



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURE

Thème :

L'INTERACTION SOL STRUCTURE APPLIQUÉ AUX BATIMENTS

PRESENTE PAR :

Kourdi MOHAMMED ABDELDJALIL

BADDOU ABDELHAMID

SOUTENU LE 22/062023

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENT : CHERIFI WAFAA

EXAMINATEUR : TAHAR BERRABAH AMINA

ENCADREUR : MOUSSI WAHIBA

ANNEE UNIVERSITAIRE 2022/2023



DEDICACE

Dans la vie, le trajet est peut-être plus important que la destination. Après ces 5 années d'études, de sacrifices et de travail acharné, malgré les difficultés, je suis arrivé à ma destination et cela marque la fermeture d'un chapitre de ma vie. Je dédie ce travail :

À mes chers parents(Ahmed et Fadila), que Dieu les garde et les protège, pour leur éducation, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces années.

À mes frères et ma petite sœur.

À la famille de mon frère et à sa fille "ilef" qui a apporté une dimension spéciale à ma vie.

À tous mes amis sur qui j'ai toujours pu compter.

À tous mes amis d'études et ma promotion de Master 2 Génie Civil 2023.

À tous nos enseignants qui ont été présents tout au long de notre parcours. À tous ceux qui ont été à nos côtés, nous vous offrons mille salutations et notre gratitude.

Les mots me manquent encore pour vous exprimer ma reconnaissance, car comme le dit un proverbe : "Quelle que soit la valeur du présent fait à l'homme, il n'y a qu'un seul mot pour exprimer la reconnaissance inspirée par la générosité, ce mot c'est Merci".

Enfin, à tous ceux qui me sont chers, merci et encore mille mercis.

KOURDI

MOHAMMED

DEDICACE

قال تعالى: " و ما توفيقى إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب "

Je remercie Dieu pour ses innombrables bénédictions.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, vous êtes les piliers de ma vie, les guides qui ont toujours éclairé mon chemin, que Allah les garde et les protège pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés toutes ces années, tout mon amour et ma gratitude a vous deux.

À mes chers frères et sœurs, vous êtes mes compagnons de route, mes complices et mes meilleurs amis.

À ma chère sœur, son mari et ses filles Hana et Rahma. Vous être les fleurs de ma vie.

A ma merveilleuse grande famille. Vous être des trésors précieux qui illuminent ma vie.

A mes amis fidèles, vous êtes la toile de fond de ma vie.

A tous les amis d'études promotion de master 2 génie civil 2023.

À tous nos enseignants : à travers toute l'étude. À tous ceux qui se sont tenus à nos côtés,

Les mots me manquent encore pour vous témoigner reconnaissance.

Enfin, Merci et mille merci a vous tous.

BADDOU

ABDELHAMID

Remerciement

En conclusion de ce modeste travail, nous tenons tout d'abord à exprimer nos sincères remerciements à Allah Tout-Puissant pour Sa volonté, Sa santé et Sa patience qui nous ont accompagnés tout au long de ces années d'études. Nous souhaitons également adresser nos plus vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre apprentissage tout au long de notre parcours scolaire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Madame MOUSSI pour avoir proposé et encadré ce travail, ainsi que pour son suivi constant tout au long de la préparation de ce mémoire. Nous souhaitons également remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail. Leurs expériences et leurs conseils précieux nous ont permis de surmonter les nombreux obstacles rencontrés.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur expertise et leur implication ont été essentielles dans notre parcours académique.

Table des matières

| | |
|---|----|
| CHAPITRE I : NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE.... | 3 |
| I. 1) Introduction :..... | 3 |
| I. 2) Les sources et les impacts des mouvements sismiques : | 3 |
| I. 3) Les attributs d'un mouvement sismique..... | 5 |
| I.4) Les caractéristiques et les mécanismes de propagation des ondes sismiques : | 6 |
| I.4.1) Ondes de volume : | 7 |
| I.4.2) Ondes de surface : | 10 |
| I.5) Mesure des ondes sismiques : outils et techniques :..... | 12 |
| I.5.1) Sismographes :..... | 12 |
| I.6) Échelles de mesure de la magnitude sismique : | 14 |
| I.6.1) Echelle de Mercalli: | 14 |
| I.6.2) Echelle De Richter : | 15 |
| I.7) Zonage des aléas sismiques: | 15 |
| I.8) Coefficient d'accélération de zone : | 16 |
| I.8.1) Les coefficients d'accélération de zone selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/v2003) :..... | 17 |
| I.9) Classification des sites :..... | 17 |
| I. 10) L'INTERACTION SOL STRUCTURE:..... | 18 |
| I. 11) Définition de l'interaction sol structure : | 18 |
| I.12) Méthodes d'analyse de l'interaction sol structure: | 19 |
| I.12.1) Méthode globale :..... | 19 |
| I.12.2) Méthode des sous-structures : | 20 |
| I.13) LES COMPOSANTES D'ISS : | 21 |
| I.13.1) Interaction cinématique : | 22 |
| I.13.2) Interaction inertielle : | 22 |
| I.13.3) La fonction d'impédance : | 24 |
| I.13.4) La définition de champs libre :..... | 25 |
| I.14)Conclusion : | 26 |
| CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT | 27 |
| II.1)-Présentation et caractéristiques de l'ouvrage : | 27 |
| II.1.1) Caractéristiques géométriques:..... | 27 |
| II. 2) Caractéristique mécaniques du béton : | 30 |
| II. 2.1) La résistance caractéristique du béton | 30 |
| II.3) Pré dimensionnement de la structure et descente des charges :..... | 32 |

| | |
|--|----|
| II.4) Les planchers : | 32 |
| II.4.1) Plancher à corps creux : | 32 |
| II.4.2) Plancher en dalle pleine : | 33 |
| II. 4.3) Les poutrelles : | 34 |
| II.5) Les poutres : | 35 |
| II. 5.1) Prédimensionnement : | 37 |
| II. 5.1.1) Poutre principale (PP) : | 37 |
| III. 5.1.2) Les poutres secondaires (P.S) : | 38 |
| II. 6) Les poteaux : | 39 |
| II. 6.1) Choix du poteau le plus sollicité : | 39 |
| II. 7) Les voiles : | 42 |
| II. 8) Les escaliers : | 43 |
| II. 9) Acrotère : | 46 |
| II. 10) Evaluation des charges : | 47 |
| II. 10.1) Descente des charges : | 47 |
| II. 10.2) Planchers étage courant : | 47 |
| III. 10.3) Plancher terrasse inaccessible : | 48 |
| III. 10.4) Dalle pleine : | 49 |
| II. 10.5) Balcon : | 50 |
| II.10.6) Acrotère : | 51 |
| II. 10.7) Murs extérieur : | 51 |
| II. 10.8) Les escaliers: | 52 |
| II. 11) Les fondations : | 53 |
| II. 11.1) Fondations superficielles : | 54 |
| II. 11.2) Conception et dimensionnement : | 54 |
| II. 11.2.1) Les semelles isolées : | 55 |
| II. 11.2.2) semelle isolé pour poteaux de rive: | 56 |
| II. 11.2.3) semelle isolé pour poteaux de centre : | 59 |
| II. 11.2.4) semelle isolé pour poteaux de coin : | 61 |
| II. 11.2.5) Les semelles filante : | 61 |
| II. 12) Conclusion : | 65 |
| III. 1) Introduction : | 67 |
| III.1.1 Hypothèses pour le calcul..... | 67 |
| III.1.2 Modélisation de l'interaction sol-structure : | 68 |
| III.1.2.1) Modélisation du sol par éléments ressorts : | 68 |
| Les ressorts du sol ont été utilisés pour modéliser le comportement du sol en définissant ses réactions élastiques à l'égard des éléments de déplacement statique de la fondation..... | 68 |

| | |
|--|----|
| III.1.2.2) Modélisation par des éléments finis | 72 |
| III.2) Méthode de l'analyse modale spectrale : | 74 |
| III.3) Spectre de réponse selon le RPA 99 (ver 2003) : | 74 |
| III.4) Modélisation de la structure : | 76 |
| III.4.1) Modèle du sol: | 77 |
| III.5) Le résultat obtenu et son interprétation concernant la structure sont présentés : | 79 |
| III.5.1) participation massique : | 79 |
| III.5.2) Les périodes : | 80 |
| III.5.3) Les déplacements : | 82 |
| III.5.4) Effort tranchant à la base (KN) : | 85 |
| III.5.5) Effort normal dans les poteaux (KN) : | 85 |
| III.5.6) Moments fléchissant dans les poteaux : | 87 |
| III.6) Conclusion : | 88 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| TABLEAU I. 1: COEFFICIENT D'ACCELERATION SISMIQUE EN FONCTION DE LA ZONE SISMIQUE | 17 |
|---|----|

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| TABLEAU II. 1: RECAPITULATION DES DIMENSIONS DES POTEAUX. | 41 |
| TABLEAU II. 2: VERIFICATION DES CONDITIONS SUIVANT RPA 99 VERSION 2003..... | 41 |
| TABLEAU II. 3 : RÉSULTATS DES CALCULS POUR LE MOMENT D'INERTIE, LE RAYON DE GIRATION ET L'ÉLANCEMENT..... | 41 |
| TABLEAU II. 4: CHARGE PERMANENTE REVENANT AUX PLANCHERS ETAGE COURANT | 48 |
| TABLEAU II. 5: CHARGE PERMANENTE REVENANT AU PLANCHER TERRASSE INACCESSIBLE..... | 49 |
| TABLEAU II. 6: CHARGE PERMANENTE REVENANT A LA DALLE PLEINE | 50 |
| TABLEAU II. 7 : CHARGE PERMANENTE REVENANT AUX BALCON | 50 |
| TABLEAU II. 8: CHARGE PERMANENTE REVENANT A L'ACROTERE | 51 |
| TABLEAU II. 9: CHARGE PERMANENTE REVENANT AUX MURS EXTERIEURS..... | 52 |
| TABLEAU II. 10: CHARGE PERMANENTE REVENANT A LA PALIER..... | 52 |
| TABLEAU II. 11: CHARGE PERMANENTE REVENANT AU VOLEE..... | 53 |
| TABLEAU II. 12: RECAPITULATIF DES DIMENSIONS DES SEMELLES..... | 64 |

Chapitre III :

| | |
|---|----|
| TABLEAU III. 1: FORMULES DE NEWMARK-ROSENBLUETH DES RAIDEURS STATIQUES D'UNE FONDATION RECTANGULAIRE SURFACIQUE..... | 69 |
| TABLEAU III. 2: LES EQUATIONS DE DELEUZE | 70 |
| TABLEAU III. 3: RAYON DU CERCLE EQUIVALENT D'UNE FONDATION CIRCULAIRE..... | 70 |
| TABLEAU III. 4: LES COEFFICIENTS DE TRANSMITTANCE VERTICALE (FV) DU SOL. | 71 |
| TABLEAU III. 5: LES COEFFICIENTS DE TRANSMITTANCE HORIZONTALE (FH) DU SOL. | 71 |
| TABLEAU III. 6: LES COEFFICIENTS DE TRANSMITTANCE EN ROTATION (FR) DU SOL. | 72 |
| TABLEAU III. 7 PERIODES CARACTERISTIQUES DES SITES..... | 75 |
| TABLEAU III. 8: RIGIDITE DE RESSORTS DU SOL. | 78 |
| TABLEAU III. 9: 9 LES PERIODES CARACTERISTIQUES DES SITES | 80 |
| TABLEAU III. 10: DEPLACEMENTS MAXIMAUX DES POTEAUX CENTRAUX DANS LES DIRECTIONS X ET Y. | 83 |
| TABLEAU III. 11: EFFORTS TRANCHANTS A LA BASE DE LA STRUCTURE..... | 85 |
| TABLEAU III. 12: EFFORTS NORMAUX DANS LES POTEAUX SANS ET AVEC ISS. | 85 |
| TABLEAU III. 13: LES MOMENTS FLECHISSANTS DANS LES POTEAUX AVEC ET SANS INTERACTION SOL- STRUCTURE (ISS)" | 87 |

LISTE DES FIGURE

CHAPITRE I :

| | |
|---|----------|
| FIGURE I. 1: L'ORIGINE ET LES CONSEQUENCES DU TREMBLEMENT DE TERRE..... | 5 |
| FIGURE I. 2: DEFORMATIONS ELASTIQUES DES MILIEUX LORS DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE P | 9 |
| FIGURE I. 3 LES DEPLACEMENTS TRANSVERSAUX DES PARTICULES LORS DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE S. 10 | |
| FIGURE I. 4: SIMULATION EXPERIMENTALE DE L'ONDE DE CISAILLEMENT (S) AVEC UNE CORDE TENDUE..... | 10 |
| FIGURE I. 5 :ONDES DE SURFACE"LOVE "ET "RAYLEIGH..... | 12 |
| FIGURE I. 6: MECANISME DE DETECTION SISMIQUE | 14 |
| FIGURE I. 7: CARTE DE ZONAGE PARASISMIQUE EN ALGERIE | 16 |
| FIGURE I. 8 ILLUSTRATION SCHEMATIQUE D'UNE ANALYSE DIRECTE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE A L'AIDE DE LA MODELISATION DU CONTINUUM PAR ELEMENTS FINIS, FROMNIST GCR 12-917-21..... | 20 |
| FIGURE I. 9: SCHEMATIQUE MONTRANT LES ETAPES CLES DE L'APPROCHE SOUS-STRUCTURE. D'APRES KRAMER ET STEWART..... | 21 |
| FIGURE I. 10: DECOMPOSITION DU PROBLEME DE L'ISS | 24 |
| FIGURE I. 1111 : ÉQUATION DE GAZETAS ET STOKOE POUR LE CALCUL DES RIGIDITES DU SOL POUR UNE FONDATION RECTANGULAIRE SITUEE A LA SURFACE | 25 |

CHAPITRE II :

| | |
|--|----|
| FIGURE II. 1 PLAN D'ARCHITECTURE REPRESENTE LES DIMENSIONS DE NOTRE STRUCTURE..... | 28 |
| FIGURE II. 2: PLANCHER A CORPS CREUX..... | 33 |
| FIGURE II. 3: COMPOSITIONS D'UNE DALLE PLEINE..... | 34 |
| FIGURE II. 4: SCHEMA DES POUTRELLES. | 35 |
| FIGURE II. 5 : DE COUPES VOILES EN PLAN..... | 42 |
| FIGURE II. 6 :SCHÉMA D'ESCALIER. | 44 |
| FIGURE II. 7:SHÉMA D'ACROTÈRE..... | 46 |
| FIGURE II. 8: COUPE TRANSVERSALE DES PLANCHERS ETAGE COURANT | 47 |
| FIGURE II. 9 : COUPE TRANSVERSALE DU PLANCHER TERRASSE..... | 48 |
| FIGURE II. 10 :COUPE TRANSVERSALE DES DALLES PLEINE | 49 |
| FIGURE II. 11: FERRAILLAGE DE SEMELLE FILANT | 62 |

CHAPITRE III :

| | |
|---|----|
| FIGURE III. 1: MODELE AVEC PRISE EN COMPTE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE..... | 68 |
| FIGURE III. 2: ABAQUE DONNANT LES COEFFICIENTS DE NEWMARK..... | 70 |
| FIGURE III. 3: MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS..... | 73 |
| FIGURE III. 4: SPECTRE DE REPONSE POUR UN SITE TRES MEUBLE | 76 |
| FIGURE III. 5: REPRESENTATION 3D D'UNE STRUCTURE PARFAITEMENT FIXEE | 77 |
| FIGURE III. 6: REPRESENTATION 3D D'UNE STRUCTURE AVEC DES RESSORTS A LA BASE..... | 77 |
| FIGURE III. 7: PARTICIPATION MASSIQUE SANS ISS. | 79 |
| FIGURE III. 8: PARTICIPATION MASSIQUE AVEC ISS | 80 |
| FIGURE III. 9: UN GRAPHE COMPARANT LES PERIODES AVEC ET SANS INTERACTION SOL-STRUCTURE (ISS) DANS LES 12 MODES..... | 82 |
| FIGURE III. 10: UN GRAPHE COMPARANT LES DEPLACEMENTS AVEC ET SANS INTERACTION SOL-STRUCTURE (ISS) SELON LE SENS X..... | 83 |
| FIGURE III. 11: UN GRAPHE COMPARANT LES DEPLACEMENTS AVEC ET SANS INTERACTION SOL-STRUCTURE (ISS) SELON LE SENS Y..... | 84 |
| FIGURE III. 12: EFFORTS NORMAUX DANS LES POTEAUX SANS ET AVEC ISS..... | 86 |
| FIGURE III. 13: MOMENTS MAXIMUM DES POTEAUX SANS ET AVEC INTERACTION SOL-STRUCTURE (ISS). | 88 |

TABLE DES NOTATIONS

A : Aire de la fondation superficielle.

As: surface de ferailage

a : Dimension parallèle du poteaux à la direction du séisme

A' : Coefficient d'accélération de zone.

b : Dimension perpendiculaire du poteaux à la direction du séisme

b_p : La largeur de la poutre

b₀ : la largeur de la nervure inférieure

b_t : la largeur de la table de compression

b₁ : la largeur de chaque nervure supérieure

Br: Section réduite

C: Matrice amortisseur

E: Module de Young

E_{ij} : module de déformation longitudinal instantanée

E_v : module de déformation longitudinale différée

f : fréquence du mode de vibration fondamental dans la direction de séisme considéré

f_c: la résistance a la comparaison du beton

Fe : limite élastique.

f_t : la résistance a la traction du beton

f_v : Transmittance verticale

f_h : Transmittance horizontale

f_r : Transmittance en rotation

G : la charge permanente

g : le giron

G_s : Module de cisaillement dynamique du sol [N/m²].

H: la hauteur de plancher

h_c: hauteur de dalle ou corps creux

h_{cn} : hauteur du contre marche.

h_p: La hauteur de la poutre

I_y : Moment d'inertie

I_x : Moment d'inertie

i_x: Rayon de giration

i_y : Rayon de giration

j : jours

K: Matrice de raideur du système ; représente la matrice d'impédance de la fondation rigide.

K_h: Raideur horizontal.

K_v : Raideur vertical.

K_φ : Raideur de basculement.

K_θ: Raideur de rotation

L : longueur

L_e : la distance horizontale totale de l'escalier.

L₀ : la portée de la poutrelle

L_p : la longueur totale de la poutrelle

L_{max} : désigne la distance entre l'axe de deux poteaux

L_f: Élanement

M : Matrices de masse

N_e : nombre d'étage.

N_s : La charge appliquée sur le poteau le plus chargé.

P: effort normal

Q : charge répartie, Facteur de qualité

Q : Facteur de qualité.

R: Le coefficient de comportement, Rayon de la fondation circulaire

R0 : Rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire

S : surface

S_a: Accélération spectrale associée au mode de vibration de période T du bâtiment.

T : Période

T₁, T₂: Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

U : Déplacement.

U̇ : Vitesse.

Ü : Accélération.

Ü_g : La direction de sollicitation.

v : Coefficient de poisson.

V_s: Vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

ζ: Pourcentage d'amortissement critique.

β_z, β_{x,y}, β_φ : Donnés par des abaques

η: Correction d'amortissement

(.) : La dérivée par rapport au temps

ρ : Masse volumique du sol.

ω : Pulsation

[K] : La matrice d'impédance

σ_{sol} : La contraint admissible de sol.

Abréviations

CBA93 : Cahier CBA93 (REGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES STRUCTURES EN BETON ARME)

NEHRP: National Earthquake Hazards Reduction Program

RPA 99: Code parasismique algérien

ISS: Interaction-sol-structure

IC : Interaction cinématique

II : Interaction inertielle

SRX: Spectre de réponse selon x

SRY: Spectre de réponse selon y

الخلاصة

تتأثر استجابة الهياكل المبنية للزلازل بعوامل مختلفة ، مثل طبيعة حركة التربة والخواص الميكانيكية والفيزيائية للهيكل والتربة . هناك تفاعل بين الهيكل والبيئة الخارجية . أكثر الطرق المتطرفة لمعالجة مشكلة تفاعل التربة والهيكل هو اعتبار الهيكل مدمجًا تمامًا في التربة ؛ وهذا الافتراض صحيح عندما تظهر التربة والأساس تشوهات ضئيلة مقارنة بالهيكل ، على سبيل المثال في حالة وجود مبنى صلب على تربة صخرية .

يتم دراسة تأثير تفاعل التربة والهيكل على المباني المسلحة بالخرسانة . يظهر تحليل الاستجابة الزلزالية للهياكل ، بما في ذلك التشوه والعزم وتطور القوى القصية في قاعدة الهياكل ، مع وبدون تفاعل ، أهمية أخذ هذه الظاهرة في الاعتبار أثناء مرحلة تصميم المشروع

كلمات مفتاحية: تفاعل التربة والهيكل ، الزلازل ، طيف الاستجابة

RESUME

L'interaction entre les structures des bâtiments et le sol influence la réponse sismique. Les propriétés mécaniques et physiques de la structure et du sol, ainsi que le type de mouvement du sol, sont des facteurs déterminants. Dans certains cas, il est possible de considérer la structure comme étant solidement ancrée dans le sol, ce qui est applicable lorsque le sol et les fondations sont peu déformables par rapport à la structure, par exemple dans le cas d'un bâtiment rigide construit sur un sol rocheux.

Cette interaction sol-structure est étudiée plus particulièrement pour les bâtiments en béton armé. L'analyse de la réponse sismique, en prenant en compte ou non l'interaction, permet d'évaluer les déplacements, les moments et l'évolution des efforts tranchants à la base des structures. Il devient évident de considérer ce phénomène dès la conception du projet, en accord avec les réglementations en vigueur, pour sol meuble.

Mots-clés : Interaction sol-structure, séisme, spectres de réponse.

ABSTRACT

The seismic response of building structures is influenced by various factors, such as the nature of ground motion and the mechanical and physical properties of both the structure and the soil. There exists an interaction between the structure and the external environment. The most extreme approach to address the soil-structure interaction problem is to consider the structure fully embedded in the soil; this assumption holds true when the soil and foundation exhibit minimal deformation compared to the structure, for example, in the case of a rigid building on rocky soil.

The influence of soil-structure interaction on reinforced concrete buildings is being studied. Analyzing the seismic response of structures, including displacement, moment, and the development of shear forces at the base of the structures, with and without interaction, demonstrates the importance of considering this phenomenon during the project design stage, for soft soil, as recommended by the prevailing regulations.

Keywords: Soil-structure interaction, earthquake, response spectra.

INTRODUCTION GENERALE

L'interaction sol-structure est un domaine de la mécanique appliquée qui se penche sur les méthodes théoriques et pratiques visant à étudier comment les structures réagissent aux charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol sur lequel elles sont construites. Jusqu'au tremblement de terre de 1971 à San Fernando et au début de la construction nucléaire en Californie, les ingénieurs civils n'avaient pas vraiment pris en compte les effets de l'interaction sol-structure (ISS). Cependant, les tremblements de terre dévastateurs dans différentes parties du monde ont posé un sérieux problème aux ingénieurs civils. Ils se sont rendu compte qu'ils devaient prendre en compte l'ISS pour comprendre comment les structures se comportent pendant un séisme.

Dans le domaine de la géotechnique, l'interaction sol-structure (ISS) se manifeste lorsque les ondes sismiques se propagent à travers le système formé par le sol et la structure. Ce phénomène complexe englobe divers processus, tels que la dispersion des ondes incidentes par la fondation, la transmission de ces ondes à la structure, la conversion de l'énergie vibratoire de la structure en vibrations du sol, ainsi que l'influence de l'ISS sur la réponse globale du système. Les caractéristiques de la réponse du système dépendent essentiellement de la rigidité relative du sol et de la structure,

Les règles RPA99 (Règles de Construction Parasismique) utilisent une classification en quatre catégories pour les sites, basée sur les propriétés des sols qui les composent. Chaque catégorie de sol est associée à un spectre de réponse élastique spécifique, calculé en prenant en compte les caractéristiques du site et de la structure étudiée. Cette approche permet d'établir un spectre de réponse adapté à chaque type de sol

Problématique et objectif

La réponse des structures est influencée par plusieurs facteurs, notamment la nature du mouvement du sol, les propriétés dynamiques de la structure elle-même, ainsi que les caractéristiques du sol environnant. Il existe donc une interaction entre la structure et le milieu extérieur. Pour éliminer complètement les effets de cette interaction sol-structure, une approche radicale consiste à considérer que la structure est parfaitement encadrée dans le sol. Cette hypothèse est particulièrement valable lorsque le sol de fondation est peu déformable par rapport à la structure, comme dans le cas d'un bâtiment rigide construit sur un sol rocheux

Cependant, le problème d'interaction se pose de manière plus significative lorsque des bâtiments massifs sont construits sur des sols meubles. Dans ces cas, le sol joue un rôle non négligeable et modifie la réponse de la structure. Les déformations du sol peuvent avoir un impact important sur le comportement global de la structure.

La raison principale de cette étude est d'estimer la réponse sismique de notre structure (R+6 avec des voiles) en tenant compte de l'interaction sol-structure. Ainsi, nous pourrions comparer les résultats (périodes, déplacements, moments, évolution de l'effort tranchant à la base de notre structure étudiée) avec le cas d'une base rigide afin de déceler les différences.

Le sol sera modélisé à l'aide de ressorts dans le logiciel SAP2000, et les caractéristiques du sol seront obtenues à partir des recommandations du code RPA99.

Méthodologie

- Le premier chapitre aborde la sismologie, les caractéristiques et les propriétés des séismes, le zonage du risque sismique, ainsi que la classification des séismes basée sur le code RPA99
- Dans le deuxième chapitre, nous aborderons l'interaction sol-structure. Nous discuterons des différentes approches d'analyse de l'interaction sol-structure ainsi que des composantes de cette interaction.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons notre structure en pré-dimensionnant ses éléments. Nous calculerons les charges appliquées sur la structure et déterminerons les dimensions de notre fondation
- Dans le quatrième chapitre, nous modéliserons notre structure dans le logiciel SAP2000 en considérant à la fois les scénarios avec interaction sol-structure (ISS) et sans ISS. Nous passerons en revue les résultats obtenus, tels que les périodes, les déplacements, les efforts et les moments, et nous les comparerons entre ces deux scénarios
- Enfin, nous conclurons ce mémoire par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats que nous avons obtenus.

CHAPITRE I : NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

I. 1) Introduction :

La sismologie est une discipline clé pour la prévention et la gestion des risques sismiques, ainsi que pour la compréhension de la structure interne de la Terre et de ses processus dynamiques. Elle consiste à détecter et à analyser les vibrations naturelles du sol et les signaux sismiques générés artificiellement, en vue de comprendre comment et pourquoi les séismes se produisent, comment ils se propagent à travers la Terre et comment ils peuvent être mesurés. Les sismologues utilisent des techniques telles que la mesure de la magnitude et de l'intensité sismique, la localisation des hypocentres des séismes, la détermination des caractéristiques des ondes sismiques et l'analyse des données sismiques historiques pour évaluer les risques sismiques. La sismologie joue également un rôle crucial dans le domaine du génie civil, en particulier dans la conception et la construction de structures résistantes aux tremblements de terre, en utilisant des normes et des codes de construction sismiques spécifiques. En somme, la sismologie est une science essentielle pour comprendre les phénomènes sismiques et minimiser leurs effets sur la vie humaine et les infrastructures.

I. 2) Les sources et les impacts des mouvements sismiques :

Un séisme est un phénomène naturel qui se produit lorsque les plaques tectoniques de la croûte terrestre se déplacent brusquement et libèrent une grande quantité d'énergie sous forme d'ondes sismiques[1]. Les séismes peuvent être causés par plusieurs facteurs, notamment :

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

- **Les mouvements des plaques tectoniques** : lorsque les plaques tectoniques de la croûte terrestre se déplacent les unes par rapport aux autres, cela peut provoquer des séismes. La plupart des séismes se produisent le long des limites des plaques tectoniques, où la tension accumulée est libérée brusquement.

- **Les mouvements du magma** : les séismes peuvent également être causés par les mouvements du magma sous la surface de la Terre, qui peuvent provoquer des tremblements de terre volcaniques.
- **Les activités humaines** : les activités humaines telles que la construction de barrages, l'extraction de pétrole et de gaz, et l'injection de liquides sous pression dans le sol peuvent également déclencher des séismes.

Lorsqu'un séisme se produit, les ondes sismiques se propagent à travers la Terre et peuvent causer des dommages aux bâtiments, aux infrastructures et aux personnes. Les effets d'un séisme dépendent de nombreux facteurs, tels que la magnitude du séisme, la distance par rapport à l'épicentre, la profondeur de l'hypocentre et la nature du sol.

Les principales actions des séismes sont les secousses sismiques, les tsunamis, les glissements de terrain, les effondrements de bâtiments et les fissures de la surface terrestre.

- **Les secousses sismiques** sont les vibrations de la Terre qui se produisent pendant un séisme, et elles peuvent causer des dommages aux bâtiments et aux infrastructures.
- **Les tsunamis** sont des vagues géantes qui peuvent être provoquées par un séisme sous-marin, et qui peuvent causer des dégâts considérables sur les côtes.
- **Les glissements de terrain** peuvent se produire lorsque le sol est instable en raison d'un séisme.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

- **les effondrements de bâtiments** peuvent se produire lorsque les structures ne sont pas conçues pour résister aux secousses sismiques.
- **les fissures de la surface terrestre** peuvent être causées par un séisme, et elles peuvent rendre certaines zones dangereuses pour les personnes et les bâtiments.

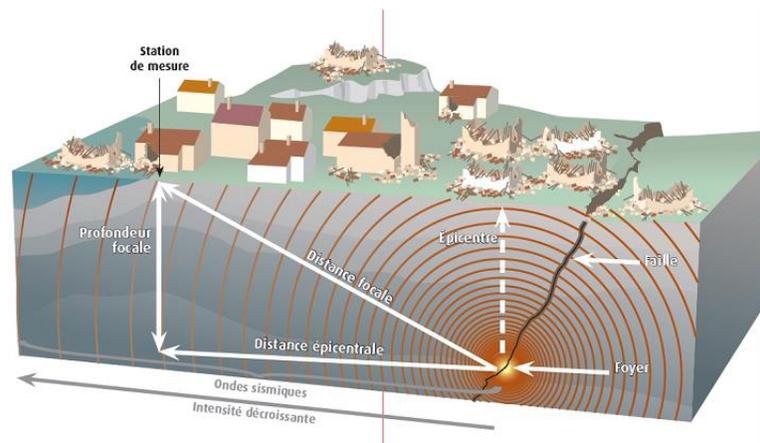


Figure I. 1: L'origine et les conséquences du tremblement de terre

I. 3) Les attributs d'un mouvement sismique :

Un séisme est caractérisé par plusieurs éléments, notamment sa magnitude, son épicentre, sa profondeur, sa durée, sa fréquence et son intensité.

- **La magnitude** : la magnitude est la mesure de l'énergie libérée lors d'un séisme. Elle est mesurée sur l'échelle de Richter, qui va de 0 à plus de 9. Les séismes de magnitude inférieure à 2,5 sont généralement imperceptibles, tandis que les séismes de magnitude

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

supérieure à 7 sont considérés comme majeurs et peuvent causer des dégâts considérables.

- **L'épicentre** : l'épicentre est le point à la surface de la Terre situé directement au-dessus du point d'origine du séisme. C'est l'endroit où les secousses sont les plus fortes.

- **La profondeur** : la profondeur est la distance entre le point d'origine du séisme et la surface de la Terre. Les séismes peu profonds (moins de 70 km de profondeur) ont tendance à causer plus de dégâts que les séismes profonds.
- **La durée** : la durée est le temps pendant lequel les secousses sismiques sont ressenties. Les séismes de courte durée (quelques secondes) peuvent être moins destructeurs que les séismes de longue durée (plusieurs minutes).
- **La fréquence** : la fréquence est le nombre de cycles de secousses sismiques par seconde. Les séismes à haute fréquence peuvent causer plus de dommages aux structures à faible hauteur, tandis que les séismes à basse fréquence peuvent causer des dommages à des structures plus hautes.
- **L'intensité** : l'intensité est la mesure de l'effet du séisme sur les personnes, les bâtiments et les infrastructures. Elle est mesurée sur l'échelle de Mercalli, qui va de I (non ressenti) à XII (dévastateur). L'intensité dépend de plusieurs facteurs, tels que la magnitude, la distance par rapport à l'épicentre, la nature du sol et la construction des bâtiments.

I.4) Les caractéristiques et les mécanismes de propagation des ondes sismiques :

Les ondes sismiques sont des vibrations qui se propagent à travers la Terre après un événement sismique tel qu'un séisme, une explosion ou une éruption volcanique.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Ces vibrations se déplacent à travers la Terre sous forme d'ondes qui transportent de l'énergie. Les ondes sismiques peuvent se propager à travers tous les types de matériaux de la Terre, y compris les solides, les liquides et les gaz, bien que leur vitesse et leur amplitude dépendent des propriétés physiques des matériaux qu'elles traversent.

Les ondes sismiques se propagent dans toutes les directions à partir du foyer du séisme, où la rupture sismique a eu lieu. Les ondes de volume comprennent les ondes P, qui sont des ondes de compression, et les ondes S, qui sont des ondes de cisaillement. Les ondes de surface comprennent les ondes de Love, qui sont des ondes de cisaillement horizontales, et les ondes de

Rayleigh, qui sont des ondes de rotation qui font vibrer le sol verticalement et horizontalement. Les ondes sismiques peuvent causer des dégâts aux structures et aux bâtiments lorsqu'elles atteignent la surface de la Terre.

Enfin, les ondes sismiques sont également utilisées pour détecter et mesurer les séismes, en utilisant des instruments tels que les sismomètres. Les données sismiques sont ensuite utilisées pour cartographier les zones à risque sismique et pour prévoir les séismes futurs.

I.4.1) Ondes de volume :

Ces ondes sont également appelées ondes de corps, car elles se propagent à travers le corps de la Terre plutôt que le long de sa surface. Les ondes de volume comprennent les ondes P et les ondes S, qui sont des ondes élastiques.[2]

- **Ondes primaires ou ondes longitudinales (P) :**

Les ondes P, également connues sous le nom d'ondes primaires ou ondes longitudinales, sont des ondes sismiques qui se propagent dans les milieux solides, liquides et gazeux. Elles se propagent en comprimant et en dilatant le matériau dans la direction de propagation de l'onde.

- **Les ondes P** sont les plus rapides des ondes sismiques et sont les premières à être enregistrées par les instruments sismiques lors d'un tremblement de terre. Leur vitesse

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

de propagation dépend des propriétés élastiques du matériau qu'elles traversent. Dans les roches, elles peuvent se déplacer à une vitesse allant jusqu'à 8 km/s, tandis que dans l'eau, leur vitesse est d'environ 1,5 km/s.

- **Les ondes P** sont capables de se propager à travers le centre de la Terre, car la Terre est un matériau élastique qui peut transmettre ces ondes. Cependant, leur vitesse diminue avec la profondeur, car la pression et la température augmentent.
- **Les ondes P** ont des périodes courtes, de l'ordre de la seconde, et ont une longueur d'onde relativement courte, de l'ordre de quelques kilomètres. Elles peuvent être

réfléchies et réfractées par les interfaces entre les différents matériaux, ce qui leur permet de se propager à travers différentes couches de la Terre.

Une manière courante de modéliser les ondes P est d'utiliser une analogie avec un ressort. Pensez à un ressort que vous tenez dans votre main. Lorsque vous appuyez sur le ressort et le relâchez, vous pouvez voir que les spires du ressort se compriment et se dilatent successivement en se déplaçant vers l'avant et vers l'arrière. Lorsque vous exercez une force sur une extrémité du ressort, elle est transmise rapidement aux spires adjacentes, provoquant ainsi une compression et une dilatation qui se propagent le long du ressort. De manière similaire, les ondes P se propagent dans la Terre en comprimant et en dilatant les particules du matériau par lequel elles se déplacent.

Dans cette analogie, le ressort représente le matériau que traversent les ondes P, et les spires du ressort représentent les particules du matériau qui sont comprimées et dilatées par les ondes P.

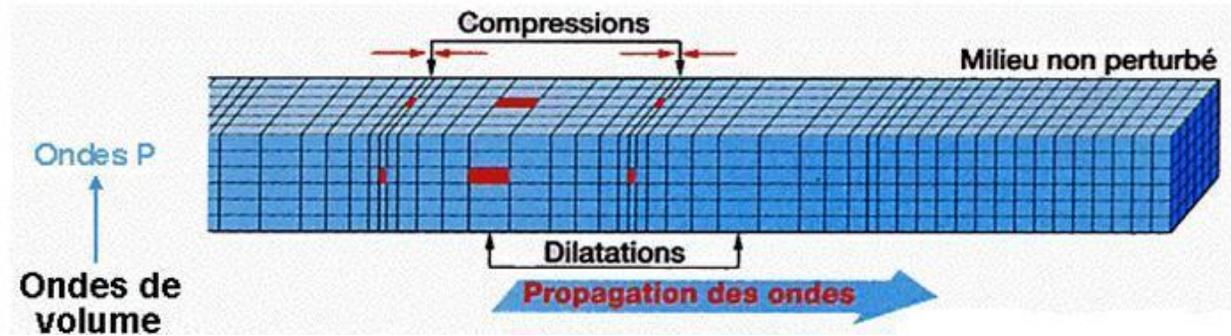


Figure I. 2: déformations élastiques des milieux lors de la propagation d'une onde P

- **Onde secondaire ou ondes de cisaillements (S):**

Les ondes S, également appelées ondes de cisaillement, sont des ondes sismiques qui se propagent uniquement dans les solides. Contrairement aux ondes P, les particules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde, dans un plan transversal. Une analogie courante pour comprendre ce type d'onde est celle d'une corde horizontale tenue à une extrémité et secouée en son milieu. L'onde se propage alors le long de la corde en créant des zones de cisaillement et de relaxation. Les ondes S sont plus lentes que les ondes P, avec une vitesse d'environ 60% de celle des ondes P, mais elles sont également plus destructrices en raison de leur mouvement de cisaillement qui peut provoquer des déformations permanentes dans les solides traversés.

Les ondes S ont une période de l'ordre de la seconde, avec une longueur d'onde d'environ 4 à 6 km. Il est important de noter que les ondes S ne se propagent pas dans les liquides ou les gaz, car ces milieux ne peuvent pas transmettre de forces de cisaillement.

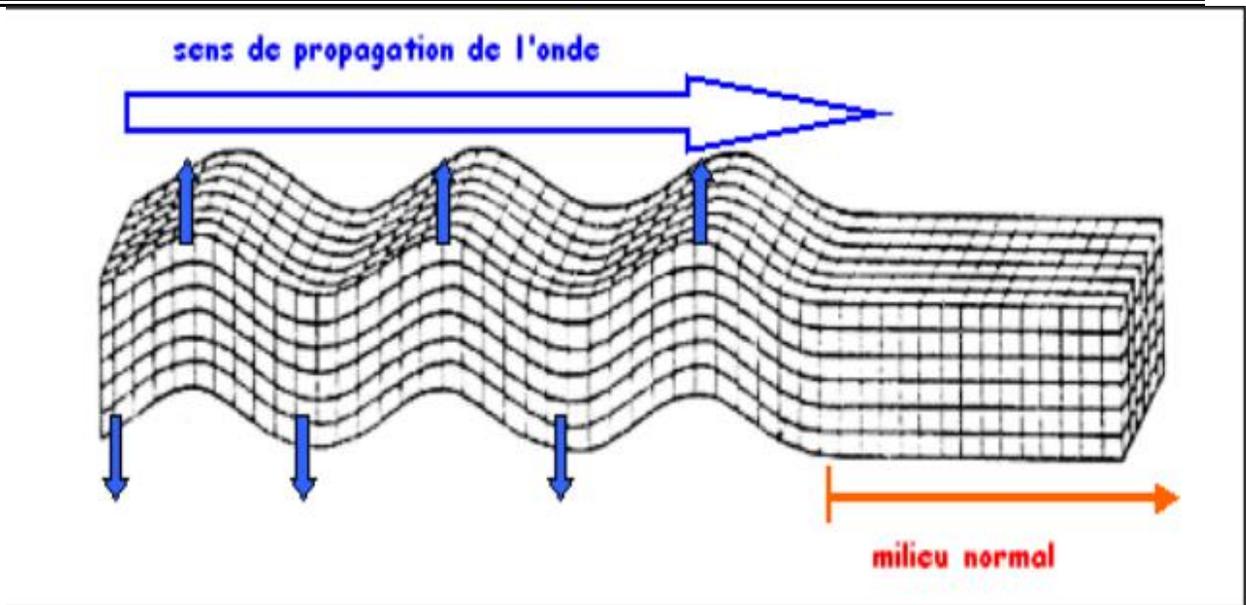


Figure I. 3 Les déplacements transversaux des particules lors de la propagation d'une onde S

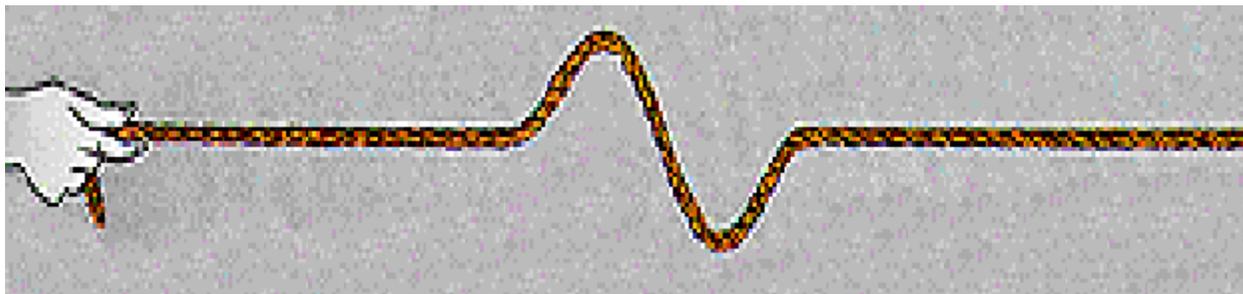


Figure I. 4: Simulation expérimentale de l'onde de cisaillement (S) avec une corde tendue

I.4.2) Ondes de surface :

Les ondes de surface sont des ondes qui se propagent à la surface de la Terre et qui sont générées par l'interaction des ondes P et S avec la surface. Contrairement aux ondes de volume, qui se propagent à travers le sol, les ondes de surface se déplacent le long de la surface. Elles ont une vitesse inférieure à celle des ondes P et S, mais leur amplitude est beaucoup plus grande, ce qui

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

les rend plus destructrices. Les ondes de surface se subdivisent en deux types : les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.

- **Ondes sismiques de love :**

Les ondes sismiques de Love, également appelées ondes L, sont des ondes de surface qui se propagent le long de la surface terrestre. Contrairement aux ondes P et S, les ondes L se déplacent horizontalement avec un mouvement de va-et-vient perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Ce mouvement génère des contraintes de cisaillement dans le sol, ce qui peut causer des dommages importants aux bâtiments et aux infrastructures.

En effet, les ondes de cisaillement (S) et (Love) peuvent causer des dommages plus importants aux constructions que les ondes P en raison de la manière dont elles déforment le sol. Les ondes de cisaillement provoquent des mouvements horizontaux et verticaux du sol, qui peuvent entraîner des effets de balancement, de torsion et de basculement des bâtiments.

- **Ondes sismiques Rayleigh :**

Les ondes de Rayleigh sont des ondes sismiques de surface qui se propagent le long de la surface terrestre. Elles ont été nommées d'après le physicien Lord Rayleigh, qui les a décrites pour la première fois. Les particules du sol se déplacent selon des trajectoires elliptiques dans le plan vertical et dans le sens rétrograde, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des tremblements de terre. Ce mouvement engendre des compressions, des tractions et des cisaillements dans le sol, ce qui peut provoquer des mouvements de sol importants et endommager les constructions. Les ondes de Rayleigh sont souvent les plus destructrices pour les structures en raison de leur longueur d'onde plus grande.[3]

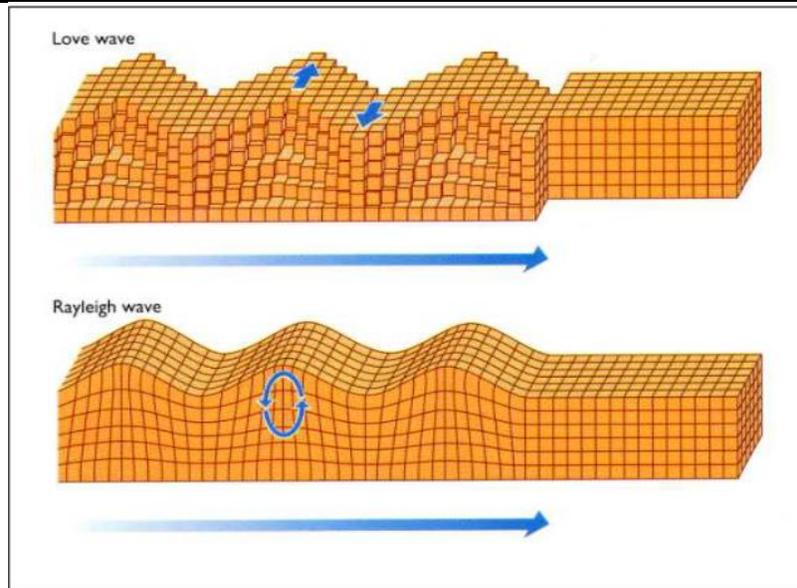


Figure I. 5 : Ondes de surface "Love "et "Rayleigh

I.5) Mesure des ondes sismiques : outils et techniques :

I.5.1) Sismographes :

Les sismographes sont des instruments scientifiques conçus pour enregistrer les mouvements du sol en réponse aux ondes sismiques qui se propagent à travers la Terre lors d'un séisme. Les sismographes se composent généralement d'un détecteur de mouvement, appelé un sismomètre, qui est fixé au sol, et d'un enregistreur de données qui enregistre et stocke les données enregistrées par le sismomètre. Les sismographes sont utilisés pour détecter et enregistrer les tremblements de terre, mais ils peuvent également enregistrer d'autres types de vibrations telles que les explosions, les avalanches, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain, et même les mouvements dus aux activités humaines. Les données collectées par les sismographes sont utilisées par les scientifiques pour étudier les séismes, pour cartographier les zones sismiques, pour évaluer les risques sismiques et pour concevoir des bâtiments et des infrastructures résistantes aux séismes.

Il existe deux types de sismographes couramment utilisés : le sismographe horizontal et le sismographe vertical.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

- **Le sismographe horizontal** est conçu pour enregistrer les mouvements horizontaux du sol pendant un séisme. Il se compose d'un séismomètre horizontal, qui est installé de manière à pouvoir se déplacer librement dans deux directions perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. Les mouvements horizontaux du sol provoquent des mouvements relatifs du sismomètre, qui sont enregistrés par l'enregistreur de données.
- **Le sismographe vertical**, quant à lui, est conçu pour enregistrer les mouvements verticaux du sol pendant un séisme. Il se compose d'un séismomètre vertical, qui est fixé au sol et ne peut se déplacer que dans une seule direction verticale. Les mouvements verticaux du sol provoquent des mouvements relatifs du séismomètre, qui sont enregistrés par l'enregistreur de données.

Il convient également de noter que certains sismographes sont fixes et sont installés dans des endroits spécifiques, tels que les stations sismiques, pour surveiller en permanence l'activité sismique dans une région donnée. Ces sismographes fixes sont souvent utilisés pour cartographier les zones sismiques et pour suivre les tendances d'activité sismique au fil du temps. D'autres sismographes sont portables et peuvent être déplacés sur le terrain pour effectuer des mesures temporaires ou pour répondre à des événements sismiques spécifiques.

Ces sismographes portables sont souvent utilisés pour étudier les séismes dans des régions éloignées ou difficiles d'accès, ou pour effectuer des études spécifiques sur des structures ou des infrastructures potentiellement vulnérables aux séismes.

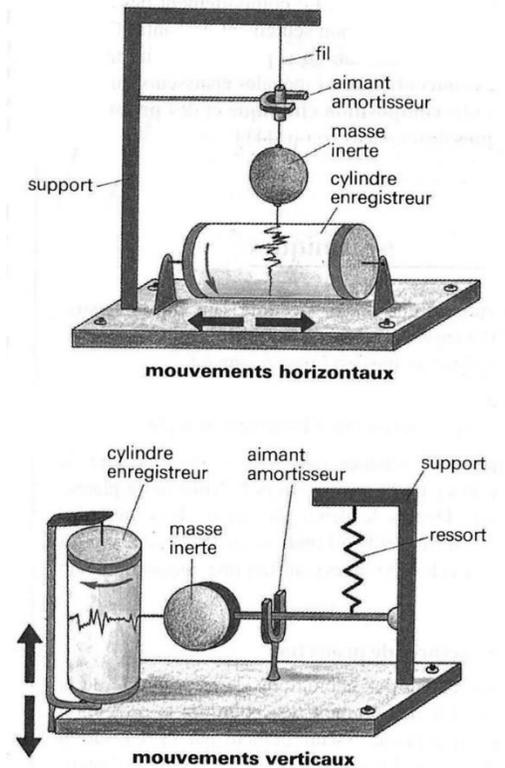


Figure I. 6: Mécanisme de détection sismique

I.6) Échelles de mesure de la magnitude sismique :

Les échelles d'évaluation des séismes sont des systèmes de classification qui permettent de mesurer l'intensité et les effets d'un tremblement de terre. Il existe plusieurs échelles, mais les plus courantes sont les suivantes :

I.6.1) Echelle de Mercalli:

Cette échelle mesure l'intensité du tremblement de terre en fonction de ses effets sur l'environnement et les populations. Elle est basée sur l'observation des dommages causés aux bâtiments, aux routes, aux ponts, aux conduites d'eau et aux autres infrastructures. L'échelle de Mercalli est graduée de I à XII, chaque degré correspondant à des effets de plus en plus importants sur l'environnement et les populations.[4]

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

I.6.2) Echelle De Richter :

Cette échelle mesure la magnitude d'un séisme, c'est-à-dire la quantité d'énergie libérée par le tremblement de terre. Elle est basée sur la mesure de l'amplitude des ondes sismiques enregistrées par les sismographes. L'échelle de Richter est logarithmique, ce qui signifie qu'un séisme de magnitude 7 est dix fois plus puissant qu'un séisme de magnitude 6.

I.7) Zonage des aléas sismiques:

Le zonage du risque sismique, également appelé zonage des aléas sismiques, est une classification qui divise un territoire en différentes zones selon le niveau de risque sismique encouru dans chaque zone. Cette classification prend en compte plusieurs facteurs tels que la sismicité passée de la région, la nature et la composition géologique du sol, ainsi que les caractéristiques de la construction des bâtiments et des infrastructures.

En Algérie, le zonage du risque sismique est basé sur le « Règlement Parasismique Algérien (RPA 99, version 2003) », qui divise le territoire national en cinq zones de sismicité croissante : la Zone 0 avec une sismicité négligeable, la Zone 1 avec une sismicité faible, la Zone 2a et la Zone 2b avec une sismicité moyenne, et la Zone 3 avec une sismicité élevée. L'annexe I de ce règlement donne une classification sismique par wilaya et par commune, lorsque la wilaya est partagée entre deux zones sismiques différentes ou plus.

Ce zonage est utilisé pour réglementer la construction de nouveaux bâtiments et la rénovation de bâtiments existants, en imposant des normes de construction plus strictes dans les zones à risque élevé.

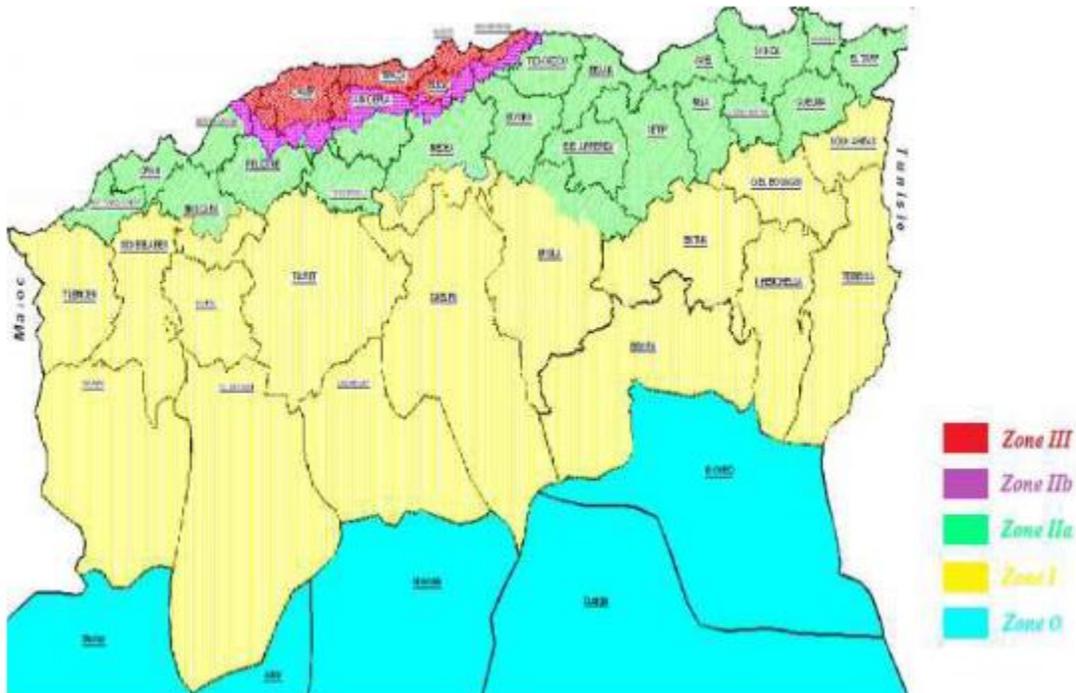


Figure I. 7: carte de zonage parasismique en Algérie

I.8) Coefficient d'accélération de zone :

Le coefficient d'accélération de zone est un paramètre utilisé en génie parasismique pour caractériser le niveau de risque sismique d'une région donnée. Il représente l'accélération maximale que peut subir le sol au niveau de la roche lors d'un séisme. Ce coefficient est fonction de la zone sismique et de la classification des ouvrages selon leur importance.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

I.8.1) Les coefficients d'accélération de zone selon le Règlement Parasismique Algérien (RPA99/v2003) :

En Algérie, le règlement parasismique RPA-version 2003 établit les coefficients d'accélération de zone sismique pour chaque groupe d'usage en fonction des quatre zones de sismicité définies dans ce règlement.

Tableau I. 1: coefficient d'accélération sismique en fonction de la zone sismique

| Groupe d'usage | Zone de sismicité | | | |
|----------------|-------------------|------------|------------|------------|
| | I | IIa | IIb | III |
| 1A | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.40 |
| 1B | 0.12 | 0.2 | 0.25 | 0.30 |
| 2 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| 3 | 0.07 | 0.10 | 0.14 | 0.18 |

I.9) Classification des sites :

La classification des sites sismiques en Algérie est basée sur la vitesse moyenne d'onde de cisaillement (V_s) et la profondeur du sol. Elle divise les sites en quatre catégories :

Catégorie S1 : Cette catégorie comprend les sites rocheux avec une V_s moyenne de 800m/s à une profondeur de 10 mètres. Les sites de cette catégorie offrent une bonne résistance aux vibrations sismiques.

Catégorie S2 : Les sites fermes, qui ont une épaisseur de dépôts de sable et de gravier densément compactés et/ou d'argile consolidée de 10 à 20 mètres d'épaisseur avec une V_s de 400 m/s à

partir de 10 mètres de profondeur. Ces sites sont considérés comme ayant une résistance modérée aux vibrations sismiques.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Catégorie S3 : Les sites meubles, qui comprennent des dépôts épais de sable et de gravier moyennement denses ou d'argile modérément raide avec une V_s de 200 m/s à partir de 10 mètres de profondeur. Ces sites ont une faible résistance aux vibrations sismiques.

Catégorie S4 : Les sites très meubles, qui comprennent des dépôts de sable lâches avec ou sans la présence de couches d'argile molle avec une V_s inférieure à 200 m/s dans les 20 premiers mètres. Les dépôts d'argile molle à moyennement raide avec V_s inférieure à 200 m/s dans les 20 premiers mètres font également partie de cette catégorie. Ces sites ont une très faible résistance aux vibrations sismiques.

I .10) L'INTERACTION SOL STRUCTURE :

Les ingénieurs civils ont tendance à obtenir de plus amples informations sur l'interaction sol-structure entre la structure et le sol environnant parce qu'il est devenu un sujet interdisciplinaire difficile qui couvre de nombreux domaines du génie civil.

L'analyse de l'interaction sol –structure en sismique évalue comment la structure, la fondation et le sol adjacent répondent à un mouvement sismique.

L'effet ISS (Interaction-Sol-Structure) est considéré pour capturer la différence entre la réponse réelle de la structure et la réponse théorique d'une fondation rigide soutenue sur un sol rigide.

I .11) Définition de l'interaction sol structure :

L'interaction sol-structure est le processus dans lequel la réponse du sol influence le mouvement de la structure et la réponse de la structure influence le mouvement du sol (Kramer, 1996).

Si le mouvement à un point quelconque de l'interface sol-structure diffère du mouvement qui se produirait à ce point dans le champ libre si la structure n'était pas présente, il y a interaction sol-structure (Rosenblueth, 1980).

I.12) Méthodes d'analyse de l'interaction sol structure:

I.12.1) Méthode globale :

L'approche d'analyse directe est une méthode utilisée pour analyser le problème d'interaction sol-structure. Dans cette approche, le sol et la structure sont modélisés comme un système unique utilisant des éléments finis. Le sol est modélisé pour s'étendre suffisamment autour et sous le bâtiment pour tenir compte des propriétés du site, tandis que les fondations et les éléments structurels sont représentés par leurs éléments finis correspondants. Cette approche prend en compte l'interaction entre le sol et la structure et considère la déformation des deux comme un système unique. Il est généralement utilisé pour les grands projets critiques tels que les centrales nucléaires, les grands ponts, les tunnels, les stations de métro, les réservoirs et les structures marines, et nécessite une expertise spécialisée et un logiciel puissant.[5]

La méthode directe ou globale résous l'équation de mouvement en une seule étape :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MR\ddot{U}_g$$

Ou:

M, C, K: la masse, l'amortissement et la matrice de rigidité du système respectivement,

R: le vecteur chargement, il indique \ddot{U}_g la direction de sollicitation.

U, \dot{U} , \ddot{U} : les matrices de déplacement, vitesse et accélération.

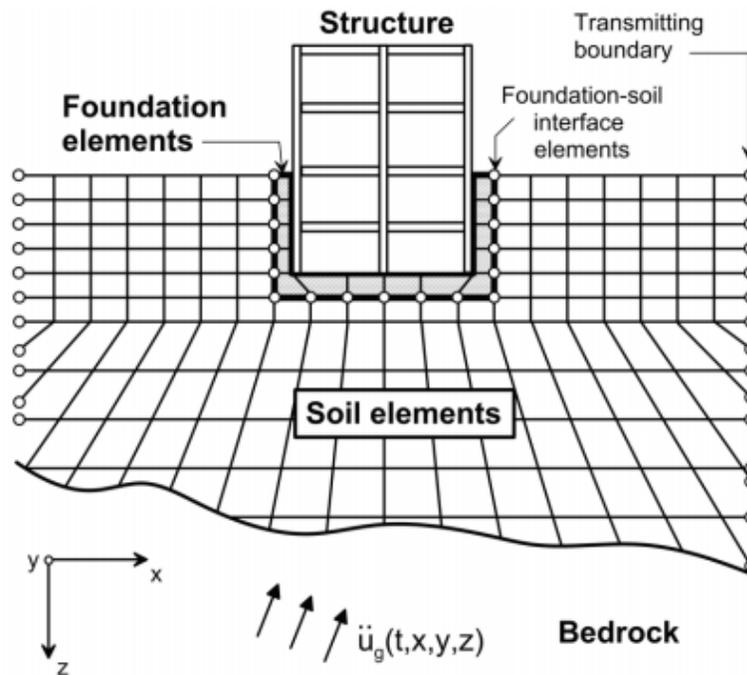


Figure I. 8 Illustration schématique d'une analyse directe de l'interaction sol-structure à l'aide de la modélisation du continuum par éléments finis, From NIST GCR 12-917-21

I.12.2) Méthode des sous-structures :

La structure est une méthode linéaire utilisée pour analyser la réponse d'un système sol-structure. Dans cette approche, le sol est représenté avec des ressorts orientés verticalement pour capturer les rotations des fondations, qui sont souvent la principale source d'effets d'interaction sol-structure (SSI). La fondation est généralement fixée contre la translation horizontale, mais des ressorts horizontaux peuvent également être utilisés pour capturer son déplacement horizontal par rapport au champ libre, et des amortisseurs peuvent être inclus pour tenir compte de l'amortissement de la fondation. Cette approche divise le système en composants plus petits,

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

ou sous-structures, et calcule la réponse de chaque composant indépendamment, avant de combiner les réponses par superposition pour obtenir la réponse globale du système.[5]

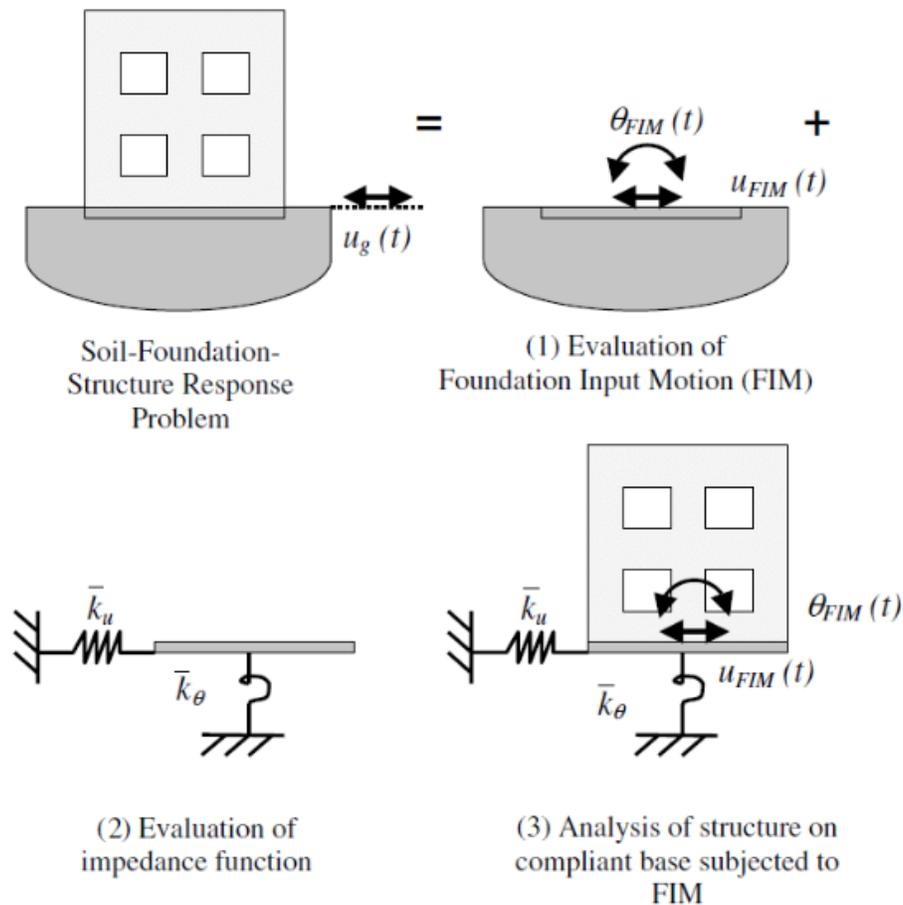


Figure I. 9: Schématique montrant les étapes clés de l'approche sous-structure. D'après Kramer et Stewart

I.13) LES COMPOSANTES D'ISS :

La méthode de la sous-structure est constituée de trois étapes qui sont :

1. L'interaction cinématique.
2. L'interaction inertielle.
3. Les fonctions d'impédance.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Les termes interaction cinématique et inertielle ont été introduits en 1975 par Robert Whitman.

I.13.1) Interaction cinématique :

Si une fondation sur la surface d'un sol, ou encastrée sur elle, est si rigide, qu'elle ne peut pas correspondre à la déformation du champ libre, son mouvement sera influencé par l'interaction cinématique même si la structure n'a pas de masse.

L'interaction cinématique est causée par la différence de rigidité entre les fondations et le sol. la rigidité.

Dans l'analyse de l'interaction cinématique, la masse de la structure est ignorée, mais sa rigidité est incluse et le mouvement de la structure résultant de l'interaction cinématique seule est calculé à chaque point de masse.

L'interaction cinématique introduit la variation des mouvements de terrain en champ libre plus l'interaction avec ces mouvements d'une structure déformable mais en apesanteur.

L'équation de mouvement dans ce cas est:

$$[M_{\text{soil}}]\{\ddot{U}_{\text{KI}}\} + [C]\{\dot{U}_{\text{KI}}\} + [K]\{U_{\text{KI}}\} = -[M_{\text{soil}}]\ddot{U}_{\text{g}}(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ou:

$[M_{\text{soil}}]$: C'est la matrice de masse en supposant que la structure et la fondation sans masse.

I.13.2) Interaction inertielle :

La structure et la fondation ont la masse. À chaque point de masse, l'accélération de la superstructure due à l'interaction cinématique calculée ci-dessus multipliée par la masse pour

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

obtenir une force dynamique, et la réponse structurelle du système sol-fondation-structure complet à cet ensemble de forces est calculée (Fig.II.3).

De plus, pour une surface ou une fondation encastrée, l'analyse inertielle se fait en deux étapes :

1. Calculer l'impédance dynamique de base (ressorts et amortisseurs) associée à chaque mode de vibration.
2. Déterminer la réponse sismique de la structure et de la fondation supportées sur ces ressorts et amortisseurs, et soumises aux accélérations cinématiques de la base (Fig.2.3c).

$$[M]\{\ddot{U}_{II}\} + [C]\{\dot{U}_{II}\} + [K]\{U_{II}\} = -[M_{structure}]\{\ddot{U}_{KI}(t) + \ddot{U}_g(t)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Ou:

$[M_{structure}]$: C'est la matrice masse en supposant que le sol est sans masse.

Dans l'analyse de l'interaction inertielle, le chargement est appliqué uniquement à la structure; la base du sol est stationnaire.

Les mouvements totaux et les contraintes sont trouvés en ajoutant ceux calculés dans les deux étapes (interaction cinématique et inertielle).

La somme des équations (1) et (2) donne:

$$[M_{soil}]\{\ddot{U}_{KI}\} + [M]\{\ddot{U}_{II}\} + [C]\left(\{\dot{U}_{KI}\} + \{\dot{U}_{II}\}\right) + [K]\left(\{U_{KI}\} + \{U_{II}\}\right) = -\left([M_{soil}] + [M_{structure}]\right)\{\ddot{U}_g\} - [M_{structure}]\{\ddot{U}_{KI}\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Puisque

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

$$\{U_{KI}\} + \{U_{II}\} = \{U\} \quad \text{et} \quad [M_{\text{soil}}] + [M_{\text{structure}}] = [M] ,$$

Equation (3) par analogie avec l'équation de mouvement d'origine:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{U}_g(t)\}$$

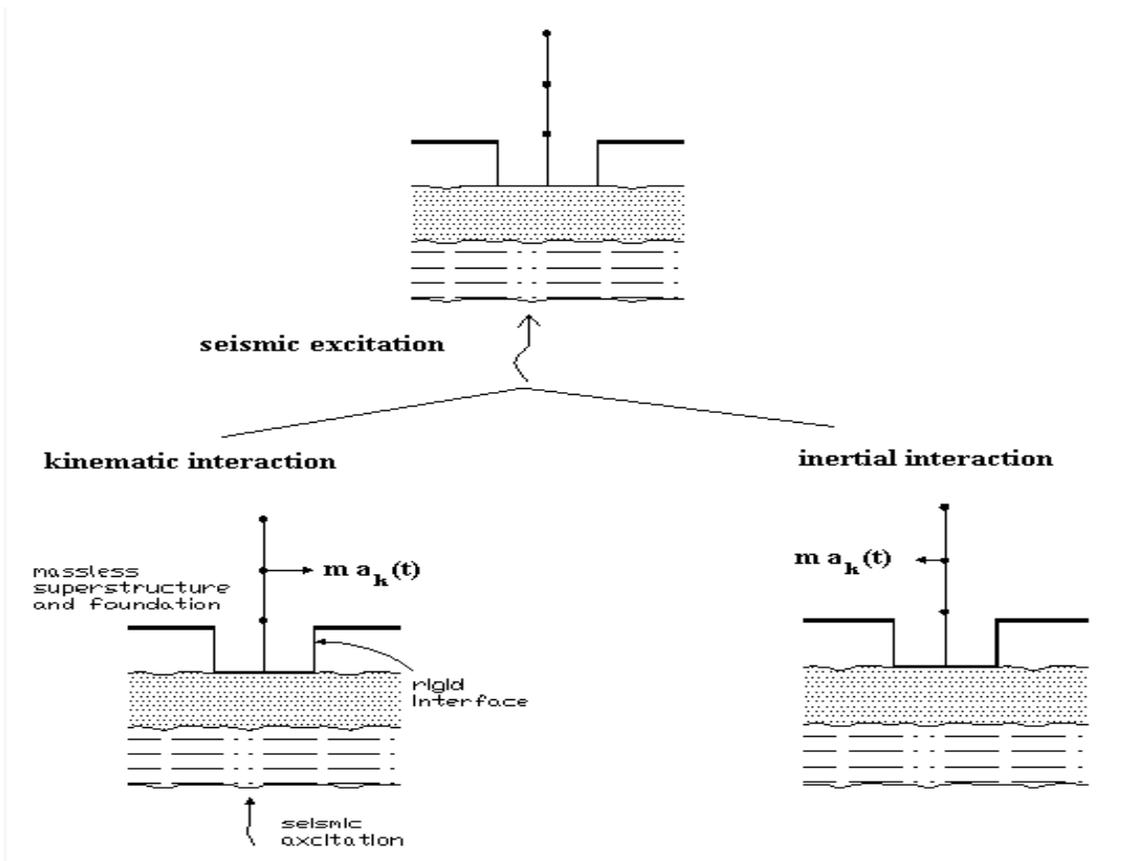


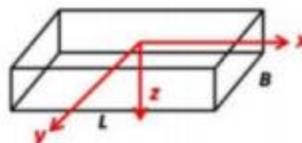
Figure I. 10: Décomposition du problème de l'ISS .

I.13.3) La fonction d'impédance :

La fonction d'impédance décrit la rigidité et l'amortissement du sol lors de l'interaction entre la fondation et le sol. Elle tient compte des dimensions et de la rigidité de la fondation, ainsi que des propriétés du sol telles que sa résistance au cisaillement. La fonction d'impédance peut être représentée par un système de ressorts et d'amortisseurs qui ont été calibrés pour le sol du site.

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Les équations de Gazetas et Stokoe (1991) ont été adoptées dans ATC-40 (1996) (Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings) et sont les plus souvent utilisées dans la pratique.[6]



| Stiffness Parameter | Equation |
|---|--|
| Surface Stiffnesses | |
| Vertical Translation | $K_z' = \frac{GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$ |
| Horizontal Translation (toward long side) | $K_y' = \frac{GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right]$ |
| Horizontal Translation (toward short side) | $K_x' = \frac{GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] + \frac{GL}{0.75-\nu} \left[0.1 \left(1 - \frac{B}{L} \right) \right]$ |
| Rotation about x-axis | $K_{\theta_x}' = \frac{G}{1-\nu} I_x^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left(2.4 + 0.5 \frac{B}{L} \right)$ |
| Rotation about y-axis | $K_{\theta_y}' = \frac{G}{1-\nu} I_y^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$ |

Figure I. 1111 : Équation de Gazetas et Stokoe pour le calcul des rigidités du sol pour une fondation rectangulaire située à la surface

I.13.4) La définition di champs libre :

La réponse en champ libre du site est la variation spatiale et temporelle du mouvement du sol avant de construire la structure qui signifie un sol vierge sans excavation. Le calcul de cette réponse exige que :

CHAPITRE I: NOTION DE BASE SUR LE SÉISME ET L'INTERACTION SOL-STRUCTURE

1. Le mouvement de conception doit être connu à un point précis (« contrôle »), pris à la surface du sol ou à la surface de la roche, ou dans de nombreux cas, il est donné comme spectre de réponse de conception dans la direction horizontale ou verticale.

2. Le type d'ondes sismiques qui produisent le mouvement au point de contrôle doit être connu.

Il existe de nombreux programmes informatiques spéciaux pour calculer les déplacements de surface en champ libre en fonction du mouvement sismique à la base d'un dépôt de sol.

I.14) Conclusion :

Le présent chapitre donne quelques notions de base sur le phénomène de séisme et l'interaction sol-structure. On a défini certains termes sismiques de base et présenté quelques méthodes possibles pour aborder le problème de l'interaction sol-structure

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

II.1)-Présentation et caractéristiques de l'ouvrage :

L'ouvrage à étudier est un bâtiment à usage d'habitation composée d'un rez-de-chaussée plus 6 étages, classée en zone IIa ; de moyenne sismicité, Le groupe d'usage est 2(RPA99 /version 2003).

L'ossature de la structure est composée des portiques auto stables dans les deux directions longitudinales et transversales ; ainsi que des voiles en béton armé.

II.1.1) Caractéristiques géométriques:

Les caractéristiques géométriques sont :

- La hauteur de l'étage est de 3.06m.
- La hauteur totale de bâtiment est de 21.42m.
- La longueur de bâtiment 20.5 m.
- La largeur de bâtiment 8.8 m.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

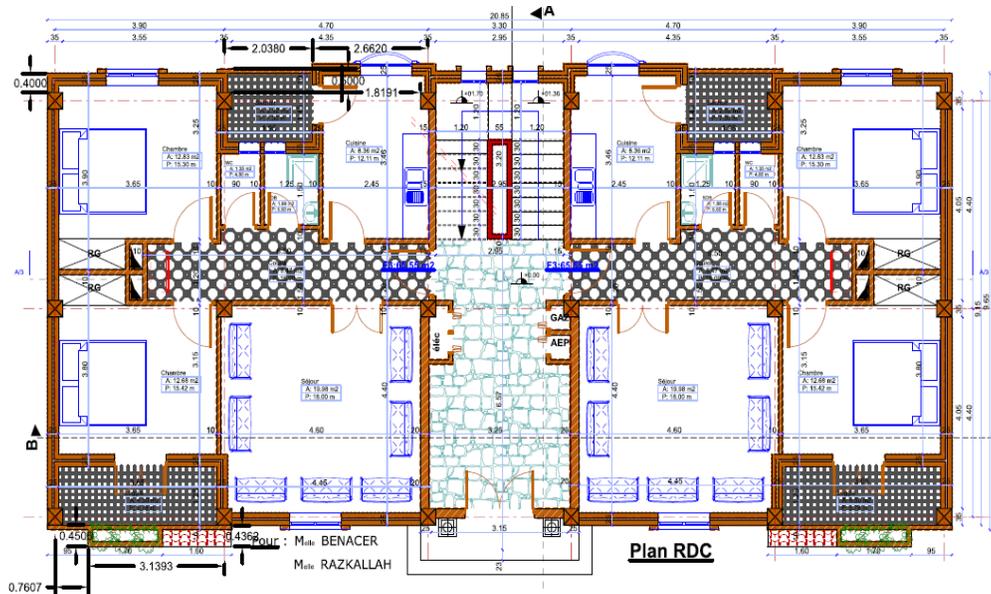


Figure II. 1 Plan d'architecture représente les dimensions de notre structure.

- **Conception :**

- **Ossature :**

La stabilité de l'ouvrage est assurée par le système poteaux poutre. Le contreventement est destiné à reprendre les effets des forces statiques et dynamiques respectivement produites par la charge permanente, d'exploitation et le vent.

- **plancher :**

- Dalle pleine pour les balcons.

- Dalle à corps creux.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

. maçonnerie :

- **Mur extérieur** : est réalisée en double parois. Il s'agit de la brique Briques creusées d'épaisseur 15cm. Entre les deux murettes, une âme d'aire d'épaisseur de 5cm destinée pour l'isolation.

- **Murs intérieurs** : Les cloisons sont exécutées par la brique de 10cm d'épaisseur.

. Isolation :

-Dans le sens vertical, l'isolation, phonique et thermique et acoustique, est assurée par le Coffrage perdu utilisé au niveau des planchers.

. Balcons :

-Sont considérés comme des plaques en béton armé.

. Acrotère :

-Le garde de corps de la terrasse sera réalisé en béton armé.

. Revêtement :

- Etanchéité en ciment pour les faces extérieurs des murs de façades et en plâtre pour les murs intérieurs.

- Carrelage pour les planchers.

- Marche et contre marche en granito pour les escaliers.

- Enduit en plâtre pour le sous plafond.

- Céramique pour les sanitaires.

II. 2) Caractéristique mécaniques du béton :

Pour la réalisation des fondations, Le béton est un matériau compose de : (ciment, sable, gravier et l'eau). Conforme aux normes et définie par la valeur de sa résistance mécanique à la compression à l'âge de 28jours.

Le béton obtenu aura une masse volumique qui de 2500Kg /m³.

II. 2.1) La résistance caractéristique du béton

-Dans le cas courant, le béton est caractérisé du point de vue mécanique par sa résistance caractéristique à la compression à l'âge de 28 jours, notée f_{c28} et choisie à priori compte tenu des possibilités locales et des règles de contrôle qui permettent de vérifier qu'elle est atteinte.

- **Résistance du béton à la compression :**

La résistance caractéristique à la compression du béton à « j » jours notée f_{cj} est donnée par **C.B.A 93:**

$$\begin{cases} \text{pour } f_{c28} \leq 40\text{Mpa} \\ \text{pour } j \leq 28 \text{ jours} \end{cases}$$

- $f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28}$; $f_{cj} = \frac{j}{1,40+0,95j} f_c$ C.B.A 93 [A-2-1-1-1]

- on a: $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

- **Résistance du béton à la traction :**

La résistance caractéristique à la traction du béton à « j » jours notée f_{tj} est donnée par **C.B.A 93:**

- $f_{tj} = 0,6 + 0,06.f_{cj}$ pour $f_{c28} \leq 60\text{MPa}$.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- On a : $f_t = 2,1 \text{ MPa}$
- **Module d'élasticité :**

Le module d'élasticité est défini comme le rapport entre la contrainte appliquée à un matériau et la déformation relative résultante. Cette définition s'applique spécifiquement à la phase élastique du matériau, où il y a une proportionnalité directe entre les contraintes et les déformations.

- **Module de déformation longitudinale du béton E:**

Sous contraintes normales d'une durée d'application $< 24\text{h}$, on admet à défaut de mesure qu'à l'âge de « j » jours le module de déformation instantané du béton est

donné par **C.B.A.93:**

- $E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$
- $E_{i28} = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}} \Rightarrow E_{i28} = 32164,20 \text{ Mpa}$

Sous contraintes normales d'une longue durée $> 24\text{h}$, le module de déformation déferé est donné par **C.B.A.93 :**

- $E_{vj} = \frac{E_{ij}}{3} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}}$
- $E_{v28} = \frac{E_{i28}}{3} = 3700 \sqrt[3]{f_{c28}} \Rightarrow E_{v28} = 10818,87 \text{ Mpa}$

2-Module de déformation transversale :

La valeur du module d'élasticité transversale est donnée par : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

E : Module de Young

ν : Coefficient de poisson

- **Coefficient de poisson C.B.A:**

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

On appelle coefficient de poisson ν le rapport de la déformation transversale relative à la déformation longitudinale relative.

- $\nu = 0.20$: dans le cas d'états limite de services.
- $\nu = 0$: dans le cas d'états limite ultimes.

II.3) Pré dimensionnement de la structure et descente des charges :

Le pré dimensionnement est une étape initiale dans la conception d'un projet de construction ou d'une structure. Cette étape consiste à établir des dimensions et des caractéristiques approximatives de la structure ou du bâtiment en fonction de la destination de celui-ci et des contraintes du site.

II.4) Les planchers :

II.4.1) Plancher à corps creux :

Le plancher à corps creux est un élément porteur de la structure du bâtiment, qui est conçu pour supporter le poids de toutes les charges permanentes et temporaires, telles que les murs, les cloisons, les meubles, les équipements, les personnes, etc. Ce type de plancher est formé de poutrelles en béton armé ou en acier espacées régulièrement, sur lesquelles sont placées des entrevous en béton, en céramique, en polystyrène ou en d'autres matériaux, pour créer un espace creux entre la dalle et le plafond inférieur. Les corps creux permettent de réduire le poids total de la structure tout en fournissant une résistance et une stabilité suffisantes pour supporter les charges imposées sur le plancher. Le vide créé par les corps creux peut également être utilisé pour faire passer des câbles électriques, des conduites de plomberie ou de ventilation, ce qui permet de simplifier l'installation et de réduire les coûts. Son pré dimensionnement se fait par satisfaction de la condition suivante.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

La détermination de l'épaisseur du plancher à corps creux s'appuie sur la condition de la flèche :

$$\frac{L}{25} \leq h \leq \frac{L}{20} \quad (\text{Art B.6.8.4.2 CBA 93}).$$

Avec :

L: La portée maximale entre nus d'appuis dans le sens de la disposition des poutrelles.

H: Hauteur totale du plancher.

$$\frac{440}{25} \leq H \leq \frac{440}{20}$$

$$17 \leq H \leq 21$$

Alors on prend **corps creux (16+5) → h_c = 21cm**

On adopte un plancher d'une épaisseur de h_c=21cm $\left\{ \begin{array}{l} 16\text{cm: l'épaisseur de corps creux} \\ 5\text{cm: dalle de compression} \end{array} \right.$

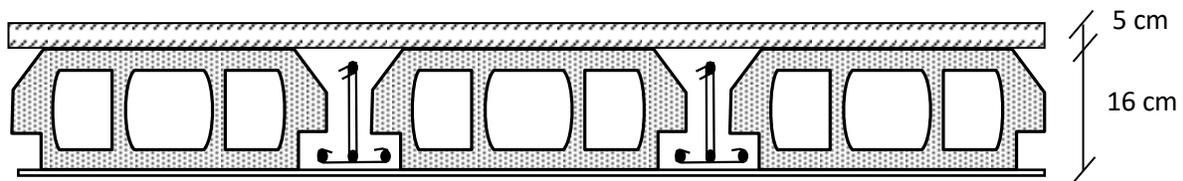


Figure II. 2: Plancher à corps creux

II.4.2) Plancher en dalle pleine :

Un plancher en dalle pleine est un élément de construction qui repose sur des poutres, des poutrelles ou des murs. Il se caractérise par une épaisseur relativement faible par rapport à ses dimensions et travaille essentiellement en flexion. L'épaisseur de la dalle dépend des conditions d'utilisation et des vérifications de résistance, mais elle doit également prendre en compte d'autres critères tels que la résistance au feu et l'isolation phonique. Pour répondre aux normes de sécurité en vigueur en Algérie, la dalle doit avoir une épaisseur minimale de 15 cm pour assurer une résistance au feu suffisante en cas d'incendie. En ce qui concerne l'isolation phonique, il est

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

recommandé que l'épaisseur de la dalle soit d'au moins 13 cm conformément aux règles techniques CBA93. donc notre épaisseur à : 15 cm.

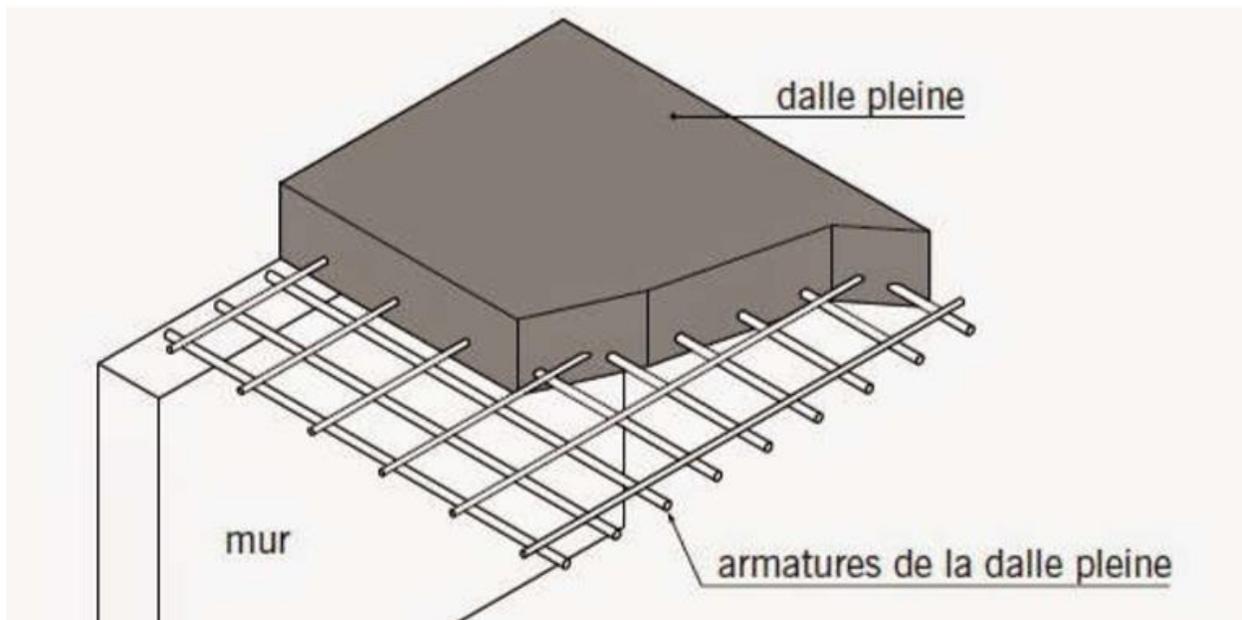


Figure II. 3: Compositions d'une dalle pleine

II. 4.3) Les poutrelles :

Elle est largement utilisée dans la construction de bâtiments pour supporter les charges transversales telles que celles résultant de la flexion ou du cisaillement.

La section transversale en T est caractérisée par une table de compression horizontale sur le dessus de la poutrelle, avec deux ailes verticales qui se projettent vers le bas. La table de compression est conçue pour résister aux charges de compression, tandis que les ailes aident à résister aux charges de flexion et de cisaillement.

La largeur de la table de compression (b_t) est déterminée par la formule $b_t = b_0 + 2b_1$, où b_t est la largeur de la partie supérieure de la poutrelle et b_1 est la largeur de chaque aile de la section en T.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Les valeurs de b_0 et b_1 sont déterminées en fonction des exigences de la structure.

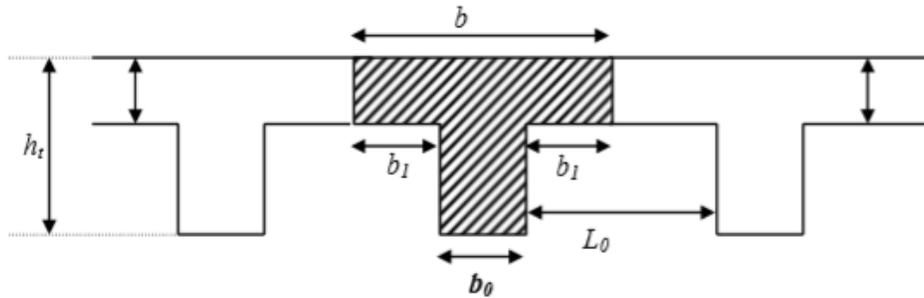


Figure II. 4: Schéma des Poutrelles.

La largeur de la table de compression est égale à :

$$b_t = b_0 + 2b_1$$

- Avec :

$$b_1 = \min \left\{ \frac{L_0}{2}, \frac{L_p}{10} \right\}; \quad b_0 = 10 \text{ cm}; \quad L_0 = 65 - 10 = 55 \text{ cm}$$

$$b_1 = 27.5 \text{ cm}$$

- Soit : $b_t = 65 \text{ cm}$
- b_t : la largeur de la table de compression
- b_0 : la largeur de la nervure inférieure (aussi appelée aile inférieure)
- b_1 : la largeur de chaque nervure supérieure (aussi appelées ailes supérieures)
- L_0 : la portée de la poutre
- L_p : la longueur totale de la poutre

II.5) Les poutres :

Les poutres en béton armé sont des éléments horizontaux couramment utilisés dans les ouvrages de génie civil pour transmettre les charges aux poteaux.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

-Le prédimensionnement des poutres est effectué à l'aide des formules empiriques données par le CBA93 (Cahier des Prescriptions Techniques de Construction en Béton Armé) et ensuite vérifié selon les normes en vigueur, telles que le RPA99 (Règles de Calcul des Ouvrages et des Constructions en Béton Armé), version 2003. L'effort normal est souvent négligé dans la conception des poutres car il est généralement faible par rapport aux moments fléchissants et aux efforts tranchants.

Les critères mentionnés ci-dessus sont des règles de conception pour les poutres en béton armé de section rectangulaire. Pour rappel, ils sont les suivants :

- La hauteur (h_p) de la poutre doit être supérieure ou égale à 30 cm.
- La largeur (b_p) de la poutre doit être supérieure ou égale à 20 cm.
- Le rapport hauteur sur largeur (h_p/b_p) de la poutre doit être inférieur ou égal à 4.
- La largeur maximale ($b_p \text{ max}$) de la poutre doit être inférieure ou égale à 1,5 fois la hauteur ($1,5h$) plus la largeur de la dalle (b_1).

On a deux types de poutres :

- **Les poutres principales :**

Une poutre principale est une poutre qui joue un rôle majeur dans la résistance de la structure d'un bâtiment. Elle est généralement positionnée de manière longitudinale dans le sens de la portée la plus grande et repose sur les murs porteurs ou les poteaux. Les poutres principales sont souvent dimensionnées pour résister aux charges de flexion et de cisaillement important, ainsi qu'aux charges ponctuelles qui peuvent être transmises par les poutres secondaires ou les poteaux. Elles peuvent être en béton armé, en acier, ou dans d'autres matériaux selon les normes et les exigences de sécurité en vigueur.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- **Les poutres secondaires :**

Les poutres secondaires sont des éléments de structure qui complètent les poutres principales pour former le plancher. Elles sont disposées perpendiculairement aux poutres principales et reçoivent les charges transmises par les entrevous ou la dalle de compression. Les poutres secondaires ont généralement des portées plus courtes que les poutres principales et sont dimensionnées en fonction de la charge qu'elles supportent. Les poutres secondaires peuvent également être appelées "poutres de rive" lorsqu'elles sont situées à l'extrémité d'un plancher.

II. 5.1) Prédimensionnement :

D'après les règles de CBA 93 (Code des ponts et chaussées, Bureau d'études et d'essais) est un règlement français en vigueur de 1993 à 2007 qui a établi les règles de conception et de calcul des ouvrages en béton armé, précontraint et en acier pour les ponts et les bâtiments.

$$\frac{L_{max}}{15} \leq h_p \leq \frac{L_{max}}{10}$$

- Avec :
 - L_{max} : désigne la distance entre l'axe de deux poteaux qui correspond à la plus grande portée de la poutre.
 - h_p : hauteur de la poutre.

II. 5.1.1) Poutre principale (PP) :

- On a :
 - ✓ $L_{max} = 4.7\text{m}$
 - ✓ $\frac{470}{15} \leq h_p \leq \frac{470}{10}$
 - ✓ $31.33\text{cm} \leq h_p \leq 47\text{cm}$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

On prend $h_p = 40$ cm

- Pour b:

On prend le b min suivant RPA99 version 2003 donc $b_p = 30$ cm

On prend: $h_p = 40$ cm et $b_p = 30$ cm

• Vérification :

Reprenons les exigences du RPA 99 version 2003 pour une poutre :

Avec $h_p = 40$ cm et $b_p = 30$ cm, nous avons :

$$h_p \geq 30 \text{ cm : vérifié.}$$

$$b_p \geq 20 \text{ cm : vérifié.}$$

$$h_p/b_p \leq 4 : 40/30 = 1.33 \leq 4 : \text{vérifié.}$$

En conclusion, une poutre principale de dimensions 40 cm x 30 cm est conforme aux exigences du RPA99 pour une portée de 4,70 m.

III. 5.1.2) Les poutres secondaires (P.S) :

Les poutres secondaires sont généralement plus petites que les poutres principales car elles supportent des charges moins importantes et ont des portées plus courtes. Elles sont généralement pré-dimensionnées selon la condition de flèche du **CBA93**.

$$L_{\max} = 4.70 \text{ m}$$

$$\text{D'où : } \frac{470}{15} < h_p < \frac{470}{10}$$

$$\text{Donc } 31.33 < h_p < 47$$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

On prend $h_p = 35$ cm

Pour la largeur 'b_p'

Largeur minimale b_p doit être égale ou supérieure à 20 cm, **RPA99 version 2003**

Soit $h_p = 35$ cm et $b = 30$ cm

Reprenons les exigences du **RPA99 V2003** qui sont les suivantes:

Avec $h_p = 35$ cm et $b_p = 30$ cm,

nous avons :

$h_p \geq 30$ cm : **vérifié.**

$b_p \geq 20$ cm : **vérifié.**

$h_p/b_p \leq 4$: $35/30 = 1.167 \leq 4$: **vérifié.**

En conclusion, une poutre secondaire de dimensions 35 cm x 30 cm est conforme aux exigences du **RPA99 version 2003** pour une portée de 4,70 m.

II. 6) Les poteaux :

Les poteaux doivent être dimensionnés pour supporter les charges verticales (permanentes et surcharges) ainsi que les sollicitations horizontales telles que les séismes. Il est important de s'assurer que les poteaux sont suffisamment résistants pour éviter tout risque d'effondrement ou de dommages structurels. Les normes et règles de dimensionnement de la construction, comme le RPA 99 version 2003 et CBA93, établissent des critères de sécurité pour garantir la stabilité des bâtiments.

Notre pré-dimensionnement va s'appliquer sur le poteau qui supporte plus de charges réparties sur une surface

II. 6.1) Choix du poteau le plus sollicité :

$L_x = 4.3$ m $L_y = 4.4$ m

S : surface supportée par le Poteau le plus défavorable.

On suppose une charge **Q=1t/m²**.

NU=Q×S×N_e

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Q : charge répartie 1t/m².

N_e : nombre d'étage.

S : surface supporté.

Poteau RDC :

$$S = 4.3 * 4.4 = 18.92 \text{m}^2$$

$$N_u = 1 * 18.9 * 7 = 132.44 \text{ t}$$

$$N_u = 1.324 \text{MN}$$

Section réduite

$$Br \geq \frac{\beta * Nu}{f_{bc}/0.9 + A_s / Br * F_e / \gamma_s}$$

$$\lambda = 35 \implies \beta = 1 + 0.2(\lambda / 35)^2 = 1.2$$

Pourcentage minimal des armatures est de 0.8% en Zone IIa en peut prendre

A_s / B_r = 1%.

- Fe = 400 MPa.
- f_{bc} = 14,17 MPa
- γ_s = 1.15
- Donc:

$$Br \geq \frac{1.2 * 1.324}{14.17/0.9 + (0.85 * 0.01) * 400/1.15} = 0,084 \text{m}^2$$

$$Br = (a - 0,02)^2 \geq 0,084 \text{m}^2$$

$$a \geq \sqrt{0,084} + 0,02$$

$$a \geq 0,30 \text{m}$$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Pour notre projet, la section du poteau le plus défavorable est choisie tel que :

$$a = b = 45 \times 45 \text{ cm}$$

Tableau II. 1: Récapitulation des dimensions des poteaux.

| Niveau | N _e | Nu (MN) | Br(m ²) | H(m) | a _{choisie} | b _{choisie} |
|-------------------------|----------------|---------|---------------------|------|----------------------|----------------------|
| RDC | 7 | 1.324 | 0,084 | 3.06 | 45 | 45 |
| 1 ^{er} étage | 6 | 1.135 | 0,072 | 3.06 | 40 | 40 |
| 2 ^{eme} étage | 5 | 0.946 | 0,060 | 3.06 | 40 | 40 |
| 3 ^{eme} étage | 4 | 0.756 | 0,048 | 3.06 | 40 | 40 |
| 4 ^{-eme} étage | 3 | 0.567 | 0,036 | 3.06 | 35 | 35 |
| 5 ^{-eme} étage | 2 | 0.378 | 0,024 | 3.06 | 35 | 35 |
| 6 ^{-eme} étage | 1 | 0.189 | 0,012 | 3.06 | 35 | 35 |

Tableau II. 2: Vérification des conditions suivant RPA 99 version 2003

| Condition | Poteau | Obs |
|--------------------------------|----------------------|-----|
| Min (a,b) ≥ 25 | a=35 > 25 | CV |
| Min (a,b) ≥ h _e /20 | a=35 > (306/20)=15.3 | CV |
| 1/4 ≤ a/b ≤ 4 | 0.25 < 1 < 4 | CV |

Tableau II. 3 : résultats des calculs pour le moment d'inertie, le rayon de giration et l'élanement.

| Calcul | Résultat |
|-------------------|---|
| Moment d'inertie | $I_x = I_y = a \cdot b^3 / 12 = 125052 \text{ cm}^4$ |
| Rayon de giration | $i_x = i_y = \sqrt{\frac{I_x}{a \cdot b}} \Rightarrow \sqrt{\frac{125052}{35 \cdot 35}} = 10.10 \text{ cm}$ |
| Élanement | $L_f = 0.7 \cdot L_0 = 0.7 \cdot 3.06 = 2.14 \text{ m}$, |

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

II. 7) Les voiles :

Selon le **RPA99** version 2003, les voiles sont des éléments de contreventement qui permettent de reprendre toutes les charges et surcharges dans une structure contreventée par voiles. Le prédimensionnement des voiles doit être effectué en respectant les règles définies dans le **RPA99**, notamment :

- L'épaisseur minimale des voiles doit être de 15 cm .
- La hauteur minimale (L_{min}) des voiles doit être supérieure à 4 fois l'épaisseur a
- L'épaisseur des voiles doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage et des conditions de rigidité aux extrémités comme indiqué à la figure ci-dessous :

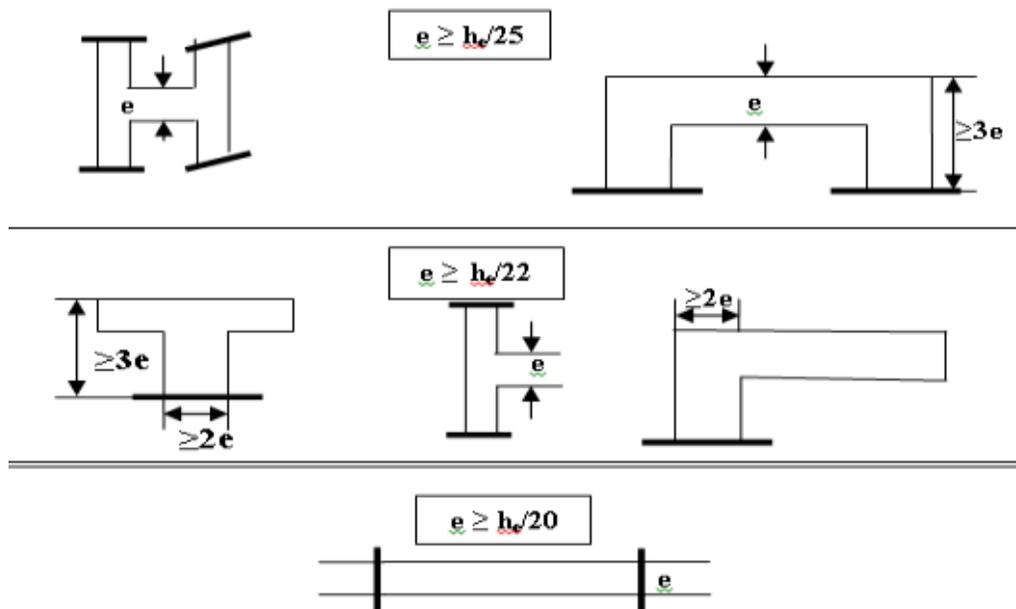


Figure II. 5 : de Coupes voiles en plan

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

la hauteur libre d'étage est de 3,06 mètres :

$$e > H / 22 \rightarrow a \geq 306 / 22 \rightarrow e \geq 13.90 \text{ cm}$$

on a retenu une épaisseur minimale de 20cm, ce qui vérifie la condition d'épaisseur minimale de 15cm.

$e = 15 \text{ cm} \geq 15 \text{ cm}$ **Vérifié.**

II. 8) Les escaliers :

-Un escalier en génie civil est une structure de construction qui permet de faciliter le déplacement vertical des personnes entre différents niveaux d'un bâtiment. Les escaliers peuvent être construits en divers matériaux tels que le béton, l'acier, le bois ou la pierre.

-Il existe différents types d'escaliers en fonction de leur forme et de leur positionnement, tels que l'escalier droit, l'escalier en colimaçon, l'escalier quart-tournant, l'escalier hélicoïdal, l'escalier suspendu, l'escalier flottant, etc.

-La conception d'un escalier en génie civil implique la prise en compte de plusieurs facteurs tels que la hauteur de l'étage, la largeur disponible pour la construction, la capacité de charge, la sécurité des utilisateurs, les normes de construction, etc.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

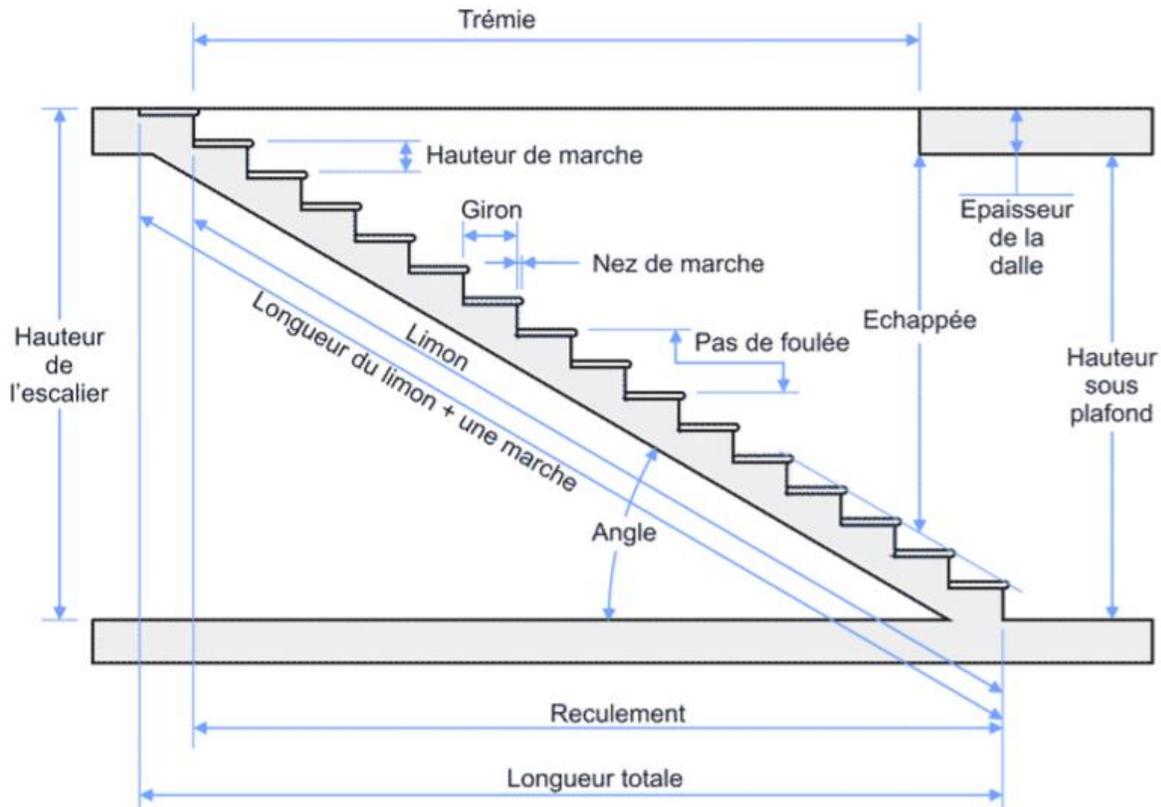


Figure II. 6 :Schéma d'escalier.

les différents éléments constituant un escalier sont :

- H : c'est la hauteur verticale entre le plancher d'un étage et le plancher du niveau supérieur.
- L_e : c'est la distance horizontale totale de l'escalier.
- g : le giron.
- h_{cn} : hauteur du contre marche.

L'escalier de notre projet est de même type : deux volées et un palier intermédiaire.

pour déterminer la profondeur (g) et la hauteur (h_m) des contre marches d'un escalier, on peut utiliser la relation de **Blondel** :

$$59 \leq g + 2h \leq 66$$

- **Nombre de contremarche :**

pour déterminer le nombre de contremarches nécessaires pour un escalier en utilisant les valeurs

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

suivantes :

Hauteur d'étage $H = 3.06$ m

Hauteur de marche $h_m = 17$ cm

Profondeur de marche $g = 30$ cm (comprise entre 25 et 32 cm)

- **nombre total de marches :**

En utilisant la formule $N_m = H/h_m$, nous avons :

$$N_m = 3.06 / 0.17 = 18 \text{ marches}$$

Cela signifie que l'escalier aura 18 marches au total, réparties sur deux volées.

- **nombre de contremarches :**

Comme l'escalier est composé de deux volées, nous devons diviser le nombre total de contremarches par deux pour obtenir le nombre de contremarches par volée.

Le nombre de contremarches par volée est donc :

$$9 \text{ contremarches} = (18 \text{ marches} / 2 \text{ volées})$$

Cela signifie qu'il y aura 9 contremarches pour chaque volée.

- **Nombre de marche :**

$N_m - 1 = 8$ Marches par volée.

- **Longueur de ligne de foulée :**

$$L = (N_m - 1) \times g = 2.4 \text{ m}$$

- **L'inclinaison de la pailasse :**

$$\tan \alpha = \frac{H/2}{L} = \frac{1.53}{2.40} \Rightarrow \alpha = 32.52^\circ$$

- **Longueur de la pailasse :**

$$L_{pa} = \frac{1.53}{\sin \alpha} = 2.84 \text{ m}$$

- **Epaisseur de palier :**

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

$$\frac{L}{20} \leq e \leq \frac{L}{15}$$
$$\Rightarrow \frac{240}{20} \leq e \leq \frac{240}{15}$$
$$\Rightarrow 12 \leq e \leq 16$$

On prend : $e = 15 \text{ cm}$

- **Epaisseur de paliasse :**

On prend : $e = 15 \text{ cm}$

II. 9) Acrotère :

- **Définition:**

L'acrotère est un élément architectural qui se trouve à la bordure d'un toit plat ou d'une terrasse. Il peut être constitué d'un petit mur, d'un parapet ou d'une barrière destinée à empêcher les chutes accidentelles de personnes depuis le toit ou la terrasse.

En plus de sa fonction de sécurité, l'acrotère peut également jouer un rôle important dans l'étanchéité de la toiture ou de la terrasse en empêchant les infiltrations d'eau entre la forme en pente et le plancher terrasse. Cela peut contribuer à la protection du bâtiment contre les dommages causés par l'humidité et les infiltrations d'eau.

$$S = (0,6 \times 0,1) + (0,05 \times 0,1) / 2 + (0,1 \times 0,05) = 0,675 \text{ m}^2$$

$$G = 0,675 \times 2500 = 168,75 \text{ kg/ml}$$

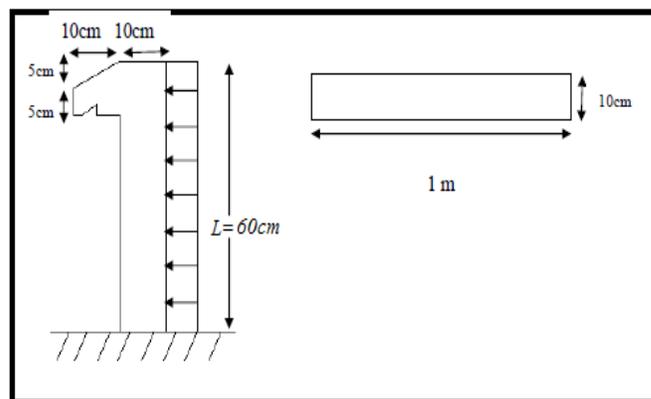


Figure II. 7: Schéma d'acrotère

II. 10) Evaluation des charges :

II. 10.1) Descente des charges :

La descente de charges est un processus important dans la conception et la construction des structures. Cela consiste à calculer et à prévoir les charges qui seront appliquées sur la structure, telles que les charges permanentes (poids propre de la structure) et les charges variables (personnes, meubles, équipements, vents, etc.), afin de garantir que la structure est solide et durable.

Les charges peuvent être transmises aux différentes parties de la structure, notamment aux fondations, aux murs porteurs, aux poutres et aux colonnes, qui doivent être dimensionnées en conséquence. Les ingénieurs calculent les charges en utilisant des normes et des codes de construction, ainsi que des modèles informatiques sophistiqués pour simuler les conditions réelles.

Une fois que les charges ont été calculées, les ingénieurs peuvent déterminer les dimensions et les matériaux appropriés pour chaque élément de la structure.

II. 10.2) Planchers étage courant :

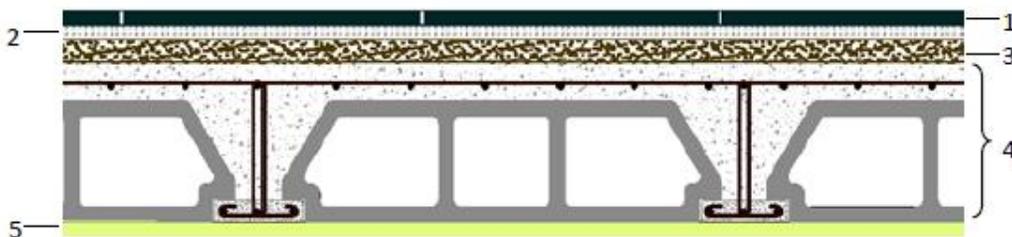


Figure II. 8: Coupe transversale des planchers étage courant

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Tableau II. 4: Charge permanente revenant aux planchers étage courant

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique "γ" (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|--------------------|--|--------------------------------|
| 1 | Revêtement en carrelage | 2 | 22 | 0,44 |
| 2 | Mortier de pose | 2 | 20 | 0,40 |
| 3 | Lit de sable | 2 | 18 | 0,36 |
| 4 | Dalle Corp creux(16+5) | 21 | / | 2.80 |
| 5 | Enduit en plâtre | 1 | 20 | 0,2 |
| 6 | Cloison de separation | 10 | 10 | 1 |
| | | | | $\Sigma = 5.2$ |

III. 10.3) Plancher terrasse inaccessible :

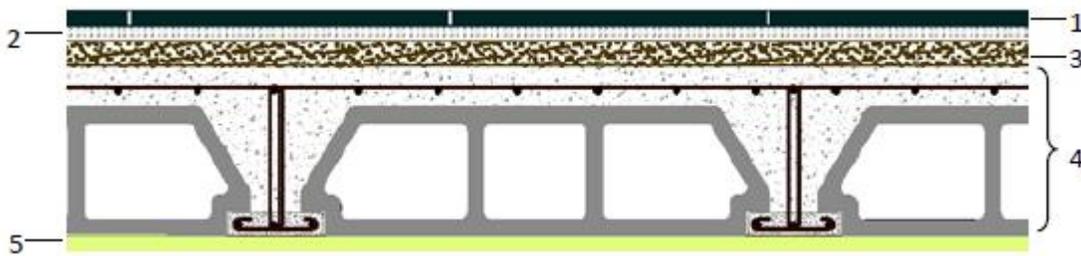


Figure II. 9 : Coupe transversale du plancher terrasse

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Tableau II. 5: Charge permanente revenant au plancher terrasse inaccessible

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique " γ " (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|-----------------------|--|-----------------------------------|
| 1 | Gravillon de protection | 5 | 0.17 | 0.85 |
| 2 | Etanchéité multicouche | 2 | 06 | 0,12 |
| 3 | Isolation thermique | 4 | 04 | 0,16 |
| 4 | Corp creux (16+5) | 21 | / | 3,80 |
| 5 | Enduit de ciment | 1,5 | 18 | 0,27 |
| 6 | Forme de pente | 10 | 22 | 2.2 |
| | | | | $\Sigma = 6.33$ |

- La charge permanente totale est évaluée à : $G = 6.33 \text{KN/m}^2$.
- Il s'agit d'un plancher terrasse, la charge d'exploitation est due au personnel d'entretien
 $\Rightarrow Q = 1,00 \text{KN/m}^2 \dots \dots \dots \text{DTR B.C.2.2.}$

III. 10.4) Dalle pleine :

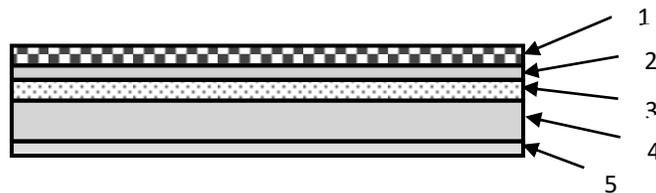


Figure II. 10 : Coupe transversale des dalles pleine

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Tableau II. 6: Charge permanente revenant à la dalle pleine

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique " γ " (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Revêtement en carrelage | 2 | 22 | 0.44 |
| 2 | Mortier de pose | 2 | 20 | 0.40 |
| 3 | Lit de sable | 2 | 18 | 0.36 |
| 4 | Dalle pleine | 15 | 25 | 3,75 |
| 5 | Enduit en plâtre | 2 | 10 | 0.20 |
| 6 | Cloison de separation | 10 | 10 | 1 |
| | | | | $\Sigma = 6.15$ |

- La charge totale est estimée à : $G = 6.15 \text{ KN/m}^2$.
- Il s'agit d'un plancher à usage d'habitation, la charge d'exploitation est :
 $\Rightarrow Q = 3,5 \text{ KN/m}^2 \dots\dots\dots \text{DTR B.C.2.2.}$

II. 10.5) Balcon :

Tableau II. 7 : Charge permanente revenant aux Balcon

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique " γ " (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Revêtement en carrelage | 2 | 22 | 0,44 |
| 2 | Mortier de pose | 2 | 20 | 0,40 |

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

| | | | | |
|---|------------------|----|----|-----------------|
| 3 | Lit de sable | 2 | 18 | 0,36 |
| 4 | Dalle en BA | 15 | 25 | 3,75 |
| 5 | Enduit en plâtre | 1 | 20 | 0,2 |
| | | | | $\Sigma = 5.15$ |

II.10.6) Acrotère :

- Charge vertical:

Tableau II. 8: Charge permanente revenant à l'acrotère

| Hauteur (cm) | Epaisseur (cm) | Surface (m ²) | Poids propre (KN/ml) | Enduit ciment (KN/ml) | G Total (KN/ml) |
|-----------------|-------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| 60 | 10 | 0,069 | 1,725 | 0,16 | 1,885 |

- La charge totale estimée est : $G = 1,885 \text{ KN/ml}$.
- La charge d'exploitation est : $Q = 1,0 \text{ KN/ml}$DTR B.C.2.2.

II. 10.7) Murs extérieur :

- Definition:

Ils jouent un rôle important dans l'isolation thermique et phonique du bâtiment.

- Evaluations des charges

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Tableau II. 9: Charge permanente revenant aux murs extérieurs

| N° des parois | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique " γ " (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|---------------|-------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Enduit ciment extérieur | 1,2 | 18 | 0,21 |
| 2 | Brique creuse de 15 cm | 15 | / | 1,3 |
| 3 | Lame d'air | 5 | / | / |
| 4 | Brique creuse de 10cm | 10 | / | 0,90 |
| 5 | Enduit plâtre intérieur | 0.9 | 10 | 0,09 |
| | | | | $\Sigma = 3,31$ |

- La charge totale est estimée à : $G = 3,31 \text{ KN/m}^2$.

II. 10.8) Les escaliers:

- palier:

Tableau II. 10: Charge permanente revenant à la palier

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique " γ " (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|--------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Revêtement en carrelage | 2 | 22 | 0.44 |
| 2 | Mortier de pose | 2 | 20 | 0.40 |
| 3 | Lit de sable | 2 | 18 | 0.36 |
| 4 | Dalle pleine | 15 | 25 | 3,75 |
| 5 | Enduit en plâtre | 2 | 10 | 0.20 |
| | | | | $\Sigma = 5.15$ |

- Volée:

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Tableau II. 11: Charge permanente revenant au Volée

| N° | Description | Epaisseur "e" (cm) | Poids volumique "γ" (KN/m ³) | Poids "G" (KN/m ²) |
|----|-------------------------|------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | Revêtement en carrelage | Horizontal | 1 | 0.22 |
| | | Vertical | 1 | 0.22 |
| 2 | Mortier de pose | Horizontal | 1 | 0.20 |
| | | Vertical | 1 | 0.20 |
| 3 | Lit de sable | 2 | 18 | 0,36 |
| 4 | Dalle pleine 15 cm | $\frac{15}{\cos 32.5}$ | 25 | 4.44 |
| 5 | Enduit en plâtre | 1 | 20 | 0,2 |
| 6 | Poids des marche | 0.17/2 | 2.2 | 1.87 |
| 7 | Cloison de separation | 10 | 10 | 1 |
| | | | | $\Sigma = 8.71$ |

- La charge permanente revenant au palier est estimée à : $G = 5.15 \text{ KN/m}^2$.
- La charge permanente revenant au Volée est estimée à : $G = 8.71 \text{ KN/m}^2$.
 - Il s'agit d'un escalier à usage d'habitation $Q=2,50 \text{ KN/m}^2$

II. 11) Les fondations :

Les fondations sont des éléments essentiels de tout bâtiment, car elles transfèrent la charge de la structure au sol. Les fondations doivent être conçues et dimensionnées de manière à supporter la charge de la structure sans subir de déformations excessives ou de rupture.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

II. 11.1) Fondations superficielles :

Les fondations superficielles sont utilisées lorsque la charge de la structure est relativement faible et que le sol est suffisamment résistant pour supporter la charge. Les fondations superficielles peuvent être de deux types : les semelles isolées et les semelles filantes. Les semelles isolées sont utilisées pour les charges légères à moyennes, telles que les colonnes, les poteaux et les murs. Les semelles filantes sont utilisées pour les charges plus lourdes, telles que les murs de soutènement.

II. 11.2) Conception et dimensionnement :

La conception et le dimensionnement des fondations dépendent de la charge de la structure, des conditions du sol et du type de fondation choisi. La charge de la structure peut être calculée en fonction des éléments structurels, tels que les colonnes, les poutres et les dalles. Les conditions du sol peuvent être évaluées en fonction des tests géotechniques, tels que les essais de pénétration standard et les essais pressiométriques.

Pour le dimensionnement des fondations superficielles, il est important de déterminer la surface de la semelle qui sera en contact avec le sol. La surface de la semelle peut être calculée

en fonction de la charge de la structure et de la contrainte admissible du sol considérés par le

RPA99/ version 2003

- Pour notre projet en utilisant de type de fondation superficielle :
 - Semelle isolé pour les poteaux.
 - Semelle filante pour les voiles.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

II. 11.2.1) Les semelles isolées :

La semelle isolée est conçue pour répartir la charge de la colonne sur une surface plus large afin de réduire la pression exercée sur le sol. Elle est généralement formée par une base en béton de forme rectangulaire ou carrée, renforcée par des armatures en acier pour assurer sa résistance et sa stabilité. La taille et l'épaisseur de la semelle isolée sont déterminées en fonction des caractéristiques du sol et des charges appliquées.

-En dimensionné, il existe trois types de semelles isolées :

- La semelle isolée pour les poteaux intermédiaire .
- La semelle isolée pour les poteaux de coin.
- La semelle isolée pour les poteaux centraux.

-En utilisant la méthode des rapports égaux :

- À partir de cette loi :

$$\text{pression [Pa]} = \frac{\text{Force [N]}}{\text{Surface [m}^2\text{]}}$$

$$\text{Avec : } \sigma = \frac{Ns}{s} \leq \sigma_{sol} \Rightarrow \begin{cases} s \geq \frac{Ns}{\sigma_{sol}} \\ \frac{A}{B} = \frac{a}{b} \end{cases}$$

Notation:

Ns : La charge appliquée sur le poteau le plus chargé.

σ_{sol} : La contrainte admissible de sol.

S : La surface de semelle.

- On peut écrire : $\sigma_{sol} \geq (Ns / (A \times B)) \dots\dots\dots 01$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- On a:

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b} \Rightarrow A = (a \cdot B) \frac{(a \cdot B)}{b} \dots \dots \dots \mathbf{02}$$

- On remplace 02 dans 01 : $\sigma_{sol} \geq N_s / ((a \times B) / b) \times \mathbf{B}$

$$\rightarrow B \geq \sqrt{S \cdot \frac{b}{a}}$$

$$\rightarrow A \geq \sqrt{S \cdot \frac{a}{b}}$$

II. 11.2.2) semelle isolé pour poteaux de rive:

*On calcule la surface S :

$$S \geq \frac{N_s}{\sigma_{sol}}$$

σ_{sol} : il donne dans le rapport géotechnique de laboratoire.

- On prend $\sigma_{sol} = 0.2 \text{ MN}$
- On détermine le rapport N_s depuis la modélisation on SAP2000 on a trouvé
- $N_s = 672 \text{ KN}$
- Donc:

$$S = \frac{0.672}{0.20} \rightarrow S = 3.36 \text{ m}^2.$$

$$A \geq \sqrt{S \cdot \frac{a}{b}} = \sqrt{3.36 \times \frac{0.45}{0.45}} \rightarrow A \geq 1.83 \text{ m}$$

- On prend $A = 2 \text{ m}$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

$$B \geq \sqrt{S \cdot \frac{b}{a}} = \sqrt{3.36 \times \frac{0.45}{0.45}} = \rightarrow B \geq 1.83 \text{ m}$$

- On prendre $B = 2 \text{ m}$
- **calculer la hauteur H de la semelle :**

$$d \geq \text{SUP} \left(\frac{A-a}{4}; \frac{B-b}{4} \right) \rightarrow d \geq \text{SUP} [0.3875 ; 0.3875]$$

- on prend : $d = 0.4 \text{ m}$ et $H_s = d + 0.05 \rightarrow H_s = 0.45 \text{ m}$
- on a les dimensions des semelles sont $(A * B * H_s)$ $(2 * 2 * 0.45)$.

$$S_{\text{semelle}} = B^2 \times \text{Nombre de poteaux}$$

$$S_{\text{semelle}} = 4 \times 18 = 72 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{bat}} = 180.4 \text{ m}^2$$

$$\frac{S_{\text{semelle}}}{S_{\text{bat}}} = 0.39 < 50\% \quad \text{CV.}$$

- **Vérification des contraintes :**

$$\sigma_{\text{sol}} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} \quad \text{avec } \sigma_{\text{sol}} = \frac{(N_s + \text{poids de semelle})}{S}$$

$$\sigma_{\text{sol}} = \frac{0.672 + (2 \times 2 \times 0.45 \times 0.025)}{2 \times 2} = 0.18 \text{ MN}$$

$$\sigma_{\text{sol}} = 0.18 \text{ MN} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} = 0.20 \text{ MN} \quad \text{C.V}$$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- Détermination des aciers :
- la nappe supérieure $A_s // A$:

ELU :

- On détermine le rapport Nu depuis la modélisation on SAP2000 à l'état limite ultime (1.35G+1.5Q)
- on trouve $Nu = 921 \text{ KN}$ → $Nu = 0.921 \text{ MN}$

$$A_s // A = \frac{Nu(A-a)}{8\sigma_s \cdot d} = \frac{0.921 \times (2-0.45)}{8 \times \left(\frac{400}{1.15}\right) \times 0.40} = 12.85 \text{ cm}^2$$

ELS :

Fissuration préjudiciable :

$$\sigma_{s1} = \min\left(\frac{2}{3} f_e ; ou : 110\sqrt{\eta * Ft28}\right) \text{ Avec } \eta = 1.6 : \text{haute adhérence ;}$$

$$ft28 = 0.6 + 0.06 f_{c28}$$

$$ft28 = 2.1 \text{ MPA ;}$$

$$\sigma_{s1} = \min\left(\frac{2}{3} \times 400 ; ou : 110\sqrt{1.6 \times 2.1}\right) = 201.63 \text{ MPA}$$

$$A_s // A = \frac{Ns.(A-a)}{8.\sigma_{st}.d} = \frac{0.672 \times (2-0.45)}{8 \times 201.63 \times 0.40} = 16.14 \text{ cm}^2$$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Pour la nappe supérieure

- on prendre $A_s//A = 16.14 \text{ cm}^2$

a/- la nappe inférieure $A_s // B$:

ELU :

$$A_s//B = \frac{Nu(B-b)}{8\sigma_s \cdot d} = \frac{0.921 \times (2-0.45)}{8 \times (400/1.15) \times 0.40} = 12.85 \text{ cm}^2$$

ELS :

$$A_s//B = \frac{N_s \cdot (B-b)}{8 \cdot \sigma_{st} \cdot d} = \frac{0.672 \times (0.95-0.45)}{8 \times 201.63 \times 0.40} = 16.14 \text{ cm}^2$$

Pour la nappe inférieure

- on prendre $A_s//B = 16.14 \text{ cm}^2$

Le choix d'armateur : Pour $\begin{cases} A_s//A = 16.14 \text{ cm}^2 \rightarrow 12T14 \\ A_s//B = 16.14 \text{ cm}^2 \rightarrow 12T14 \end{cases}$

II. 11.2.3) semelle isolé pour poteaux de centre :

***On calculer la surface S :**

$$S = \frac{N_s}{\sigma_{sol}}$$

- On déterminer le rapport N_s depuis la modélisation on SAP2000 a l'état limiteservice (G+Q) pour S poteaux centrale .
- En trouver $N_s = 1079 \text{ KN}$ $\rightarrow N_s = 1.079 \text{ MN}$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- Donc : $S = \frac{1.079}{0.2} \rightarrow S = 4.8 \text{ m}^2$

$$A \geq \sqrt{S \cdot \frac{a}{b}} = \sqrt{5.395 \times \frac{0.45}{0.45}} \rightarrow A \geq 2.19 \text{ m}$$

- On prendre $A = 2.2 \text{ m}$

$$B \geq \sqrt{S \cdot \frac{b}{a}} = \sqrt{4.8 \times \frac{0.45}{0.45}} \rightarrow B \geq 2.32 \text{ m}$$

- On prendre $B = 2.2 \text{ m}$

Calculer la hauteur H de la semelle :

$$d \geq \text{SUP} \left(\frac{A-a}{4}; \frac{B-b}{4} \right) \rightarrow d \geq \text{SUP} [0.45 ; 0.45]$$

- on prend : $d = 0.45 \text{ m}$ et $H = d + 0.05 \rightarrow H = 0.50 \text{ m}$
- on a les dimension des semelle sont $(A*B*H) (2.2 \times 2.2 \times 0.50)$

- **Vérification des contraintes :**

$$\sigma_{\text{sol}} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} \quad \text{avec } \sigma_{\text{sol}} = (N_s + \text{poids de la semelle}) / S$$

$$\sigma_{\text{sol}} = [0.9 + (2.2 * 2.2 * 0.60 * 0.025)] / (2.2 * 2.2) = 0.18764 \text{ MN}$$

$$\sigma_{\text{sol}} = 0.19 \text{ MN} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} = 0.20 \text{ MN} \quad \text{C.V}$$

- **Détermination des aciers :**

En suivent la même méthode pour calculé la semelle de intermédiaire

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- $N_u = 1483 \text{ KN}$

- On trouve :

Le choix d'armateur : Pour $\begin{cases} A_s//A = 24.94 \text{ cm}^2 \rightarrow 17\text{T}14 \\ A_s//B = 24.94 \text{ cm}^2 \rightarrow 17\text{T}14 \end{cases}$

II. 11.2.4) semelle isolé pour poteaux de coin :

En suivant les mêmes étapes que pour calculer (poteaux centrale et de rive)

- On trouve :
- $N_s = 348.15 \text{ Kn}$
- $N_u = 475.887 \text{ KN}$
- Section de la semelle est $= 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$
- Hauteur de la semelle est $= 0.35\text{m}$

Le choix d'armateur : Pour $\begin{cases} A_s//A = 7.55 \text{ cm}^2 \rightarrow 12\text{T}10 \\ A_s//B = 7.55 \text{ cm}^2 \rightarrow 12\text{T}10 \end{cases}$

II. 11.2.5) Les semelles filante :

La "semelle filante" désigne une fondation continue en béton armé qui est utilisée pour répartir la charge d'une structure, telle qu'un mur ou une colonne, sur une plus grande surface du sol. Cette fondation est généralement de forme rectangulaire et allongée, d'où son nom "filante". Elle est conçue pour résister aux charges verticales et latérales exercées par la structure et pour éviter les mouvements du sol.

La semelle filante est souvent utilisée lorsque la charge à supporter est uniformément répartie le long de la structure.

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

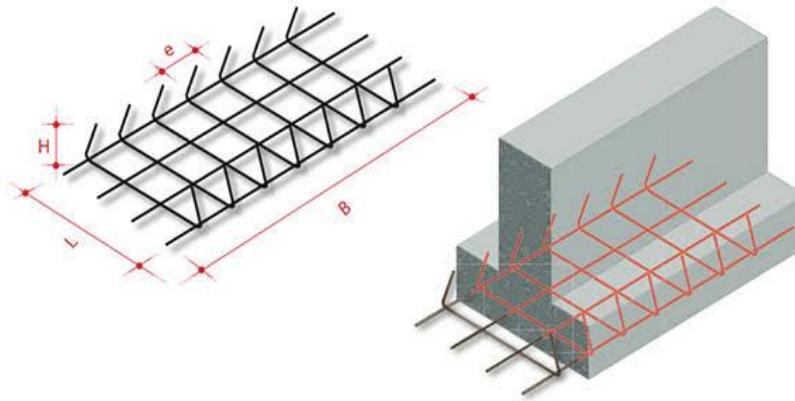


Figure II. 11: Ferrailage de semelle filant

- Déterminer les dimensions de la semelle :

$$B=1\text{m}$$

$$S=A \times 1$$

$$e=15\text{cm}$$

On calcule la surface S : $S = N_s / \sigma_{sol}$

- On détermine le rapport N_s depuis la modélisation on SAP2000 à l'état limite service (G+Q)

En trouvant $N_s = 680 \text{ KN}$ → $N_s = 0.680 \text{ MN}$

$$\text{Donc : } S = \frac{0.68}{0.2}$$

- Et on a $S = A \times 1$
- On prend $A = 4 \text{ m}$

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

Calculer la hauteur H de la semelle :

$$d \geq \text{SUP}\left(\frac{A-e}{4}\right) \rightarrow d \geq \text{SUP}[0.8375]$$

- on prend : $d = 1 \text{ m}$ et $H = d + 0.05 \rightarrow H = 1.05 \text{ m}$

- **Vérification des contraintes :**

$$\sigma_{\text{sol}} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} \quad \text{avec } \sigma_{\text{sol}} = (N_s + \text{poids de semelle}) / S$$

$$\sigma_{\text{sol}} = [0.68 + (4 \times 1 \times 1.05 \times 0.025)] / (4 \times 1) = 0.196 \text{ MN}$$

$$\sigma_{\text{sol}} = 0.196 \text{ MN} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} = 0.2 \text{ MN} \quad \text{C.V}$$

- **Détermination des aciers :**

➤ ferrailage suivant $A_s // A$: (les armateurs transversale)

ELU :

- On déterminer le rapport N_u depuis la modélisation on SAP2000 a l'état limite ultime (1.35G+1.5Q).
- En trouver $N_u = 1020 \text{ KN}$

$$A_s // A = \frac{N_u(A-e)}{8\sigma_s \cdot d} = \frac{1.02 \times (4 - 0.15)}{8 \times \left(\frac{400}{1.15}\right) \times 1} = 14.15 \text{ cm}^2$$

ELS :

Fissuration préjudiciable :

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

$$As//A = \frac{Ns.(A-a)}{8.\sigma_{st}.d} = \frac{1.02 \times (4-0.15)}{8 \times 201.63 \times 1} = 24.34 \text{ cm}^2$$

Pour les armatures transversales on prend $As//A = 24.34 \text{ cm}^2$

➤ **ferraillage suivant $As // B$: (les armatures longitudinales) :**

ELU :

$$As//B = \frac{As/A}{4} = \frac{14.15}{4} = 3.53 \text{ cm}^2$$

ELS :

$$As//B \geq \frac{As/A}{4} = \frac{24.34}{4} = 6.085 \text{ cm}^2$$

Pour les armatures longitudinales on a $As//B = 6.085 \text{ cm}^2$

Le choix d'armateur : pour $\begin{cases} As//A = 24.34 \text{ cm}^2 \rightarrow 17T14 \\ As//B = 6.085 \text{ cm}^2 \rightarrow 12T10 \end{cases}$

• Conclusion :

D'après les résultats obtenus nous constatons que les conditions sont vérifiées; donc nous pouvons opter pour les dimensions que nous avons proposées les dimensions des semelles suivantes :

Tableau II. 12: récapitulatif des dimensions des semelles

| Type de semelle | A (m) | B (m) | H (m) | As//A (cm ²) | As//B (cm ²) | Choix d'acier (mm)As//A | Choix d'acier (mm)As//B |
|-------------------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Semelles centraux | 2.2 | 2.2 | 0.5 | 24.94 | 24.94 | 17T14 | 17T14 |

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

| | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |
| Semelles intermédiaires | 2 | 2 | 0.45 | 16.14 | 16.14 | 12T14 | 12T14 |
| Semelle de coins | 1.5 | 1.5 | 0.35 | 7.55 | 7.55 | 12T10 | 12T10 |
| Semelle filante | 4 | 1 | 1.05 | 24.34 | 6.085 | 17T14 | 17T14 |

II. 12) Conclusion :

Suite à l'analyse des résultats, il a été constaté que les conditions requises sont satisfaites, ce qui nous permet de valider les dimensions proposées, à savoir :

- **Plancher à corps creux (16+5) cm**
- **Dalle pleine d'épaisseur 15 cm**
- **Épaisseur des paillasse de 15 cm**
- **Épaisseur des voiles de 20 cm**
- **Poutres principales de dimensions (30×40) cm²**
- **Poutres secondaires de dimensions (30×35) cm²**
- **Poteaux pour le rez-de-chaussée de dimensions (45×45) cm²**
- **Poteaux pour l'étage 1 et 2 de dimensions (40× 40) cm²**

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET PRÉ DIMENSIONNEMENT

- Poteaux pour les étages 3, 4 ,5 et 6 de dimensions (35×35) cm²
- dimensions de semelles montrées dans le tableau III.12

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

III. 1) Introduction :

L'objectif de cette étude est d'analyser la réponse d'une structure de six niveaux, avec et sans prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS), soumise à des charges sismiques sur un sol très meuble. Deux hypothèses concernant la nature des supports à la base de la structure seront considérées.

Dans un premier temps, le comportement de la structure sans prise en compte de l'ISS sera analysé en utilisant les spectres de réponse correspondants pour le sol très meuble. Les forces de cisaillement, les moments fléchissants et les déplacements de la structure seront évalués pour cette configuration.

Dans un deuxième temps, l'effet de l'ISS sera pris en compte en utilisant des modèles de ressorts pour représenter le comportement du sol très meuble. Les réponses sismiques de la structure, y compris les forces de cisaillement, les moments fléchissants et les déplacements, pour cette configuration.

Les résultats obtenus pour les deux configurations seront comparés afin de déterminer l'impact de l'interaction sol-structure sur la réponse de la structure.

III.1.1 Hypothèses pour le calcul

Les hypothèses de calcul suivantes sont utilisées :

- Le sol est considéré comme un milieu élastique semi-infini avec un module d'élasticité dynamique E et un coefficient de poisson ν . Le sol utilisé pour l'étude est homogène.
- Le sol reste toujours dans le domaine élastique sous l'action sismique ; il n'y a pas d'excursion des grains dans le domaine anélastique, et le sol ne présente pas de risque de liquéfaction.
- Le sol est stable et il n'y a pas de tassements.

- Des ressorts élastiques sont utilisés pour simuler la résistance de l'ensemble sol-fondations.

III.1.2 Modélisation de l'interaction sol-structure :

La modélisation peut se faire par des ressorts élastiques ou par élément finis.

III.1.2.1) Modélisation du sol par éléments ressorts :

Les ressorts du sol ont été utilisés pour modéliser le comportement du sol en définissant ses réactions élastiques à l'égard des éléments de déplacement statique de la fondation.

Les ressorts de sol ont été déterminés pour la fondation circulaire selon la méthode de (Deleuze,1967) et (Newmark-Resenblueth,1971), et la méthode simplifiée de (V.Davidovici,1999), Pour les autres types de fondations superficielles, on peut déterminer les rigidités d'après la méthode de (Cevaer-Sieffert,1967).

La méthode des ressorts de sol est basée sur une réaction élastique on ne tient pas compte de la masse de sol participant au mouvement.

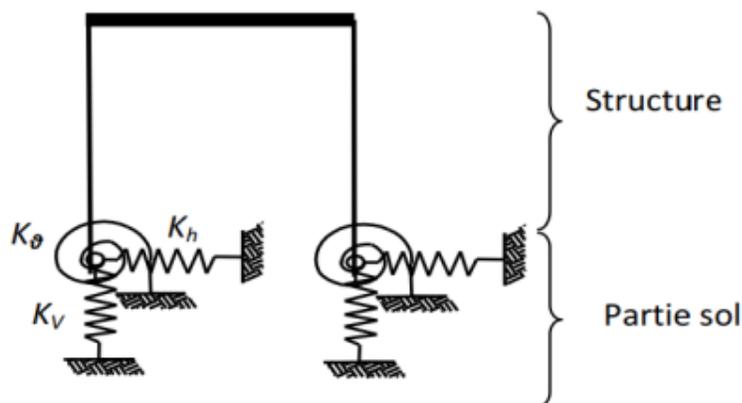


Figure III. 1: Modèle avec prise en compte de l'interaction sol-structure

❖ *Formules de Newmark-Rosenblueth:*

Cette méthode est indépendante de la fréquence, donc avec des coefficients constants.

Tableau III. 1: Formules de Newmark-Rosenblueth des raideurs statiques d'une fondation rectangulaire surfacique

| Mouvement | Semelle rigide rectangulaire |
|--------------------|---|
| Vertical | $K_v = \frac{G}{1 - \nu} \cdot \beta_z \sqrt{A}$ |
| Horizontal | $K_h = 2(1 + \nu) \cdot G \cdot \beta_{x,y} \sqrt{A}$ |
| Balancement | $K_\phi = \frac{G}{1 - \nu} \cdot \beta_\phi \cdot a^2 b$ |

Avec :

- A : Aire de la fondation. ($A = a_s \times b_s$), a et b longueurs et largeurs de la fondation.
- G_s : Module de cisaillement dynamique du sol [N/m^2].
- ν : Coefficient de poisson.
- β_z , $\beta_{x,y}$ et β_ϕ sont donnés par des abaques suivants.
- a_s : dimension parallèle à la direction du séisme.
- b_s : dimension perpendiculaire à la direction du séisme.

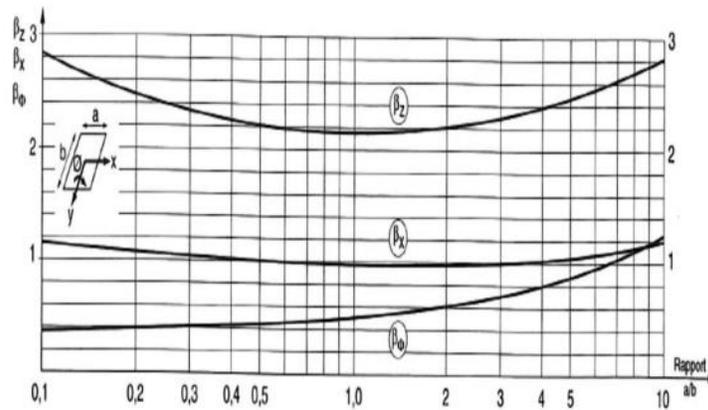


Figure III. 2: Abaque donnant les coefficients de Newmark.

❖ **Méthode de Deleuze**

Cette méthode peut être appliquée dans le cas où les fondations, circulaires ou assimilées, peuvent être considérées comme superficielles et suffisamment rigides.

Les coefficients de raideur sont calculés pour chaque direction sismique en fonction des coefficients de transmittance f par les expressions suivantes [7].

Tableau III. 2: Les équations de Deleuze

| Translation vertical | Translation horizontal | Rotation |
|---|---|--|
| $K_v = GR_0 \frac{f_{v1}}{f_{v1}^2 + f_{v2}^2}$ | $K_h = GR_0 \frac{f_{h1}}{f_{h1}^2 + f_{h2}^2}$ | $K_\theta = GR_0 \frac{f_{r1}}{f_{r1}^2 + f_{r2}^2}$ |

Tableau III. 3: Rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire

| Vertical | Horizontal | Rotation | Torsion |
|----------|------------|----------|---------|
|----------|------------|----------|---------|

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| $R_0 = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$ | $R_0 = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$ | $R_0 = \sqrt[4]{\frac{a^3 b}{3\pi}}$ | $R_0 = \sqrt[4]{\frac{ab(a^2 + b^2)}{6\pi}}$ |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|

Tableau III. 4: Les coefficients de transmittance verticale (fv) du sol.

| a0 | v=0.01 | | v=0.25 | | v=0.5 | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | fv1 | fv2 | fv1 | fv2 | fv1 | fv2 |
| 0.00 | 0.2675 | 0.0000 | 0.2026 | 0.0000 | 0.1351 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.2533 | -0.0518 | 0.1928 | -0.0365 | 0.1285 | -0.0258 |
| 0.50 | 0.2356 | -0.0985 | 0.1818 | -0.0698 | 0.1211 | -0.0495 |
| 0.75 | 0.2032 | -0.1355 | 0.1604 | -0.0971 | 0.1066 | -0.0695 |
| 1.00 | 0.1629 | -0.0160 | 0.1332 | -0.1165 | 0.0878 | -0.0888 |
| 1.50 | 0.1202 | -0.1709 | 0.1034 | -0.1270 | 0.0669 | -0.0935 |
| 1.25 | 0.0799 | -0.1691 | 0.0743 | -0.1290 | 0.0457 | -0.0969 |
| 1.75 | 0.0459 | -0.1570 | 0.0484 | -0.1236 | 0.0259 | -0.0949 |
| 2.00 | 0.0206 | -0.1381 | 0.0274 | -0.1128 | 0.0090 | -0.0887 |

Tableau III. 5: Les coefficients de transmittance horizontale (fh) du sol.

| a0 | v=0.01 | | v=0.25 | | v=0.5 | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | fh1 | fh2 | fh1 | fh2 | fh1 | fh2 |
| 0.00 | 0.2688 | 0.0000 | 0.2364 | 0.0000 | 0.2026 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.2636 | -0.0404 | 0.2324 | -0.0323 | 0.1995 | -0.0259 |
| 0.50 | 0.2491 | -0.0779 | 0.2215 | -0.0625 | 0.1910 | -0.0502 |
| 0.75 | 0.2267 | -0.1099 | 0.2045 | -0.0890 | 0.1778 | -0.0718 |
| 1.00 | 0.1988 | -0.1346 | 0.1833 | -0.1103 | 0.1610 | -0.0894 |
| 1.25 | 0.1684 | -0.1520 | 0.1597 | -0.1257 | 0.1424 | -0.1025 |
| 1.50 | 0.1377 | -0.1590 | 0.1354 | -0.1349 | 0.1231 | -0.1108 |
| 1.75 | 0.1087 | -0.1596 | 0.1118 | -0.1384 | 0.1043 | -0.1146 |
| 2.00 | 0.0829 | -0.1542 | 0.0899 | -0.1369 | 0.0866 | -0.1144 |

Tableau III. 6: Les coefficients de transmittance en rotation (fr) du sol.

| a0 | v=0.01 | | v=0.25 | | v=0.5 | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | fr1 | fr2 | fr1 | fr2 | fr1 | fr2 |
| 0.00 | 0.4280 | 0.0000 | 0.3242 | 0.0000 | 0.2161 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.4361 | -0.0018 | 0.3295 | -0.0001 | 0.2197 | -0.0007 |
| 0.50 | 0.4587 | -0.0137 | 0.3445 | -0.0085 | 0.2299 | -0.0053 |
| 0.75 | 0.4874 | -0.0435 | 0.3642 | -0.0270 | 0.2437 | -0.0170 |
| 1.00 | 0.5128 | -0.0941 | 0.3831 | -0.0590 | 0.2577 | -0.0376 |
| 1.25 | 0.5252 | -0.1632 | 0.3952 | -0.1039 | 0.2683 | -0.0670 |
| 1.50 | 0.5160 | -0.2434 | 0.3949 | -0.1578 | 0.2719 | 0.1033 |
| 1.75 | 0.4801 | -0.3240 | 0.3782 | -0.2147 | 0.2655 | -0.1434 |
| 2.00 | 0.4177 | -0.3931 | 0.3439 | -0.2674 | 0.2477 | 0.1829 |

- Avec :
- a_s : dimension parallèle à la direction du séisme.
- b_s : dimension perpendiculaire à la direction du séisme.
- R_0 : rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire
- ρ : masse volumique du sol.
- G_s : module de cisaillement dynamique du sol.
- f : fréquence du mode de vibration fondamental dans la direction de séisme considéré, défini à l'aide d'un calcul modal préliminaire.

III.1.2.2) Modélisation par des éléments finis

On peut substituer les ressorts du modèle par des éléments finis afin de mieux prendre en compte les propriétés dynamiques du sol. Des couches successives d'éléments empilés sur une base qui représente le soubassement rocheux représentent alors le sol. Un module d'élasticité, un

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

coefficient de Poisson, une masse volumique et un coefficient d'amortissement caractérisent chaque couche.

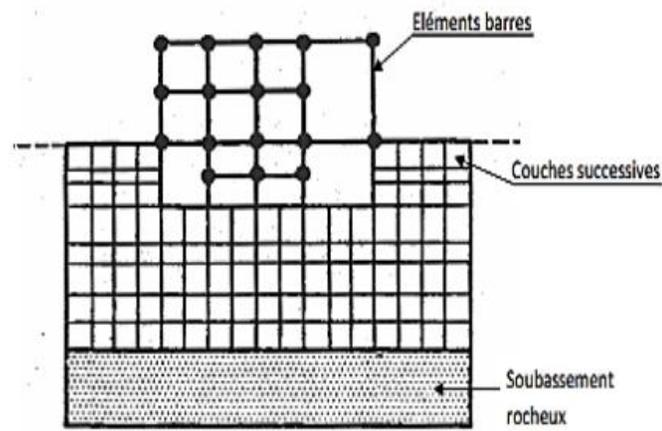


Figure III. 3: modélisation par éléments finis

NB :

- Notre étude se fait sur un type de fondation qui est une semelle rectangulaire, donc le sol sera modélisé par des ressorts horizontaux, des ressorts verticaux et de rotations. La raideur de ces ressorts est calculée par les formules de (Newmark-Resenblueth, 1971).

- **L'amortissement :**

- a. Amortissement Interne Ou Structural :**

il en gendre la principale dissipation d'énergie suite à la déformation des matériaux

- **Par un amortissement visqueux :** caractérisant la dissipation 'd'énergie dans le domaine élastique et lié à la viscoélasticité des matériaux dépendant de la fréquence

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{Km}}$$

- ***Par un amortissement d'hystérésis*** : caractérisant dans le domaine inélastique
Indépendant de la fréquence.

b. Amortissement Externe:

- Par les frottements entre les éléments structuraux
- Par l'interaction entre le sol et les fondations.

On traite l'amortissement externe et l'amortissement d'hystérésis comme un amortissement visqueux donnant lieu à la même dissipation d'énergie [8].

L'amortissement est pris égale a 5 %.

III.2) Méthode de l'analyse modale spectrale :

La méthode de l'analyse modale spectrale est couramment utilisée en génie parasismique pour calculer les effets maximaux d'un séisme sur une structure, la méthode implique la recherche des modes propres de la structure, qui sont les modes de vibration naturels de la structure, ainsi que le calcul de la réponse modale de la structure à chaque mode propre.

Une fois que la réponse modale a été calculée pour chaque mode propre, les réponses modales sont combinées pour donner la réponse totale de la structure. Cette étape peut être effectuée à l'aide de différentes méthodes, telles que la méthode de la combinaison quadratique, la méthode de la somme spectrale et la méthode de la combinaison en enveloppe.

Enfin, les effets des composantes du mouvement sismique sont cumulés pour obtenir la réponse totale de la structure au séisme. Cela implique souvent l'utilisation d'un spectre de dimensionnement, qui fournit la valeur maximale de l'accélération sismique que la structure est susceptible de subir.

III.3) Spectre de réponse selon le RPA 99 (ver 2003) :

La sélection du spectre de réponse approprié pour une structure donnée dépend de la catégorie de site sur laquelle la structure est construite. Il est donc important de déterminer la catégorie de site et les périodes caractéristiques T1 et T2 correspondantes avant de choisir le spectre de réponse à utiliser pour les calculs de conception sismique de la structure.

Tableau III. 7 périodes caractéristiques des sites

| Site | S1 | S2 | S3 | S4 |
|----------|------|------|------|------|
| T1 (sec) | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| T2 (sec) | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,70 |

- En utilisant des relations mathématiques spécifiques, la forme du spectre élastique normalisé en accélération peut être calculée pour chaque catégorie de site.

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \left(\frac{Q}{R} \right) - 1 \right) \right] \rightarrow 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \rightarrow T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} \rightarrow T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_3}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) \rightarrow T \geq 0.3s \end{cases}$$

S_a: Accélération spectrale associée au mode de vibration de période T du bâtiment.

A': Coefficient d'accélération de zone.

η: Correction d'amortissement.

ζ: Pourcentage d'amortissement critique.

R: Le coefficient de comportement.

Q: Facteur de qualité.

T₁, T₂: Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site

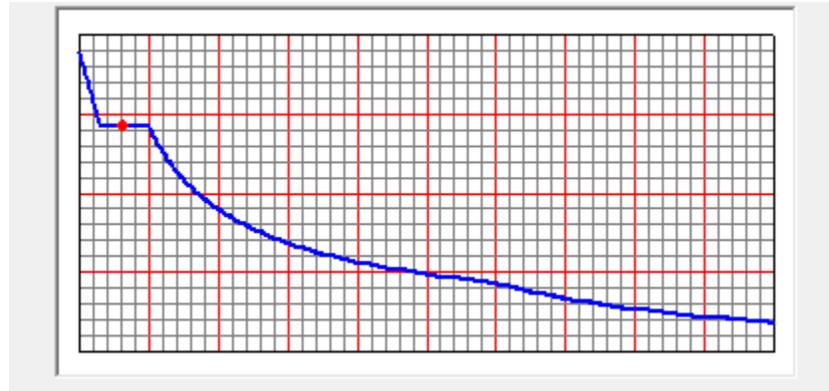


Figure III. 4: spectre de réponse pour un site très meuble

III.4) Modélisation de la structure :

- La modélisation d'une structure sans Interaction Sol Structure (ISS) implique de considérer que la base de la structure est parfaitement fixée, sans possibilité de déplacement ou de rotation sous l'effet des forces sismiques. Cette approche est généralement utilisée pour les bâtiments standards.

Dans ce contexte, il est important de préciser que la structure est implantée sur un site très meuble, ce qui peut affecter sa réponse sismique. De plus, la structure est localisée en zone sismique IIa et appartient au groupe d'usage 2. Elle possède un coefficient de comportement R de 3,5 ainsi qu'un facteur de qualité Q de 1,2, qui permettent d'évaluer sa capacité à résister aux forces sismiques.

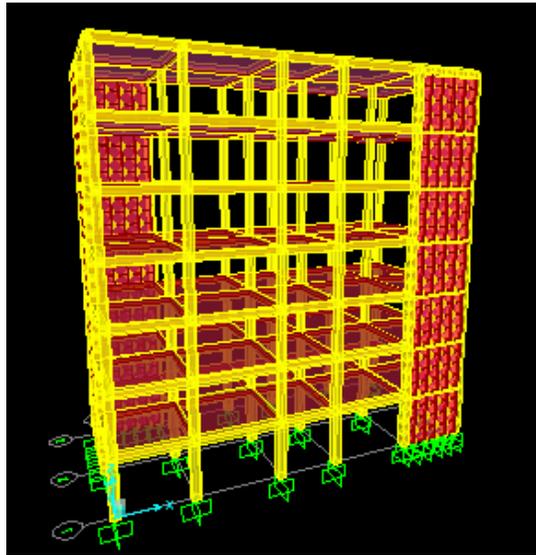


Figure III. 5: Représentation 3D d'une structure parfaitement fixée

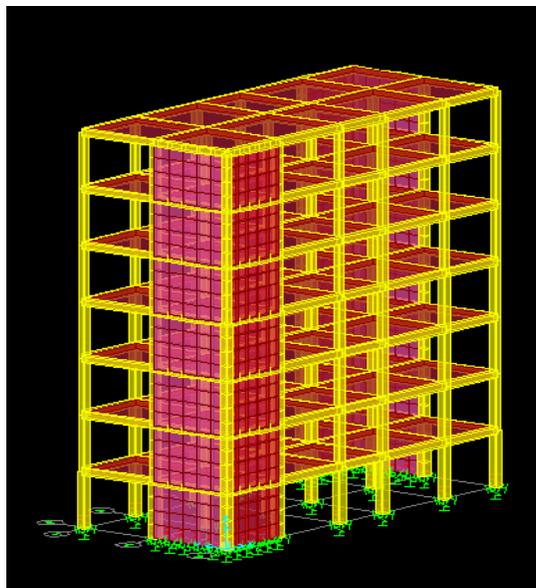


Figure III. 6: Représentation 3D d'une structure avec des ressorts a la base.

III.4.1) Modèle du sol:

Nous avons considéré le sol comme étant homogène, avec un comportement élastique linéaire. Il a été modélisé à l'aide de ressorts, et sa caractérisation inclut des paramètres tels que la masse volumique ρ , le module de cisaillement G , le coefficient de Poisson ν , et la vitesse des ondes de cisaillement V_S .

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

$$G_s = \rho \times V_s^2$$

Tableau III. 8: Rigidité de ressorts du sol.

| Type de Semelle | | Coin | Intermédiaire | Centrale | Filant |
|--|----------------|--------|---------------|------------|---------|
| Coefficient a_s/b_s | | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Surface de semelle $A(m^2)$ | | 2.25 | 4 | 4.84 | 4 |
| Type de sol | | Meuble | | | |
| Coefficient de poisson ν | | 0.4 | | | |
| Module de cisaillement dynamique G [Mpa] | | 162 | | | |
| la vitesse des ondes de cisaillement (m/s) | | 300 | | | |
| Paramètre sans dimension | $\beta_{x, y}$ | 1 | | | 1 |
| | B_z | 2.16 | | | 2.4 |
| | B_ϕ | 0.5 | | | 0.8 |
| Raideurs des ressorts de sol (KN/m) | K_v | 874800 | 1166400 | 1458000 | 1296000 |
| | K_h | 680400 | 907200 | 1134000 | 907200 |
| | K_ϕ | 455625 | 1080000 | 2122395.84 | 3456000 |

III.5) Le résultat obtenu et son interprétation concernant la structure sont présentés :

Les résultats de cette étude, en ce qui concerne la participation massique, les périodes, les forces, les moments et les déplacements de la structure analysée, sont exposés de la manière suivante

III.5.1) participation massique :

Avant de vérifier les résultats fondamentaux de la structure, il est nécessaire de s'assurer que la participation massique est supérieure à 90% et qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres mode modal.

| SumUX Unitless | SumUY Unitless |
|---------------------------|---------------------------|
| 0.42571 | 0.26091 |
| 0.69237 | 0.69049 |
| 0.69237 | 0.69049 |
| 0.82102 | 0.75406 |
| 0.88842 | 0.89038 |
| 0.88842 | 0.89038 |
| 0.88868 | 0.89067 |
| 0.88868 | 0.89067 |
| 0.91038 | 0.90088 |
| 0.91656 | 0.90967 |
| 0.91656 | 0.90967 |
| 0.94651 | 0.94488 |

Figure III. 7: participation massique sans ISS.

| SumUX Unitless | SumUY Unitless |
|-------------------|-------------------|
| 0,43838 | 0,30398 |
| 0,74034 | 0,7387 |
| 0,74034 | 0,7387 |
| 0,84608 | 0,79968 |
| 0,91498 | 0,91868 |
| 0,91498 | 0,91868 |
| 0,91502 | 0,91911 |
| 0,91502 | 0,91911 |
| 0,91578 | 0,91911 |
| 0,91578 | 0,91911 |
| 0,94783 | 0,93588 |
| 0,94783 | 0,93588 |

*Figure III. 8:
participation
massique avec ISS*

- **Commentaires :**
 - A partir de **figure III.7** et **figure III.8** la participation massique est vérifié dans les deux cas (avec et sans ISS)

III.5.2) Les périodes :

Le **tableau III.9** et **figure III.9** montre les périodes avec ISS et sans ISS

Tableau III. 9: 9 les périodes caractéristiques des sites

| Modes | T1 | T2 (ISS) |
|--------|-------|----------|
| Mode 1 | 0.452 | 0.55 |

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | | |
|---------|----------|----------|
| Mode 2 | 0.333 | 0.41 |
| Mode 3 | 0.221 | 0.28 |
| Mode 4 | 0.113 | 0.128 |
| Mode 5 | 0.0937 | 0.95 |
| Mode 6 | 0.0794 | 0.089 |
| Mode 7 | 0.07257 | 0.079075 |
| Mode 8 | 0.061241 | 0.066984 |
| Mode 9 | 0.0584 | 0.06277 |
| Mode 10 | 0.0575 | 0.061437 |
| Mode 11 | 0.0565 | 0.056194 |
| Mode 12 | 0.0531 | 0.055 |

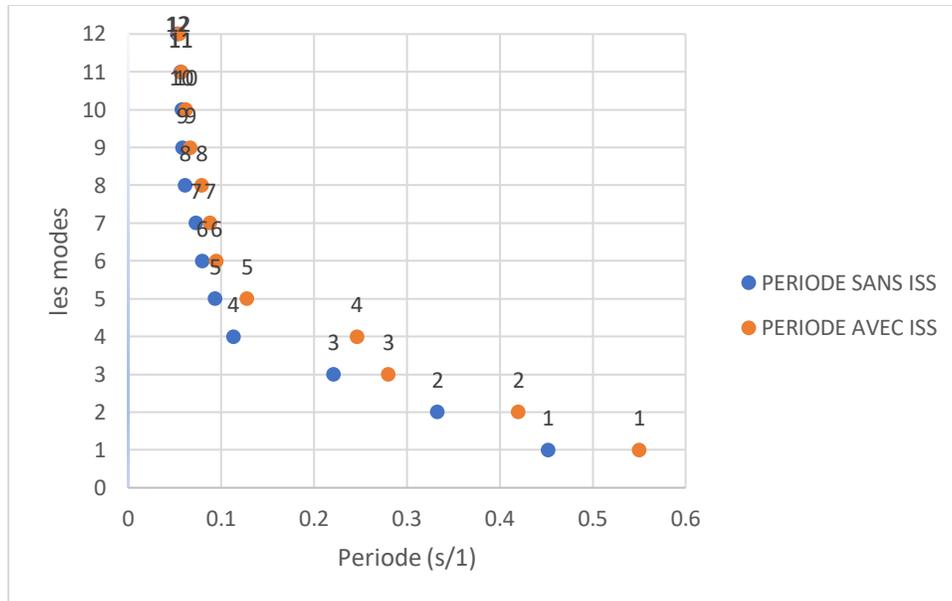


Figure III. 9: Un graphe comparant les périodes avec et sans interaction sol-structure (ISS) dans les 12 modes.

- **Commentaire :**

Sur la base des résultats obtenus, on observe que la période "T2" est plus longue que "T1" pour les quatre premier modes. Cette augmentation significative de la période peut être attribuée à la prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS) dans l'analyse. La présence de la flexibilité du sol dans le modèle d'ISS entraîne un système moins rigide, ce qui se traduit par des périodes plus longues. Cette constatation implique que la structure est plus vulnérable à des dommages plus importants lors d'événements sismiques en raison de l'augmentation du temps d'exposition.

III.5.3) Les déplacements :

Le **Tableau III.10** et la **Figure III.10**, **Figure III.11** ci-dessous présentent les déplacements maximaux des poteaux centraux dans les directions x et y, dans différentes situations, à la fois sans interaction sol-structure (ISS) et avec ISS.

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

Tableau III. 10: Déplacements maximaux des poteaux centraux dans les directions x et y.

| Hauteur | SANS ISS | | | | AVEC ISS | | | |
|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | Direction | U1 (cm) | Direction | U2 (cm) | Direction | U1 ISS (cm) | Direction | U2 ISS (cm) |
| 0 | X | 0 | Y | 0 | X | 0.0025 | Y | 0.0021 |
| 3.06 | X | 0.0452 | Y | 0.0372 | X | 0.11 | Y | 0.09 |
| 6.12 | X | 0.1357 | Y | 0.1099 | X | 0.24 | Y | 0.21 |
| 9.18 | X | 0.2554 | Y | 0.2048 | X | 0.4 | Y | 0.34 |
| 12.24 | X | 0.3913 | Y | 0.3129 | X | 0.55 | Y | 0.48 |
| 15.3 | X | 0.5392 | Y | 0.4311 | X | 0.72 | Y | 0.62 |
| 18.36 | X | 0.6857 | Y | 0.5494 | X | 0.88 | Y | 0.77 |
| 21.42 | X | 0.8239 | Y | 0.6616 | X | 1.05 | Y | 0.9 |

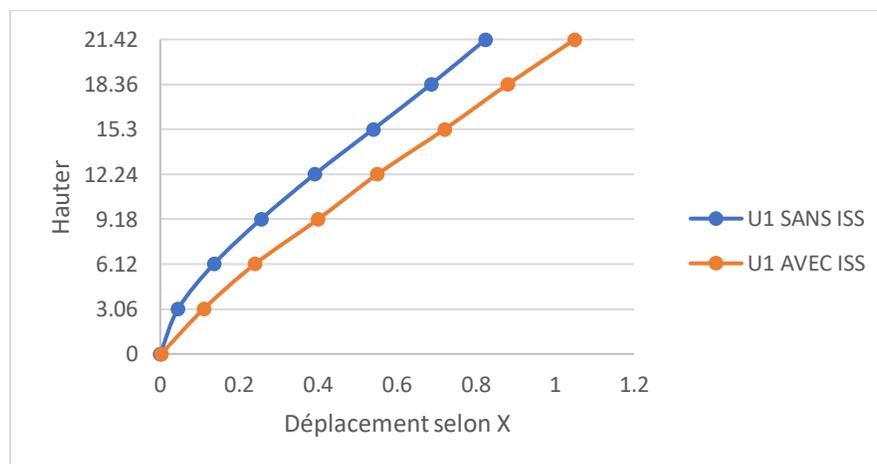


Figure III. 10: Un graphe comparant les déplacements avec et sans interaction sol-structure (ISS) selon le sens X.

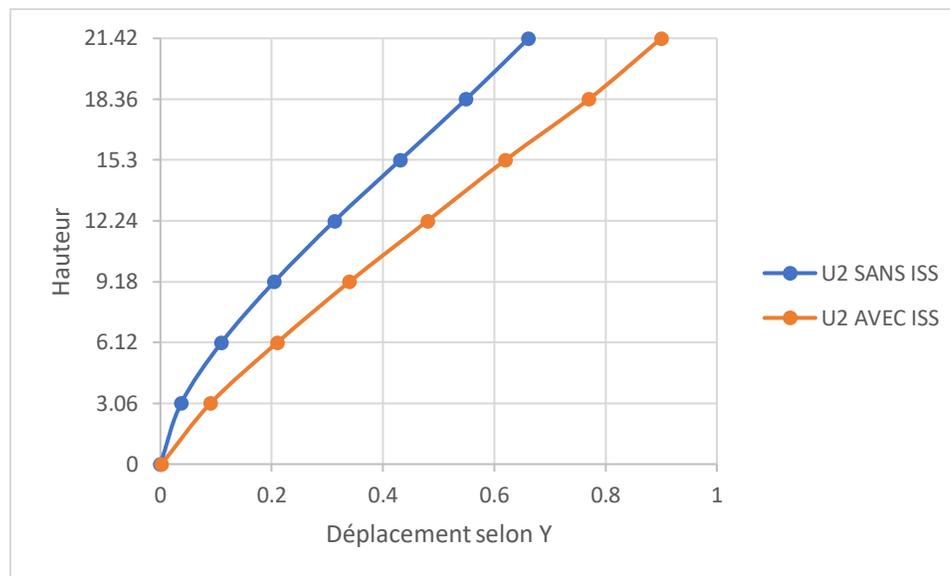


Figure III. 11: Un graphe comparant les déplacements avec et sans interaction sol-structure (ISS) selon le sens y.

- **Commentaire :**

Selon l'analyse effectuée, il est clair que les déplacements dans les directions x et y sont nettement plus importants lorsque l'interaction sol-structure (ISS) est prise en compte par rapport au cas sans ISS. Cela s'explique par la flexibilité inhérente du sol, qui lui permet de se déformer et d'interagir avec la structure lors d'événements sismiques.

En l'absence d'ISS, lorsque l'on suppose que le sol est totalement rigide à 100 %, nous avons constaté qu'il n'y avait aucun déplacement à la base de la structure. Cependant, cette hypothèse ne correspond pas à la réalité du comportement du sol dans les situations réelles. La prise en compte de l'ISS tient compte du comportement réel du sol, qui n'est pas complètement rigide. En conséquence, la structure subit des déplacements plus importants en raison de son interaction avec un sol plus flexible.

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

Ces résultats indiquent que la flexibilité du sol a une influence directe sur l'amplitude des déplacements. Plus le sol est flexible, plus les déplacements observés dans la structure seront importants.

III.5.4) Effort tranchant à la base (KN) :

Cette table (**Tableau III.11**) présente les résultats des efforts tranchants à la base de la structure générés par les forces sismiques EX et EY. Nous allons maintenant examiner de près ces résultats et en discuter.

Tableau III. 11: Efforts tranchants à la base de la structure

| | Effort tranchant à la base sans ISS (KN) | Effort tranchant à la base avec ISS (KN) | Comparaison % |
|-----------|---|---|---------------|
| Suivant X | 961,937 | 974.051 | 1.25% |
| Suivant Y | 966.178 | 992 | 2.7% |

- **Commentaire :**

On observe une variation relativement faible de l'effort tranchant dans le cas de la prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS).

III.5.5) Effort normal dans les poteaux (KN) :

Le **Tableau III.12** et la **Figure III.12** ci-dessous présentent les résultats des "efforts normaux dans les poteaux" pour chaque étage de la structure, permettant d'observer les différences entre ces valeurs.

Tableau III. 12: Efforts normaux dans les poteaux sans et avec ISS.

| POTEAUCX | | P | P (ISS) | $\frac{p-p(ISS)}{p}\%$ |
|----------|-----|-----------|-----------|------------------------|
| Poteau 1 | Max | -1129.841 | -1073.371 | 5 |
| Poteau 2 | Max | -939.754 | -888.782 | 5.5% |
| Poteau 3 | Max | -764.794 | -740.72 | 3.15% |
| Poteau 4 | Max | -615.33 | -600 | 2.5% |

CHAPITRE III : MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | | | | |
|----------|-----|----------|----------|------|
| Poteau 5 | Max | -465.641 | -308.92 | 33% |
| Poteau 6 | Max | -316.41 | -277.18 | 12% |
| Poteau 7 | Max | -171.263 | -156.312 | 8.8% |

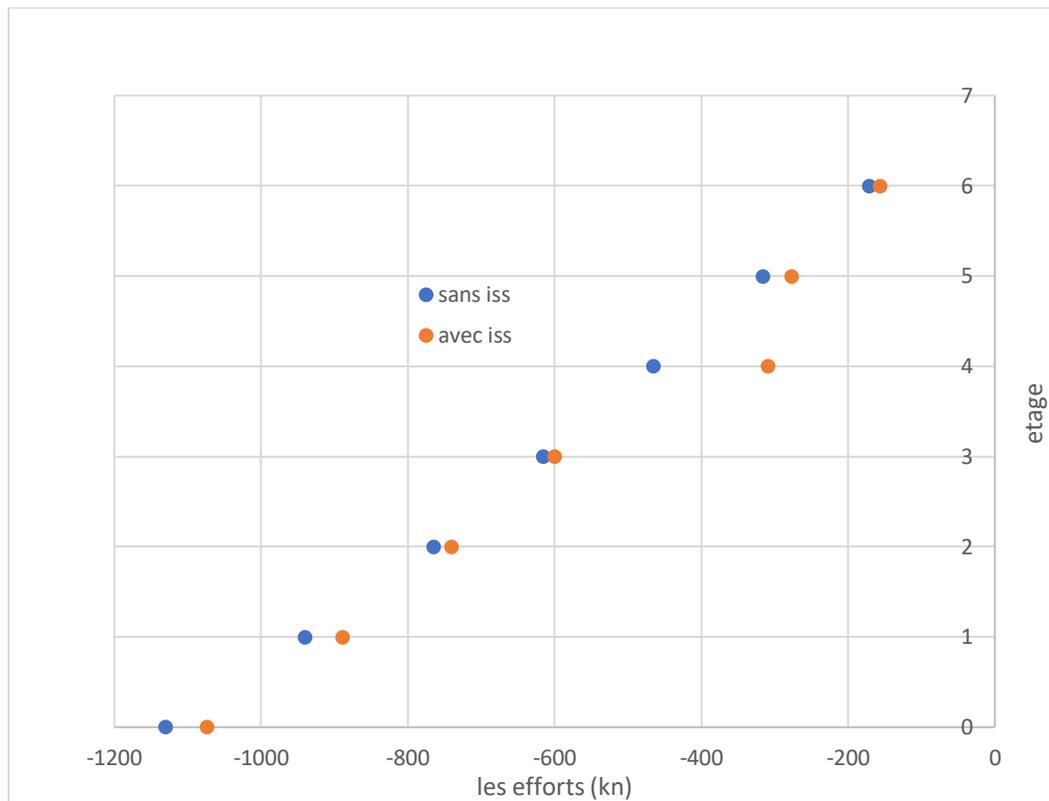


Figure III. 12: Efforts normaux dans les poteaux sans et avec ISS

- **Commentaire :**

On constate une légère réduction de l'effort normal dans le cas de l'interaction sol-structure (ISS), avec une réduction moyenne d'environ 10%. Lorsqu'on considère l'interaction sol-structure (ISS), la répartition des forces peut être modifiée en raison de l'influence mutuelle entre la structure et le sol. Cette redistribution des forces peut se produire en raison de la répartition des charges : lorsque le sol est pris en compte dans l'analyse, il absorbe une partie de la charge sismique appliquée à la structure. Cette absorption peut être attribuée à la déformation du sol et à sa capacité à dissiper l'énergie sismique.

III.5.6) Moments fléchissant dans les poteaux :

Tableau III.13 et la **Figure III.13** ci-dessous mettent en évidence la différence des "Moments fléchissants dans les poteaux" entre les cas avec et sans prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS).

Tableau III. 13: les moments fléchissants dans les poteaux avec et sans interaction sol-structure (ISS)".

| POTEAUCX | M | M (ISS) | $\frac{M(ISS) - M}{M(ISS)}$ (%) |
|----------|---------|---------|------------------------------------|
| Poteau 1 | 26.839 | 52.88 | 49.3% |
| Poteau 2 | 31.9159 | 48.90 | 34.74% |
| Poteau 3 | 44.0862 | 57.8 | 23% |
| Poteau 4 | 54.3746 | 66.7 | 18.5% |
| Poteau 5 | 39.9373 | 46.07 | 13.31% |
| Poteau 6 | 42.0061 | 47.54 | 11.6% |
| Poteau 7 | 45.7435 | 52.17 | 14.05% |

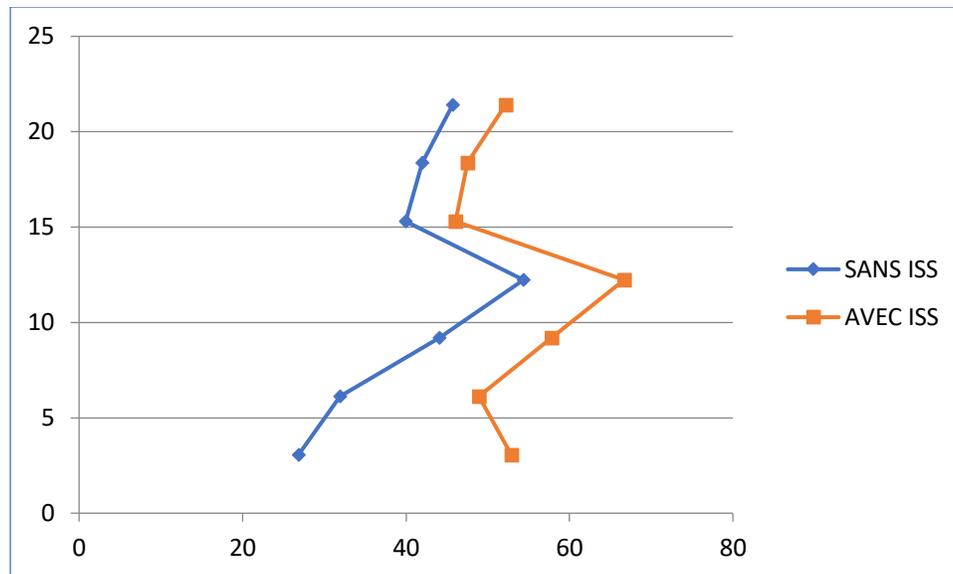


Figure III. 13: Moments maximum des poteaux sans et avec interaction sol-structure (ISS).

- **Commentaire :**

On observe une augmentation significative des "moments" jusqu'à 49,3%, avec une augmentation moyenne d'environ 23,5%. , ce qui entraîne une différence de ferrailage importante.

III.6) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la modélisation à l'aide de ressorts pour estimer l'effet de l'interaction sol-structure (ISS) sur la structure. Nous avons comparé les périodes, les déplacements, les efforts et les moments entre le cas avec ISS et le cas de base rigide afin de déterminer les différences.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Mon projet de master me permet d'appliquer les connaissances que j'ai acquises tout au long de mes études universitaires, ainsi que celles que j'ai obtenues en consultant des documents, des articles et des livres pertinents. Nous avons constaté que la prise en compte de l'interaction sol-structure (ISS) peut être utile dans le cas de sol meuble et peut jouer un rôle important dans la réponse sismique.

Au cours de ce projet, nous avons abordé différentes méthodes et approches pour prendre en compte l'interaction sol-structure (ISS) en modélisant la relation entre la structure et le sol qui l'entoure à l'aide de ressorts et des lois de Newmark-Rosenblueth.

Nous avons suivi une démarche comprenant plusieurs étapes :

- Estimation approximative des raideurs du sol en utilisant les méthodes de Newmark-Rosenblueth.
- Calcul des déplacements induits par le séisme.
- Détermination des efforts tranchants dans les éléments structuraux.
- Évaluation de l'effort tranchant total à la base de la structure.
- Analyse des moments fléchissants dans les éléments structuraux.

Ces étapes nous ont permis d'évaluer l'impact de l'interaction sol-structure sur les déplacements, les efforts tranchants et les moments dans la structure.

L'interaction sol-structure (ISS) est un domaine complexe qui nécessite une expertise de la part de l'ingénieur et une connaissance de l'utilisation de logiciels d'analyse développés pour obtenir des résultats précis. Les résultats que nous avons obtenus sont satisfaisants, mais il est possible d'obtenir des résultats encore plus précis en utilisant d'autres méthodes plus complexes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CEA, “Quelle est l’origine des séismes ?,” 2017. [Online]. Available: <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/climat-environnement/origine-des-seismes.aspx>
- [2] M. Boscher, “Séismes et volcans Vivre avec le risque,” 2015. https://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/_migrated/content_uploads/Dossier_enseignants_Seismes_et_volcans-Cycle3_02.pdf
- [3] Musée de Sismologie et collections de Géophysique, “Ondes sismiques - Musée de Sismologie et collections de Géophysique - Université de Strasbourg.” <https://musee-sismologie.unistra.fr/comprendre-les-seismes/notions-pour-petits-et-grands/notions-de-base/ondes-sismiques/> (accessed May 10, 2023).
- [4] H. . Wood and F. Neumann, “Modified Mercalli Intensity Scale for Earthquakes For Use with Geoscience Data Puzzle Project,” 1931.
- [5] NEHRP Consultants Joint Venture A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. 2012.
- [6] Ushanthan Muruganathan, “Mémoire de maîtrise ,” 2018. [Online]. Available: https://publications.polymtl.ca/3298/1/2018_UshanthanMuruganathan.pdf

[7]. Nedjai A, Rouane Z, L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments (cas des bâtiments portiques en béton armée), Département de Génie Civil, Faculté de technologie, Université mohamed boudiaf - M'SILA., 2019.

[8]. Aane S, Bouzerfa A, réponse sismique 3d d'un bâtiment avec prise en compte de l'interaction sol-structure, Mémoire de magister ,Département de Génie Civil, Faculté des Sciences , Université Badji Mokhtar, Annaba., 2020.