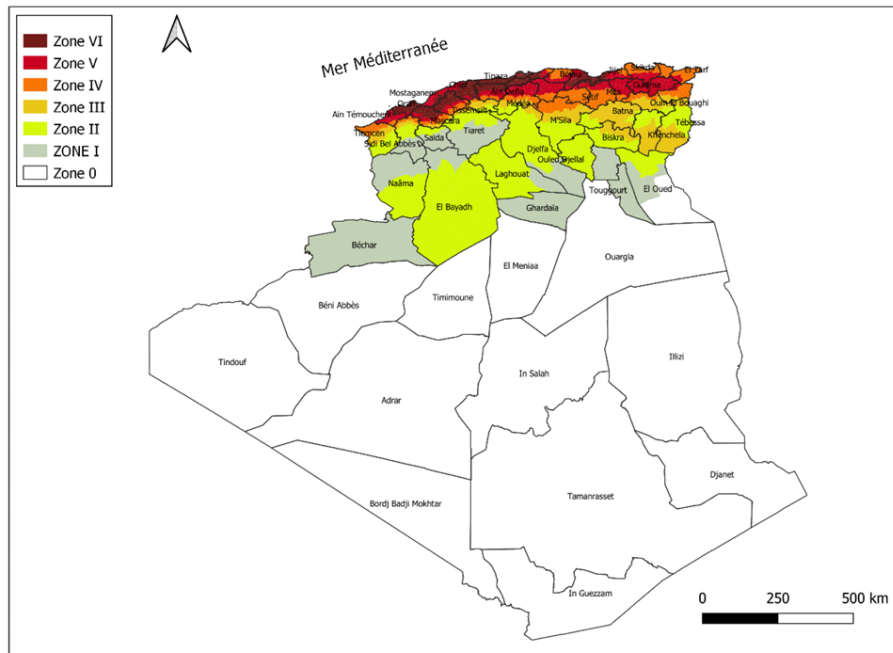


Figure 2. 1 Classification sismique des wilayas d'Algérie. [31]

2.2.2. Vulnérabilité

La vulnérabilité sismique caractérise la prédisposition d'une structure à subir des dommages face à un séisme d'une intensité donnée. Elle correspond à la fragilité d'un élément exposé et s'exprime typiquement par une relation entre les niveaux de dommages observés et l'agression sismique [6]. Identifier ces facteurs est capital pour les ingénieurs, afin d'adapter la conception des nouvelles constructions et d'évaluer la sécurité des bâtiments existants. Pour les sismologues, la vulnérabilité permet d'estimer précisément l'intensité d'un séisme à partir des dégâts, grâce à des outils comme la classification EMS-98 [11] ou les courbes de vulnérabilité. Cette vulnérabilité est influencée par plusieurs facteurs, tels que le type de construction (béton, maçonnerie...), l'architecture, l'âge du bâtiment, la qualité des matériaux, les méthodes d'application, ainsi que le respect ou non des normes parasismiques.

Dans des contextes urbains complexes comme celui de l'Algérie, où coexistent des édifices anciens, coloniaux, mais aussi récents, la vulnérabilité varie fortement d'un quartier à l'autre. Bien que les constructions publiques récentes soient soumises à des normes parasismique (comme le RPA) [31], de nombreux bâtiments auto-construits ou anciens ne le sont pas, ce qui expose une grande partie de la population à des dangers considérables.

Par conséquent, réduire cette vulnérabilité, à travers la réhabilitation des structures à risque et le respect des réglementations actuelles, représente un enjeu

vital pour diminuer les impacts des tremblements de terre tant sur l'aspect humain qu'économique.

2.2.3. Risque sismique

La compréhension de la vulnérabilité des structures, est une étape essentielle pour évaluer le risque sismique. Ce dernier représente la probabilité de pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales résultant d'un tremblement de terre potentiel dans une zone spécifique et sur une période donnée [34]. Il résulte de l'interaction entre l'aléa sismique, la vulnérabilité des constructions et infrastructures, ainsi que le niveau d'exposition des populations et des biens, comme l'exprime la formule : **Risque = Aléa × Vulnérabilité × Enjeux** [6] ainsi que le schéma illustré dans (*Figure 2.2*). Cette évaluation est essentielle pour anticiper les impacts potentiels d'un séisme et élaborer des stratégies de réduction des risques.

2.2.4. Enjeux

Enfin, pour évaluer pleinement le risque sismique, il est vital d'identifier et de caractériser les enjeux qui pourraient être affectés. Les enjeux correspondent à la valeur des éléments exposés et vulnérables à un aléa [35]. Ces éléments comprennent les bâtiments, leurs occupants et leur contenu, ainsi que les activités économiques associées. Sont également concernées les infrastructures de transport et d'énergie, les structures vitales et le patrimoine susceptibles d'être affectés. L'évaluation de ces enjeux, en lien avec l'aléa et la vulnérabilité, est donc fondamentale pour une compréhension globale du risque sismique et pour la mise en œuvre de mesures de prévention et de gestion efficaces.

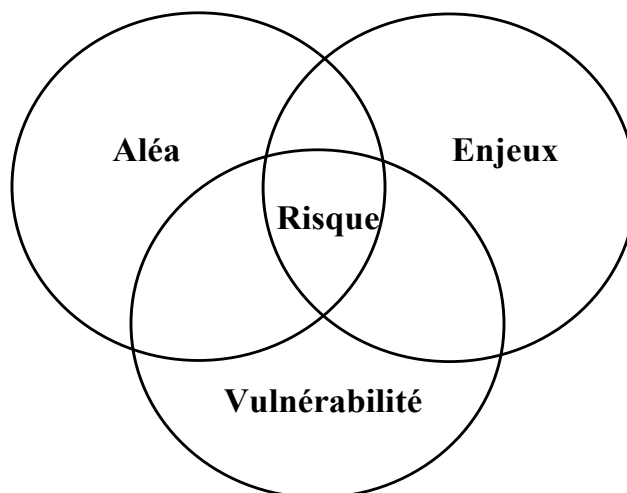


Figure 2. 2 Représentation schématique du risque sismique. [36]

2.3. FACTEURS DE VULNERABILITE

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes est une tâche complexe qui exige la prise en compte de multiples facteurs. Ces facteurs, identifiés à partir des dommages observés après les séismes, peuvent être classés en différentes catégories.

- **Matériaux et Techniques de Construction**

Les matériaux et les techniques de construction constituent un facteur primordial dans la vulnérabilité sismique des bâtiments. Dans le bâti ancien, la maçonnerie non armée, en raison de sa faible résistance aux forces horizontales, représente un risque majeur d'effondrement [37]. Le béton armé, bien que matériau moderne, peut présenter des faiblesses dues à des problèmes de qualité lors de sa fabrication (dosage incorrect, mauvaise cure), à la corrosion des armatures, ou encore à des erreurs de conception ou d'exécution, notamment au niveau des nœuds poutre-poteau [38] [39]. De même, les constructions en bois sont susceptibles d'être affectées par des dégradations biologiques (termites, moisissures) et des systèmes d'assemblage inadaptés aux contraintes sismiques [40]. Enfin, les constructions non conventionnelles, incluant les auto-constructions et celles utilisant des matériaux de récupération, présentent une vulnérabilité accrue en raison du fréquent non-respect des normes de construction.

- **Configuration Structurale**

La configuration structurale d'un bâtiment est un autre facteur qui détermine la vulnérabilité sismique. Des irrégularités, que ce soit en plan (entraînant des torsions) ou en élévation (créant des étages souples), peuvent engendrer des comportements structurels défavorables lors d'un séisme [41]. De même, un contreventement absent ou insuffisant, notamment par l'absence ou la faiblesse des voiles et de portiques résistants, diminue considérablement la capacité de la structure à supporter les efforts sismiques [41]. Enfin, il est important de considérer les effets de site, tels que l'amplification des ondes sismiques par le sol ou le phénomène de liquéfaction, qui peuvent significativement aggraver les dommages subis par les constructions [42].

- **Age et état de conservation**

Un autre aspect essentiel à considérer est l'âge et l'état de conservation des bâtiments existants. Au fil du temps, la dégradation des matériaux, qu'il s'agisse de corrosion, de fissuration ou de perte de leurs propriétés de résistance et de déformation (ductilité), ainsi qu'un manque d'entretien régulier, contribuent à accroître leur sensibilité aux dommages. [40]

- **Modifications et Extensions**

Les modifications et les extensions apportées ultérieurement aux structures, comme la création d'ouvertures dans les murs porteurs, l'ajout de niveaux supplémentaires ou le changement de la fonction initiale du bâtiment, peuvent sérieusement compromettre sa stabilité globale si elles n'ont pas été conçues et réalisées en accord avec les normes de construction appropriées.

2.4. CLASSIFICATION DES STRUCTURES VULNERABLES

Afin d'évaluer efficacement la résistance du patrimoine bâti face aux risques sismiques, il est essentiel d'examiner comment les divers facteurs de vulnérabilité (matériaux, configuration structurale, âge, etc.), précédemment détaillés, se manifestent spécifiquement selon la typologie de chaque bâtiment. La vulnérabilité d'une structure aux secousses dépend en grande partie de sa conception, de la qualité de ses matériaux et du respect des normes lors de sa construction ou de sa rénovation, incluant également la nature de ses fondations et leur capacité à transmettre les efforts sismiques au sol de manière adéquate. C'est pourquoi l'identification des principales catégories de bâtiments couramment rencontrées, en mettant en lumière leurs caractéristiques, points faibles et susceptibilité aux effets dévastateurs d'un séisme, sont essentiels pour une évaluation pertinente et des stratégies de réhabilitation efficaces. Ses structures peuvent présenter des vulnérabilités sismiques spécifiques en fonction de leur conception, de leurs matériaux et de leur état général. Voici une classification des bâtiments potentiellement vulnérables :

2.4.1. Bâtiments en Maçonnerie

Les structures en maçonnerie, constituent une catégorie de bâtiments à haute vulnérabilité sismique [43]. Fréquemment rencontrées dans le bâti ancien ou traditionnel, comme en témoignent les édifices historiques de la Casbah d'Alger, ces constructions faites de briques, pierres ou terre cuite sans renforts (chaînages), présentent une faible résistance à la traction et au cisaillement, ainsi qu'un manque de ductilité. Cela se traduit par des modes de rupture caractéristiques tels qu'une ruine totale ou partielle de la structure (*Figure 2.3* et *Figure 2.4*). Leur fragilité est aggravée par l'âge, la dégradation des matériaux, le manque d'entretien et les modifications inappropriées, les rendant très sensibles aux effets de site et aux mouvements différentiels du sol [44], aggravés parfois par des fondations superficielles ou des vides sanitaires non rigides qui peuvent entraîner des désordres structurels lors d'un séisme.



Figure 2. 3 Dommages sur un bâtiment en maçonnerie dans la Casbah d'Alger après un séisme [45]



Figure 2. 4 Bâtiment en maçonnerie en pierres brutes, endommagé lors du séisme de 1979 au Monténégro, Yougoslavie. [46]

2.4.2. Structures Métalliques et en Bois

Malgré leurs atouts considérables en génie parasismique, tels que la haute ductilité pour l'acier [47] et la légèreté du bois, ces types de structures ne sont pas à l'abri des vulnérabilités face aux séismes.

Les constructions métalliques sont sensibles à la corrosion qui affaiblit la section de leurs éléments [48], et leur comportement dépend de manière critique de la qualité des assemblages (soudures, boulons), dont les défaillances peuvent entraîner des ruptures prématurées ou le flambement des éléments élancés. [49]

Quant aux structures en bois, elles peuvent malheureusement être attaquées par des insectes ou la pourriture [40] ce qui diminue leurs propriétés mécaniques, comme en témoignent des poutres endommagées (Figure 2.5). De plus, les assemblages traditionnels manquent souvent

de "souplesse" face à un séisme, n'étant pas conçus pour bouger et absorber les chocs, ce qui limite fortement leur capacité à encaisser et à dissiper l'énergie d'un tremblement de terre. Dans les deux cas, des fixations mal conçues ou défailtantes peuvent compromettre gravement la résistance de l'ensemble, comme l'illustre le détachement du bardage de façade (*Figure 2.6*).



Figure 2.5 Poutres en bois endommagées, révélant la dégradation des matériaux. [50]



Figure 2. 6 Détachement du bardage de façade (Séisme Coalinga Californie, 1983). [48]

2.4.3. Ponts et Infrastructures Non Renforcés

Outre les typologies de bâtiments précédemment examinées (maçonnerie, métal et bois), les ponts et autres infrastructures représentent également une catégorie d'éléments particulièrement vulnérables aux séismes. Ces infrastructures, essentielles au réseau de transport et de communication, présentent un risque élevé car leur conception initiale n'intègre souvent pas les exigences parasismiques modernes [31] [51] [52]. En l'absence de dispositifs de protection sismique comme des contreventements ou des amortisseurs, elles sont exposées à des déformations excessives, des ruptures de tablier, ainsi qu'à l'effondrement des piles et des culées lors d'un tremblement de terre comme l'illustrent le déplacement transversal du tablier lors du séisme d'El Asnam en 1980 en Algérie (*Figure 2.7*) ou l'effondrement du viaduc de Cypress Street à Oakland (*Figure 2.8*). Cette vulnérabilité est souvent aggravée par des facteurs tels que la corrosion, l'usure ou un entretien insuffisant, rendant ces éléments encore plus fragiles face aux secousses. Les conséquences de telles défaillances sont majeures, entraînant de graves interruptions dans la circulation, l'approvisionnement et la sécurité des communautés.



Figure 2. 7 Déplacement transversal du tablier et destruction des butées d'un pont (séisme d'El Asnam « Algérie » 1980). [53]



Figure 2. 8 Effondrement du Viaduc Cypress Street à Oakland, (séisme de Loma Prieta « Californie, 1989 »). [54]

2.4.4. Structures en Béton Armé

Les structures en béton armé sont largement utilisées à travers le monde, car solides, durables et offrant une grande liberté dans la conception architecturale. Cependant, malgré leur potentiel à résister aux séismes lorsqu'elles sont correctement conçues et construites selon les normes parasismiques modernes [31] [51], un grand nombre d'entre elles, notamment les plus anciennes, présentent un risque élevé et des vulnérabilités importantes.

Ces vulnérabilités proviennent souvent d'une conception initiale qui ne prend pas en compte les exigences sismiques, ou d'une construction qui ne respecte pas toujours les règles de l'art. Parmi les éléments ou points faibles majeurs des bâtiments en béton armé, on peut citer :

- **Bâtiments à ossature en béton armé (poteaux-poutres)**

Les bâtiments en béton armé à ossature poteaux-poutres, particulièrement ceux construits il y a plusieurs décennies sont encore largement présents dans nos villes. Conçus avant l'application de normes parasismiques rigoureuses comme le RPA ou l'Eurocode 8 [51]. Ces structures souffrent principalement d'un manque de ductilité, souvent dû à un ferrailage inadapté ou une conception insuffisante. Cela se manifeste notamment par l'absence ou la mauvaise disposition des armatures transversales dans des zones vulnérables (jonctions, extrémités des éléments, nœuds), réduisant ainsi la capacité du béton à être confiné et des armatures longitudinales à ne pas flamber. Cette lacune ne permet pas à la structure de se déformer de manière progressive et contrôlée en cas de séisme. En conséquence, ces bâtiments sont plus susceptibles de subir des ruptures brutales et des défaillances prématurées, comme le cisaillement des poteaux de l'étage intermédiaire, la destruction de l'extrémité du poteau ou la

destruction par cisaillement des poteaux courts, un problème souvent causé par la rigidité induite par une construction adjacente. Comme on peut le constater dans la (Figure 2.9). Ces modes de défaillance sont difficiles à anticiper et à maîtriser, augmentant considérablement le risque d'effondrement et de défaillances prématurées. [31] [3] [55]

Enfin, un autre point critique réside dans la conception dite « poutre forte – poteau faible », une configuration inverse de celle recommandée en génie parasismique. En effet, les poutres devraient plastifier en premier, en se comportant comme des rotules plastiques et ainsi faciliter la dissipation d'énergie et éviter que la structure ne se fragmente brutalement. Une conception inversée, où la défaillance précoce des poteaux se produit comme illustré par la (Figure 2.10), compromet rapidement et de manière imprévisible la stabilité globale de l'édifice en contexte sismique. [31] [51] [3] [56]



a- Cisaillement des poteaux de l'étage intermédiaire.



b- Destruction de l'extrémité du poteau.



c- Poteaux courts en raison de la construction adjacente



d- Destruction par cisaillement du poteau court

Figure 2.9 Illustrations de poteaux endommagés par le séisme de Boumerdes [46]



Figure 2. 10 Cisaillement des poteaux d'une construction à Bordj el bahri. Séisme de 2003, Boumerdes, Algérie [46]

- **Bâtiments avec étage souple (soft storey) ou étage faible (weak storey)**

Outre les problématiques de ductilité et de ferrailage des ossatures, un point de vulnérabilité critique fréquemment observé dans les bâtiments en béton armé, notamment les plus anciens, est la présence d'un étage souple ou étage faible. On observe fréquemment cette configuration dangereuse dans les immeubles résidentiels ou commerciaux, où le rez-de-chaussée, étant plus ouvert (pour des commerces, un parking, ou un vide sanitaire non rigidifié), se révèle ainsi moins rigide et résistant que les niveaux supérieurs. Dans de tels cas, un vide sanitaire sans murs de contreventement ou de fondations continues suffisamment rigides agit comme un étage très flexible, concentrant les déformations sismiques à sa base ainsi aggravant les effets d'un étage souple et augmentant le risque de défaillance lors d'événements sismiques.

En effet, conformément à des codes parasismiques comme le RPA [31] et l'UBC 97 [57], un étage souple est défini par une rigidité latérale inférieure à 70% de celle de l'étage immédiatement au-dessus, ou à moins de 80% de la rigidité moyenne des trois étages supérieurs [58]. Cette conception est non seulement indésirable pour une construction réalisée en région sismique active, mais elle représente également un manquement au principe "poteau fort - poutre faible" cité précédemment.

Durant un séisme, les forces et les déplacements se concentrent excessivement à cet étage, induisant la formation de rotules plastiques aux extrémités des poteaux (voir Figure 2.11) [58]. Contrairement à un comportement ductile où l'énergie est dissipée de manière distribuée, l'étage souple mène à une ruine localisée et souvent fragile. Ces rotules, malgré leur dissipation d'énergie, entraînent rapidement une dégradation de la résistance des poteaux, les rendant

incapables de supporter les charges gravitaires. L'effet P- Δ augmente l'instabilité provoquant l'effondrement total et souvent brutal du bâtiment. [58]

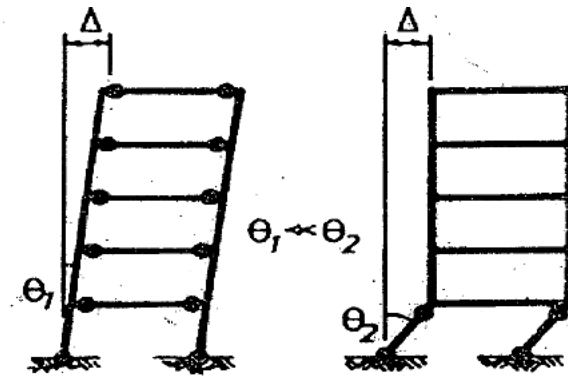


Figure 2. 11 Illustration du concept d'étage souple (soft storey). [58]

En Algérie, de nombreux bâtiments érigés avant l'application stricte des premières réglementations parasismiques (RPA 88) et durant les décennies 1970 et 1980 illustrent cette fragilité. Le séisme de Boumerdes particulièrement, a mis en lumière ces lacunes, révélant un parc immobilier encore largement exposé en l'absence d'une conception conforme aux normes parasismiques modernes (voir Figure 2.12 et Figure 2.13)



Figure 2.12 Effondrement complet du rez-de-chaussée (étage souple) dans plusieurs blocs résidentiels à Corso. Séisme de Boumerdes 2003, Algérie. [2]



Figure 2.13 Effondrement complet d'une construction au niveau 1 Séisme de Boumerdes 2003, Algérie. [58]

- **Vulnérabilités des Fondations**

Les fondations, jouent un rôle primordial dans la performance sismique d'un bâtiment en garantissant le transfert sécurisé des charges et l'ancrage de l'édifice. Habituellement cachés en sous-sol et fréquemment négligés lors des inspections post-séisme, leurs systèmes sont directement soumis aux sollicitations sismiques et peuvent être gravement endommagés, avec des conséquences parfois très graves pour la stabilité globale de la structure [59]. La vulnérabilité des fondations est fortement influencée par les caractéristiques du sol, les ruptures sont plus fréquentes dans les sols faibles ou liquéfiables, ou lorsque la résonance entre les fréquences naturelles du sol et de la superstructure amplifie l'excitation sismique, comme on peut le constater dans la (Figure 2.14 et Figure 2.15). Les mécanismes de défaillance observés incluent fréquemment des ruptures rotationnelles avec décollement à l'interface sol-fondation, provoquant de grands tassements et des rotations permanentes. Ces problèmes sont souvent exacerbés par l'absence de chaînages transversaux, un dimensionnement inadéquat (radier, capacité portante, poinçonnement) ou une rigidité insuffisante, soulignant l'impératif des normes de construction parasismique (telles que le RPA [31] et l'Eurocode 8 - Partie 5 [51]) qui dictent l'utilisation d'aciers haute adhérence, un espacement serré des armatures, et des chaînages rigoureux pour garantir l'intégrité de la structure dès sa base. [59] [60]



Figure 2.14 Dommages dus à la liquéfaction des sols : Effondrement d'un immeuble par affaissement du sol lors du séisme d'Izmir (Turquie) en 1999. [61]



Figure 2.15 Poinçonnement de la fondation suite à la liquéfaction du sol. Séisme de Kocaeli en Turquie [62]

2.5. METHODES D'EVALUATION DU NIVEAU DE VULNERABILITE

L'évaluation du niveau de vulnérabilité sismique des structures est essentielle pour évaluer leur capacité à résister aux séismes et pour identifier rapidement les bâtiments qui nécessitent des réparations ou un renforcement. De nombreuses stratégies et travaux de recherche ont été menées à l'échelle mondiale [63]. Ces recherches se classifient en deux grandes familles, à savoir :

2.5.1. Méthodes qualitatives

Ces approches simplifiées reposent sur des inspections rapides et des évaluations visuelles sur le terrain, permettant d'obtenir une première estimation du niveau de risque sans recourir à des calculs complexes. Parmi ces méthodes, on peut citer :

2.5.1.1. Méthode GNDT

La méthode GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Groupe National pour la Défense contre les Tremblements de Terre) a été proposée pour la première fois par Benedetti et Petrini en 1984 en Italie [64]. Par la suite, cette technique a été développée par le Groupe National de Défense contre les Tremblements de Terre (GNDT) du Conseil National de Recherche de l'Italie (CNR). Cette technique semi-quantitative utilise un système de notation pour évaluer les éléments structuraux et non structuraux d'un bâtiment, permettant ainsi une estimation rapide du risque à l'échelle urbaine. Son but est de calculer un indice de vulnérabilité à partir des caractéristiques d'une construction, afin d'évaluer les pertes potentielles qu'une région pourrait subir lors d'un tremblement de terre. [65] [66]

2.5.1.2. Méthode RISK-UE

La méthode RISK-UE est un programme d'évaluation du risque sismique développé dans le cadre d'un projet européen, impliquant des organismes de plusieurs pays. Appliquée dans sept grandes villes européennes (Bitola, Thessalonique, Catane, Bucarest, Barcelone, Sofia et Nice), cette méthode vise à établir une analyse détaillée de la vulnérabilité des bâtiments existants et historiques. Inspirée de la méthode HAZUS [67], RISK-UE a permis de créer une méthodologie commune pour évaluer le risque sismique, en se basant sur des données locales et des approches scientifiques. Le projet a abouti à la définition de typologies de bâtiments plus précises que celles fournies par l'échelle EMS98, facilitant l'analyse et la réduction des impacts sismiques sur les bâtiments existants à travers l'Europe. [65] [68] [69]

2.5.1.3. Méthode VULNERALP

La méthode VULNERALP est une adaptation simplifiée de la méthode GNDT [70]. Cette approche évalue la vulnérabilité sismique des bâtiments en se concentrant sur la collecte d'informations fiables et facilement identifiables concernant la nature structurelle du bâti, ainsi que sur la perception du risque par la population. VULNERALP se concentre sur trois niveaux d'analyse : le niveau 1, qui recherche des données générales sur la structure, le niveau 1.1, qui approfondit certaines informations, et le niveau 2, qui nécessite une analyse plus détaillée et

des ressources supplémentaires pour le recueil des données. Chaque niveau d'analyse ajoute des éléments supplémentaires à diagnostiquer, permettant une évaluation progressive de la vulnérabilité. L'objectif principal de cette méthode est de caractériser la vulnérabilité des bâtiments en fonction de leurs paramètres structuraux, facilitant ainsi une évaluation rapide et efficace du risque sismique à l'échelle urbaine. En intégrant des réponses binaires (oui/non) pour les niveaux inférieurs, VULNERALP permet également de gérer les incertitudes inhérentes à l'évaluation sommaire, rendant cette méthode accessible et pratique pour les évaluations de terrain. [65] [71]

Bien que les méthodes qualitatives d'évaluation du niveau de vulnérabilité soient rapides et basées sur des inspections visuelles, elles manquent souvent de précision et ne fournissent pas une évaluation quantitative des risques. En conséquence, il est important d'explorer les méthodes quantitatives, qui, en s'appuyant sur des données mesurables et des analyses rigoureuses, permettent d'obtenir des estimations précises des risques sismiques et d'améliorer la prise de décision en matière de sécurité des structures.

2.5.2. Méthodes quantitatives

Contrairement aux méthodes qualitatives, qui s'appuient sur des évaluations visuelles et subjectives, les méthodes quantitatives reposent sur des données mesurables et des analyses systématiques, en fonction de la typologie structurale et des objectifs recherchés. Parmi les méthodes les plus courantes, on peut citer [1] :

2.5.2.1. Les méthodes d'analyse linéaires

Souvent recommandées par les codes parasismiques [31], elles sont utilisées pour établir des relations simples et directes entre les variables. Elles permettent d'évaluer la réponse d'une structure sous des charges sismiques en supposant que les déformations restent dans le domaine élastique. Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux structures simples et aux évaluations préliminaires. Parmi les exemples notables, on peut citer :

- **Méthode statique équivalente (force de remplacement)**

Cette méthode consiste à remplacer les efforts dynamiques générés par le mouvement sismique par des sollicitations statiques calculées [31]. La force statique résultante équivalente est donnée par l'expression (Eqn. 4.1 /RPA2024) [31] :

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g}(T_0) \cdot W \quad 1.1$$

Avec :

$\frac{S_{ad}}{g}(T_0)$: Coordonnée du spectre de calcul (Art. 3.3.3 /RPA2024) [31], pour la période T_0 ;

T_0 : Période fondamentale de vibration du bâtiment, pour le mouvement de translation dans la direction considérée (Art. 4.2.4 /RPA2024) [31] ;

λ : Coefficient de correction (Eqn. 4.2 /RPA2024) [31] ;

W : Poids sismique total du bâtiment (Eqn. 4.3 /RPA2024) [31] .

Cette méthode est applicable lorsque ses conditions d'application sont satisfaites (Art. 4.1.2 /RPA2024) [31], et repose sur le principe que la force statique résultante équivalente est déterminée par une expression reliant les paramètres de mouvement du sol, les propriétés physiques et dynamiques du bâtiment, ainsi que son usage principal.

Il convient de noter que la difficulté d'application de cette méthode pour des constructions existantes réside dans l'appréciation du facteur de comportement (R) et du facteur d'amplification (D), qui dépendent de la période et de l'amortissement de la structure. [1]

- **Méthode dynamique linéaire**

Cette méthode est utilisée pour l'analyse de l'action sismique lorsque les conditions de la méthode statique équivalente ne sont pas satisfaites. Elle repose sur la réponse maximale de la structure, calculée à l'aide de spectres de réponse adaptés au site de la construction, ou par des calculs directs en fonction du temps utilisant des accélérogrammes [31] [1].

Les méthodes temporelles modales permettent de rechercher la solution sur la base des modes propres, en déterminant l'équation différentielle de la dynamique pour chaque mode retenu. La solution en termes de déplacement est obtenue par combinaison de réponses modales.

Les méthodes d'intégration directe, quant à elles, utilisent des schémas de discrétisation dans le temps de l'équation dynamique, permettant de calculer la solution au temps $t + \Delta t$ (Δt étant le pas de temps) à partir de l'état connu au temps t . Il est important de choisir un Δt approprié pour garantir une bonne précision, certaines méthodes nécessitant que Δt soit inférieur à une valeur limite dépendant des caractéristiques de la structure [1].

2.5.2.2. Les méthodes d'analyse non-linéaires

Les méthodes d'analyse non-linéaires, contrairement à l'analyse linéaire, prennent en compte le comportement non linéaire des matériaux et des structures, notamment lors de déformations importantes. Elles permettent d'évaluer la performance des structures sous des charges sismiques de manière plus réaliste et sont essentielles pour les structures complexes ou critiques. Parmi les principales méthodes non-linéaires, on distingue :

- **Méthode statique non-linéaire (analyse pushover)**

Introduction

L'analyse pushover est une méthode d'évaluation sismique largement utilisée pour évaluer le comportement réel des structures au-delà du domaine élastique. Cette approche offre une vision réaliste de la performance des bâtiments sous sollicitations sismiques et constitue un outil privilégié en génie civil en raison de son accessibilité et de sa simplicité d'application [72]. Reconnue à l'échelle mondiale [73] [33], y compris en Algérie, cette méthode est documentée dans des travaux de recherche universitaire, notamment pour l'analyse des bâtiments en béton armé et la détermination de leur performance sismique [58]. Elle est couramment utilisée par les ingénieurs pour évaluer la réponse non linéaire des structures face aux séismes, en se basant sur le règlement parasismique algérien, tel que le RPA [31]. Son efficacité dans l'évaluation des structures existantes et son rôle dans l'amélioration de la sécurité sismique en font donc un outil essentiel.

Description de la méthode

L'analyse pushover se fonde sur l'application progressive d'un chargement latéral croissant à une structure jusqu'à ce qu'elle atteigne sa capacité ultime (défaillance). Ce processus permet d'observer la formation des rotules plastiques au fur et à mesure et de tracer une courbe de capacité qui relie l'effort tranchant à la base au déplacement à la partie supérieure de la structure (sommet) (voir *Figure 2.16*). Bien que cette méthode présente certaines limites, notamment en négligeant l'influence des modes supérieurs de vibration, elle demeure relativement simple et fournit des informations essentielles sur la résistance, la déformation, la ductilité et la distribution des sollicitations non linéaires. Ces données permettent d'identifier les éléments qui risquent d'atteindre leurs états limites (par exemple, la fissuration ou l'effondrement) lors d'un séisme. [74] [73]

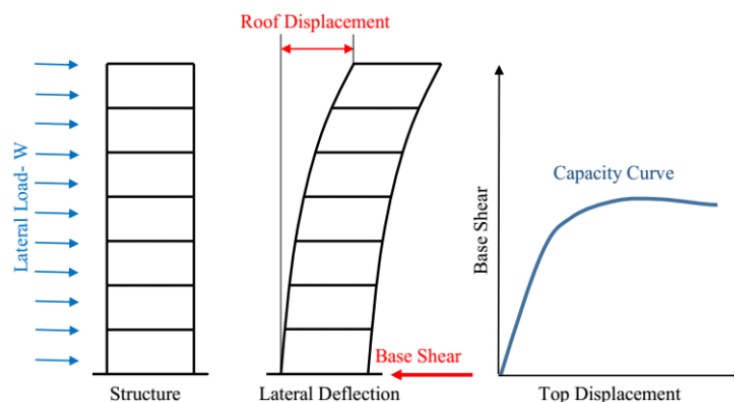


Figure 2. 16 Principe de la méthode d'analyse Pushover [75]

Avec :

- Charge latérale (Lateral Load W)
- Courbe de capacité (Pushover) (Capacity Curve)
- Déformation latérale (Lateral Deflection)
- Déplacement du toit (Δ) (Roof/ Top Displacement)
- Effort tranchant à la base (V) (Base Shear)

But de la méthode

La méthode d'analyse "Pushover" est conçue pour fournir une évaluation détaillée de la performance sismique des structures. Son objectif principal est d'estimer les paramètres critiques de réponse du système structurel, en se basant sur des comportements réels plutôt que théoriques (simple analyse élastique vue dans les méthodes d'analyses linéaires). L'objectif principal de l'analyse pushover est de permettre :

- L'estimation des déformations et la localisation des points faibles de la structure, cette méthode permet d'analyser les contraintes réelles sur les éléments fragiles, d'estimer les déformations inélastiques, et de localiser précisément les éléments (poutres, poteaux ou murs) qui seront les premiers à céder et à dissiper l'énergie sismique.
- L'évaluation des conséquences (points forts et les points faibles) de la dégradation des propriétés des éléments (rigidité, résistance) sur le comportement global de la structure.
- L'identification des zones critiques où les déformations sont supposées être élevées, et qui doivent faire l'objet d'une attention particulière durant la conception.
- La prise en compte du système structural complet et de ses irrégularités (en plan ou en élévation) qui modifient le comportement dynamique de la structure. Ainsi estimer les déplacements entre les niveaux pour contrôler l'endommagement et évaluer les effets $P-\Delta$.

L'analyse pushover est particulièrement valorisée parce qu'elle offre une évaluation réaliste et détaillée du comportement d'une structure, ce qui justifie son utilisation dans des projets complexes. Cette méthode permet de localiser précisément les points faibles et d'évaluer la ductilité de la structure, des informations cruciales pour anticiper son mode de défaillance et garantir une sécurité accrue. Relativement simple à mettre en œuvre avec les logiciels modernes, elle représente un excellent compromis entre une approche théorique simplifiée et une analyse dynamique complexe.

Étapes de l'analyse

La procédure comporte les étapes suivantes [74]:

- 1. Modélisation de la structure :** qui consiste à préparer un modèle numérique détaillé. Cette phase préliminaire inclut la définition de la géométrie du bâtiment et des propriétés de ses

matériaux (béton, acier), la spécification des emplacements où se formeront les rotules plastiques, ainsi que l'application des charges gravitaires permanentes et d'exploitation conformément aux réglementations RPA [31].

- 2. Définition du chargement latéral :** Cette phase est essentielle, car elle simule l'effet du séisme sur la structure. En choisissant le type de distribution de la force latérale (généralement triangulaire, modale ou uniforme) qui sera appliquée le long de la hauteur du bâtiment. L'intensité de cette charge est ensuite augmentée de manière progressive et monotone pour pousser la structure jusqu'à sa capacité ultime.
- 3. Application du chargement progressif et obtention des résultats :** Au cours de la troisième étape, le chargement progressif est appliqué de manière incrémentale à la structure pour simuler l'effet croissant d'un séisme. Cette phase est cruciale, car elle permet de suivre la formation séquentielle des rotules plastiques et d'enregistrer les déformations et les contraintes à chaque étape du processus, ce qui est essentiel pour analyser le comportement non linéaire du bâtiment.
- 4. Construction de la courbe de capacité et analyse des résultats :** Cette étape regroupe la construction du graphique et l'interprétation initiale des données. Les informations de l'analyse sont d'abord utilisées pour tracer la courbe de capacité (voir *Figure 2.16*) L'analyse de cette courbe permet ensuite d'identifier les points clés qui définissent la performance de la structure, notamment sa limite élastique, sa capacité maximale et son point de rupture.
- 5. Évaluation de la performance :** Cette phase est dédiée à une évaluation plus poussée des résultats. En se basant sur la courbe de capacité, on peut identifier les mécanismes de rupture et les éléments critiques de la structure. Cette étape permet également d'évaluer la ductilité et la marge de sécurité du bâtiment, et de vérifier sa conformité avec les exigences des règlements parasismiques [31] [33] [51]. C'est à ce stade que l'on détermine le point de performance en superposant la courbe de capacité de la structure avec le spectre de demande sismique du site, on identifie un point unique qui représente l'état réel et les dommages attendus du bâtiment pour le séisme de conception.
- 6. Interprétation et recommandations :** La dernière étape de l'analyse pushover consiste à tirer des conclusions pratiques. Les résultats sont interprétés pour proposer des stratégies de renforcement ou de modification, si nécessaire. Cette phase finale inclut également la documentation des limites de l'analyse et la formulation de recommandations concrètes pour la conception parasismique ou la réhabilitation de la structure.

- **Méthode dynamique non-linéaire**

L'analyse dynamique non linéaire est une méthode avancée qui évalue la réponse d'une structure face à des excitations sismiques. Elle intègre l'équation du mouvement dans le temps, prenant en compte à la fois les termes linéaires et non linéaires, à l'aide de techniques telles que (méthode de Newmark, Wilson- Θ , collocation, Houbolt, ...). Cette approche implique le calcul des réponses en force et en déplacement, soit par une analyse modale, soit par une analyse temporelle. [76]

Contrairement à l'analyse statique non linéaire "Pushover", qui applique des charges progressivement, l'analyse dynamique non linéaire simule les effets réels des mouvements sismiques, permettant d'analyser les effets d'inertie et de déformation sur la structure. Bien qu'elle soit particulièrement utile pour les structures complexes, son efficacité dépend de la modélisation précise de la structure et des caractéristiques du mouvement terrestre [31] [51]. De plus, le choix d'accélérogrammes appropriés est crucial en raison de la variabilité des conditions sismiques.

En conclusion, bien que cette méthode soit indispensable pour évaluer le comportement des structures lors de séismes, elle peut parfois être moins fiable que l'analyse pushover en raison de sa complexité et de sa sensibilité aux paramètres d'entrée. [1]

2.6. CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence les enjeux majeurs liés à la vulnérabilité sismique des structures existantes, en soulignant la nécessité d'une évaluation rigoureuse de cette dernière pour assurer la sécurité des bâtiments face aux séismes. Nous avons défini les concepts associés à la vulnérabilité et décrit comment ces éléments interagissent pour influencer la sécurité des infrastructures. L'analyse des facteurs de vulnérabilité a permis d'approfondir notre compréhension des défis rencontrés par les constructions, notamment dans un environnement urbain complexe comme celui de l'Algérie. De plus, l'examen des méthodes d'évaluation, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, a révélé l'importance de l'analyse pushover en tant qu'outil fondamental pour évaluer la performance sismique des structures. Cette méthode non linéaire offre une vision réaliste des capacités des bâtiments et aide à identifier les points faibles nécessitant des interventions.

Le prochain chapitre se concentrera sur la présentation de la structure d'étude choisie pour ce travail de recherche. Nous examinerons en détail ses caractéristiques, sa conception et son contexte, avant de passer à la modélisation numérique et à l'application de l'analyse pushover. Cette approche nous permettra d'effectuer une évaluation précise de la vulnérabilité sismique de la structure.

Chapitre III

Présentation et modélisation de la
Structure.

3.3.INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons établi le cadre théorique de notre étude en explorant les concepts du risque sismique, la vulnérabilité des structures en béton armé et les méthodes d'évaluation telles que l'analyse « pushover ». Ce troisième chapitre marque la transition de la théorie à la pratique en présentant la structure qui servira de cas d'étude pour le reste de cette recherche. Pour cela, nous avons choisi un bâtiment hospitalier de type polyclinique située à Assi Youcef Boghni, dans la wilaya de Tizi-Ouzou, un ouvrage stratégique dont la fonctionnalité doit être assurée en toutes circonstances, y compris après un événement sismique. En se basant sur la conception initiale de cette structure, ce chapitre décrira les caractéristiques architecturales et structurales du bâtiment afin de fournir toutes les données nécessaires à la modélisation numérique qui sera effectuée par la suite.

3.4.PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Le cas étudié est un bâtiment à usage hospitalier (Polyclinique) en R+3+2 Sous-sols avec une terrasse accessible et inaccessible. Le bâtiment est projeté à Tizi-Ouzou, précisément à Ait Hidja, Assi Youcef, daïra de Boghni, wilaya de Tizi-ouzou.

Alors que ce site était initialement classé en Zone II.a (sismicité moyenne) selon le RPA 99/v2003 [77], il est désormais classé en Zone V (sismicité élevée) selon le nouveau RPA 2024 [31]. Ce changement de zonage, qui s'accompagne d'un groupe d'usage 2 pour les deux versions, souligne de manière significative l'importance de notre étude et renforce la pertinence d'une analyse de vulnérabilité, étant donné que la structure devra désormais satisfaire à des exigences sismiques considérablement plus élevées que celles de sa conception initiale.



Figure 3.1 Façade principale de la polyclinique.

3.5.DESCRPTION DE L'OUVRAGE

3.5.1. Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques du bâtiment sont :

- Longueur totale (L)..... 21,79 m.
- Largeur totale (B) 13,5 m.
- La hauteur totale (H) 25,67 m.
- La hauteur du S-sol 1 3,40 m.
- La hauteur du S-sol 2 2,89 m.
- La hauteur du RDC 4,08m.
- La hauteur des étages courants (R+1, R+2, R+3) 4,08m.

3.5.2. Caractéristiques structurales

• L'ossature

Le bâtiment est en ossature **mixte**, constitué de **portiques et de voiles en béton armé**. Ce choix de conception est en parfaite conformité avec les réglementations parasismiques algériennes successives. D'après l'article 3.4.A.1.a du RPA99/v2003 [77], et l'article 3.5A.4 du RPA2024 [31].

➤ Les Poutres :

Poutres principales : (35x45) cm².

Poutres secondaires : (30x40) cm².

D'après l'article 7.5.1 du RPA99/v2003 [77]. Conditions vérifiées.

D'après l'article 7.5.1 du RPA2024 [31]. Conditions vérifiées

➤ Les poteaux :

Poteaux carrés : 45x45 cm².

D'après l'article 7.4.1 du RPA99/v2003 [77]. Conditions vérifiées.

D'après l'article 7.4.1 du RPA2024 [31]. Conditions vérifiées.

➤ Voiles :

L'épaisseur des voiles est de 20 cm.

L'épaisseur des voiles est donnée par l'article 7.7.1 RPA2024 [31] et l'article 7.7.1 RPA99/v2003 [77]. En fonction de la hauteur libre d'étage (h_e)= 388cm

Une épaisseur **20 cm** à tous les niveaux.

Selon eq. 7.10 RPA2024 [31]. Conditions vérifiées.

Selon cf. Figure (7.8) RPA99/v2003 [77]. Conditions vérifiées.

Voile V1, V2, V4, V5 & V6 : **L=2.03m.**

Voile V3 : **L=2.73m.**

Voile V7 & V10 : **L=3.80m.**

Voile V8 : **L=3.85m.**

Voile V9 : **L=3.75m.**

Selon eq. 7.9 RPA2024 [31]. Conditions vérifiées.

• Les planchers

➤ Plancher à corps-creux :

L_{max} : La portée maximale dans le sens de la disposition des poutrelles. ($L_{max} = 445$ cm)

L'épaisseur du plancher (h_t) est déterminée à partir de la condition (Art B 6-8-423/BAEL91 modifier 99 [78])

$h_t = 20 \text{ cm} = (16+4) \text{ cm}$

Plancher Corps-Creux (16+4)

➤ Plancher en dalle pleine :

L'épaisseur du plancher en **dalle pleine** $ep = 15 \text{ cm}$

• Les escaliers

La structure est munie de deux types d'escaliers :

Escalier type 1 : escalier entre S-sol, R.D.C et étage courant avec une épaisseur 25 cm.

Escalier type 2 : escalier de secours avec une épaisseur de 25 cm.

3.5.3. Caractéristiques mécaniques des matériaux

• Le béton

➤ Dosage :

Le béton utilisé dans la construction de cet ouvrage est dosé à 350 kg/m³ de ciment ; 400 kg/m³ de sable ($D_m \leq 5 \text{ mm}$) ; de 800 kg/m³ de gravillon ($D_m \leq 25 \text{ mm}$) ; et entre 150 et 175 litres d'eau de gâchage. Et il est précisé que le rapport $E/C = 0,5$, ce qui signifie $Eau/Ciment = 0,5$.

➤ La résistance caractéristique du béton à la compression :

La résistance à la compression à 28 jours, est prise égale à **$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$** .

➤ La résistance caractéristique du béton à la traction :

La résistance à la traction à 28 jours, est prise égale à **$f_{t28} = 2,1 \text{ MPa}$**

Selon (Art.A.2.1.1.2/DTR B.C. 2-41) [79].

- Le module de déformation longitudinale du béton :

Le module de déformation longitudinale instantanée du béton (pour les contraintes de courte durée) :

$$E_{ij} = 11000 \times \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{Art.A.2.1.2.1/DTR B.C. 2-41}) [79].$$

Pour $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ **$E_{i28} = 32164,2 \text{ MPa}$**

Le module de déformation différée du béton (pour les contraintes de longue durée) :

$$E_{vj} = 3700 \times \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{Art.A.2.1.2.2/DTR B.C. 2-41}) [79].$$

Pour $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ **$E_{v28} = 10819 \text{ MPa}$**

- Le module de déformation transversale du béton :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 1.2$$

(Calculer automatiquement par notre logiciel **ETABS**.) avec ($\nu = 0,2$)

Avec : E module de Young

ν Coefficient de poisson. $\left\{ \begin{array}{l} \text{Il est pris égal à : 0 pour le calcul des sollicitations, (ELU).} \\ \text{Il est pris égal à : 0.2 pour le calcul des déformations, (ELS).} \end{array} \right.$

- La masse volumique du béton :

La masse volumique du béton est prise égale à : **$\rho = 2500 \text{ Kg /m}^3$** .

- La contrainte limite du béton :

- ❖ A l'état limite ultime (ELU) :

La contrainte limite de béton à 28 jours vaut :

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \times f_{c28}}{\gamma_b} \quad 1.3$$

$\sigma_{bc} = 14,2 \text{ MPa}$

Avec : $\gamma_b = 1,5$ pour situations normales.

$\gamma_b = 1,15$ pour situations accidentelles (Séisme).

- ❖ A l'état limite de service (ELS) :

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28} = \mathbf{15 \text{ MPa}}. \quad (\text{Art.4.3.4.1/ DTR B.C. 2-41}) [79].$$

• Les aciers

Les aciers utilisés dans la structure analysée sont les suivant :

Fe E40 H.A type1 **$f_e = 400 \text{ MPa}$ (limite d'élasticité garantie).**

Fe E 24 ronds lisses **$f_e = 235 \text{ MPa}$ (limite d'élasticité garantie).**

- Module déformation longitudinal de l'acier :

Le module de déformation longitudinale de l'acier est égal à :

$$E = 200000 \text{ MPa.} \quad (\text{Art.2.2.1/ DTR B.C. 2-41}) [79].$$

- Les contraintes limites d'élasticité de l'acier :

- ❖ A l'état limite ultime (ELU) :

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} \quad 1.4$$

Avec : $\gamma_s = 1,15$ pour situations normales.

$\gamma_s = 1,00$ pour situations accidentelles (Séisme).

- ❖ A l'état limite de service (ELS) :

Cas de la Fissuration Préjudiciable : Le diamètre des armatures est au moins égal à **6mm**.

Cas de la Fissuration Très Préjudiciable : Le diamètre des armatures est au moins égal à **8mm**.

3.5.4. Evaluation des charges et des surcharges

- Charges verticales

Charges permanentes (G) :

- Etage courant (plancher Corps-cœur (20+4)) **G = 5.64 KN/m².**
- Terrasse inaccessible (plancher Corps-cœur (20+4)) **G = 6.3 KN/m².**
- Terrasse inaccessible (plancher Dalle pleine (e=15 cm)) **G = 8.08 KN/m².**
- Dalle pleine inclinée (e=15 cm) **G = 3.75 KN/m².**
- Maçonnerie double cloison **G = 2.55 KN/m².**

Charges d'exploitations (Q) :

- Hall et Salle d'attente **Q=4 KN/m².**
- Salle de chirurgie..... **Q=3.5 KN/m²**
- Bureau et salle de soin..... **Q=2.5kN/m²**
- Terrasse accessible..... **Q=1.5 KN/m².**
- Terrasse inaccessible..... **Q=1 KN/m².**
- Escalier..... **Q=2.5 KN/m².**

Ces charges sont spécifiques à un établissement de santé, (Art. 7.2.4 / D.T.R B.C. 2-41)

- Charges horizontales (Etude Sismique)

Pour l'étude au séisme, nous utiliserons la méthode Pushover pour évaluer le comportement non-linéaire de la structure face aux charges sismiques.

3.6.MODELISATION

Logiciel utilisé : ETABS**3.6.1. Description du logiciel ETABS**

ETABS « Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems » est un logiciel d'analyse et de conception des structures particulièrement adaptées aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil. Développé par la société américaine Computers and Structures Inc. (CSI), ce logiciel permet de déterminer les efforts internes dans la structure sous l'effet des charges permanentes (G) et d'exploitation (Q), ainsi que sous les charges horizontales représentées par le séisme (E). Il offre la possibilité de définir la structure en mode graphique et d'effectuer divers types d'analyses, y compris les analyses statiques, dynamiques, linéaires et non linéaires, comme l'analyse « pushover » pour l'évaluation sismique. Ce logiciel permet de visualiser en détail le comportement de la structure grâce à la déformée, aux diagrammes des efforts, aux champs de contraintes et aux modes propres de vibration. De plus, il facilite la collaboration en permettant d'exporter des objets vers d'autres logiciels (Excel, etc.) et de composer librement des notes de calcul ou des rapports d'impression.

Dans notre travail on utilisera la version ETABS Ultimate v 22.3.0.

3.6.2. Les étapes de calcul

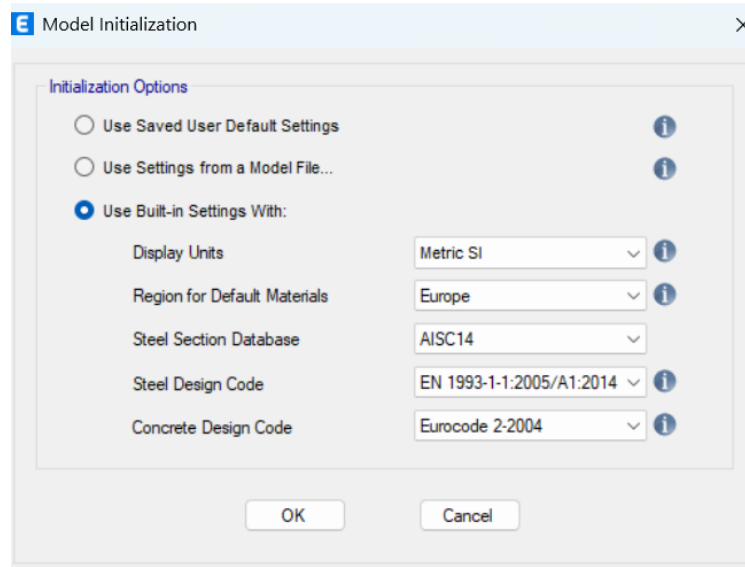
La modélisation et l'analyse de la structure ont été réalisées en suivant une approche en plusieurs étapes. Les principales étapes de calcul sont les suivantes :

- ✓ **Etape 01** : Modélisation de la structure et évaluation de son comportement selon les spécifications initiales, notamment les propriétés des matériaux et les dimensions des éléments.
- ✓ **Etape 02** : Intégration du nouveau spectre de réponse sismique du RPA 2024 pour une évaluation plus poussée de la performance de la structure face à un séisme plus récent.
- ✓ **Etape 03** : Définition du comportement non linéaire des éléments, notamment la création des rotules plastiques (*plastic hinges*) pour simuler la dissipation d'énergie, et définir le chargement de l'analyse statique non linéaire.
- ✓ **Etape 04** : Exécution de l'analyse statique non linéaire « Pushover » et interprétation des résultats afin de déterminer la capacité réelle de la structure et d'identifier les modes de défaillance potentiels.

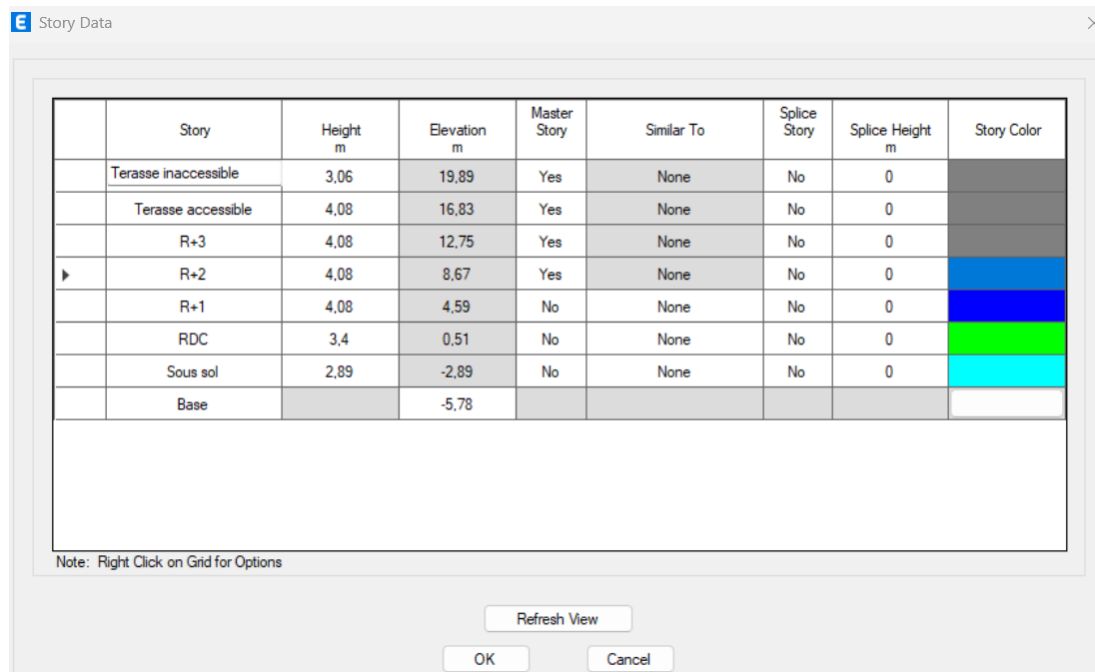
➤ Etape 01

a) Introduction de la géométrie de l'ouvrage :

La première étape qui vient juste après le lancement du logiciel ETABS, consiste à choisir l'unité et la base de données. **File → new model.**



Après ça nous avons la fenêtre « New Model quick Template » dans notre cas on clique sur **Ok**. Puis un clic droit et on va sur « **Add/Modify Grids** ». Une fenêtre qui s'affiche, « **Modify/Show story data** » et on modifie les longueurs de trames et des hauteurs d'étages.



Ok → Modify/Show Grid System.

Grid System Data

Grid System Name: G1

System Origin: Global X: 0 m, Global Y: 0 m, Rotation: 0 deg

Story Range Option: ☒ Default - All Stories, ☐ User Specified

Click to Modify/Show: Reference Points..., Reference Planes...

Options: Bubble Size: 1250 mm, Grid Color: [Color Picker]

Rectangular Grids: ☐ Display Grid Data as Ordinates, ☒ Display Grid Data as Spacing

X Grid Data

Grid ID	X Spacing (m)	Visible	Bubble Loc
1	4,8	Yes	End
2	3,4	Yes	End
3	4,8	Yes	End
4	4,8	Yes	End
5	3,4	Yes	End
6	4,8	Yes	End

Y Grid Data

Grid ID	Y Spacing (m)	Visible	Bubble Loc
F	3,35	Yes	End
E	3,3	Yes	End
D	3,35	Yes	End
C	4,45	Yes	End
B	4,45	Yes	End
A	0	Yes	End

Quick Start New Rectangular Grids...

Ok → Ok → Save. Et on enregistre notre travail.

b) Spécification des propriétés mécaniques des matériaux :

La deuxième étape consiste à définir les propriétés mécaniques des matériaux (béton, acier et autre)

Pour le béton : **Define → Material Properties → Add New Material.**

Add New Material Property

Region: Europe

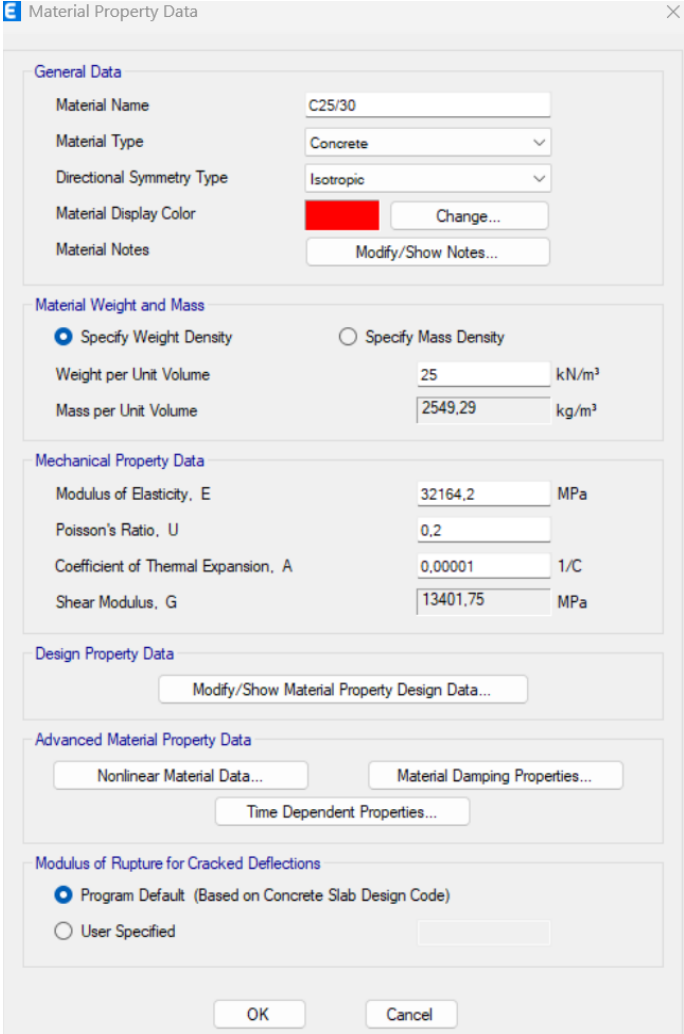
Material Type: Concrete

Standard: EN 1992-1-1 per EN 206-1

Grade: C25/30

OK Cancel

Ok.



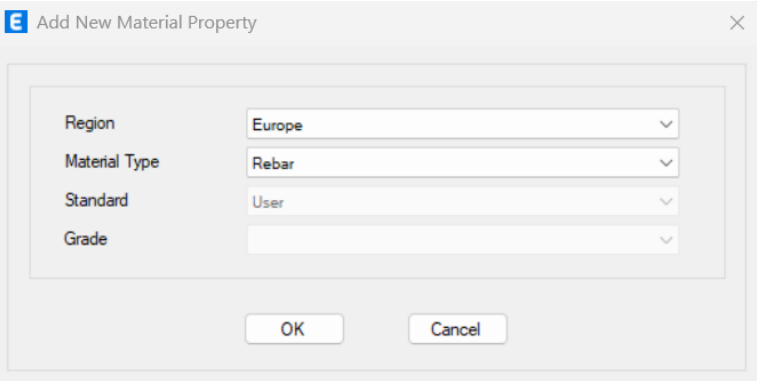
The 'Material Property Data' dialog box is used to define material properties. It contains several sections:

- General Data:** Material Name (C25/30), Material Type (Concrete), Directional Symmetry Type (Isotropic), Material Display Color (Red), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Material Weight and Mass:** Radio buttons for 'Specify Weight Density' (selected) and 'Specify Mass Density'. Fields for Weight per Unit Volume (25 kN/m³) and Mass per Unit Volume (2549,29 kg/m³).
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E (32164,2 MPa), Poisson's Ratio, U (0,2), Coefficient of Thermal Expansion, A (0,00001 1/C), and Shear Modulus, G (13401,75 MPa).
- Design Property Data:** A button to 'Modify/Show Material Property Design Data...'.
- Advanced Material Property Data:** Buttons for 'Nonlinear Material Data...', 'Material Damping Properties...', and 'Time Dependent Properties...'.
- Modulus of Rupture for Cracked Deflections:** Radio buttons for 'Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)' (selected) and 'User Specified' (with an empty text field).

Buttons at the bottom: OK, Cancel.

Ok.

Pour l'acier : **Add New Material.**

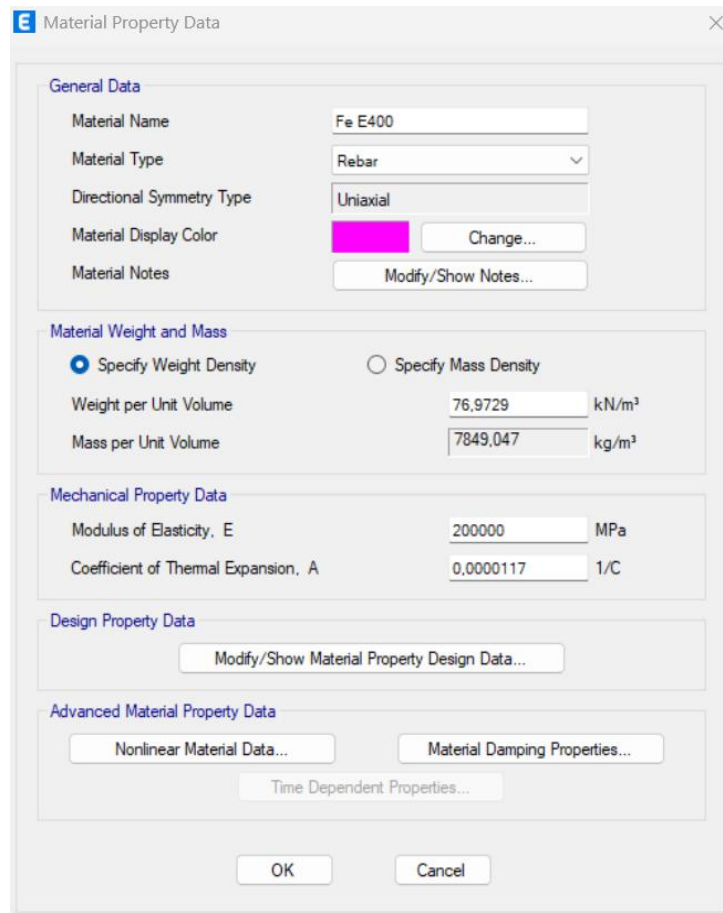


The 'Add New Material Property' dialog box is used to define new material properties. It contains the following fields:

- Region (Europe)
- Material Type (Rebar)
- Standard (User)
- Grade (empty field)

Buttons at the bottom: OK, Cancel.

Ok.



The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It is organized into several sections:

- General Data:** Includes fields for "Material Name" (Fe E400), "Material Type" (Rebar), "Directional Symmetry Type" (Uniaxial), "Material Display Color" (a pink color swatch with a "Change..." button), and "Material Notes" (with a "Modify/Show Notes..." button).
- Material Weight and Mass:** Features two radio buttons: "Specify Weight Density" (selected) and "Specify Mass Density". Below are input fields for "Weight per Unit Volume" (76,9729 kN/m³) and "Mass per Unit Volume" (7849,047 kg/m³).
- Mechanical Property Data:** Includes "Modulus of Elasticity, E" (200000 MPa) and "Coefficient of Thermal Expansion, A" (0,000117 1/C).
- Design Property Data:** Contains a single button: "Modify/Show Material Property Design Data..."
- Advanced Material Property Data:** Contains three buttons: "Nonlinear Material Data...", "Material Damping Properties...", and "Time Dependent Properties..." (which is disabled).

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Ok.

c) Spécification des propriétés géométriques des éléments :

La troisième étape consiste à affecter les propriétés géométriques des éléments (poteaux, poutres, etc.) :

Pour les poteaux : **Define → Section Properties → Frame sections → Add New Proprety.**

The screenshot shows the 'Frame Section Property Data' dialog box. It contains the following fields and options:

- General Data:**
 - Property Name: Poteau_45x45
 - Material: C25/30
 - Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...
 - Display Color: Yellow (Change...)
 - Notes: Modify/Show Notes...
- Shape:**
 - Section Shape: Concrete Rectangular
- Section Property Source:**
 - Source: User Defined
- Section Dimensions:**
 - Depth: 450 mm
 - Width: 450 mm
- Property Modifiers:**
 - Modify/Show Modifiers... (Currently User Specified)
- Reinforcement:**
 - Modify/Show Rebar...
- Buttons:** OK, Cancel, Show Section Properties...
- Checkbox:** Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

A diagram on the right shows a square section with a coordinate system (2, 3) and reinforcement points.

Ok.

Pour les poutres : **Add New Property.**

- **Poutres principales et poutres secondaires**

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Frame Section Property Data' dialog box for rectangular sections.

Left Screenshot:

- General Data:**
 - Property Name: PP (35x45)
 - Material: C25/30
 - Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...
 - Display Color: Blue (Change...)
 - Notes: Modify/Show Notes...
- Shape:**
 - Section Shape: Concrete Rectangular
- Section Property Source:**
 - Source: User Defined
- Section Dimensions:**
 - Depth: 450 mm
 - Width: 350 mm
- Property Modifiers:**
 - Modify/Show Modifiers... (Currently User Specified)
- Reinforcement:**
 - Modify/Show Rebar...
- Buttons:** OK, Cancel, Show Section Properties...
- Checkbox:** Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

Right Screenshot:

- General Data:**
 - Property Name: PS (30x40)
 - Material: C25/30
 - Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...
 - Display Color: Green (Change...)
 - Notes: Modify/Show Notes...
- Shape:**
 - Section Shape: Concrete Rectangular
- Section Property Source:**
 - Source: User Defined
- Section Dimensions:**
 - Depth: 400 mm
 - Width: 300 mm
- Property Modifiers:**
 - Modify/Show Modifiers... (Currently User Specified)
- Reinforcement:**
 - Modify/Show Rebar...
- Buttons:** OK, Cancel, Show Section Properties...
- Checkbox:** Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

Both screenshots show a diagram of a rectangular section with a coordinate system (2, 3) and reinforcement points.

- **Poutres noyée**

E Frame Section Property Data

General Data

Property Name: PN (30x35)

Material: C25/30

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color:  Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 350 mm

Width: 300 mm

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently Default

Reinforcement

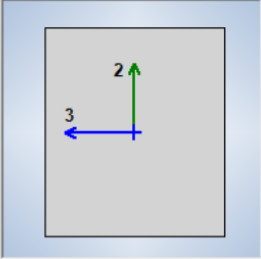
Modify/Show Rebar...

OK

Cancel

Show Section Properties...

☐ Include Automatic Rigid Zone Area Over Column



Ok.

Pour les voiles : **Define** → **Section Properties** → **Wall sections** → **Add New Property**.

E Wall Property Data

General Data

Property Name: Voile_200

Property Type: Specified

Wall Material: C25/30

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Modeling Type: Shell-Thin

Modifiers (Currently Default): Modify/Show...

Display Color:  Change...

Property Notes: Modify/Show...

Property Data

Thickness: 200 mm

☐ Include Automatic Rigid Zone Area Over Wall

OK

Cancel

Ok.

Pour le plancher : **Define** → **Section Properties** → **Slab sections** → **Add New Proprety.**

- **Corps creux selon X et Y**

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Slab Property Data' dialog box. The left dialog is for 'CC X (16+4)' and the right is for 'CC Y (16+4)'. Both dialogs have a 'General Data' section and a 'Property Data' section. The 'General Data' section includes fields for Property Name, Slab Material, Notional Size Data, Modeling Type, Modifiers (Currently User Specified), Display Color, and Property Notes. The 'Property Data' section includes fields for Type, Overall Depth, Slab Thickness, Stem Width at Top, Stem Width at Bottom, Rib Spacing (Perpendicular to Rib Direction), and Rib Direction is Parallel to. The 'Property Data' section for both dialogs is identical, showing 'Ribbed' type, 'Overall Depth' 200 mm, 'Slab Thickness' 40 mm, 'Stem Width at Top' 120 mm, 'Stem Width at Bottom' 120 mm, 'Rib Spacing' 650 mm, and 'Rib Direction is Parallel to' 'Local 1 Axis' (left) and 'Local 2 Axis' (right).

Ok.

- **Dalle pleine**

Slab Property Data

General Data

Property Name: DP15

Slab Material: C25/30

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Modeling Type: Shell-Thin

Modifiers (Currently User Specified): Modify/Show...

Display Color:  Change...

Property Notes: Modify/Show...

Property Data

Type: Slab

Thickness: 150 mm

OK Cancel

Ok.

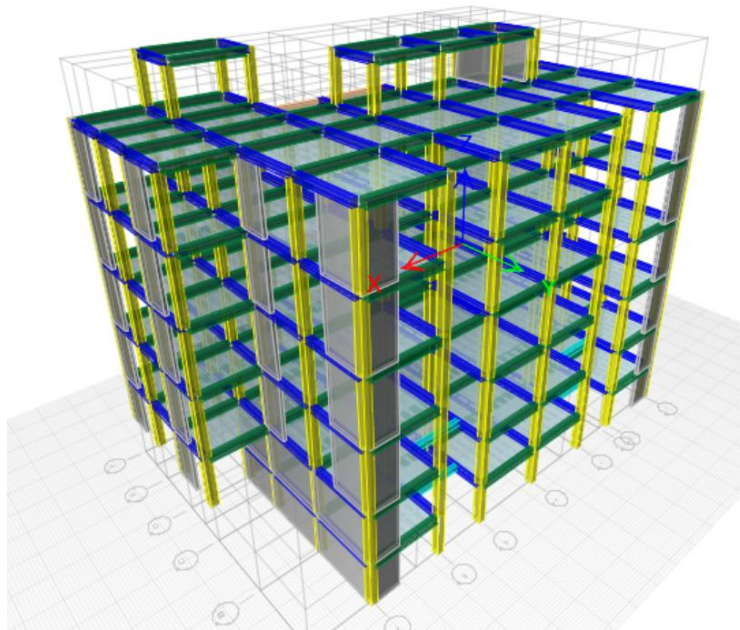


Figure 3.2 Vue en 3D des éléments de la structure.

d) Définition des charges statiques de la structure (G et Q) :

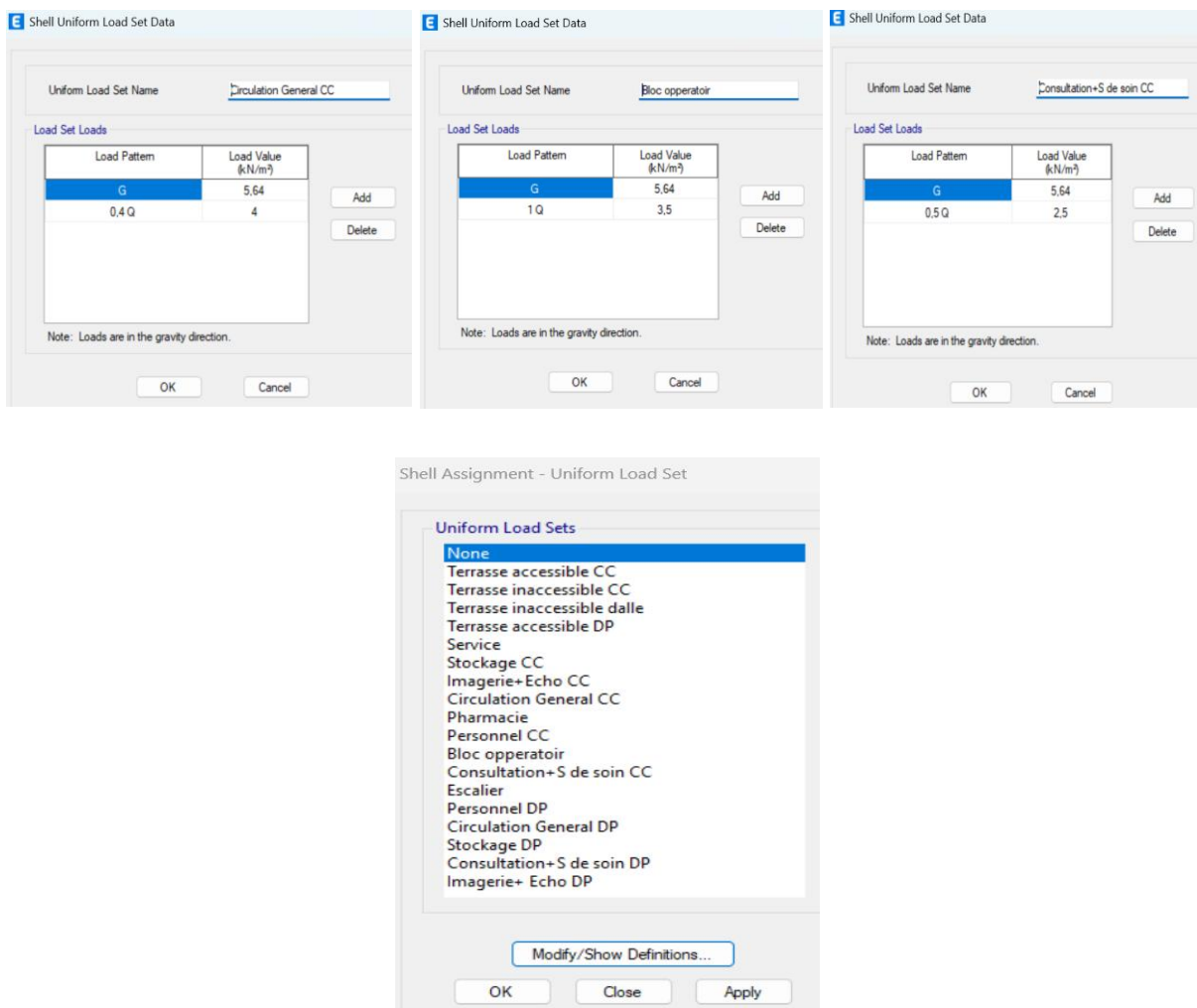
La structure est soumise à des charges permanentes (G) et des charges d'exploitation (Q) déjà citées précédemment :

Define → Shell Uniform Load Sets → Add New Load Sets

Dans cette fonction on remplit directement G et Q. Les charges d'exploitations sont en fonction du coefficient d'accompagnement ψ (Tableau (4.2) /RPA2024) :

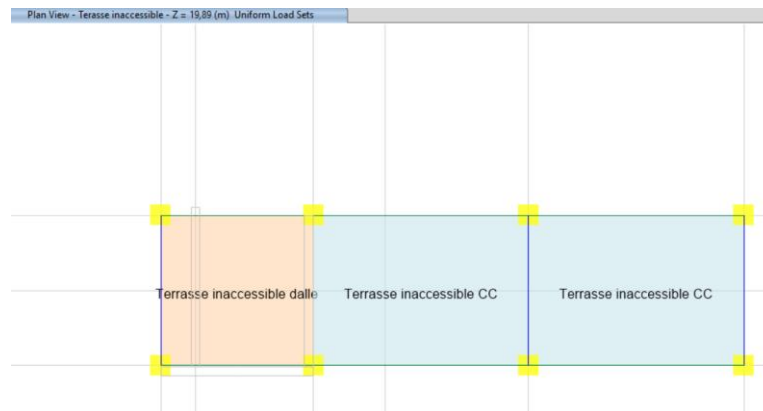
Cas	Type d'ouvrage	ψ
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0.30
2	Bâtiments recevant du public temporairement : Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions, salles de classes, restaurants, dortoirs	0.40
3	Entrepôts, hangars	0.50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs, ouvrages assimilés, bâtiment recevant des équipements médicaux critiques	1.00
5	Autres locaux non visés ci-dessus	0.60

On définit les charges pour chaque plancher



Ok.

Assign → Shell Load → Uniform Load Sets. Et on applique les charges selon les plans d'architecture.



➤ Etape 02

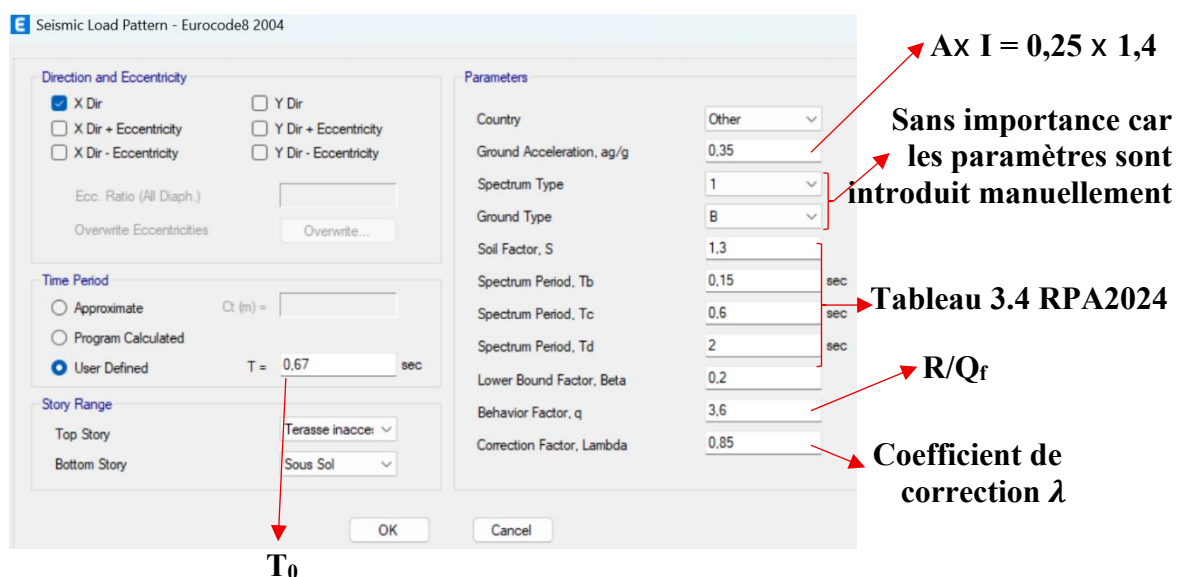
a) Analyse modale

Pour le calcul dynamique de la structure on introduira un spectre de réponse conçu par le CGS.

Ce spectre est une courbe de réponse maximal d'accélération (S_a/g) pour un système à un degré de libertés ou mis à une excitation donnée pour des valeurs successives de périodes propre T . Cette dernière permet d'évaluer la réponse d'un bâtiment a un séisme passé ou futur.

❖ Les paramètres de spectre de réponse

✓ Selon RPA 2024



Avec :

➤ La zone : V

(Table A.3/ RPA2024)

15	TIZI OUZOU	V
	Groupe de communes A Illiten, Iloula Oumalou, Iferhounene, Imsouhal, Bouzguen, Beni Ziki, Idjer, Abi Youcef, Akbil, Yatafene, Iboudraren, Ouacif, Aït Boumahdi, Boghni, Bounouh, Frikat, Draâ El Mizan, Tizi Ghenif, Mkira, Ait Yahia, Ifigha, Soua- maâ, Tadmaït, Aïn El ammam, Beni Yenni, Aït Toudert, Agouni Gueghrane, Ouadhia, Aït Bouadou, Tizi N'Tleta, Assi Youcef, Ait Yahia Moussa, Ain Zaouia, Mechtras	

➤ Le groupe d'usages : 1A

(Art. 3.4 /RPA2024)

• **Groupe 1A : Bâtiments d'importance vitale**

– Bâtiments vitaux qui doivent demeurer opérationnels après un séisme majeur pour les besoins de la survie de la région, de la sécurité publique et de la défense nationale, tels

* Bâtiments des établissements publics de santé (les hôpitaux, centres dotés de services des urgences, de chirurgie et d'obstétrique, etc.) ;

➤ Le coefficient d'importance $I = 1,40$

(Table 3.11 /RPA2024)

Coefficient d'importance, I	Groupe d'importance			
	1A	1B	2	3
I	1.40	1.20	1	0.80

➤ Le coefficient d'accélération de la zone, $A = 0,25$

(Table 3.3 /RPA2024)

Zone de sismicité	Niveau de sismicité	A
0	Très faible	-
I	Faible	0.07
II	Faible à moyenne	0.10
III	Moyenne	0.15
IV	Moyenne à élevée	0.20
V	Elevée	0.25
VI	Elevée	0.30

➤ Site : S3 (site meuble) « donnée initiale »

$S = 1,3$: coefficient de site

$T_1 = 0,15$: limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante ;

$T_2 = 0,60$: limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante ;

$T_3 = 2$: valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant ;

(Table 3.4 /RPA2024)

Spectre Type 1 (Zones IV, V et VI)	S	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
site S_1	1.00	0.10	0.40	2.0
site S_2	1.20	0.10	0.50	2.0
site S_3	1.30	0.15	0.60	2.0
site S_4	1.35	0.15	0.70	2.0

➤ Le coefficient de comportement $R : 4.5^{(b)}$ (Table 3.18 /RPA2024)

A) Structures en béton armé

1	Système à ossature	5.5 ^(a)
2	Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature	5.5 ^(a)
3	Système à ossature ou mixte équivalent à ossature avec remplissage en maçonnerie rigide	3.5 ^(a)
4	Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles	4.5 ^(b)
5	Système de contreventement constitué par des voiles	4.5 ^(b)

➤ Facteur de qualité $Q_f = 1,25$ (Eqn 3.26 /RPA2024)

$$Q_f = 1 + \sum_{q=1}^{q=i} Pq \quad 1.5$$

➤ Coefficient de correction $\lambda = 0,85$ (Eqn 4.2 /RPA2024)

$$\lambda = \begin{cases} 0.85 : \text{si } T_0 \leq (2.T_2) \text{ et si le bâtiment a plus de 2 niveaux} \\ 1. \text{ autrement} \end{cases}$$

Avec :

- $T_{empirique} = 0,67$: période fondamentale

$$T_{empirique} = C_T \cdot (h_N)^{3/4}$$

- h_N : Hauteur du bâtiment mesurée depuis les fondations ou le sommet d'un soubassement rigide de la structure jusqu'au dernier niveau (N).
- C_T : Coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage et donné par (Table 4.3 /RPA2024)

Cas	Système de contreventement	C_T
1	Ossatures spatiales en béton armé sans remplissage en maçonnerie	0.075
2	Ossatures en portique en acier, sans remplissage en maçonnerie	0.085
3	Ossature en portiques en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0.050
4	Autres types de structures	0.050

- $T_{calcul} = 0,7$: période fondamentale après le lancement de l'analyse modale.

Dans ce cas

La valeur de période (T_0) = 0,67 (Table 4.4 /RPA2024)

Cas	Période à utiliser
$T_{calcul} < 1.3 T_{empirique}$	$T_0 = T_{calcul}$
$T_{calcul} \geq 1.3 T_{empirique}$	$T_0 = 1.3 T_{empirique}$

Après avoir introduit les données dans leurs cases respectives, on clique sur enregistrer dans le même dossier que le modelé qu'on a introduit. On obtient la courbe suivante :

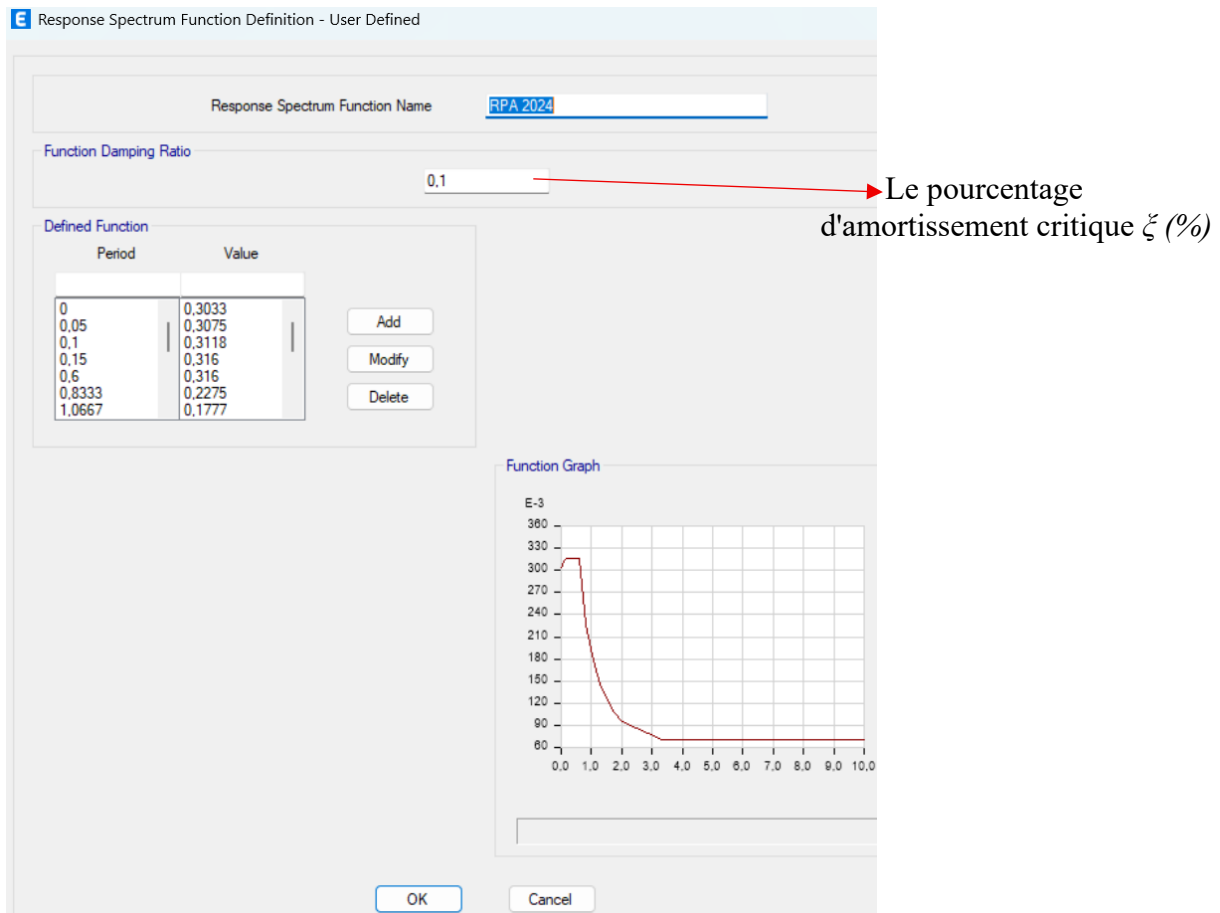


Figure 3.3 Spectre de réponse.

Remarque :

- Le pourcentage d'amortissement critique qui est fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages. $\xi = 10 \%$ (Table 3.6 /RPA2024)

	Ossatures (*)		Voiles (**)
Remplissage	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	10

(*): Sans présence de voiles ou de noyaux en béton armé
 (**): Valeurs valables même si les voiles sont associés à des portiques

❖ La masse sismique

Define → Add new mass source.

❖ Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'action à considérées pour la détermination des sollicitations sont :

$$\text{ELU : } 1.35G + 1.5Q \quad 1.7$$

$$\text{ELS : } G + Q \quad 1.8$$

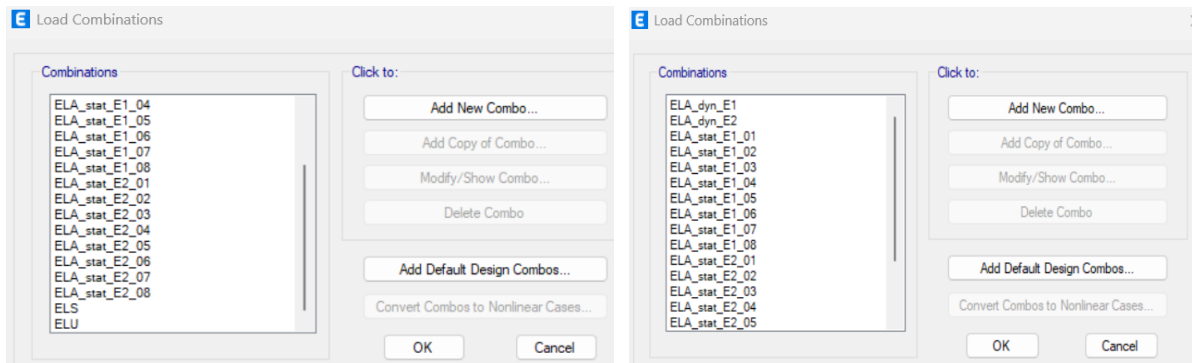
Les composantes de l'action sismique :

$$\begin{cases} G + \psi \cdot Q + E_1 \\ G + \psi \cdot Q + E_2 \end{cases} \quad 1.9 \quad \begin{cases} E_1 = \pm E_x \pm 0,3E_y \\ E_2 = \pm 0,3E_x \pm E_y \end{cases} \quad 1.10$$

(Eqn 5.1 /RPA2024)

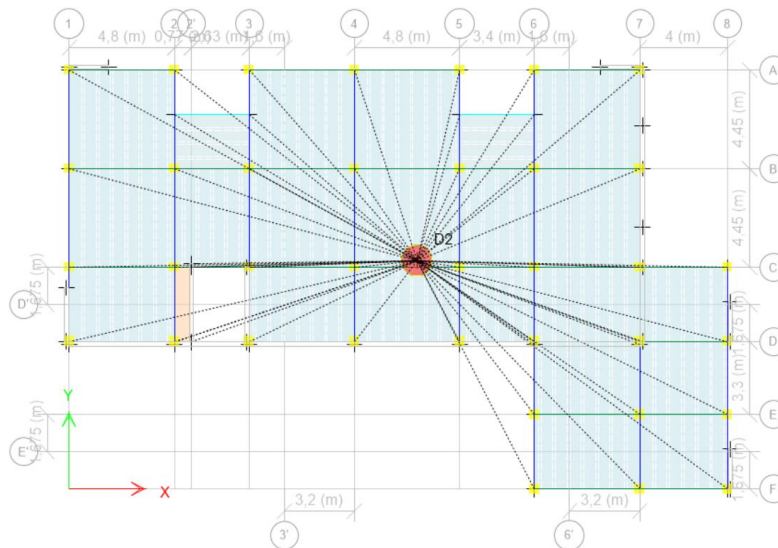
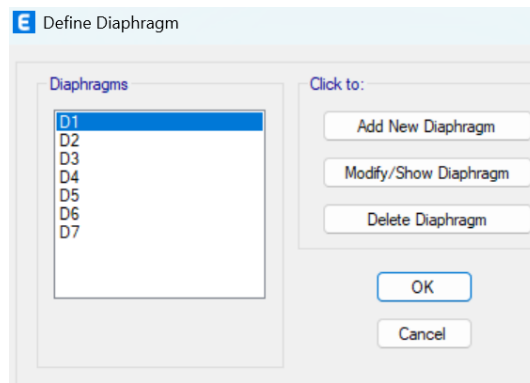
(Eqn 5.2 /RPA2024)

La valeur du coefficient d'accompagnement ψ , pour la charge d'exploitation Q a été introduite dans chaque plancher.



❖ Les diaphragmes

Define → Diaphragms → Add new Diaphragm (dans chaque story)



b) Lancement de l'analyse :

Pour lancer l'analyse de la structure, on clique sur **Analyze → Run Analysis**.

c) Vérification selon les exigences du RPA 2024

✓ **Analyse modale et masse participante**

Selon (Art.4.3.3/RPA2024), le nombre de modes de vibration à retenir dans chacune des deux directions de l'excitation doit être tel que La somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale au moins à 90% de la masse totale de la structure.

Tableau 3. 1 Modes propres de la structure.

Mod e	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RZ
1	0,539	0,366	0,1478	0	0,366	0,1478	0	0,0826
2	0,517	0,1621	0,4366	0	0,5281	0,5844	0	0,3041
3	0,452	0,0613	0,0291	0	0,5894	0,6135	0	0,0344
4	0,16	0,1289	0,0033	0	0,7182	0,6167	0	0,0016
5	0,145	0,0057	0,1563	0	0,724	0,7731	0	0,2047
6	0,127	0,0007	0,0068	0	0,7247	0,7799	0	0,0013
7	0,121	0,0002	0,000007975	0	0,7248	0,7799	0	0,0001
8	0,112	0,0038	0,0063	0	0,7286	0,7862	0	0,0104
9	0,099	0,0379	0,0103	0	0,7665	0,7965	0	0,0085
10	0,096	0,001	0,0055	0	0,7676	0,802	0	0,0054
11	0,088	0,0225	0,0128	0	0,79	0,8148	0	0,0108
12	0,08	0,0009	0,0514	0	0,7909	0,8663	0	0,0795
13	0,076	0,0497	0,0035	0	0,8406	0,8698	0	0,0023
14	0,069	0,0054	0,0384	0	0,846	0,9082	0	0,0695
15	0,06	0,0689	0,0023	0	0,9149	0,9105	0	0,0036
16	0,054	0,0035	0,0354	0	0,9184	0,9459	0	0,072
17	0,044	0,0451	0,0036	0	0,9635	0,9495	0	0,0051
18	0,038	0,0006	0,0287	0	0,9641	0,9782	0	0,0551
19	0,022	0,0057	0,0142	0	0,9698	0,9924	0	0,0233
20	0,021	0,0216	0,0035	0	0,9914	0,9958	0	0,0065

La valeur de participation massique a atteint les 90% dans le mode 15. **Condition vérifiée**

✓ Effort normal réduit

L'effort normal de compression de calcul sous sollicitations dues au séisme est limité par la condition suivante :

$$\nu = \frac{N_d}{B_c \times f_{c28}} \leq 0,35 \quad (\text{Eqn.7.5 /RPA2024}) \quad 1.11$$

Avec :

N_d : l'effort normal de compression s'exerçant sur la section du poteau.

B_c : l'aire de la section transversale du poteau.

f_{c28} = 25 MPa

Tableau 3. 2 Effort normal réduit dans les poteaux.

Type	La section adoptée (cm ²)			N (KN)	ν	Observation
	b (cm)	h (cm)	aire (cm ²)			
Poteaux (45x45)	45	45	2025	2809,1379	0,55	non vérifié

Remarque : Certains poteaux présentent un effort normal réduit non vérifié ($\nu = 0,55 > 0,35$). Ces résultats indiquent que notre structure, ne satisfait pas pleinement aux exigences du RPA2024. Dans une autre approche cela impliquerait la nécessité de redimensionner certains poteaux.

Toutefois, dans le cadre de notre mémoire, la structure est étudiée telle qu'elle est modélisée sans modifications de ses caractéristiques, afin d'analyser son comportement global à travers l'analyse « Pushover »

✓ Vérification de l'effort tranchant à la base

Selon (Art. 4.3.5 /RPA2024), la résultante des forces sismiques à la base V_t (l'analyse modale), ne doit pas être inférieure à 80 % de la résultante des forces sismiques V (l'analyse statique équivalente). Tel que :

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g}(T_0) \cdot W \quad 1.12$$

Avec :

$$\lambda = 0,85$$

$$\frac{S_{ad}}{g}(T_0) \quad (\text{Eqn. 3.15 /RPA2024})$$

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = \begin{cases} A.I.S. \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1} \cdot \left(2.5 \frac{Q_F}{R} - \frac{2}{3} \right) \right] & \text{si } 0 \leq T < T_1 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{Q_F}{R} \right] & \text{si } T_1 \leq T < T_2 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{Q_F}{R} \right] \cdot \left[\frac{T_2}{T} \right] & \text{si } T_2 \leq T < T_3 \\ A.I.S. \left[2.5 \frac{Q_F}{R} \right] \cdot \left[\frac{T_2 \cdot T_3}{T^2} \right] & \text{si } T_3 \leq T < 4s \end{cases}$$

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = AIS \left[2.5 \frac{Q_F}{R} \right] \times \left[\frac{T_2}{T} \right]$$

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = 0,25 \times 1,40 \times 1,3 \left(2,5 \times \frac{1,25}{4,5} \right) \times \left(\frac{0,6}{0,67} \right)$$

$$\frac{S_{ad}}{g}(T) = 0,288$$

$$W = 19410.1 \text{ KN}$$

Donc : $V = 4751,59$

Tableau 3. 3 Efforts tranchants à la base données par la méthode modale et statique équivalente.

Load	Fx	Fy
Ex	5226,8728	2771,4949
Ey	2654,352	5610,7519

Avec : $V_{\text{dyn}} \geq 80 \% V_{\text{st}}$

	V_{dyn}	$0,8 \times V_{\text{st}}$	Observation
Sens X-X	5226,8728	3801,272	<i>vérifiée</i>
Sens Y-Y	5610,7519	3801,272	<i>vérifiée</i>

✓ Vérification des déplacements inter-étages

D'après le RPA 2024, les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser **1.5%** de la hauteur d'étage dans le cas d'un bâtiment en béton armée.

$$\Delta_k \leq \overline{\Delta_k} = 0,0150 h_k \quad 1.13$$

Avec : $\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$ (Eqn (4.16)/ RPA2024) 1.14

Et : $\delta_k = \delta_{ek} \times R / Q_f$ Eqn (4.15)/ RPA2024 1.15

$$R = 4,50(b) \quad Q_f = 1,25$$

Le déplacement relatif du niveau (k) par rapport au niveau (k-1) est égal à :

Dans le sens XX :

Tableau 3. 4 déplacements inter-étages dans le sens XX.

Story	δ_{ek}	R	δ_k	$\Delta_k X$	$\bar{\Delta}_k$	Vérification
Terrasse inaccessible	0,00151	4,50	0,005436	0,003834	0,0459	<i>vérifiée</i>
Terrasse accessible	0,002575	4,50	0,00927	0,0008316	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+3	0,002806	4,50	0,0101016	0,0001152	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+2	0,002838	4,50	0,0102168	0,0020052	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+1	0,002281	4,50	0,0082116	0,0039492	0,0612	<i>vérifiée</i>
RDC	0,001184	4,50	0,0042624	0,00288	0,0612	<i>vérifiée</i>
Sous-Sol	0,000384	4,50	0,0013824	0,0013824	0,051	<i>vérifiée</i>

Dans le sens YY :

Tableau 3. 5 déplacements inter-étages dans le sens YY.

Story	δ_{ek}	R	δ_k	$\Delta_k Y$	$\bar{\Delta}_k$	Vérification
Terrasse inaccessible	0,002406	4,50	0,0086616	0,0009612	0,0459	<i>vérifiée</i>
Terrasse accessible	0,002673	4,50	0,0096228	0,0011844	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+3	0,003002	4,50	0,0108072	7,56E-05	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+2	0,003023	4,50	0,0108828	0,0004752	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+1	0,002891	4,50	0,0104076	0,004824	0,0612	<i>vérifiée</i>
RDC	0,001551	4,50	0,0055836	0,0031392	0,0612	<i>vérifiée</i>
Sous-Sol	0,000679	4,50	0,0024444	0,0024444	0,051	<i>vérifiée</i>

✓ Vérification au renversement

Le moment de renversement, au niveau des fondations, est égal à la somme des forces latérales, à chaque niveau, multipliées par la hauteur de chacune d'entre elles, depuis le niveau de fondation. Le coefficient de sécurité vis-à-vis du renversement doit être au minimum de 1.3 (Art. 5.5 /RPA2024).

Tableau 3. 6 Efforts tranchants à la base données par la méthode modale et statique équivalente.

Effort normal P [kN]	M _{stab} X [kN.m]	M _{stab} Y [kN.m]	M _{renv} X [kN.m]	M _{renv} Y [kN.m]	Cf _x	Cf _y
27781,6115	422280,495	268925,999	90216,5564	96100,6857	4,68074278	2,79837753

Le coefficient de sécurité vis-à-vis du renversement :

$$Cf_x = 4,68074278 > 1,3 \quad \text{CV}$$

$$Cf_y = 2,79837753 > 1,3 \quad \text{CV}$$

✓ Justification Vis à Vis De l'effet P-Δ

Les effets du 2^o ordre (ou l'effet de PΔ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\left(\theta_k = \frac{P_k \cdot \Delta_k}{V_k \cdot h_k} \right) \leq 0,10 \text{ (Art. 5.9 /RPA2024)}$$

Tableau 3. 7 Justification Vis à Vis De l'effet PΔ.

Story	θ_x	θ_y
Terrasse inaccessible	0,01112741	0,01466091
Terrasse accessible	0,01996107	0,0192628
R+3	0,02424294	0,02457372
R+2	0,02807703	0,02847847
R+1	0,02617005	0,03150755
RDC	0,01657491	0,02023945
Sous-Sol	0,00519798	0,00859459

$$\text{Max} (\theta_x) = 0,02807703 < 0,10 \quad \text{CV}$$

$$\text{Max} (\theta_y) = 0,03150755 < 0,10 \quad \text{CV}$$

Alors l'effet de PΔ peut être négligé dans notre cas.

➤ Etape 03 :

a) Définition du comportement non linéaire des poutres et poteaux

Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments ayant des propriétés élastiques linéaires, le comportement non linéaire des éléments est traduit par l'introduction de rotules

plastiques « Plastic Hinge » pour simuler la dissipation d'énergie, aux niveaux des sections susceptibles de se plastifier. [80] [10]

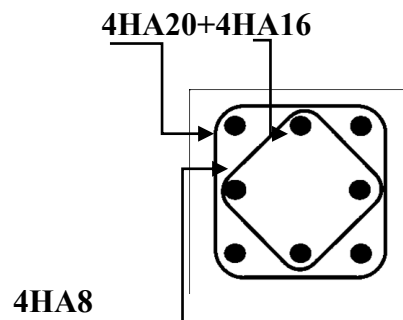
Des rotules de type moment (M2 et M3), effort normal (P), peuvent être définies le long des éléments linéaires, par ailleurs le logiciel offre aussi la possibilité de définir des rotules qui prennent en compte le couplage effort normal-moment (PMM). [80] [10]

Pour notre modèle de calcul, nous allons introduire dans les poutres et les poteaux des rotules plastiques comme suit :

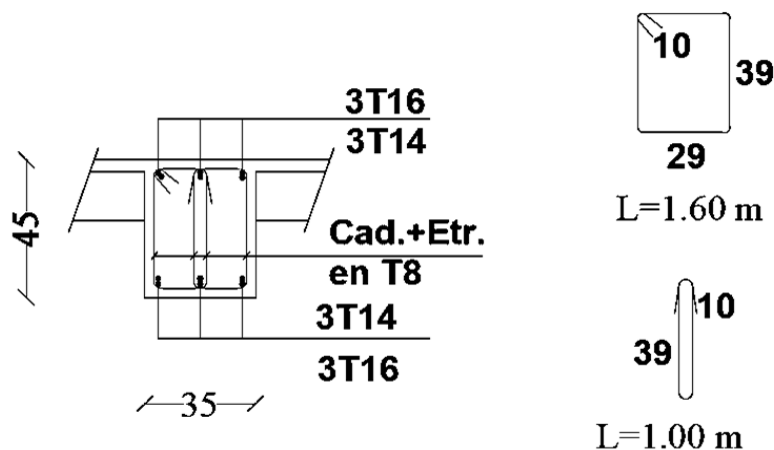
- **Poutres** : Rotules de flexion (Default M3).
- **Poteaux** : Rotules par couplage effort normal-moment (Default PMM).

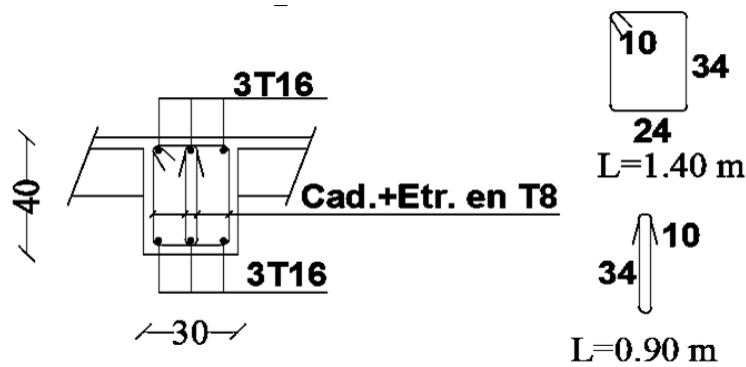
Il est essentiel de noter qu'avant la définition de ces rotules plastiques, il est nécessaire d'introduire le ferrailage des poutres et poteaux dans le modèle. Le comportement de ces rotules, notamment leur capacité à se plastifier, est directement conditionné par les caractéristiques de l'armature de la section. En assignant le ferrailage au modèle, cela permet au logiciel de calculer précisément le comportement non linéaire de chaque section et de simuler la progression de la plastification de manière réaliste.

Poteaux (45x45) :



Poutres principales (35x45) :



Poutres secondaires (30x40) :**b) Attribution des rotules**

Sélection des poutres → **Assign** → **Frame** → **Hinges**.

Frame Hinge Definition Type

☐ Nonlinear Beam/Column
☐ Distributed Plasticity
☐ Equal Spacing
☐ Continuous Spring Support (Piles or Grade Beams)
☒ User Defined

[Convert to User Defined](#)

Frame Hinge Assignment Data - User Defined

Hinge Property	Location Type	Relative Distance	Absolute Distance m
Auto	Relative to clear length	1	0
Auto M3	Relative to clear length	0	
Auto M3	Relative to clear length	1	

[Add Hinge](#)
[Modify Hinge](#)
[Delete Hinge](#)

Current Hinge Information

Type: From ASCE 41-23 (reference standard AISC 342-22, ACI 369.1-22)

Table: ACI 369.1-22 Table 4.2.2.2.2a (Reinforced Concrete Beams Controlled by Flexure)

DOF: Auto M3, Isotropic hysteresis

[Modify/Show Auto Hinge Assignment Data...](#)

☐ Show Advanced Parameters

Options

☐ Add Specified Hinge Assigns to Existing Hinge Assigns (All hinges will be converted to User Defined)
☒ Replace Existing Hinge Assigns with Specified Hinge Assigns

Existing Hinge Assignments on Currently Selected Frame Objects

Number of Selected Frame Objects: 339

Total Number of Hinges on All Selected Frame Objects: 1356

All 1356 existing hinge assignments will be removed when the above hinge assignment is applied

[Fill Form with Hinges on Selected Frame Object](#)

[OK](#)
[Cancel](#)

Sélection des poteaux → **Assign** → **Frame** → **Hinges**.

Frame Hinge Definition Type

☐ Nonlinear Beam/Column i
☐ Distributed Plasticity i
☐ Equal Spacing
☐ Continuous Spring Support (Piles or Grade Beams) i
☒ User Defined Convert to User Defined

Frame Hinge Assignment Data - User Defined

Hinge Property	Location Type	Relative Distance	Absolute Distance m
Auto	Relative to clear length	0	0
Auto P-M2-M3	Relative to clear length	0	
Auto P-M2-M3	Relative to clear length	1	

Current Hinge Information

Type: From ASCE 41-23 (reference standard AISC 342-22, ACI 369.1-22)
Table: ACI 369.1-22 Table 4.2.2.2b/c (Reinforced Concrete Columns Controlled by Flexure)
DOF: Auto P-M2-M3

☐ Show Advanced Parameters

Options

☐ Add Specified Hinge Assigns to Existing Hinge Assigns (All hinges will be converted to User Defined)
☒ Replace Existing Hinge Assigns with Specified Hinge Assigns

Existing Hinge Assignments on Currently Selected Frame Objects

Number of Selected Frame Objects: 220
Total Number of Hinges on All Selected Frame Objects: 1320
All 1320 existing hinge assignments will be removed when the above hinge assignment is applied

c) Définition du chargement de l'analyse push over

Après avoir défini le comportement non linéaire des éléments de la structure, on peut à présent définir le chargement de l'analyse « push over ». L'analyse consiste à appliquer à la structure une distribution de forces latérales incrémentées de façon progressive jusqu'à ce que le déplacement au sommet de la structure atteigne un déplacement cible.

Définition de l'analyse sous charges gravitaires :

Define → Load Cases → Add New Case

Load Case Data

General

Load Case Name: GRAVITAIRE [Design...]

Load Case Type: Nonlinear Static [Notes...]

Mass Source: Previous

Analysis Model: Default

Initial Conditions

☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☐ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: []

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	G	1
Load Pattern	Q	0,3

[Add] [Delete]

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Geometric Nonlinearity Option: None

Load Application: Full Load [Modify/Show...]

Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]

Floor Cracking Analysis: No Cracked Analysis [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: User Defined - Iterative Event-to-Event [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Add New Case

Load Case Data

General

Load Case Name: PUSHX [Design...]

Load Case Type: Nonlinear Static [Notes...]

Mass Source: Previous

Analysis Model: Default

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: GRAVITAIRE

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Acceleration	UX	1

[Add] [Delete]

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Geometric Nonlinearity Option: None

Load Application: Displacement Control [Modify/Show...]

Results Saved: Multiple States [Modify/Show...]

Floor Cracking Analysis: No Cracked Analysis [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: User Defined - Iterative Event-to-Event [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Load Case Data

General

Load Case Name: PUSHY [Design...]

Load Case Type: Nonlinear Static [Notes...]

Mass Source: Previous

Analysis Model: Default

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: GRAVITAIRE

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Acceleration	UY	1

[Add] [Delete]

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Geometric Nonlinearity Option: None

Load Application: Displacement Control [Modify/Show...]

Results Saved: Multiple States [Modify/Show...]

Floor Cracking Analysis: No Cracked Analysis [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: User Defined - Iterative Event-to-Event [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

➤ **Etape 04 :**

Exécution de l'analyse statique non linéaire « Pushover » : **Analyse → Run Analysis.**

3.7.CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de définir les principales caractéristiques de notre ouvrage, ainsi que les charges et surcharges qui lui sont appliquées, avant de passer à l'étape de la modélisation avec ETABS Ultimate v22.3.0. Les vérifications ont été effectuées conformément aux exigences du RPA2024. La majorité des critères réglementaires ont été respectés, toutefois l'effort normal dans les poteaux. Enfin nous avons défini le chargement pour l'analyse pushover. L'analyse a été lancée et ses résultats, qui détermineront le comportement sismique de notre structure, seront interprétés et détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Interprétation des Résultats.

4.1. INTRODUCTION

Après l'exécution de l'analyse statique non linéaire « Pushover », l'étape suivante consiste à interpréter les résultats afin d'évaluer la réponse globale de la structure sous action sismique. Les courbes capacité-déplacement obtenues pour les deux directions (*PUSH X* et *PUSH Y*) seront superposées au spectre de réponse du RPA 2024, ce qui permettra d'identifier, le point de performance et de vérifier la rigidité ainsi que la conformité de l'ouvrage aux exigences réglementaires.

4.2. PRESENTATION DES RESULTATS

4.2.1. Courbes de capacité ($V_{base} - D_{Sommet}$)

Pour analyser le comportement de la structure, les courbes de capacité sont d'abord tracées. Les figures suivantes (*figure 4.1* et *figure 4.2*) présentent les courbes de capacité obtenues dans les deux directions (*PUSH X* et *PUSH Y*), issues directement de l'analyse effectuée sous ETABS. **Display** → **Static Pushover Curve**.

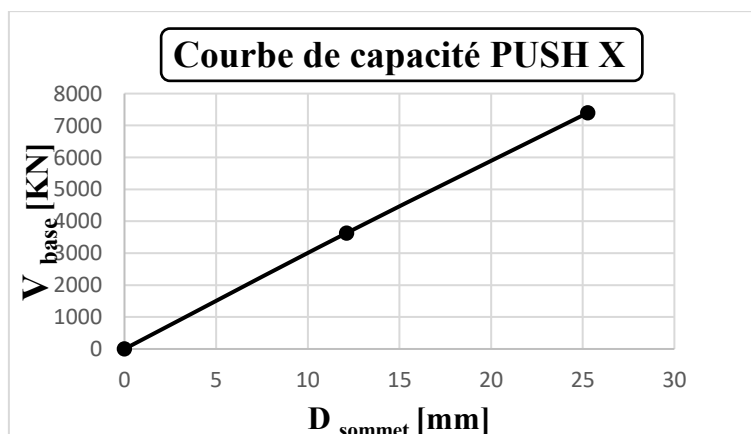


Figure 4. 1 Courbe de capacité ($V_{base} - D_{Sommet}$) - Direction X -.

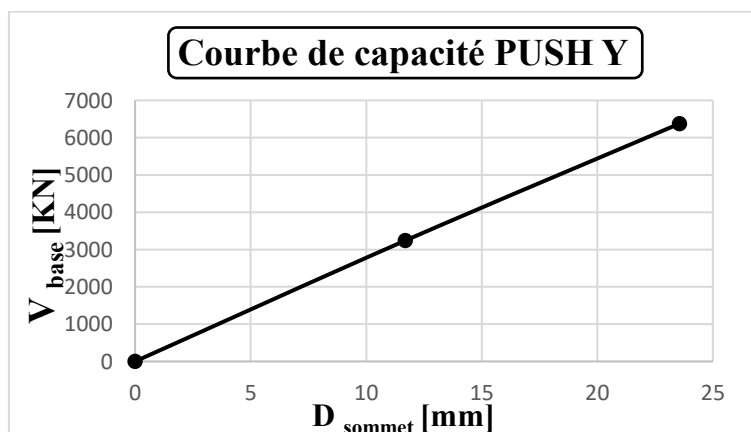


Figure 4. 2 Courbe de capacité ($V_{base} - D_{Sommet}$) - Direction Y -.

Commentaire :

La courbe de capacité représente l'effort tranchant à la base (V_{base}) développée dans la structure, en fonction du déplacement surveillé au sommet (D_{sommet}) pour les directions X et Y.

On observe que la courbe traduit l'évolution de l'effort tranchant total à la base en fonction du déplacement surveillé au sommet. La pente quasi linéaire confirme le comportement rigide (élastique) de la structure, sans apparition de rotules plastiques.

Le nombre relativement restreint de points provient des conditions de calcul propres à l'analyse réalisée, mais il permet néanmoins de dégager les tendances nécessaires à l'interprétation du comportement global.

4.2.2. Spectre de réponse RPA 2024

Le spectre de réponse élastique exprime l'accélération spectrale normalisée S_{ae}/g en fonction de la période propre T (s) (voir *figure 4.3*), permettant de caractériser la demande sismique pour les composantes horizontales de l'action. (Art.3.3.1/RPA2024).

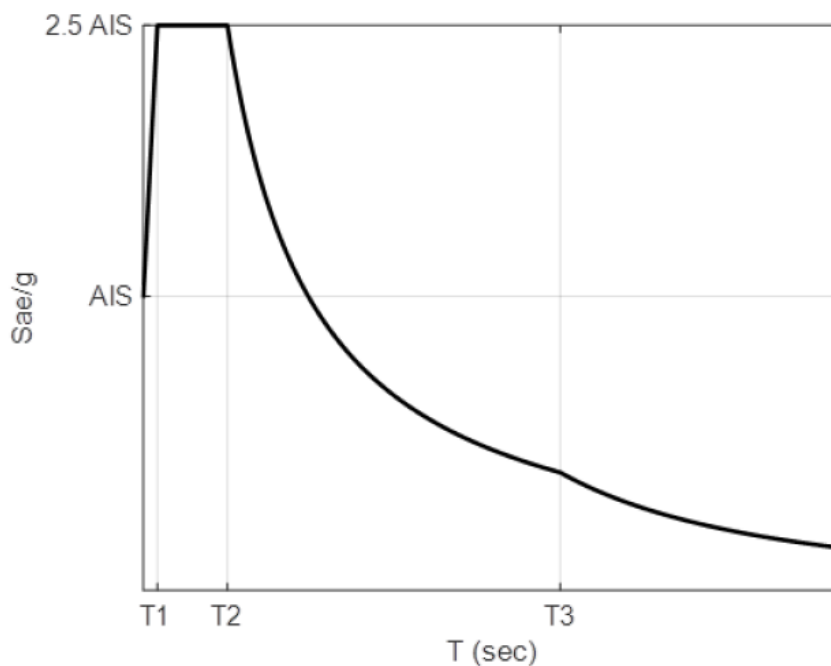


Figure 4. 3 Spectre de réponse élastique RPA2024.

En fonction des paramètres de calcul mentionnées au chapitre III, la courbe du spectre de réponse est tracée (*figure 4.4*).

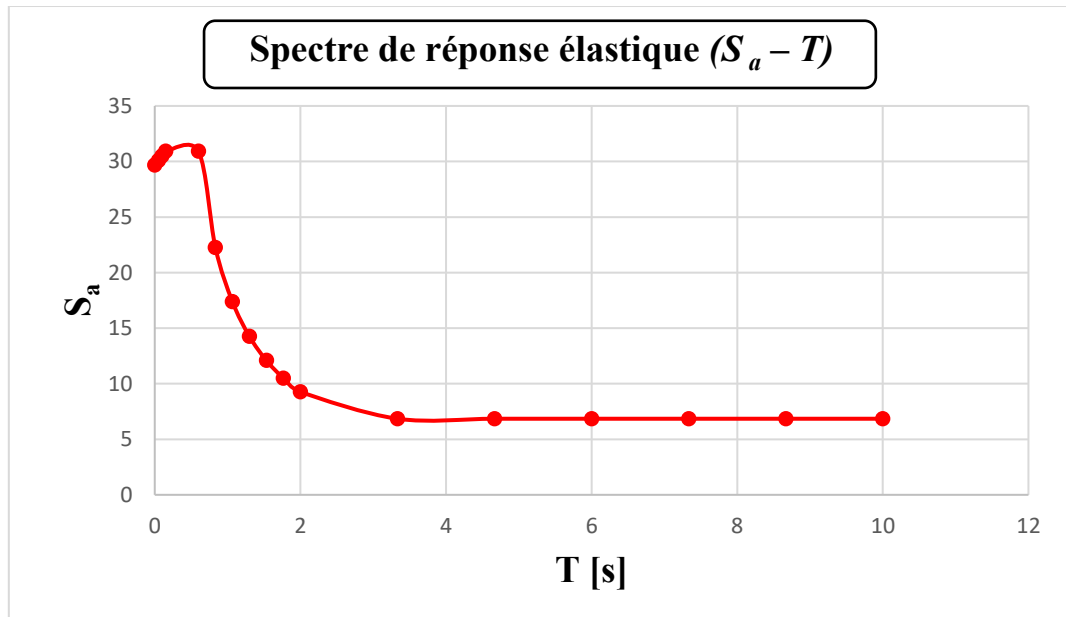


Figure 4. 4 Représentation du spectre élastique ($S_a - T$).

Remarque :

- Le RPA 2024 définit un spectre normalisé (S_a/g) en fonction de la période T .
- On prend en compte l'accélération de la gravité (g) lorsqu'on définit la fonction du spectre de réponse. Alors on utilise un spectre en accélération réelle (S_a) en fonction de la période $T(s)$.

Après avoir présenté le spectre de réponse élastique défini par le RPA 2024, qui constitue la référence réglementaire de la demande sismique, l'étape suivante consiste à transformer les courbes de capacité (*figure 4.1* et *figure 4.2*) en spectres de capacité (S_a-S_d). Ce qui va nous permettre de superposer la capacité de la structure à la demande sismique définie par le RPA et de déterminer le point de performance dans les deux directions.

4.2.3. Spectre de capacité (S_a-S_d)

- **Spectre demande ADRS « Spectre de Réponse Accélération-Déplacement » :**

Pour transformer la courbe de spectre de réponse élastique ($S_a - T$) en spectre de capacité ($S_a - S_d$), on utilise une relation fondamentale de la dynamique des structures qui permet de passer d'un format accélération-période à un format accélération-déplacement. [81]

$$S_d = S_a \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \quad 1.16$$

Où :

- S_d est le déplacement spectral.
- S_a est l'accélération spectrale.

- T est la période propre de la structure.

On obtient la courbe (figure 4.5)

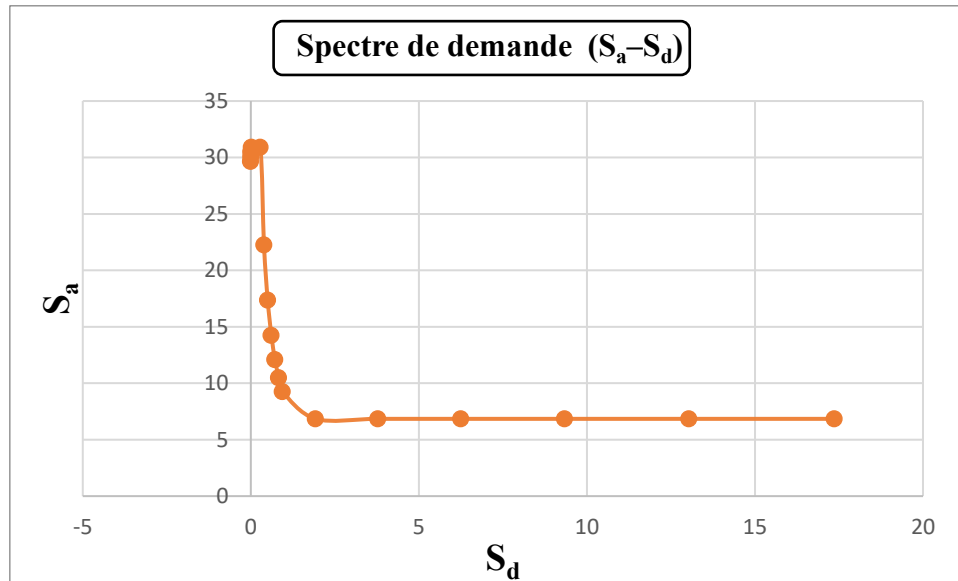


Figure 4. 5 Représentation du spectre de demande ADRS ($S_a - S_d$).

- **Les spectres de capacité :**

Pour passer de ces courbes ($V_{base} - D_{Sommet}$) au format ($S_a - S_d$), on utilise la relation fondamentale de la dynamique des structures citée ci-dessus, en prenant en compte les propriétés modales de notre bâtiment.

$$S_d = \frac{D_{sommet}}{\Gamma} \quad 1.17$$

$$S_a = \frac{V_b}{M_{eff}} \quad 1.18$$

Où :

- D_{sommet} est le déplacement au sommet.
- V_{base} est l'effort tranchant à la base.
- Γ est le facteur de participation modale pour le mode dominant dans la direction étudiée. (C'est la valeur dans les colonnes **UX** pour la direction X et **UY** pour la direction Y pour le mode 1 et 2 respectivement).
- M_{eff} est la masse modale effective. (La valeur dans les colonnes **UX** pour la direction X et **UY** pour la direction Y).

Après avoir effectué la conversion, le graphique suivant (figure 4.6 et figure 4.7) présente la capacité de la structure dans la direction X, et Y.

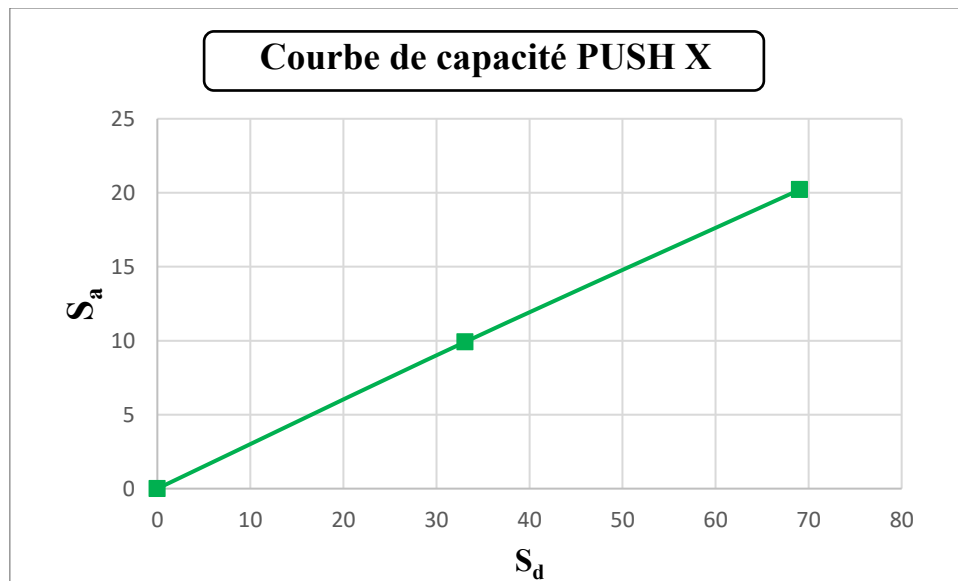


Figure 4. 6 Spectre de capacité ($S_a - S_d$) - Direction X -.

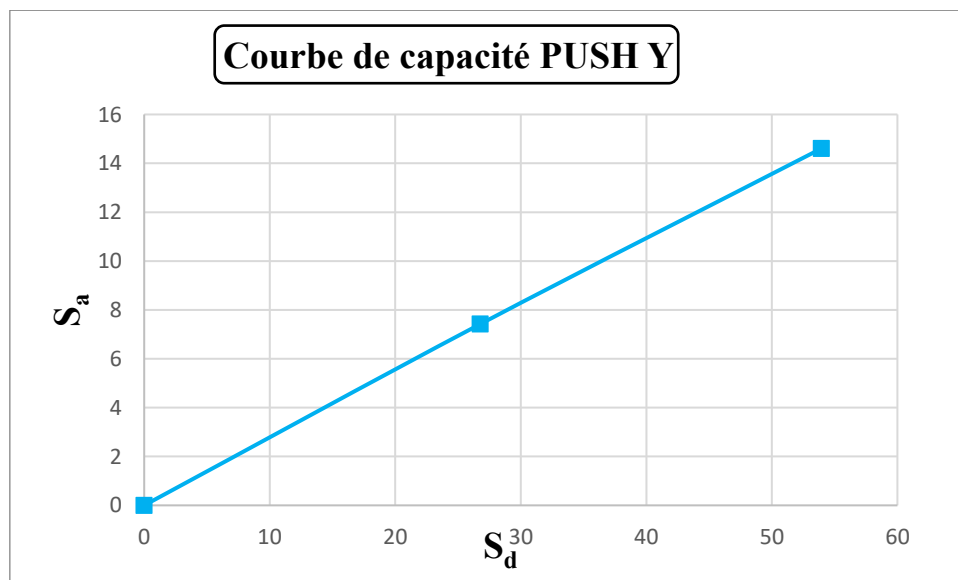


Figure 4. 7 Spectre de capacité ($S_a - S_d$) - Direction Y -.

4.2.4. Détermination du point de performance

Le point de performance est le point d'équilibre entre la capacité de la structure et la demande sismique. Pour le déterminer, nous devons superposer nos spectres.

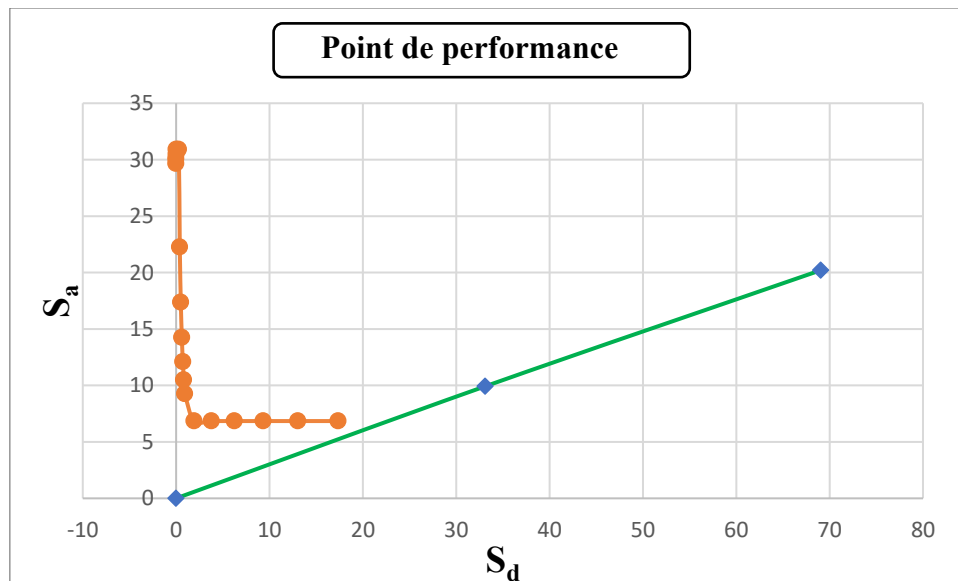


Figure 4. 8 Détermination du point de performance du système équivalent, Direction - X -.

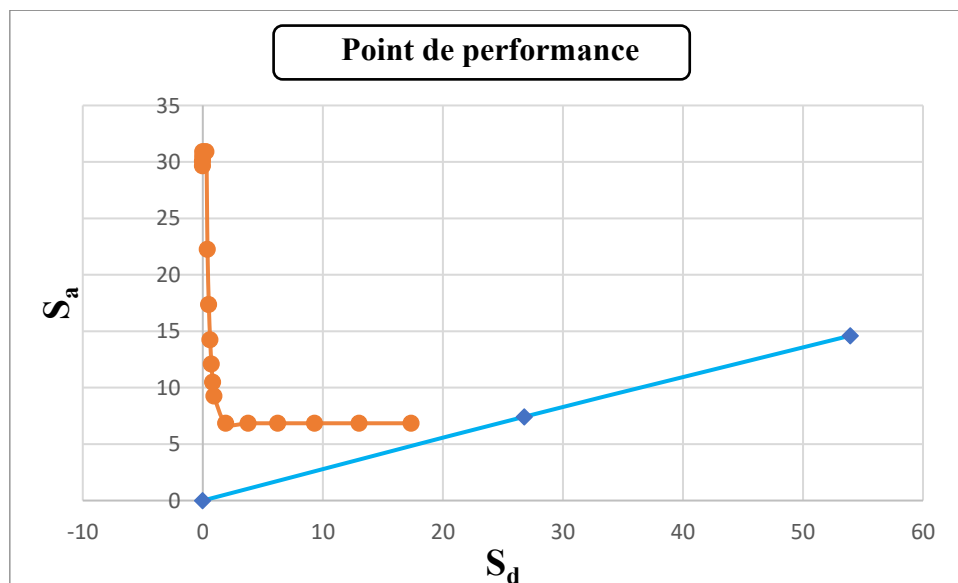


Figure 4. 9 Détermination du point de performance du système équivalent, Direction - Y -.

Commentaire :

La superposition du spectre de capacité de la structure et du spectre de demande sismique révèle l'absence d'un point d'intersection. Cette observation confirme le comportement de la structure identifié par l'analyse « pushover », qui a montré que la structure conserve une réponse quasi linéaire, sans formation de rotules plastiques. Ainsi la capacité de la structure est supérieure à la demande imposée par le séisme de conception. En d'autres termes, le bâtiment, en raison de sa rigidité et de sa résistance, ne subit pas de déformations non linéaires et se comporte de manière entièrement élastique sous l'effet du séisme.

4.2.5. Vérification des déplacements

La vérification des déplacements est cruciale pour confirmer que les déformations globales et inter-étages respectent les limites imposées par le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2024), garantissant ainsi la sécurité et l'intégrité des éléments structuraux et non-structuraux. Les résultats présentés ci-dessous, « Maximum Story Displacement » proviennent directement de l'analyse menée sur le logiciel « ETABS ».

Direction X

Le graphique ci-dessous (*figure 4.10*) présente les résultats des déplacements maximaux par étage obtenus à partir de l'analyse sous PUSH X.

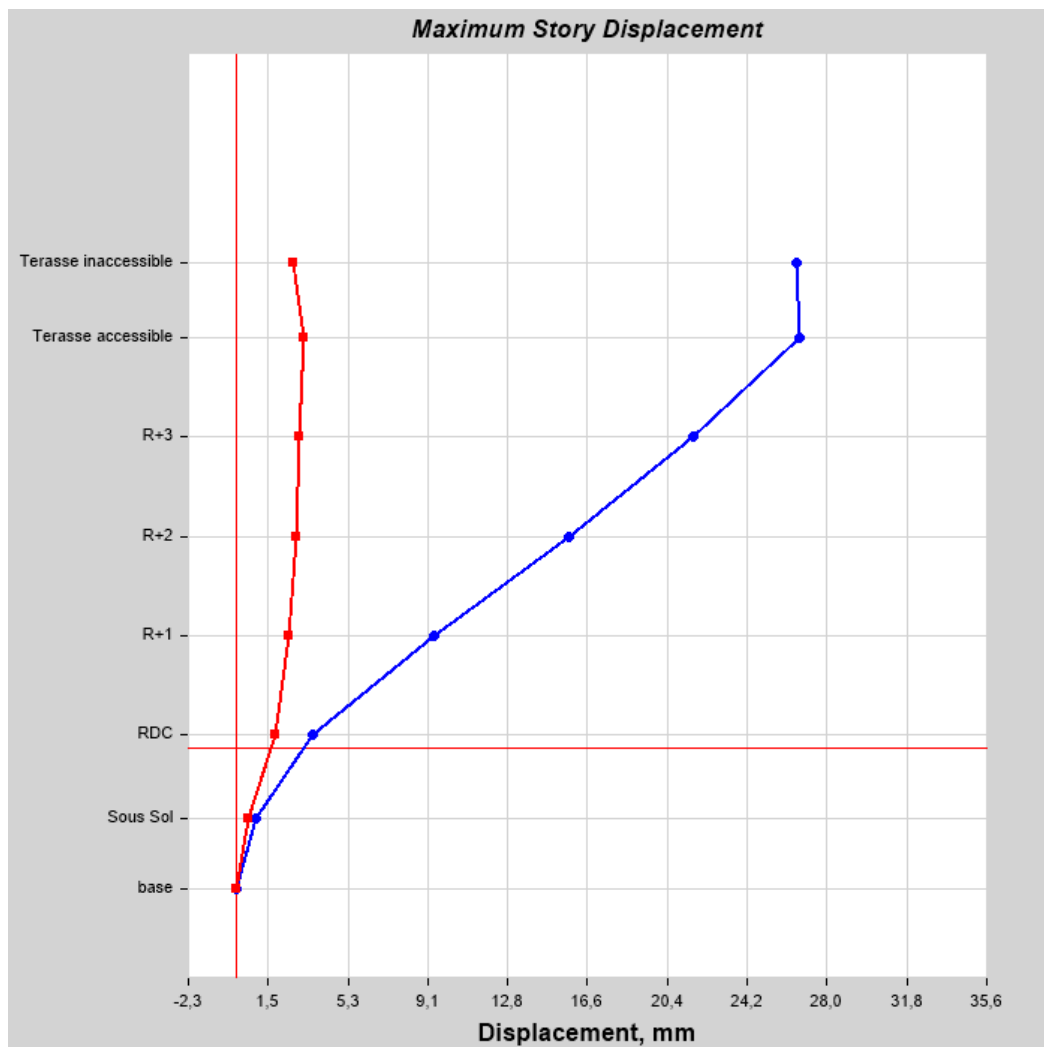


Figure 4.10 Déplacements maximaux par étage - Direction X-.

Commentaire :

Le graphique illustre le comportement global de la structure sous l'effet de l'analyse "pushover" dans la direction X. La courbe bleue représente le profil de déplacement horizontal de chaque niveau. On peut observer une déformation progressive qui augmente harmonieusement de la base vers le sommet. La courbe rouge représente la dérive inter-étages, mesurant la déformation relative entre chaque niveau. La vérification de cette dérive sera cruciale pour confirmer la conformité de la structure avec les exigences du RPA 2024.

Direction Y

Le graphique ci-dessous (*figure 4.11*) présente les résultats des déplacements maximaux par étage obtenus à partir de l'analyse sous PUSHY.

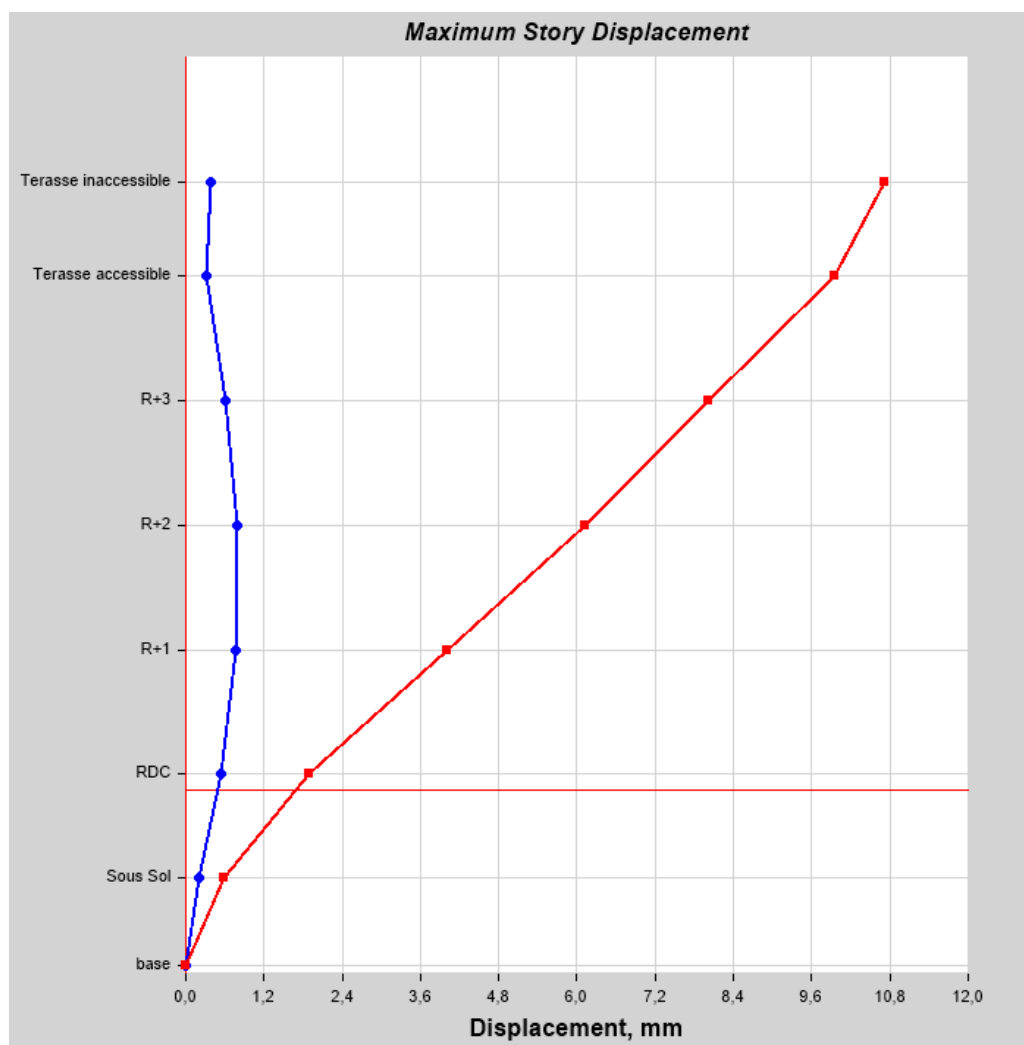


Figure 4. 11 Déplacements maximaux par étage - Direction - Y-.

Commentaire :

Le profil de déplacement dans la direction Y est également représenté par une courbe bleue. Cependant, on observe la présence d'un déplacement quasi nul au niveau des derniers étages (Terrasse accessible et inaccessible). Cette observation s'explique par la configuration structurelle du dernier niveau, qui est composée de seulement trois panneaux de dalles. La masse et la rigidité de ces éléments sont quasiment négligeables par rapport aux planchers des niveaux inférieurs. Par conséquent, le dernier niveau ne suit pas le mouvement des étages inférieurs, d'où l'absence de déplacement du dernier niveau. De plus, la rigidité globale de la structure dans la direction Y est environ trois fois moins importante que dans la direction X. Cette différence de rigidité se reflète dans les résultats, expliquant le comportement spécifique de la structure dans cette direction.

4.2.6. Vérifications des déplacements inter étages

Après avoir examiné les courbes de déplacement, la conformité de la structure est validée en comparant le déplacement inter-étages maximale à la limite réglementaire du RPA 2024, Selon ce règlement les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser **1.5%** de la hauteur d'étage dans le cas d'un bâtiment en béton armée. Les tableaux ci-dessous présentent les résultats de cette vérification pour les directions X et Y déjà citer dans (chapitre III).

Dans le sens XX :

Tableau 4. 1 déplacements inter-étages dans le sens XX.

Story	δ_{ek}	R	δ_k	Δ_k X	$\overline{\Delta_k}$	Vérification
Terrasse inaccessible	0,00151	4,50	0,005436	0,003834	0,0459	<i>vérifiée</i>
Terrasse accessible	0,002575	4,50	0,00927	0,0008316	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+3	0,002806	4,50	0,0101016	0,0001152	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+2	0,002838	4,50	0,0102168	0,0020052	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+1	0,002281	4,50	0,0082116	0,0039492	0,0612	<i>vérifiée</i>
RDC	0,001184	4,50	0,0042624	0,00288	0,0612	<i>vérifiée</i>
Sous-Sol	0,000384	4,50	0,0013824	0,0013824	0,051	<i>vérifiée</i>

Dans le sens YY :

Tableau 4. 2 déplacements inter-étages dans le sens YY.

Story	δ_{ek}	R	δ_k	$\Delta_k Y$	$\overline{\Delta_k}$	Vérification
Terrasse inaccessible	0,002406	4,50	0,0086616	0,0009612	0,0459	<i>vérifiée</i>
Terrasse accessible	0,002673	4,50	0,0096228	0,0011844	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+3	0,003002	4,50	0,0108072	7,56E-05	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+2	0,003023	4,50	0,0108828	0,0004752	0,0612	<i>vérifiée</i>
R+1	0,002891	4,50	0,0104076	0,004824	0,0612	<i>vérifiée</i>
RDC	0,001551	4,50	0,0055836	0,0031392	0,0612	<i>vérifiée</i>
Sous-Sol	0,000679	4,50	0,0024444	0,0024444	0,051	<i>vérifiée</i>

Commentaire :

Les résultats de la vérification indiquent que pour les deux directions, la vérification du déplacement inter-étages, présentés dans les tableaux sont inférieures à 1.5% de la hauteur d'étage le RPA 2024. Cette conformité démontre que la structure est suffisamment rigide pour résister aux déformations causées par le séisme de référence, évitant ainsi un comportement de « étage souple ».

4.3. CONCLUSION

L'analyse de la structure par la méthode statique non linéaire "Pushover" a permis d'évaluer la performance sismique de notre structure. La superposition du spectre de capacité de la structure avec le spectre de demande sismique du RPA2024 a révélé que la capacité du bâtiment est supérieure à la demande imposée par le séisme de référence. Cette observation est confirmée par l'analyse des déplacements inter-étages, affirmant ainsi que la structure est suffisamment rigide (**pas d'étage souple**).

En conclusion, la structure étudiée remplit, les exigences de sécurité et de performance sismique. Le comportement majoritairement élastique de l'ouvrage sous l'effet du séisme de conception garantit une sécurité élevée et une bonne résistance aux déformations, validant ainsi la conception de ce bâtiment face au risque sismique.

Conclusion générale

Ce travail a permis de mettre en évidence les principaux enjeux de la protection du bâti algérien face aux tremblements de terre. L'analyse des phénomènes sismiques et de l'évolution réglementaire a montré que, malgré les progrès réalisés depuis l'introduction du RPA et ses différentes révisions, les expériences des derniers séismes ont révélé les limites de la version 2003, conduisant à l'élaboration du RPA 2024, enrichi par les retours d'expérience et les avancées scientifiques.

L'étude des facteurs de vulnérabilité a souligné l'importance d'une évaluation adaptée et confirmé que l'analyse pushover constitue un outil efficace pour apprécier la capacité réelle des structures et repérer leurs zones sensibles.

La dernière partie du travail a porté sur la polyclinique étudiée, une infrastructure stratégique et réfléchie dont le rôle est vital en cas de catastrophe. L'analyse statique non linéaire (pushover) a permis d'évaluer sa performance sismique. La superposition du spectre de capacité et du spectre de demande sismique du RPA 2024 a montré que la capacité du bâtiment est supérieure à la demande imposée par le séisme de référence. La vérification des déplacements inter-étages confirme l'absence d'étage souple et une rigidité satisfaisante de l'ouvrage. Cependant, la vérification de l'effort normal réduit dans certains poteaux n'a pas été totalement satisfaisante, indiquant un point nécessitant une attention particulière lors d'éventuelles interventions ou renforcements.

Dans l'ensemble, la structure étudiée remplit les exigences essentielles de sécurité et de performance sismique. Son comportement majoritairement élastique sous l'effet du séisme de conception garantit une sécurité élevée et une bonne résistance aux déformations, tout en soulignant la nécessité de contrôles complémentaires pour assurer une conformité complète au règlement parasismique.

Références bibliographiques

- [1] M. Youcef, «Mémoire de Magister; Évaluation de Vulnérabilité Sismique des Bâtis Existants « Structure portique en béton armé »,» Université 08 Mai 45; Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie; Département de Génie Civil; Spécialité Risques Naturels et vulnérabilité des ouvrages., Guelma , 2009.
- [2] E. L. LEKKAS. et H. D. KRANIS, «The Boumerdes-Zemmouri, (Algeria) Earthquake (May 21, 2003, Mw=6.8): Results of Field Reconnaissance on Damage Evaluation, Surficial Deformation and Geological Site Effects,» chez 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [3] T. Paulay et M. Priestley, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [4] B. MOHAMED, «Mémoire de Magister, L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE ET DU RISQUE SISMIQUE DE LA VILLE DE CONSTANTINE.,» Université 08 Mai 1945 , Guelma , 2011.
- [5] C. F. Richter, An instrumental earthquake magnitude scale, Bulletin of the Seismological Society of America, (1935).
- [6] B. Amina, «MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS,» Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2015/2016.
- [7] «Porté à connaissance sur le risque sismique dans le département du Jura « Prévention du risque sismique et évolution de la réglementation »,» Avril 2011.
- [8] <https://www.craag.dz/>.
- [9] M. B. Piarimo Lestuzzi, « Génie Parasismique Conception et Dimensionnement des Bâtiments », Livre de 327pages,, 2008.
- [10] H. Leila, «Mémoire de master, "Evaluation de la vulnérabilité sismique d'une structure stratégique".,» Université Mouloud Mammeri , Tizi-Ouzou, 2015.
- [11] G. GRÜNTAL, «European Macroseismic Scale 1998 EMS-98,» Luxembourg, 1998.
- [12] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/climat-environnement/complements-seismes/propagation-ondes-hypocentre->

epicentre.aspx#:~:text=Foyer%20ou%20hypocentre%20:%20point%20de,
%C3%A0%20la%20verticale%20du%20foyer.

[13] Cours de Barbara Romanowicz Les séismes profonds college de France 2018.

[14] <https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/les-caracteristiques-d-un-seisme-a1087.html?lang=fr>.

[15] Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., & Bracene, R. «La tectonique active de la région nord-algérienne. Comptes Rendus Géoscience, 2006..

[16] <https://quizlet.com/fr-fr/schema/lorigine-dun-tremblement-de-terre-496781930>.

[17] <https://www.georisques.gouv.fr/consulter-les-dossiers-thematiques/volcanisme>
<https://www.georisques.gouv.fr/consulter-les-dossiers-thematiques/volcanisme>.

[18]<https://cartes.patrimoineculturel.algerien.org/fr/lieu/06b%C3%A9ja%C3%AFa/502#:~:text=Les%20grottes%20de%20Guedaman%20remonte,51%20DU%2021%20AO%C3%9BT%202019.&text=Pour%20parcourir%20la%20carte%20en,%2C%20puis%20faites%20Dla%20glisser>.

[19] https://alger-roi.fr/Alger/essor_algerie_1947/textes/21_mines_fer_ouenza.htm.

[20] B. P., Sismologie Appliquée A L'usage Des Architectes Et Ingénieurs,, Paris: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), 2004 .

[21] http://www.seismo.ethz.ch/static/100j/snapshot03/sl03_FR.html.

[22] M. Sellaoui Nezha, «Mémoire de fin d'études Master, "Risque et vulnérabilité sismique d'un bâtiment stratégique à la ville de Guelma",» Université de 8 Mai 1945 - Guelma -, 2013.

[23] L'orient le jour, Séisme de magnitude 5,1 en Algérie, pas de dégâtsle, le 18 mars 2025

[24] Algérie presse service, Secousse tellurique de Médéa:, une réplique de 4,0 degrés enregistrée Publié le. Jeudi, 20 mars 2025.

[25] Article de elmoudjahid.dz . Séisme dévastateur d'el-Asnam, Vendredi 10 octobre 1980 à l'heure de la prière : 15 secondes qui scellèrent le destin de la ville

[26] Article de Algérie Presse Service. Séisme de Boumerdes: 19 ans après, les stigmates bientôt estompés, Publié le : vendredi, 20 mai 2022 18:30

- [27] <https://www.isc.ac.uk/>.
- [28] <https://www.craag.dz/index.php/seisme-de-boumerdes/>.
- [29] Fiche scientifique – Réseau « SISMOS à l'École », Les différents types d'ondes sismiques
- [30] <https://www.le-ciel.eu/structure-interne.html>.
- [31] CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE PARASISMIQUE (CGS), «Règles Parasismiques Algériennes RPA 2024,» CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE PARASISMIQUE (CGS), Alger , 2024.
- [32] <https://ctc-dz.org/missions-controle-technique>.
- [33] Federal Emergency Management Agency (FEMA), «Hazus earthquake loss estimation methodology,» Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C, 1999.
- [34] C. M, «Les méthodologies d'évaluation de l'aléa sismique, période 1995-2001,» Ecole Nationale Supérieure Des Sciences de l'Information et des Bibliothèques Université Claude Bernard , Lyon 1, 2001.
- [35] B. Zouheyr, «Etablissement des courbes de vulnérabilité des structures : méthodologie et application,» Université Abou BekrBelkaid, Tlemcen, 2014.
- [36] <https://www.cypres.org/default/presentation-des-risques-majeurs.aspx>.
- [37] P. MORETTI, «Caractérisation des propriétés mécaniques des bâtiments en maçonnerie non armée pour l'évaluation du risque sismique,» ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC , QUÉBEC , 21 NOVEMBRE 2017 .
- [38] A. NEVILLE, Properties of Concrete, Londres: Longman, 2011.
- [39] <https://grinec.com/les-erreurs-de-conception/>.
- [40] «cours de mme ALI AHMED, pathologie et réhabilitation des structures M2 genie civil.».
- [41] D. T. CHERRARED Abderrahmane, «Vulnérabilité sismique des bâtiments existants Cas de la ville de Bejaia,» Université A. MIRA, , Bejaïa, 2011/2012.
- [42] F. DUCO, «Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments existants à partir d'une instrumentation in situ,» Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Toulouse, 2012.

- [43] Beyer, K., Mangalathu, S. Review of strength models for masonry spandrels. Bull Earthquake Eng 11, 521–542 (2013)
- [44] Djillali., A Amina & Benouar., «Contribution for a Catalogue of Earthquake Resistant Traditional Techniques in Northern Africa: The case of the Casbah of Algiers,» European Earthquake Engineering Journal, pp. 57-59 , 2005.
- [45] https://immobilier.lefigaro.fr/article/la-casbah-d-alger-a-bien-besoin-d-un-ravalement_7429660e-01f8-11ed-a561-7a39445d008c/.
- [46] D. K. Amar, «Cours de Vulnérabilité et Réhabilitation des Structures, PATHOLOGIE DES BATIMENTS ENDOMMAGÉS PAR LES SÉISMES,» UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI, CHLEF, 2014/2015.
- [47] L. Sid-Ali, «MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE ETUDE DE LA PERFORMANCE SISMIQUE DES STRUCTURES METALLIQUES RENFORCEES PAR DES PALEES DE STABILITE EN V,» Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2014.
- [48] D. I. D. HENNI, «Polycopié Pathologies et Réhabilitation des Structures,» Université Hassiba BENBOUALI Faculté de Génie Civil et d'Architecture, CHLEF, 2021-2022.
- [49] K. A. MANSOURI DALILA, «Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil. Modélisation des assemblages métalliques en zone sismique,» Université abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2015.
- [50] <https://www.reparabat.fr/pathologies/planchers-hauts/>.
- [51] C. (. E. d. Normalisation), «EN 1998 (Eurocode 8): Design of structures for earthquake resistance,» Bruxelles, Belgique, 2004.
- [52] A. Kibboua, M. Naili et D. Benouar, «Méthode d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts à poutres isostatiques en béton armé.,» Communication présentée au 9ème Colloque National AFPS., Marne-la-Vallée, France., 2015.
- [53] A. B. Mounir, «MEMOIRE DE MAGISTER "IMPLICATION DU PROJET RPOA SUR LA CONCEPTION SISMIQUE DES PONTS EN ALGERIE",» UNIVERSITE SAAD DAHLEB , Blida , 2010.
- [54] <https://www.kqed.org/science/22398/25-years-after-the-loma-prieta-earthquake-are-we-safer>.

- [55] R. Park et T. Paulay, Reinforced Concrete Structures, New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [56] A. C. I. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2008.
- [57] (ICBO), Uniform Building Code, UBC-97, WHITTIER, CALIFORNIA, 1997.
- [58] A. Issam, «Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en Génie Civil, Analyse pushover des structures en béton armé tridimensionnelle à étage souple,» Université Mohamed Khider , Biskra, 2018.
- [59] C. Chatzigogos, «Comportement sismique des fondations superficielles: vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception. Thèse de doctorat, École Polytechnique X, Spécialité: Mécanique.,» 2007.
- [60]<https://dma-armatures.fr/armatures-pour-fondations-en-zone-sismique-tout-ce-qu'il-faut-savoir/#:~:text=Les%20normes%20de%20construction%20parasismique%20dictent%20plusieurs%20aspects%20du%20ferraillage>.
- [61] «https://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_PJ.php?id_PJ=107&id_DT=5».
- [62] «Le séisme de Kocaeli en Turquie – Mission de reconnaissance,» Article paru dans IAS Bulletin technique de la Suisse romande, No. 01/02, , 19 janvier 2000.
- [63] K. AKKOUCHE, «THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT, Développement d'un système Expert pour la réhabilitation des structures endommagées par des séismes.,» Université Mouloud MAMMERI , Tizi-Ouzou.
- [64] «D. Benedetti et al, Seismic Vulnerability And Risk Evaluation for Old Urban Nuclei, Department of structural Engineering Polytechnic, Milan, Italy, 1988.».
- [65] N.Hichem, «MEMOIRE DE MAGISTER. Un système intelligent pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions,» Université saad dahlab , Blida, 2011.
- [66] Jiménez, Belén, Pelà, Luca, & Hurtado, Marcela.. «Building Survey Forms for Heterogeneous Urban Areas in Seismically Hazardous Zones. Application to the historical center of Valparaíso, Chile.,» International Journal of Architectural Heritage., 2018.

- [67] «HAZUS99 SR2: "Technical manual", FEMA, National Institute of Building Sciences, December 1999.».
- [68] «Milutinovic, Zoran V., Mouroux, Pierre et al. (2003). The Objectives and Achievements of RISK-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns. Communication présentée à la conférence SEMEF-2003,».
- [69] D.Bertil, M.B. Valérius, J. Péricat, S.Auclair Scénarios Départementaux de Risque Sismique en Guadeloupe. Rapport BRGM/RP-57488-FR, 2009.
- [70] A. H. B. e. K. O. Mammar, «Indices de vulnérabilité des constructions existantes à Oran, (Indices of vulnerability of existing buildings in Oran),» Journal of Materials and Environmental Science, 7(3), 2016.
- [71] «Dunand F., Martin C., & Guéguen P. (2010). Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments à grande échelle: application et comparaison des méthodes RISK-UE et VULNERALP. Rapport Finale No. ANR-2006-PGCU-007-01, Grenoble, France.».
- [72] H. S. S. A. e. T. A. Ourabah A., «Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, ANALYSE PUSHOVER D'UNE STRUCTURE AUTO STABLE (R+8) PUSHOVER ANALYSIS OF MULTISTORY STRUCTURES,» Université Hassiba Benbouali , Chlef (Algérie), octobre 2010 .
- [73] C. S. S. Commission., «Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC- 40, Applied Technology Council.,» Redwood City., California, 1996.
- [74] K. Amar, «THESE DE DOCTORAT, Évaluation de la performance sismique des structures en béton armé en tenant compte de la nocivité du signal sismique,» Faculté du Génie de la Construction Département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri, , TIZI-OUZOU
- [75] <https://www.structuralguide.com/pushover-analysis/>.
- [76] M. MEKKI, «Ouvrage pédagogique: Génie Parasismique, "l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments",» L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohammed BOUDIAF.
- [77] m. D. L. E. D. L'urbanisme et c. N. D. R. A. E. G.-p. (cgs), regles parasismiques algeriennes rpa 99 / version 2003, alger: ministere de l'habitat et de l'urbanisme ; centre national de recherche appliquee en genie-parasismique (cgs), 2003.

- [78] C. (. S. e. T. d. Bâtiment), Règles BAEL 91 révisées 99; Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites., Paris: CSTB , 2000.
- [79] C. N. d. R. A. e. G. P. (C.G.S.), Document Technique Réglementaire (D.T.R) BC 2.41 - Règles de conception et de calcul des structures en béton armé., 1993.
- [80] B. M. Aghiles, «Mémoire de Magister; Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des structures mixtes,» Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , 2012.
- [81] Lestuzzi, P. & Smith, I. F. C. (2023). Dynamique des structures : Bases et applications pour le génie civil..
- [82] <https://www.caritas.org/wordpress/wp-content/uploads/2016/04/ECU201615541.jpg>.
- [83] <https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9isme>.
- [84] https://en.wikipedia.org/wiki/Richter_scale.