

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Mémoire de Master en Génie Civil

Interaction sol-structure avec cas d'étude

BOUZOUINA Anes Abdelmoutaal

Sous la direction de Mme. Nadjia BAUCHE MAA ENP

Présenté et soutenue publiquement le 21/06/2017

Composition du Jury :

| | | | |
|------------|-----------------------|------------|-----|
| Président | Mme .R.MITICHE KETTAB | Professeur | ENP |
| Rapporteur | Mme N .BAUCHE | MAA | ENP |
| Examineurs | Mr M.DEMIDEM | MAA | ENP |
| | Mr R.BOUTMEUR | Docteur | ENP |

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Mémoire de Master en Génie Civil

Interaction sol-structure avec cas d'étude

BOUZOUINA Anes Abdelmoutaal

Sous la direction de Mme. Nadjia BAOUCHE MAA ENP

Présenté et soutenue publiquement le 21/06/2017

Composition du Jury :

| | | | |
|------------|-----------------------|------------|-----|
| Président | Mme .R.MITICHE KETTAB | Professeur | ENP |
| Rapporteur | Mme N .BAOUCHE | MAA | ENP |
| Examineurs | Mr M.DEMIDEM | MAA | ENP |
| | Mr R.BOUTMEUR | Docteur | ENP |

REMERCIEMENT

- ❖ Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.
- ❖ C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur M^{me} BAOUCHE.N pour son soutien, ses conseils judicieux et ses grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet.
- ❖ Je saisis également cette opportunité pour remercier les membres de l'entreprise de CTC ouest et particulièrement Mr BEENYAKOUBE qui ont beaucoup m'aider pour élaborer ce travail.
- ❖ Ainsi j'exprime ma reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.
- ❖ Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.

DÉDICACES

Je dédie ce travail à :

- ❖ Mes chers parents.
- ❖ Mes frères et ma sœur.
- ❖ Mes enseignants.
- ❖ Toute l'équipe de Dar-El hadith –Tlemcen.

ملخص

الإستجابة الزلزالية لهياكل المباني تعتمد على طبيعة حركة الأرض، الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للهيكل والأرض. كما أنه يوجد تفاعل بين الهيكل والبيئة الخارجية. الإجراء الأكثر فعالية للقضاء على مشكلة التفاعل أرض هيكل هو النظر في هيكل جزء لا يتجزأ تماماً في الأرض؛ في الواقع هذه الفرضية صالحة بشكل خاص في التشوهات الصغيرة للأرض بالنسبة للهيكل. والهدف من هذه الدراسة هو تحديد تأثير تفاعل أرض هيكل على الهياكل. وقد أجريت الدراسة باستخدام برنامج ساب 2000

الكلمات المفتاحية: ديناميك، تفاعل، أرض، هيكل، تصميم، ساب 2000

Abstract

The seismic response of building structures depends on the nature of the soil movement, the mechanical and physical properties of the structure and the soil. There is thus interaction between the structure and the external environment. The most radical procedure to eliminate the problem of this soil-structure interaction is to consider the structure perfectly embedded in the soil; This hypothesis is all the more valid since the foundation soil is not very deformable with respect to the structure. The objective of this study is to determine the influence of soil-structure interaction on structures. The study is carried out using the Sap2000 software.

Keywords : Dynamic , interaction, soil, structure, modilization, sap2000

Résumé

La réponse sismique des structures des bâtiments dépend de la nature du mouvement du sol, des propriétés mécaniques et physiques de la structure et de celles du sol. Il y' a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encastrée dans le sol ; cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure. L'objectif de la présente étude est la détermination de l'influence de l'interaction sol-structure sur les structures. L'étude est réalisée en utilisant le logiciel Sap2000.

Mots clés : Dynamique, interaction, sol, structure, modélisation, sap2000.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des Tableaux | |
| Liste des Figures | |
| Liste des Symboles | |
| Liste des Abréviations | |
| Introduction Générale | 12 |
| Chapitre I. Généralités sur l'interaction sol-structure | 14 |
| I.1. Introduction | 14 |
| I.2. Caractéristiques dynamiques des sols | 14 |
| I.3. Catégorie d'interaction | 15 |
| I.3.1. La structure est supportée par le sol | 15 |
| I.3.2. La structure est supportée par le sol | 15 |
| I.4. Description d'Interaction Sol-Structure | 15 |
| I.5. Types d'interaction | 18 |
| I.5.1. Interaction cinématique | 18 |
| I.5.2. Interaction inertielle | 18 |
| I.6. Nécessité de modéliser le sol : | 18 |
| I.7. Conséquence de l'interaction sol-structure | 19 |
| Chapitre II. Technique d'analyses de l'interaction sol-structure | 22 |
| II.1. Introduction | 22 |
| II.2. La méthode de la sous-structure | 22 |
| II.2.1. méthodes de frontière | 23 |
| II.2.2. Méthode de volume | 25 |

| | | |
|---------------|---|----|
| II.3. | Méthode des éléments finis | 26 |
| II.3.1. | Modélisation géométrique du milieu | 27 |
| II.3.2. | Formation de la matrice masse | 27 |
| II.4. | Représentation du sol par des ressorts : | 27 |
| II.5. | Organigramme de l'étude d'une structure dans le cas de prise en compte de l'interaction sol-structure | 29 |
| II.6. | Comparaisons des différentes méthodes : | 30 |
| II.7. | Conclusion..... | 30 |
| Chapitre III. | Cas d'étude d'un bâtiment R+10 avec sous-sol | 32 |
| III.1. | Introduction | 32 |
| III.2. | Présentation de l'ouvrage | 32 |
| III.2.1. | Dimensions en plan | 33 |
| III.2.2. | Dimensions en élévation | 33 |
| III.2.3. | Système structural | 35 |
| III.3. | Présentation de la méthode de demi-espace | 35 |
| III.3.1. | Raideur d'une Semelle circulaire | 36 |
| III.3.2. | Transformation des raideurs pour une section circulaire à une section rectangulaire..... | 37 |
| III.3.3. | Exemple d'étude d'une section rectangulaire | 40 |
| III.4. | Modélisation par Sap2000 | 42 |
| III.4.1. | Périodes et participation massique : | 42 |
| III.4.2. | Déplacements des étages | 46 |
| III.4.3. | Efforts tranchants à la base..... | 47 |
| III.4.4. | Effort normal dans les poteaux..... | 48 |
| III.4.5. | Moments fléchissant dans les poteaux | 49 |
| III.4.6. | Les moments dans les poutres | 50 |

| | |
|---------------------------|----|
| III.5. Conclusion | 50 |
| Conclusion Générale | 51 |
| Bibliographie..... | 53 |
| Annexe | 54 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 Raideurs d'une semelle circulaire..... | 36 |
| Tableau III.2 coefficients de raideur pour une section sous poteau..... | 41 |
| Tableau III.3 Periodes et participation massique sans Interaction sol-structure..... | 43 |
| Tableau III.4 Periodes et participation massique avec Interaction sol-structure | 44 |
| Tableau III.5 Rapport des périodes..... | 45 |
| Tableau III.6 Déplacement des étages avec et sans ISS | 46 |
| Tableau III.7 efforts tranchant à la base avec et sans ISS..... | 47 |
| Tableau III.8 Efforts normale dans les poteaux avec et sans ISS | 48 |
| Tableau III.9 Moment fléchissant dans les poteaux..... | 49 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 effet local de l'interaction sol structure | 16 |
| Figure I.2 spectre à la base de la structure et au champ libre | 17 |
| Figure II.1 méthode de sous-structure ; méthode de frontière. | 23 |
| Figure II.2 Théorème de superposition de Kausel | 24 |
| Figure II.3 Méthode de sous-structure ; Méthode de volume..... | 25 |
| Figure II.4 Méthode des éléments finis..... | 26 |
| Figure II.5 représentation du sol par plusieurs ressorts | 28 |
| Figure II.6 représentation du sol par un ressort concentré..... | 28 |
| Figure II.7 Organigramme de l'interaction sol-structure | 29 |
| Figure III.1 situation géographique de l'ouvrage. | 32 |
| Figure III.2 Vue en plan de rez-de-chaussée | 33 |
| Figure III.3 Dimension en élévation du bâtiment. | 34 |
| Figure III.4 Disposition des voiles dans le bâtiment..... | 35 |
| Figure III.5 Méthode de demi-espace | 36 |
| Figure III.6 semelle circulaire..... | 37 |
| Figure III.7 Dimensions L et B d'une section rectangulaire | 37 |
| Figure III.8 facteur de forme α pour une section rectangulaire. [7]..... | 38 |
| Figure III.9 Ancrage D de la fondation..... | 38 |
| Figure III.10 Facteur β pour une section rectangulaire. [7] | 39 |
| Figure III.11 Schéma récapitulatif de la transformation d'une section circulaire à une section rectangulaire. | 40 |
| Figure III.12 Modélisation par Sap2000..... | 42 |
| Figure III.13 graphe des déplacements des étages pour Ex dans la direction x..... | 47 |

Liste des Symboles

A : Coefficient d'accélération de zone

B : Largeur de la semelle

D : Ancrage de la fondation

E : Module de Young dynamique

E : Charges sismiques

G : Module de cisaillement dynamique

H : hauteur du bâtiment

K : Raideurs des ressorts

L : longueur de la semelle

M : Moment fléchissant de calcul

N : Effort normal de calcul

R : Rayon équivalent

R_x : Rotation suivant « x »

T : Périodes

U : Translation

V : Effort tranchant

V : Vitesses des ondes de cisaillement

ν : Coefficient de poisson (ν)

ρ : Poids volumique

α : facteur correcteur de forme

β : facteur correcteur d'ancrage

Liste des Abréviations

BAEL : Béton Armé à l'Etat Limite

CBA : Règles de Conception et de calcul des structures en Béton Armé

DTR : Document Technique Règlementaire Algérien

ELU : Etat limite ultime

ELS : Etat limite de service

ISS : Interaction sol-structure

RDC : Rez-de-chaussée

RPA : Règlement Parasismique Algérien

SS : Sous-sol

Introduction Générale

L'hypothèse couramment admise par les codes parasismiques est celle d'un encastrement parfait de la fondation du bâtiment dans un sol indéformable, dont tous les points sont animés du même mouvement. Cette hypothèse est manifestement relativement fautive pour des bâtiments de masse importante construits sur des terrains non rocheux. L'influence de la déformabilité du sol peut être estimée de façon simple par plusieurs méthodes.

L'interaction sol-structure est souvent négligée par les ingénieurs lors de l'analyse et du design d'un bâtiment. Pourtant, ce phénomène a beaucoup d'influence lors de l'étude du comportement d'un bâtiment. Le premier aspect est la sécurité, puisque la répartition des efforts dans les membrures peut être différente suite à une analyse qui tient compte de l'interaction sol-structure. De plus, l'utilisation normale peut aussi être affectée par des problèmes de fissurations causées par les tassements différentiels.

Dans la présente étude nous commencerons par un rappel sur les caractéristiques dynamique du sol, des généralités sur l'interaction sol-structure et les méthodes utilisées par les ingénieurs. Ensuite nous exposerons la méthode de demi-espace (half-space) qui est utilisée dans cette étude pour le calcul des raideurs des ressorts, avec un cas d'étude qui est un bâtiment R+10 avec un sous-sol situé à Tipaza avec modélisation par le logiciel SAP2000 et les comparaisons des différents efforts dans les membrures pour une analyse qui considère l'interaction sol-structure et une seconde qui n'en tient pas compte de cette interaction.

Chapitre I

Généralités sur l'interaction sol-structure

Chapitre I. Généralités sur l'interaction sol-structure

I.1. Introduction

On entend généralement, par interaction sol-structure l'étude au comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique, Littéralement l'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol lors d'un séisme du fait de la présence de l'ouvrage ou la modification du mouvement de l'ouvrage lors d'un séisme du fait de la présence du sol , Cette interaction est bien entendu plus ou moins importante suivant la nature du sol , les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation. La nécessité d'étudier la réponse sismique d'un ouvrage, en ne le considérant pas isolément mais comme partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures avoisinantes, rend les analyses d'interaction sol-structure impérieuses pour une part grandissante d'ouvrages importants comme les barrages, centrales nucléaires, réservoirs de gaz naturel liquéfié.

I.2. Caractéristiques dynamiques des sols

Par hypothèse, à l'échelle des dimensions en plan des fondations, le sol est supposé être un milieu semi-infini, homogène et isotrope, de comportement élastique et linéaire, les couches du sol étant supposées horizontales. Le sol est défini par ses caractéristiques mécaniques :

- le module dynamique d'Young E , ou le module transversal G dynamique.
- le coefficient de Poisson dynamique ν .
- la masse volumique ρ .
- l'amortissement interne de frottement.
- un sol stratifié représenté par différentes couches, définies par leur épaisseur et leurs caractéristiques mécaniques. Ces caractéristiques sont compatibles avec les déformations induites par le séisme et permettent de définir un sol homogène équivalent.

Généralement, la connaissance des caractéristiques de sol est assez imprécise. L'hypothèse faite sur l'homogénéité est rarement vérifiée : les sols sont la plupart du temps stratifiés et leurs propriétés mécaniques augmentent généralement avec la profondeur ; De plus, il

arrive que la stratigraphie d'un site soit trop contrastée pour permettre de définir un module de sol équivalent.

I.3. Catégorie d'interaction

I.3.1. La structure est supportée par le sol

Pour distinguer entre les deux en tenant pas compte de l'analyse d'interaction sol-structure, la première des choses qui concerne beaucoup les ingénieurs c'est l'estimation de la magnitude du déplacement relative, la deuxième chose c'est le calcul de distribution des forces et des contraintes dans toute la structure.

Pour cette catégorie on s'intéresse à l'influence du sol sur l'analyse dynamique de la structure on a pour cette catégorie les bâtiments les ponts et toutes les structure qui sont supporter par le sol. On a deux types des structures des structures rigides et des structures flexibles

a. Les structures flexibles

La structure est considéré flexible si la cette dernière ne peux pas commodité le mouvement, dans ce cas on peut mettre le mouvement des joins des articulations pour permettre une articulation ou une flexibilité global. [1]

b. Les structures rigides

La structure est designer pour distribuer les charges et avoir un déplacement acceptable.

I.3.2. La structure est supportée par le sol

Pour cette catégorie on a les tunnels les trémies et toutes les structures enterrés qui support le sol.

I.4. Description d'Interaction Sol-Structure

Au cours d'une analyse dynamique d'une structure située sur un dépôt sol on pourrait utiliser l'accélérogramme en champ libre comme mouvement à la base de la structure tout en considérant cette base rigide.

Cette approche, bien qu'elle est utilisé souvent en pratique par les ingénieurs des bureaux d'études, mais elle est douteuse particulièrement si la structure repose sur un dépôt de sol meuble très mou. En effet, la présence de la structure modifie le mouvement du sol

sous la fondation, la raison de ce changement tient au fait que le sol et la structure interagissent pour créer un nouveau système dynamique combiné, Cette interaction se nomme Interaction Sol-Structure (ISS).

Il existe plusieurs raisons de considérer l'interaction sol-structure

- Dans le but d'inclure dans les modes les mouvements à la base de la structure : la rotation à la fondation, le décollement de la semelle,...
- Pour obtenir une meilleure approximation de la période de vibration du système couplé qui sera plus longue que la période du système couplé qui sera plus longue que la période du système avec base rigide.

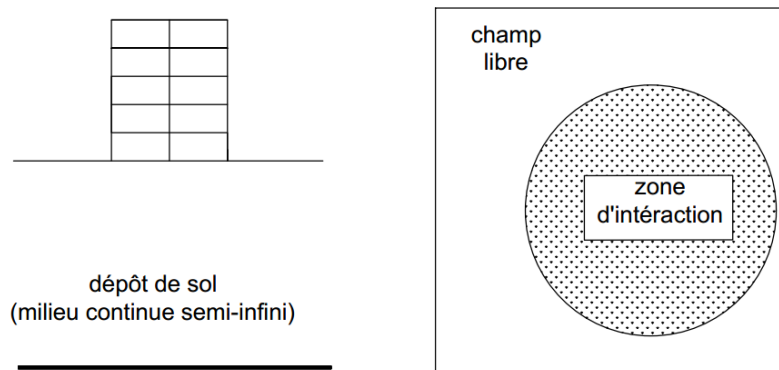


Figure I.1 effet local de l'interaction sol structure

La nécessité de définir le mouvement du sol, non pas seulement en un point comme dans le cas d'un mouvement en bloc, mais dans l'ensemble du volume concerné par le phénomène d'interaction sol-structure, au moyen d'un modèle d'ondes, La caractérisation du mouvement en termes de spectre de réponse ou accélérogramme est en général relative au mouvement d'un point de la surface en site vierge, c'est-à-dire avant la construction de l'ouvrage étudié, ce qu'on appelle le mouvement en champ libre (free-field grounds motion), La donnée de ce mouvement doit être complétée par l'établissement d'un modèle d'ondes définissant le mouvement de tous les points du sol et compatible avec la spécification en champ libre à la surface.

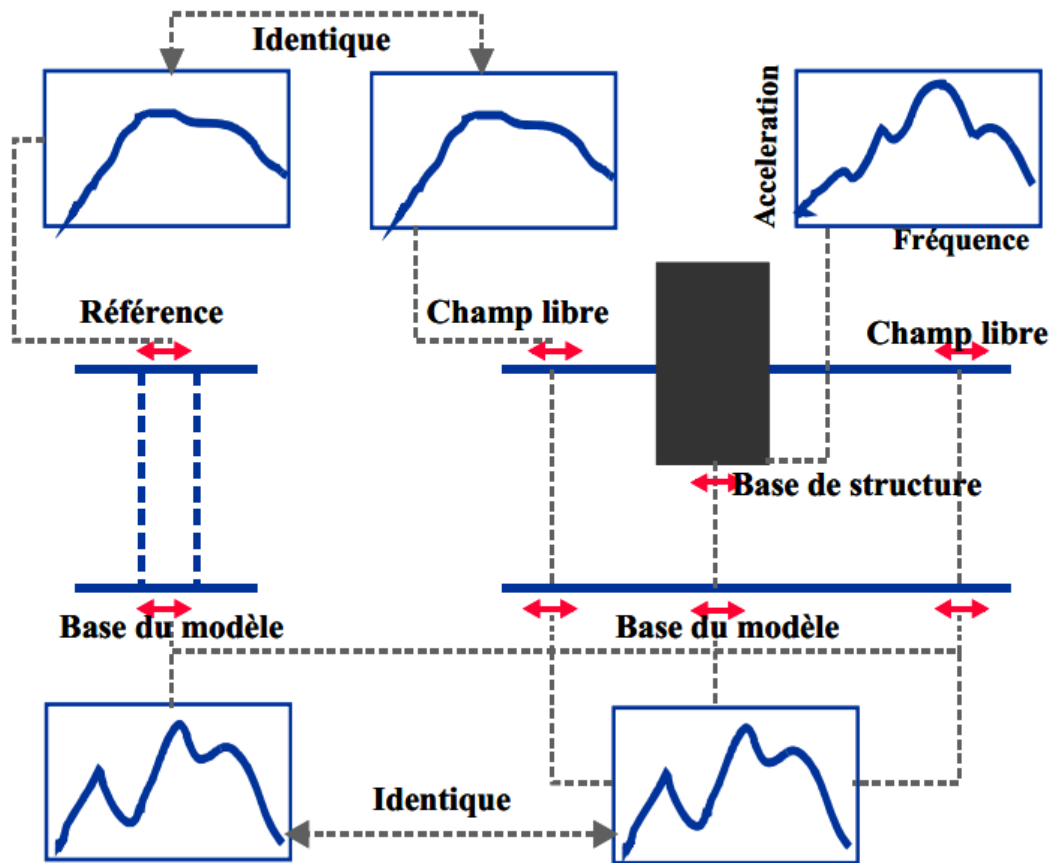


Figure I.2 spectre à la base de la structure et au champ libre

La différence, parfois très sensible, qui peut exister entre le mouvement en champ libre résultant de l'étude d'aléa sismique et le mouvement réel de la fondation de l'ouvrage, compte tenu des effets d'interaction sol-structure ; cette différence est la conséquence, non seulement de la déformabilité du sol mais aussi du couplage entre points du sol imposé par le radier, si celui-ci est suffisamment rigide : ce dernier effet a notamment tendance à filtrer les hautes fréquences du mouvement transmis à l'ouvrage par rapport à celui en champ libre ; la réalité d'un tel filtrage est confirmée par la comparaison des enregistrements obtenus à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment, sa prise en compte dans les modèles de calcul n'est toutefois pas entrée dans la pratique courante.

I.5. Types d'interaction

Il est classique de distinguer deux formes de l'interaction sol-structure : interaction cinématique et interaction inertielle.

I.5.1. Interaction cinématique

Elle correspond à la modification du champ d'ondes incident (mouvement en champ libre) du fait de la présence de la fondation, en tenant compte de la forme et de la rigidité de celle-ci, mais en considérant que sa masse est nulle. Cette forme d'interaction est importante pour les structures raides enterrées dans un sol mou négligeable pour les structures qui ont des fondations superficielles.

I.5.2. Interaction inertielle

Elle correspond aux effets des forces d'inertie associées au mouvement résultant de la prise en compte de l'interaction cinématique et aux masses réelles de la fondation et des superstructures. [2]

I.6. Nécessité de modéliser le sol :

Le mouvement sismique est le mouvement à la surface du sol en champ libre, en l'absence de toute construction, et défini à partir d'enregistrements réels des mouvements d'un point du sol. Or, les enregistrements réels actuellement disponibles ont presque tous été obtenus en surface ou à très faible profondeur. Le mouvement sismique donné, déduit de tels enregistrements, est donc essentiellement représentatif du mouvement d'un point au voisinage de la surface.

La réponse de la structure à ce mouvement sismique dépend de la nature de ce dernier, des propriétés dynamiques de l'ouvrage et de celles du sol. Il y a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur.

Il faut rappeler que c'est essentiellement la structure que l'on souhaite dimensionner et non le milieu extérieur. On souhaite, par conséquent, limiter le plus possible l'interaction avec le sol, à la fois pour des raisons de complexité de l'analyse à effectuer et de coût.

La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de l'ISS est de considérer la structure parfaitement encastrée dans le sol, hypothèse d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure ; laquelle peut donc être considérée

comme encastree (cas de bdtiments courants, rgtuliers, faisant l'objet des mthodes de calcul simplifi'es).

Il n'y a pas non plus d'interaction dans le cas d'un bdtiment rigide sur un sol rocheux, parce qu'en pratique, les d'formations du sol comme celles au droit du bdtiment sont n'gligeables devant les d'formations du bdtiment. Ce constat est d'autant plus valable que si la lecture spectrale est sur le palier.

En g'nral, et plus particuli'ement dans le cas de bdtiments massifs sur des sols moyennement ou faiblement raides, il y a une intervention non n'gligeable du sol et une modification de la r'ponse de la structure. [3]

I.7. Cons'quence de l'interaction sol-structure

• Un allongement de la p'riode de vibration du 1er mode notamment, qui peut provoquer une variation en plus ou en moins de la valeur de l'acc'l'ration selon la zone o' l'on se situe sur le spectre 'lastique.

- Un amortissement non n'gligeable (amortissement radiatif + amortissement propre au mat'riau - sol) puisque toujours sup'rieur ' celui des mat'riaux de la structure. Ne pas le prendre en compte conduit ' surestimer la r'ponse.
- Une rotation de la fondation qui peut modifier sensiblement le calcul de la d'form'ee modale et donc la r'partition des acc'l'rations sur la hauteur du bdtiment.
- Le mouvement du sol ' la base du bdtiment est suppos' identique ' celui du champ libre. Dans les cas courants, on constate toutefois que cette approximation est acceptable.

D'apr's l'Eurocode 8-5, on doit 'tudier les effets de l'interaction sol- structure dans les cas suivants : [3]

- Structures pour lesquelles les effets $P-\Delta$ (effets 2'eme ordre) jouent un r'le significatif.
- Structure avec fondations massives ou profondes, comme les piles de ponts, les silos ou tout ouvrage industriel 'quivalent.
- Structures hautes et 'lanc'ees, comme les tours et les chemin'ees.
- Structures support'ees par des sols tr's mous, sols classe S1 avec des vitesses des ondes de cisaillement de $V_s \max < 100$ m/s.

Pour les autres structures, la prise en compte de l'ISS permet en général une réduction des sollicitations par une dissipation au niveau du sol et par une lecture spectrale plus favorable.

La modélisation la plus fréquente de l'ISS suppose que la structure est fondée en surface sur un sol homogène, élastique et horizontal, avec des propriétés mécaniques connues et constantes au cours du séisme, et que le mouvement sollicitant la structure soit des ondes de volume se propageant verticalement à partir d'un substratum horizontal.

Le solide élastique est supposé avoir les mêmes modules de traction et de compression en tout point du sol, et notamment au centre et sous les bords du radier, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

L'ensemble de ces incertitudes fait que le calcul de l'ISS reste encore approximatif et donc une certaine prudence s'impose à l'exploitation des résultats obtenus. Par ailleurs, ces incertitudes conduisent à paramétrer les caractéristiques du sol et à prendre l'enveloppe des résultats.

Dans telles conditions, l'ingénieur est souvent amené à raisonner de manière différente plus intuitive et pragmatique, pour tenter de trouver une solution satisfaisante au problème si complexe de l'ISS.

On ne doit donc pas utiliser un modèle comportant un encastrement parfait à la base si de grandes déformations du sol sont prévisibles. C'est ainsi, par exemple, le cas de bâtiments très rigides, fondés sur un sol de résistance mécanique moyenne ; les déformations les plus importantes peuvent alors se produire dans le sol plutôt que dans la structure. On est ainsi amené à concevoir des modèles dans lesquels le sol est représenté par des ressorts ou des éléments finis.

Les méthodes courantes d'études de l'ISS font appel à une représentation simplifiée des actions sismiques, du sol et de l'ouvrage.

Pour la modélisation, on peut intégrer dans un même modèle le sol associé (modélisé par des ressorts) et la structure. C'est de loin la méthode la plus utilisée.

chapitre II Technique d'analyses de l'interaction
sol-structure

Chapitre II. Technique d'analyses de l'interaction sol-structure

II.1. Introduction

Il existe deux méthodes classiques pour tenir compte de l'interaction sol-structure dans l'analyse dynamique

- La méthode de la sous-structure.
- La méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis est la plus directe mais souvent la plus complexe, en particulier à cause de son temps d'exécution.

La méthode de la sous-structure est la plus utilisée par les ingénieurs grâce à sa facilité par rapport à la dernière.

II.2. La méthode de la sous-structure

Cette catégorie de méthodes fait appel au principe de superposition. L'idée de base est d'analyser le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives ; chacune de ces étapes est réputée plus facile à résoudre, du point de vue de la modélisation ou du traitement, que le problème global. Cette méthode est particulièrement puissante quand une partie du système - la fondation par exemple - a une géométrie simple alors que la structure requiert une analyse tridimensionnelle. Elle peut également présenter des avantages pour identifier la part relative de chaque composant (interaction cinématique ou inertielle) contribuant au phénomène global d'interaction.

Les différentes méthodes de sous-structure se différencient par la décomposition en sous-modèles du modèle global , on distingue les méthodes dites de frontière et les méthodes de volume.

II.2.1. méthodes de frontière

Le modèle global sol-structure est divisé en deux sous-modèles représentant la structure et le sol, la compatibilité des efforts et déplacements est écrite le long de la frontière séparant les deux sous-structures

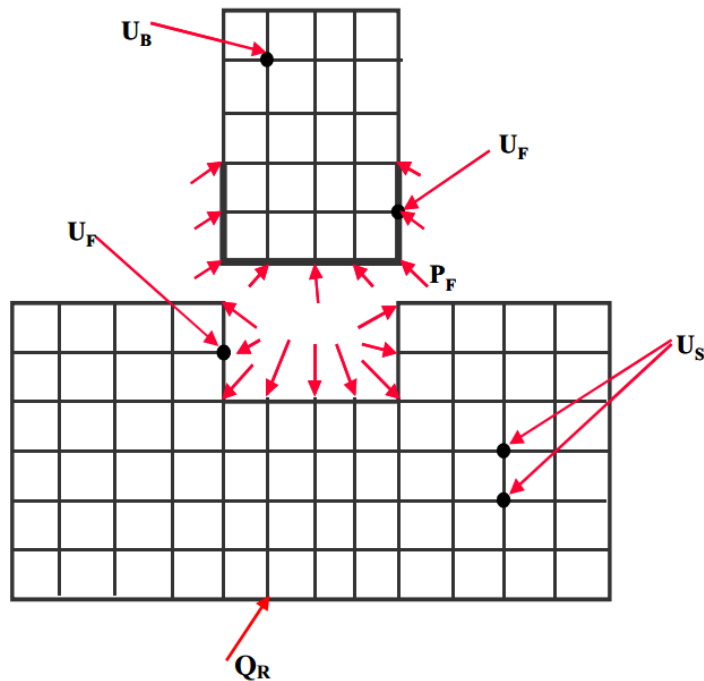


Figure II.1 méthode de sous-structure ; méthode de frontière.

Le modèle global sol-structure est divisé en deux sous-modèles représentant la structure et le sol, la compatibilité des efforts et déplacements est écrite le long de la frontière séparant les deux sous-structures

a. Frontière rigide

Supposant que la fondation soit infiniment rigide ; les composantes du vecteur déplacement peuvent s'exprimer en termes d'un mouvement de corps rigide de la fondation, défini par rapport à un point quelconque de celle-ci (ce qu'on appelle généralement le point maître ou le nœud maître) on peut considérer le centre de gravité géométrique de sa base comme le point maître.

La réponse de la structure est obtenue en résolvant trois étapes successives

- détermination du mouvement de la fondation rigide sans masse soumise à la même sollicitation sismique que la structure.
- La détermination de l'impédance de la fondation rigide.

- Le calcul de la réponse de la structure reliée aux ressorts d'impédance, déterminés à l'étape précédente, et soumise à la base de ces ressorts au mouvement calculé à la première étape.

La première étape constitue la résolution du problème de diffraction, par la fondation, du champ incident (mouvement du champ libre) ; la deuxième correspond à la détermination des impédances et la dernière est un problème de calcul de structures classique.

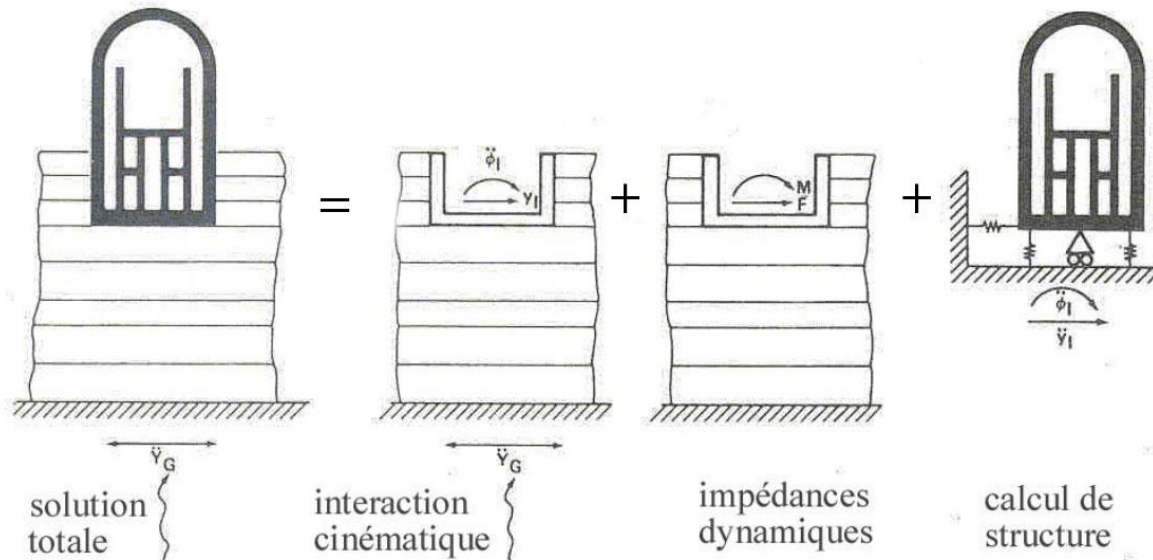


Figure II.2 Théorème de superposition de Kausel

L'intérêt de cette décomposition apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

Le problème de diffraction existe toujours sauf pour une structure fondée en surface et soumise à la propagation verticale d'ondes de volume ; dans ce cas, la résolution de l'étape 1 est identique à celle de la réponse d'un profil de sol en champ libre puisque l'interaction cinématique est nulle. Dans le cas plus général de structures enterrées, KAUSEL et AL [1978] ont proposé une méthode approchée permettant d'évaluer l'interaction cinématique sans avoir recours au calcul complet. La solution à la deuxième étape peut être évitée, pour certaines configurations, en utilisant les résultats de fonctions d'impédances publiés dans la littérature. La troisième étape est, en tout état de cause, indispensable ; elle est cependant plus familière aux ingénieurs car elle procède de l'analyse dynamique classique des structures. [4]

b. Frontière flexible

Dans le cas général, la fondation n'est pas infiniment rigide ; le problème à résoudre est plus complexe par rapport au problème précédent, La structure reliée aux impédances de sol, est soumise à un système de sollicitations multiples à chacune de ses liaisons avec le sol. Dans le principe, la résolution des trois mêmes étapes que précédemment est nécessaire :

- Diffraction du champ libre.
- Impédance.
- Réponse de la structure.

Mais chacune est plus complexe que dans le cas d'une fondation rigide. En particulier, on ne peut plus avoir recours à des solutions publiées pour la détermination des impédances.

II.2.2. Méthode de volume

La méthode de volume permet d'éviter la résolution du problème de diffraction. L'interaction entre le sol et la structure est prise en compte, non seulement à l'interface sol-structure, mais à tous les nœuds de la structure sous la surface du sol [LYSMER et Al, 1982] comme cela apparaît par la division en sous-structures définie dans la figure I.5.

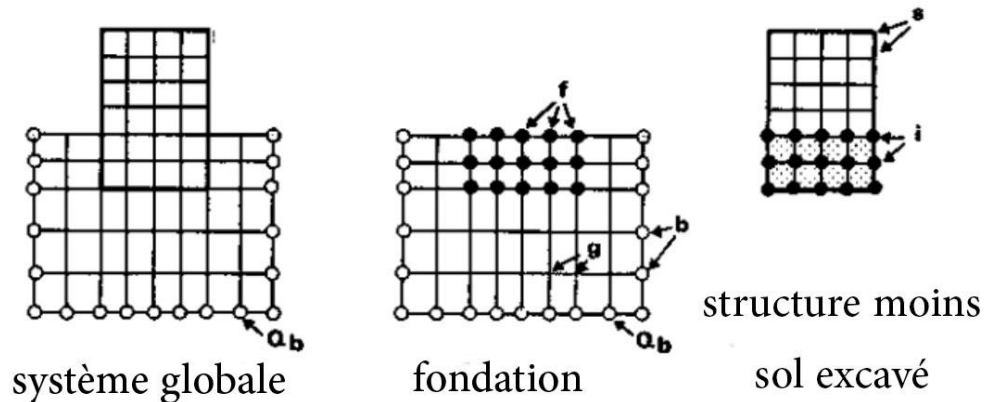


Figure II.3 Méthode de sous-structure ; Méthode de volume

Cette méthode a été incorporée dans un programme de calcul SASSI [LYSMER et al, 1981] qui permet de traiter le problème d'interaction sol-structure / le caractère tridimensionnel du problème peut être pris en compte, à un coût raisonnable, si la stratigraphie reste relativement régulière autour de la structure. [5]

II.3. Méthode des éléments finis

Pour s'affranchir de cette étape, GUPTA et Al [1980] ont développé une méthode 'éléments finis' qui est dans son principe, consiste à séparer le sol en un champ libre et un champ lointain est modélisé à l'aide d'une matrice d'impédance. En d'autres termes, le concept de sous-structures est étendu de façon à inclure le champ proche dans le modèle de structure, Le problème consiste alors à définir les coefficients de la matrice d'impédance du champ lointain.

GUPTA et Al ont résolu ce problème à l'aide d'une méthode d'identification permettant de s'assurer que le modèle hybride redonne les impédances, connues, d'un disque circulaire en surface d'un semi-espace.

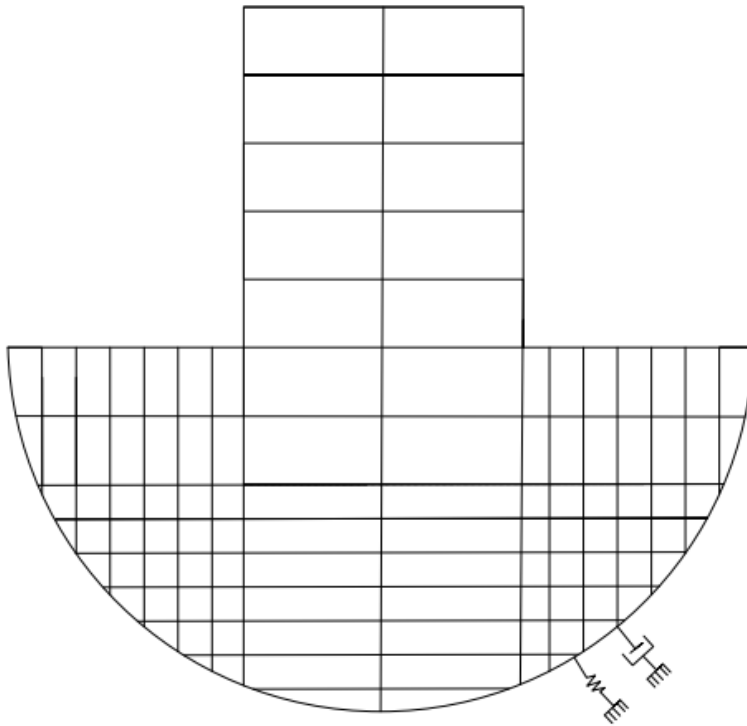


Figure II.4 Méthode des éléments finis

La difficulté de la méthode réside dans l'obtention, le long de la frontière séparant le champ proche du champ lointain, de la solution du problème de diffraction du champ incident. GUPTA et al ont négligé cet aspect en admettant un mouvement uniforme, égal à celui du champ libre en surface, tout le long de la frontière. De toute évidence, cette hypothèse constitue une approximation très grossière qui limite considérablement l'intérêt de la méthode. [5]

II.3.1. Modélisation géométrique du milieu

La formulation en éléments finis est classique, il convenait de respecter certaines conditions pour obtenir des solutions correctes. Ces conditions ont trait à la formation de la matrice de masse [M], aux dimensions des éléments du maillage ; dans le cas de schématisation bidimensionnelle, voir tridimensionnelle, l'extension du modèle a également une importance vitale.

II.3.2. Formation de la matrice masse

Cette matrice peut être soit à masses concentrées, la masse de l'élément étant simplement concentrée à ses nœuds, soit à masse répartie. Dans ce dernier cas, les forces d'inertie de l'élément sont en tout point compatible avec le champ de déplacements à l'intérieur de l'élément, alors que dans le premier cas les forces d'inertie en rotation sont surestimées.

Dans le cas unidimensionnel, une formulation à masses concentrées sous-estime les fréquences propres du système alors que la formulation à masse répartie surestime ces fréquences. Ces constatations restent valables dans les cas bi ou tridimensionnels et conduisent à retenir une matrice masse constituée pour moitié de masses concentrées et pour moitié de masse répartie [LYSMER et al, 1974, 1975]. [5]

II.4. Représentation du sol par des ressorts :

Le sol est représenté par un système de ressorts qui relie le ou les nœuds représentatifs de la fondation de l'ouvrage (figures II.5 et II.6) au repère de sol en champ libre. La modélisation de l'ISS par ressorts concentrés (figure II.6) est plus simple pour l'analyse dynamique d'ensemble (hypothèse du radier rigide), mais nécessite par la suite une modélisation spécifique du radier. La modélisation de l'ISS par ressorts répartis (figure II.5) est plus complexe, mais les efforts obtenus sont directement exploitables pour le dimensionnement du radier.

fondation

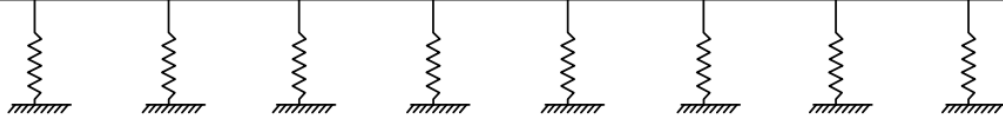


Figure II.5 représentation du sol par plusieurs ressorts

fondation



Figure II.6 représentation du sol par un ressort concentré

II.5. Organigramme de l'étude d'une structure dans le cas de prise en compte de l'interaction sol-structure

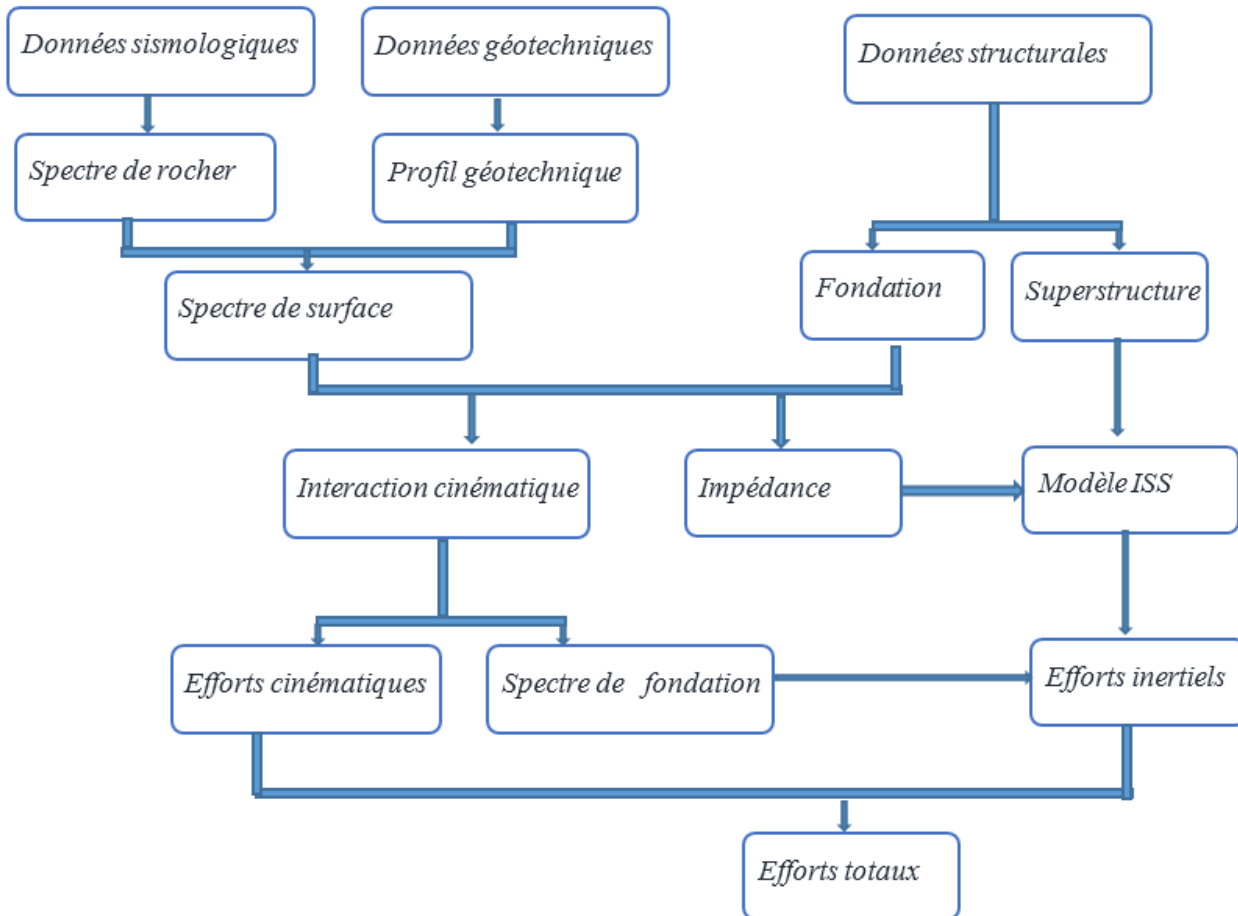


Figure II.7 Organigramme de l'interaction sol-structure

II.6. Comparaisons des différentes méthodes :

Un des arguments majeurs avancés pour l'utilisation des méthodes de sous-structure, de préférence aux méthodes globales, est leur facilité d'emploi alliée à un coût moindre. Cela est certainement vrai pour des ouvrages fondés en surface, soumis à la propagation verticale d'ondes de volume dans ce cas, on a vu que l'interaction cinématique est nulle, supprimant l'étape de résolution du problème de diffraction, et que des solutions analytiques, ou publiées, existent pour le problème d'impédance. Si par ailleurs le mouvement de référence est défini, à la surface du sol, la seule étape reste l'analyse dynamique de la structure. Par ailleurs, les méthodes de sous-structures présentent l'avantage de permettre certaines modifications sans qu'il soit nécessaire de reprendre toute l'analyse, une modification des caractéristiques de la structure ne requiert qu'une nouvelle analyse dynamique de la structure ; une modification des caractéristiques du séisme de projet permet de conserver la solution du problème d'impédance.

Dès que l'ouvrage à étudier est partiellement ou totalement enterré, la résolution du problème de diffraction devient complexe ; la solution rigoureuse est aussi délicate à obtenir que la solution globale du problème. Des méthodes simplifiées pour prendre en compte cette interaction cinématique ont cependant été proposées dans le cas de fondations rigides [KAUSEL et al, 1978 \$ HALL- KISSENPENNIG, 1975]. [5]

II.7. Conclusion

Les considérations précédentes montrent que l'interaction sol-structure est un domaine des spécialistes, Le fait qu'elle soit délibérément ignoré dans la plus part des codes parasismiques résulte sans doute beaucoup de questions, , Il ne parait guère possible, en effet, de codifier de façon simple ses règles de calcul, de manière à permettre aux ingénieurs des bureaux d'étude de la traiter de façon fiable, Le contenu de ce chapitre, vise simplement à fournir une explication des méthodes les plus simples et leurs limites de validité.

Chapitre III

Cas d'étude d'un bâtiment R+10 avec sous-sol

Chapitre III. Cas d'étude d'un bâtiment R+10 avec sous-sol

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent j'ai cité plusieurs méthodes de représentation de l'interaction sol-structure. Dans ce chapitre je vais utiliser une parmi les méthodes des sous-structure qui est la méthode de demi-espace (semi-space) pour la représentation de l'interaction sol-structure.

Je vais calculer tous d'abord les raideurs des ressorts qui vont représenter mon sol avec la méthode de demi-espace (half-space) et puis je modélise la structure avec le logiciel SAP2000 et j'analyse les résultats.

III.2. Présentation de l'ouvrage

Notre étude porte sur le dimensionnement et le calcul au séisme d'un bâtiment appartenant au projet présenté dans le projet de fin d'étude. Ce bâtiment comporte 12 niveaux (R+10+Sous-sol) à usage d'habitation.



Figure III.1 situation géographique de l'ouvrage.

Selon le règlement parasismique algérien (RPA 99 version 2003) mon bâtiment est situé : en zone III (wilaya de Tipaza) (Fig. III.1). [6]

Il appartient au groupe d'usage 2 (ouvrage courant ou d'importance moyenne). [6]

III.2.1. Dimensions en plan

En plan le bâtiment a une forme rectangulaire avec une largeur de 19,6 m et une longueur de 22,7 m. (Fig. III.2)

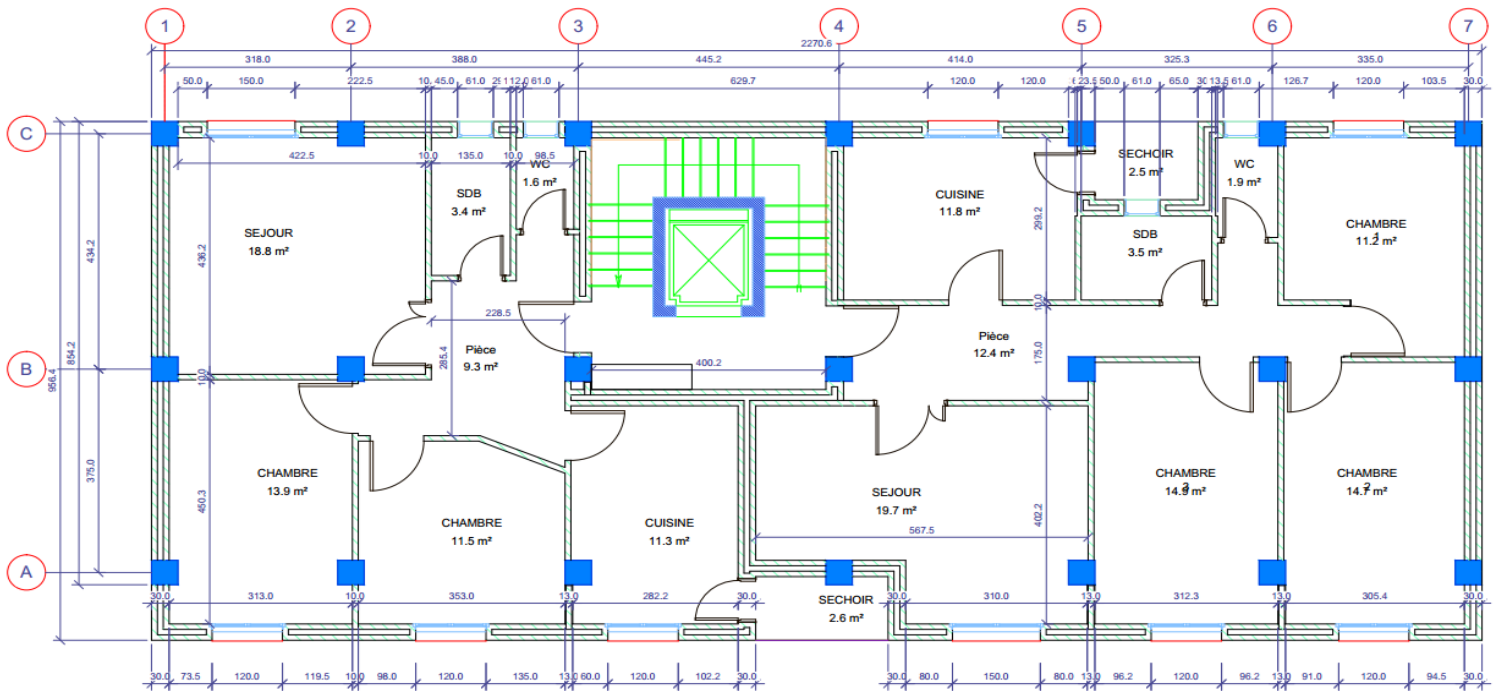


Figure III.2 Vue en plan de rez-de-chaussée

III.2.2. Dimensions en élévation

En élévation le bâtiment a une hauteur de 34,68 mètres avec une hauteur d'étage de 3,06 mètres et un sous-sol de 2.04 mètres à partir du niveau moyen du sol.

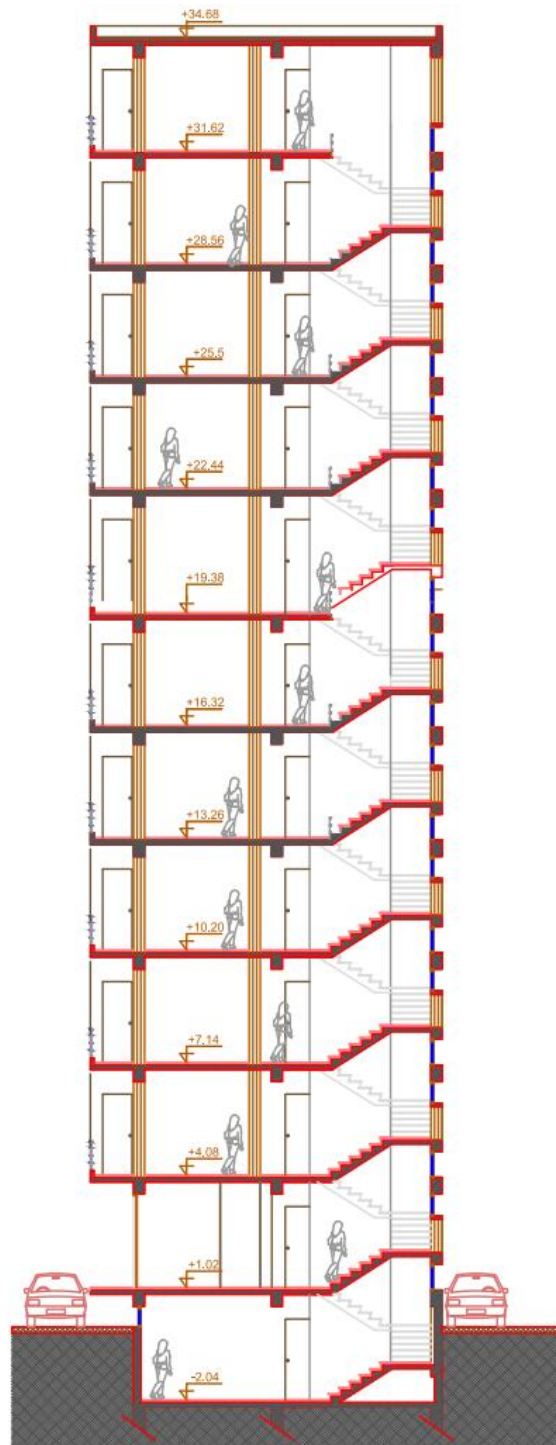


Figure III.3 Dimension en élévation du bâtiment.

III.2.3. Système structural

La structure choisie est contreventée que par des voiles pour mieux reprendre les efforts sismiques et pour une meilleure rigidité.

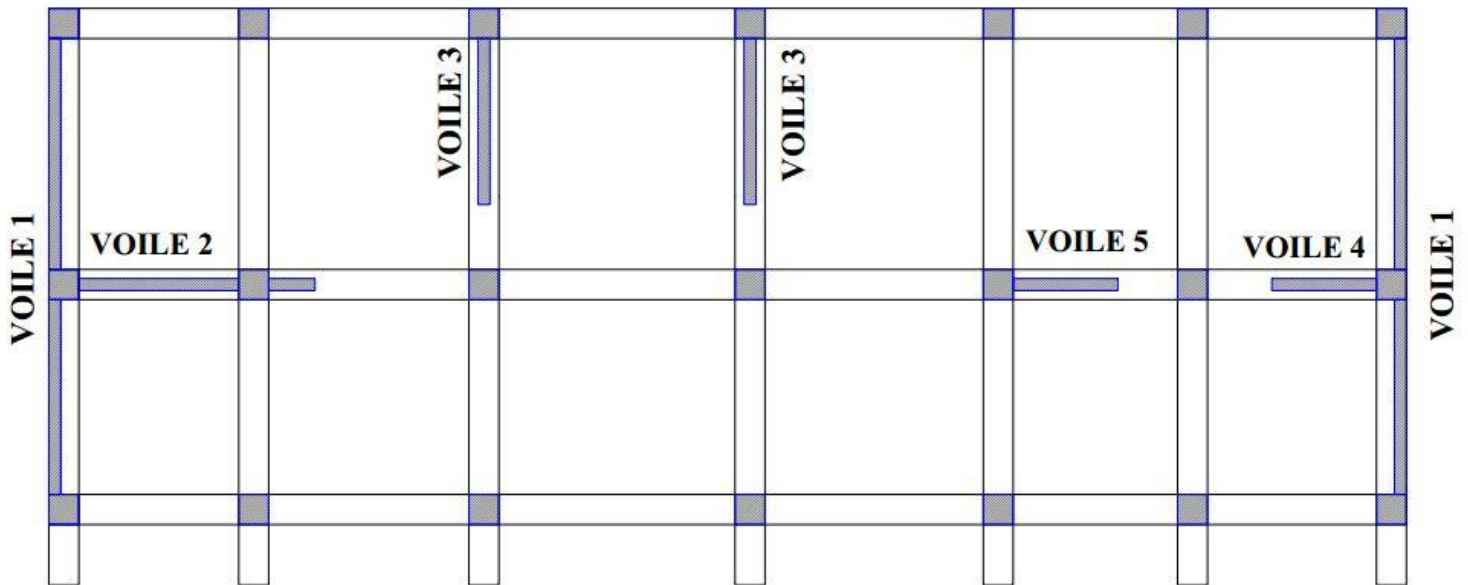


Figure III.4 Disposition des voiles dans le bâtiment

III.3. Présentation de la méthode de demi-espace

La méthode utilisée pour les calculs des raideurs : est la méthode de « half-space », Cette méthode sert au calcul des raideurs pour une semelle circule et puis faire des transformations pour aller aux semelles rectangulaires.

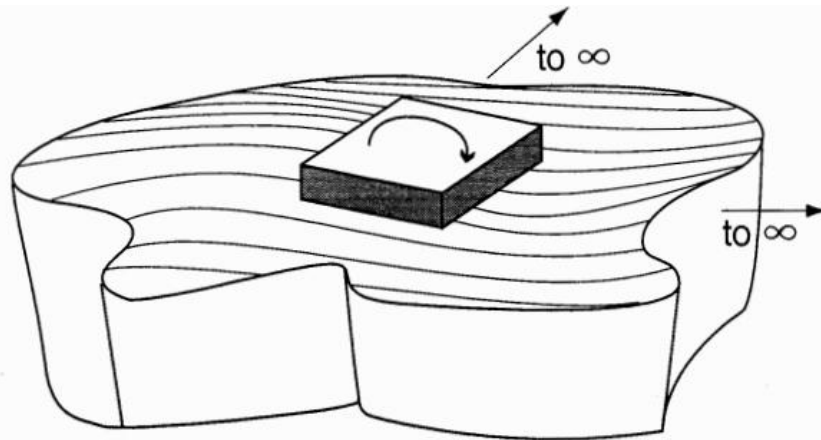


Figure III.5 Méthode de demi-espace

III.3.1. Raideur d'une Semelle circulaire

Les formules pour calculer les raideurs d'une semelle circulaire dans les différentes directions sont données dans le tableau III.1 [7]

Tableau III.1 Raideurs d'une semelle circulaire.

| Direction | Rayon équivalent « R » | La raideur « K ₀ » |
|-------------------------------|---|-------------------------------|
| Translation verticale « z » | $R_0 = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$ | $\frac{4GR}{1 - \nu}$ |
| Translation horizontale « x » | $R_0 = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$ | $\frac{8GR}{2 - \nu}$ |
| Translation horizontale « y » | $R_0 = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$ | $\frac{8GR}{2 - \nu}$ |
| Torsion | $R_1 = \sqrt[4]{\frac{4BL(4B^2 + 4L^2)}{6\pi}}$ | $\frac{16GR^3}{3}$ |
| Rotation suivant l'axe 1 | $R_2 = \sqrt[4]{\frac{(2B)^3(2L)}{3\pi}}$ | $\frac{8GR^3}{3(1 - \nu)}$ |

| | | |
|--------------------------|---|--------------------------|
| Rotation suivant l'axe 2 | $R_2 = \sqrt[4]{\frac{(2L)^3(2B)}{3\pi}}$ | $\frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$ |
|--------------------------|---|--------------------------|

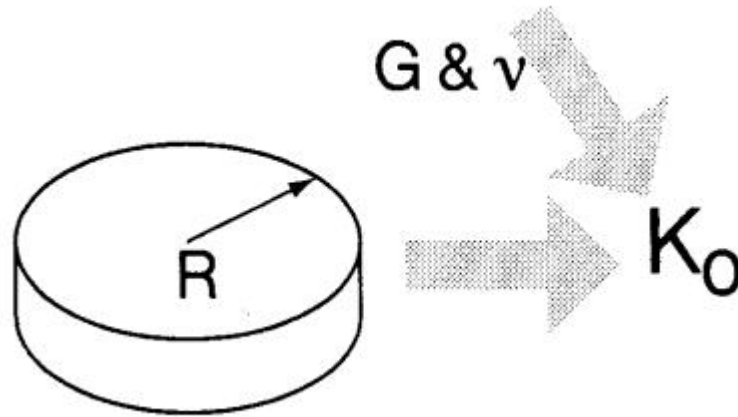


Figure III.6 semelle circulaire

III.3.2. Transformation des raideurs pour une section circulaire à une section rectangulaire

Pour aller de la fondation circulaire à la fondation rectangulaire il faut multiplier le coefficient de raideur « K » par des facteurs correcteurs α et β

Le facteur de forme α dépend de la largeur et la longueur de la fondation sous le poteau

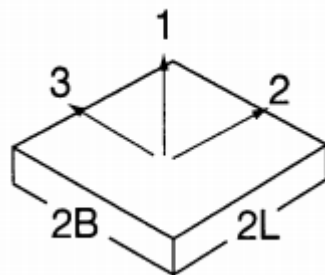


Figure III.7 Dimensions L et B d'une section rectangulaire

La figure III.8 montre la relation entre le facteur de forme α et les dimensions B et L [7]

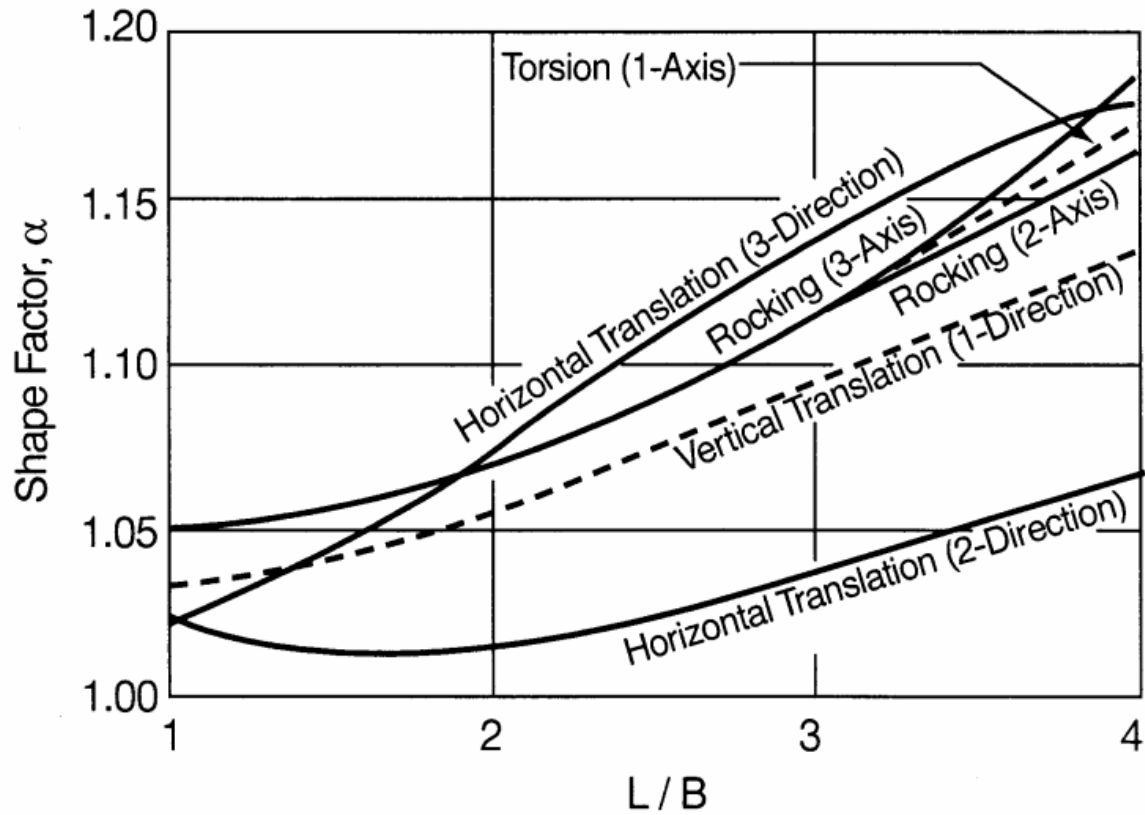


Figure III.8 facteur de forme α pour une section rectangulaire. [7]

Le facteur β dépend de la l'ancrage de la fondation « D » et le rayon R

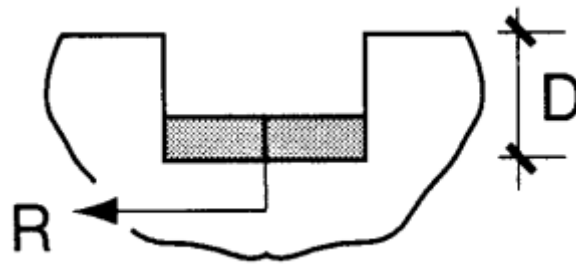


Figure III.9 Ancrage D de la fondation.

La figure III.10 montre la relation entre le facteur β et les dimensions D et R [7]

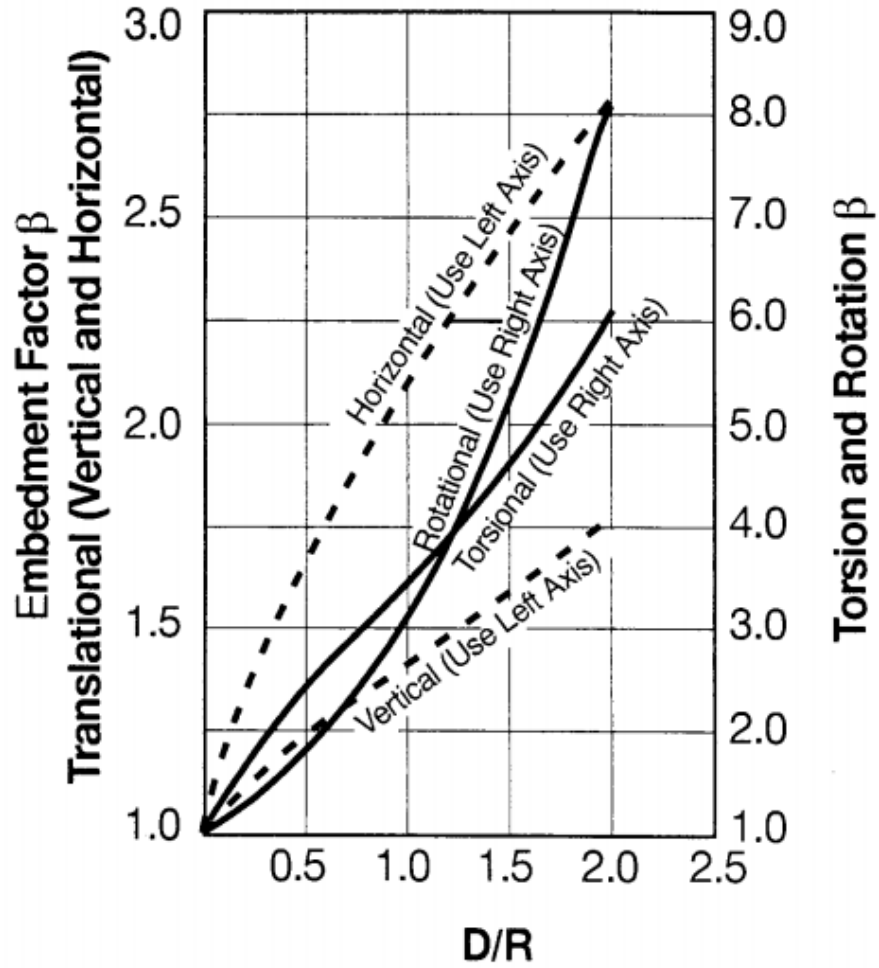


Figure III.10 Facteur β pour une section rectangulaire. [7]

Dans cette figure on a le facteur β pour les trois directions de translation et les trois rotations telles que la torsion est dans un axe a part qui est celle de la droite.

Récapitulatif de la transformation d'une section circulaire à une section rectangulaire [7]

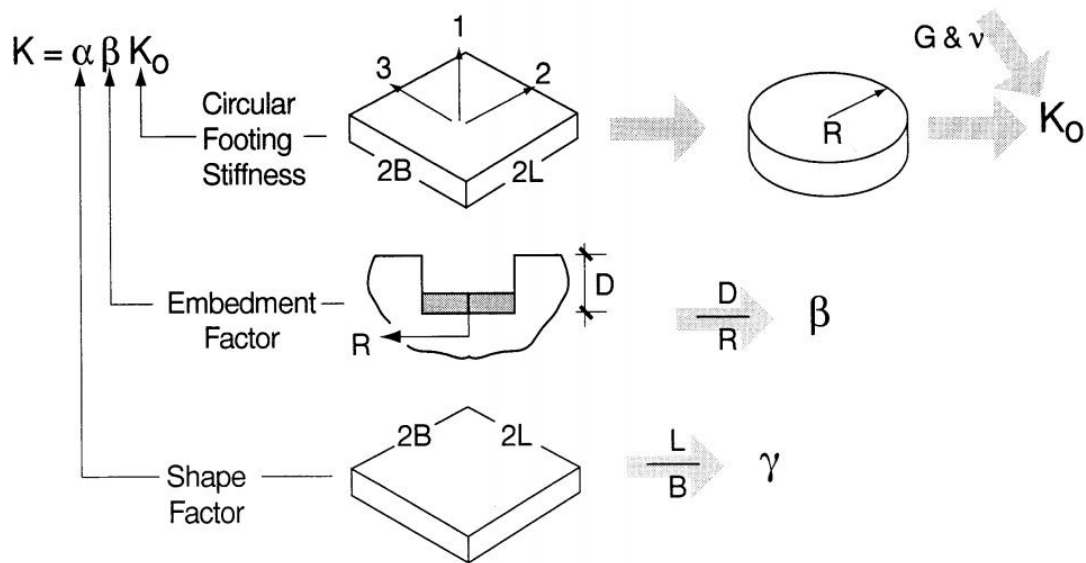


Figure III.11 Schéma récapitulatif de la transformation d'une section circulaire à une section rectangulaire.

III.3.3. Exemple d'étude d'une section rectangulaire

Dans notre cas on prend une section sous poteau de dimensions suivantes

$$\begin{cases} 2B = 4 \\ 2L = 4.3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} B = 2 \\ L = 2.15 \end{cases}$$

Translation vertical « z »

$$R_0 = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2 \times 2.15}{\pi}} = 2.34 \text{ m}$$

$$K_0 = \frac{4GR}{1-\nu} = \frac{4 \times 100000 \times 2.34}{1-0.33} = 1397014.925 \text{ KN/m}$$

Pour une valeur de $\frac{L}{B} = 1.08$ on a $\begin{cases} \alpha = 1.03 \\ \beta = 1.30 \end{cases}$

$$K_v = \alpha \times \beta \times K_0 = 1.03 \times 1.3 \times 1397014.925 = 422756.2746 \text{ KN/m}$$

Les résultats des coefficients des raideurs sont regroupés dans le tableau III.2

Tableau III.2 coefficients de raideur pour une section sous poteau.

| | Raideur KTR1 | KTR2 | KTR3 | Raideur ROT R1 (torsion) | Raideur ROT R2 | ROT R3 |
|----------|--------------|-------------|-------------|-----------------------------|-------------------|-------------|
| R | 2.34045017 | 2.340450172 | 2.340450172 | 2.368837043 | 2.324873792 | 2.410480452 |
| K_0 | 1397283.685 | 1121173.735 | 1121173.735 | 7089315.183 | 5574485.255 | 5001405.584 |
| α | 1.03 | 1.02 | 1.025 | 1.05 | 1.05 | 1.05 |
| β | 1.3 | 2.25 | 2 | 3.8 | 3.5 | 3.85 |
| kv | 1870962.854 | 2573093.722 | 2298406.157 | 28286367.58 | 20486233.31 | 20218182.07 |

III.4. Modélisation par Sap2000

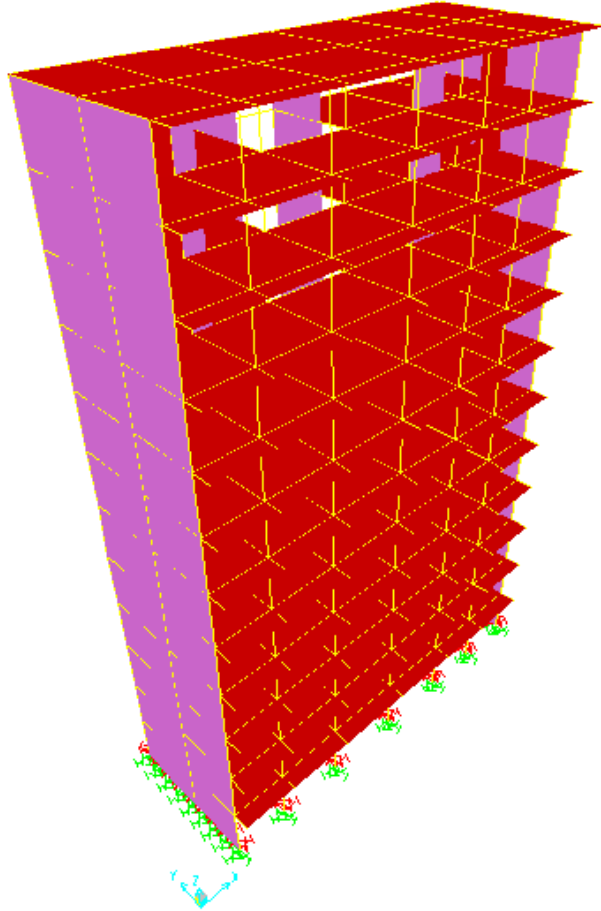


Figure III.12 Modélisation par Sap2000

III.4.1. Périodes et participation massique :

Les tableaux III.3 et III.4 montrent les périodes des 12 premiers modes avec et sans considération de l'interaction sol-structure.

Tableau III.3 Perdiodes et participation massique sans Interaction sol-structure.

| Modes | Périodes | UX | UY | UZ | $\sum UX$ | $\sum Uy$ | $\sum Uz$ | RX | RY | RZ | $\sum RX$ | $\sum Ry$ | $\sum Rz$ |
|---------|----------|-----|-----|-----|------------|------------|-----------|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|
| Mode 1 | 1.089298 | 70% | 0% | 0% | 70% | 0% | 0% | 0% | 68% | 7% | 0% | 68% | 7% |
| Mode 2 | 0.800939 | 0% | 64% | 0% | 70% | 64% | 0% | 92% | 0% | 39% | 92% | 68% | 46% |
| Mode 3 | 0.61516 | 0% | 0% | 0% | 70% | 65% | 0% | 0% | 0% | 19% | 92% | 68% | 65% |
| Mode 4 | 0.309107 | 16% | 0% | 0% | 86% | 65% | 0% | 0% | 0% | 2% | 92% | 68% | 67% |
| Mode 5 | 0.178203 | 0% | 21% | 1% | 86% | 85% | 1% | 1% | 0% | 13% | 93% | 68% | 79% |
| Mode 6 | 0.147814 | 6% | 0% | 0% | 92% | 85% | 1% | 0% | 0% | 0% | 93% | 68% | 80% |
| Mode 7 | 0.138124 | 0% | 0% | 20% | 92% | 86% | 20% | 0% | 4% | 1% | 94% | 72% | 80% |
| Mode 8 | 0.127787 | 0% | 0% | 1% | 92% | 86% | 21% | 0% | 0% | 6% | 94% | 73% | 86% |
| Mode 9 | 0.115047 | 0% | 0% | 0% | 92% | 86% | 21% | 0% | 1% | 0% | 94% | 74% | 86% |
| Mode 10 | 0.105112 | 6% | 0% | 0% | 98% | 86% | 21% | 0% | 0% | 1% | 94% | 74% | 87% |
| Mode 11 | 0.103983 | 0% | 10% | 0% | 98% | 96% | 21% | 0% | 0% | 6% | 94% | 74% | 93% |
| Mode 12 | 0.094537 | 0% | 0% | 60% | 98% | 96% | 81% | 5% | 14% | 0% | 98% | 88% | 93% |

Tableau III.4 Periodes et participation massique avec Interaction sol-structure

| Modes | Périodes | UX | UY | UZ | $\sum UX$ | $\sum Uy$ | $\sum Uz$ | RX | RY | RZ | $\sum RX$ | $\sum Ry$ | $\sum Rz$ |
|---------|----------|-----|-----|-----|------------|------------|-----------|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|
| Mode 1 | 1.174802 | 70% | 0% | 0% | 70% | 0% | 0% | 0% | 68% | 7% | 0% | 68% | 7% |
| Mode 2 | 0.928415 | 0% | 64% | 0% | 70% | 64% | 0% | 92% | 0% | 39% | 92% | 68% | 46% |
| Mode 3 | 0.715496 | 0% | 0% | 0% | 70% | 65% | 0% | 0% | 0% | 19% | 92% | 68% | 65% |
| Mode 4 | 0.323541 | 16% | 0% | 0% | 86% | 65% | 0% | 0% | 0% | 2% | 92% | 68% | 67% |
| Mode 5 | 0.192751 | 0% | 21% | 1% | 86% | 85% | 1% | 1% | 0% | 13% | 93% | 68% | 79% |
| Mode 6 | 0.152647 | 6% | 0% | 0% | 92% | 85% | 1% | 0% | 0% | 0% | 93% | 68% | 80% |
| Mode 7 | 0.149734 | 0% | 0% | 20% | 92% | 86% | 20% | 0% | 4% | 1% | 94% | 72% | 80% |
| Mode 8 | 0.135921 | 0% | 0% | 1% | 92% | 86% | 21% | 0% | 0% | 6% | 94% | 73% | 86% |
| Mode 9 | 0.121703 | 0% | 0% | 0% | 92% | 86% | 21% | 0% | 1% | 0% | 94% | 74% | 86% |
| Mode 10 | 0.111867 | 6% | 0% | 0% | 98% | 86% | 21% | 0% | 0% | 1% | 94% | 74% | 87% |
| Mode 11 | 0.108967 | 0% | 10% | 0% | 98% | 96% | 21% | 0% | 0% | 6% | 94% | 74% | 93% |
| Mode 12 | 0.100905 | 0% | 0% | 60% | 98% | 96% | 81% | 5% | 14% | 0% | 98% | 88% | 93% |

a. Rapport des périodes :

Le tableau III.5 montre le rapport des périodes avec ISS et sans ISS

Tableau III.5 Rapport des périodes.

| Modes | T1 | T2 | $\frac{T1 - T2(ISS)}{T1}$ (%) |
|---------|----------|----------|-------------------------------|
| Mode 1 | 1.174802 | 1.089298 | 7.2781626 |
| Mode 2 | 0.928415 | 0.800939 | 13.730498 |
| Mode 3 | 0.715496 | 0.61516 | 14.023279 |
| Mode 4 | 0.323541 | 0.309107 | 4.4612584 |
| Mode 5 | 0.192751 | 0.178203 | 7.5475614 |
| Mode 6 | 0.152647 | 0.147814 | 3.1661284 |
| Mode 7 | 0.149734 | 0.138124 | 7.75375 |
| Mode 8 | 0.135921 | 0.127787 | 5.9843586 |
| Mode 9 | 0.121703 | 0.115047 | 5.4690517 |
| Mode 10 | 0.111867 | 0.105112 | 6.0384206 |
| Mode 11 | 0.108967 | 0.103983 | 4.5738618 |
| Mode 12 | 0.100905 | 0.094537 | 6.3108865 |

On constate que la déformabilité du sol a un effet notable sur la période de la structure, l'allongement des périodes sont les conséquences les plus faciles à comprendre de la déformabilité du sol, on peut même estimer avec des formules donnée [Jacques Betberder-Matibet] les ordres de grandeur et montrent que cet effet est sensible pour des bâtiments de taille importante fondés sur des sols de caractéristiques mécanique moyenne ou médiocre.

III.4.2. Déplacements des étages

Grace à la flexibilité du bâtiment, le séisme dans la direction x engendre un déplacement d'étages dans la direction x mais il engendre des déplacements dans la direction y et des rotations par rapport au centre de gravité mais ils sont petite par rapport a x donc dans notre cas on analyse que le déplacement dans la direction dans le séisme « x », et vice versa pour le séisme dans la direction y dans le tableau III.6 on remarque que le déplacement à augmenter pour la direction x et la direction y pour l'interaction sol structure grâce à la flexibilité du sol(assimilé par des ressorts).

Tableau III.6 Déplacement des étages avec et sans ISS

| SANS ISS | | | | AVEC ISS | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Direction | U1 (mm) | Direction | U2 (mm) | Direction | U1 (mm) | Direction | U2 (mm) |
| Ex | 0 | Ey | 0 | Ex | 0.036781 | Ey | 0.032575 |
| Ex | 0.93428 | Ey | 0.43381 | Ex | 1.593022 | Ey | 0.93909 |
| Ex | 2.808448 | Ey | 1.32699 | Ex | 4.054263 | Ey | 2.303809 |
| Ex | 5.232176 | Ey | 2.595864 | Ex | 6.931778 | Ey | 3.979313 |
| Ex | 8.065175 | Ey | 4.19373 | Ex | 10.131518 | Ey | 5.928323 |
| Ex | 11.133998 | Ey | 6.067679 | Ex | 13.493849 | Ey | 8.104022 |
| Ex | 14.320512 | Ey | 8.152085 | Ex | 16.919674 | Ey | 10.450917 |
| Ex | 17.583781 | Ey | 10.407545 | Ex | 20.382441 | Ey | 12.935988 |
| Ex | 20.804236 | Ey | 12.782853 | Ex | 23.772256 | Ey | 15.515565 |
| Ex | 23.918881 | Ey | 15.227489 | Ex | 27.036444 | Ey | 18.147647 |
| Ex | 26.92496 | Ey | 17.709805 | Ex | 30.180722 | Ey | 20.806257 |
| Ex | 29.756438 | Ey | 20.191275 | Ex | 33.145551 | Ey | 23.459688 |
| Ex | 32.38813 | Ey | 22.645818 | Ex | 35.911182 | Ey | 26.087189 |

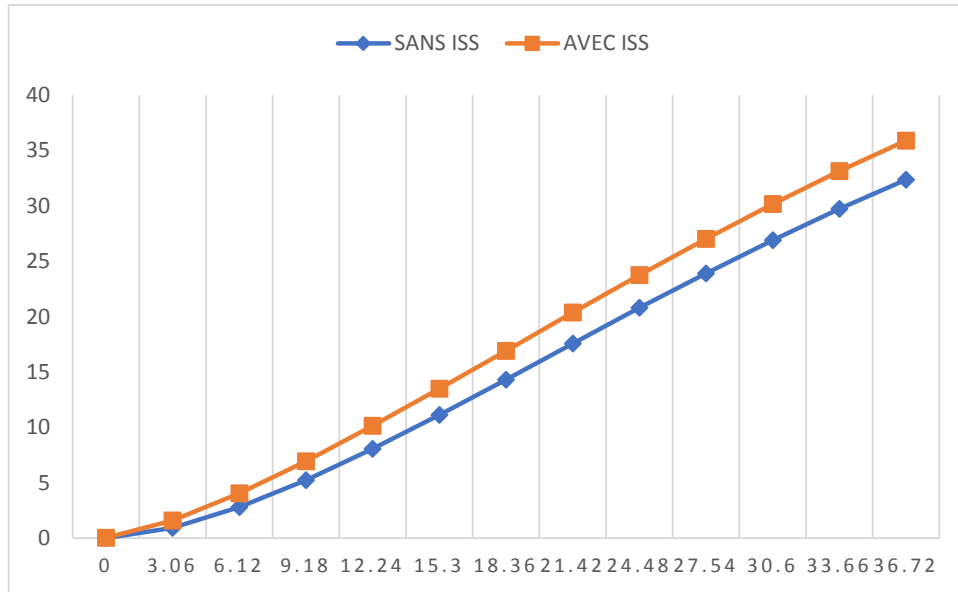


Figure III.13 graphe des déplacements des étages pour Ex dans la direction x

Grace à la flexibilité du sol, les ressort engendre une période fondamentale plus grande que celle de l'encastrement des appuis dans le sol ce qui entraine un déplacement dans la considération de l'ISS plus grand que dans le cas de non considération de l'ISS. C'est deux aspects (périodes et déplacements sont les phénomènes les plus faciles à constater ou à prévoir dans cet étude.

III.4.3. Efforts tranchants à la base

L'effort tranchant à la base est donné par le logiciel SAP2000 pour Ex et Ey

Tableau III.7 efforts tranchant à la base avec et sans ISS

| | Effort tranchant à la base sans ISS (KN) | Effort tranchant à la base avec ISS (KN) | $\frac{V-V(ISS)}{V}$ (%) |
|-----------|--|--|--------------------------|
| SUIVANT X | 2921 | 2862 | 2 |
| SUIVANT Y | 3316 | 3177 | 4 |

On constate que l'effort tranchant n'a pas une grande variation dans le cas de la considération de l'ISS.

III.4.4. Effort normal dans les poteaux

L'effort normal repris par les poteaux non associés au voiles pour la combinaison « 0.8G+E »

Tableau III.8 Efforts normale dans les poteaux avec et sans ISS

| POTEAUX | | p | P(ISS) | $\frac{P - P(ISS)}{P}$ (%) |
|-----------|-----|-----------|-----------|----------------------------|
| Poteau 1 | Max | -249.61 | -174.477 | 30.10016 |
| | Min | -1232.178 | -1264.567 | -2.6286 |
| Poteau 2 | Max | -598.503 | -516.408 | 13.71672 |
| | Min | -1289.637 | -1324.088 | -2.6714 |
| Poteau 3 | Max | -647.367 | -570.393 | 11.89032 |
| | Min | -1328.417 | -1364.991 | -2.7532 |
| Poteau 4 | Max | -559.169 | -489.903 | 12.38731 |
| | Min | -1157.823 | -1196.783 | -3.3649 |
| Poteau 5 | Max | -270.87 | -203.172 | 24.9928 |
| | Min | -1196.678 | -1234.458 | -3.1571 |
| Poteau 6 | Max | -548.186 | -527.548 | 3.76478 |
| | Min | -612.237 | -591.062 | 3.45863 |
| Poteau 7 | Max | -264.632 | -255.738 | 3.36089 |
| | Min | -1283.413 | -1211.947 | 5.56843 |
| Poteau 8 | Max | -230.913 | -224.305 | 2.86168 |
| | Min | -1182.242 | -1106.183 | 6.43345 |
| Poteau 9 | Max | -153.414 | -78.899 | 48.57119 |
| | Min | -1014.202 | -1054.74 | -3.997 |
| Poteau 10 | Max | -390.482 | -319.992 | 18.05205 |
| | Min | -948.186 | -981.085 | -3.4697 |
| Poteau 11 | Max | -51.987 | 33.36 | 164.16989 |
| | Min | -1024.615 | -1058.139 | -0.032719 |

On constate que la variation des deux cas pour l'effort normal repris par les poteaux varie entre 0.03 % et 50 %. On constate aussi que dans le cas de la non considération de l'ISS l'effort de compression est grand et ce n'est pas le cas dans la considération de l'ISS (c'est-à-dire les poteaux ne reprennent pas un grand effort de compression) mais si on aura un effort de traction il sera très grand par rapport au 1^{er} cas et c'est le cas de 11^{ème} poteau.

III.4.5. Moments fléchissant dans les poteaux

Tableau III.9 Moment fléchissant dans les poteaux

| | M | M(ISS) | $\frac{M - M(ISS)}{M}$ (%) |
|-----------|---------|---------|----------------------------|
| Poteau 1 | 22.2628 | 54.0539 | 58.813703 |
| Poteau 2 | 23.5006 | 57.1008 | 58.843659 |
| Poteau 3 | 23.9451 | 58.1411 | 58.815537 |
| Poteau 4 | 23.5975 | 57.1612 | 58.717627 |
| Poteau 5 | 22.9784 | 55.8793 | 58.878511 |
| Poteau 6 | 24.5858 | 59.2565 | 58.509531 |
| Poteau 7 | 32.0347 | 70.5276 | 54.578491 |
| Poteau 8 | 31.3027 | 68.925 | 54.584403 |
| Poteau 9 | 24.3632 | 56.6037 | 56.958291 |
| Poteau 10 | 24.3463 | 56.5138 | 56.919726 |
| Poteau 11 | 22.8889 | 53.0649 | 56.866215 |

On constate quand on une très grande augmentation du moment fléchissant dans le cas de la considération de l'ISS jusqu'à 59% avec une diminution de l'effort de compression ce qui nous donne une différence de ferrailage importante.

III.4.6. Les moments dans les poutres

On prend un fils de poutre et on constate le moment maximum et le moment minimum pour la combinaison G+Q+E

| | M | M(ISS) | $\frac{M - M(ISS)}{M}$ (%) |
|-----|----------|----------|----------------------------|
| Max | 37.5255 | 24.707 | 34 |
| Min | -54.0107 | -39.9305 | 26 |

On constate quand on a une diminution de 34% dans la travée et 26% dans l'appuie.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a vu grâce la méthode de demi espace l'influence de la considération de l'interaction sol-structure sur les périodes, les déplacements et surtout les efforts et les moments et on a constaté qu'on ne peut pas négliger cet aspect de l'interaction sol-structure.

Conclusion Générale

Ce projet de Master, m'a permis de mettre en pratique toutes les connaissances acquises durant mon cycle de formation d'ingénieur et de master, d'approfondir mes connaissances et ma façon de rechercher de l'information en se basant sur des différents ouvrages et articles.

Dans cette étude on a vu les différentes méthodes utilisées pour la prise en compte de l'interaction sol-structure ainsi qu'une méthode détaillée celle de demi espace (half-space) détailler avec un simple cas d'étude. On compare les résultats avec l'encastrement des appuis dans le sol.

Les récents développements de l'analyse numérique, dus aux grandes possibilités offerte par l'ordinateurs, ont influencé profondément sur les méthodes de calcul en effet on peut dire que l'emploi de logiciels de calcul nous y était d'une précieuse aide en terme de temps et d'effort à condition de maîtriser les notions de bases des sciences de l'ingénieur, ainsi que le logiciel lui-même.

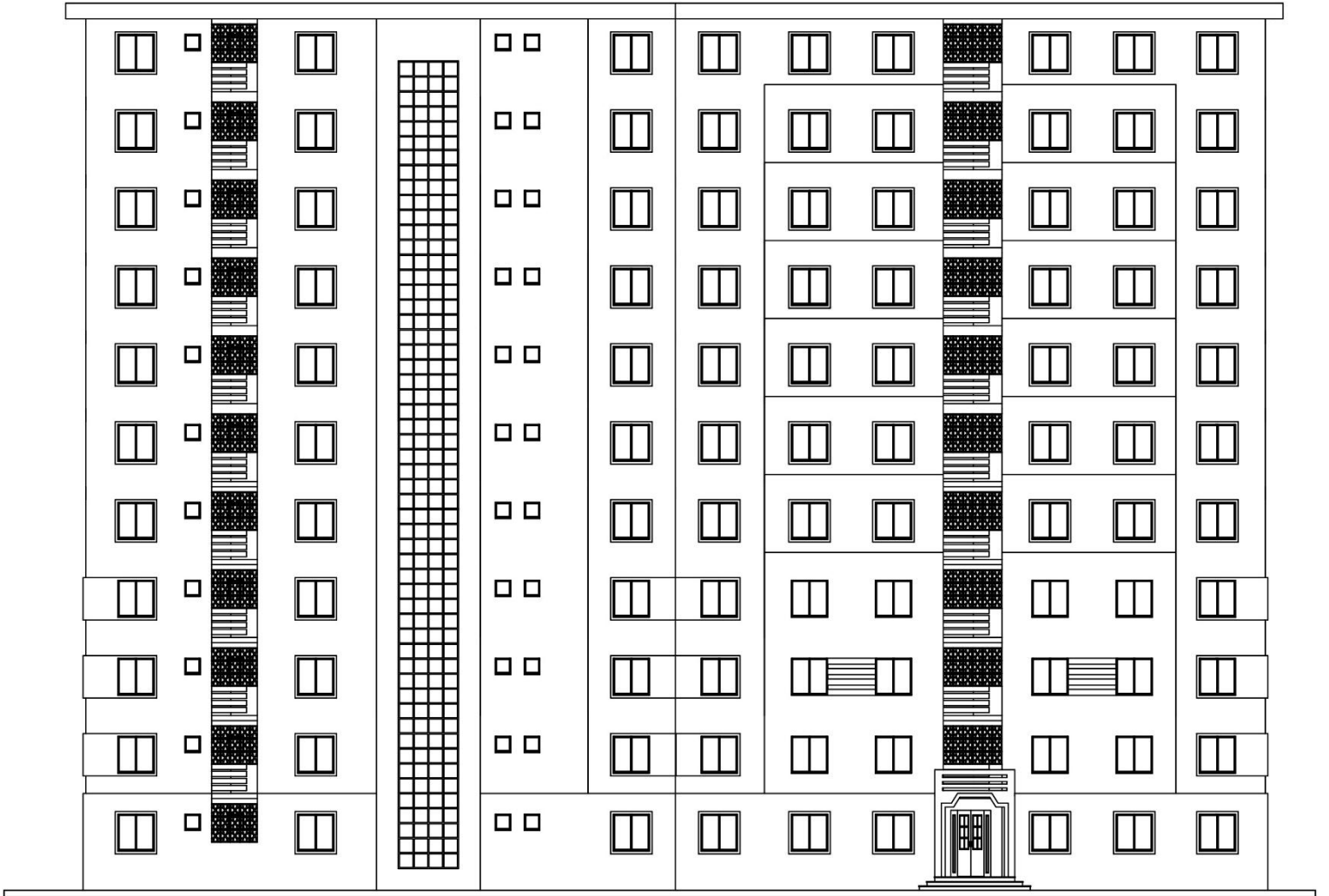
Ce travail m'a donné des résultats satisfaisants mais on peut aller plus loin avec des résultats plus exacts si on utilise d'autre méthode qui sont plus délicate que cette dernière.

Bibliographie

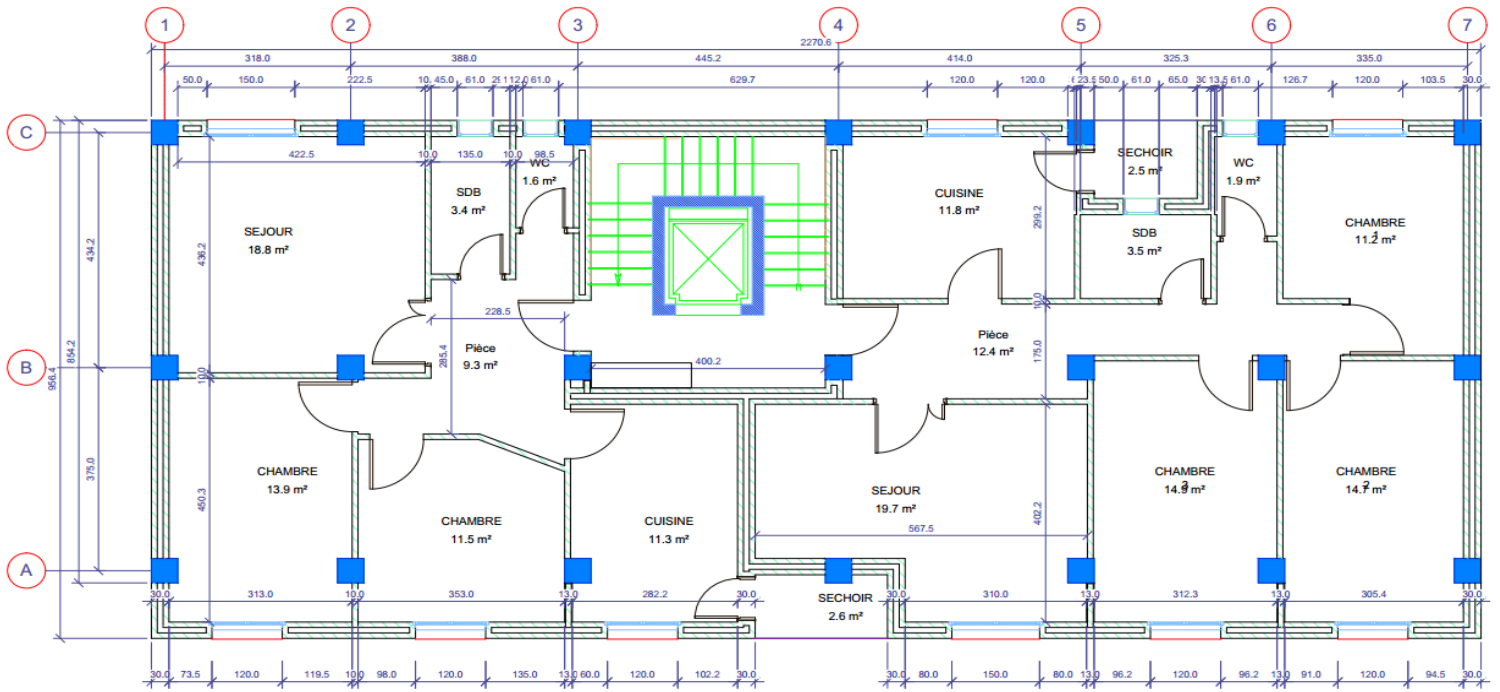
Bibliographie

- [1] S.THORBURN, Soil-structure interaction The real behaviour of structures, 4^{ème} Edition éd., The institution of structural engineers, mars1989, p. 117.
- [2] J. Betbeder-Matibet, Prévention parasismique volume3, Lavoisier, 2003, p. 397.
- [3] V. DAVIDOVICI, Eurocode 8, Pratique du Calcul Sismique, Edition AFNOR éd., France: EYROLLES, Fév 2013, p. 244.
- [4] J.P.WOLF, Dynamic Soil-structure Interaction, Amsterdam: Elsevier, 1998, p. 428.
- [5] A. PECKER, dynamique des structure, Paris: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, p. 120.
- [6] M. BELAZOUGUI, REGLES PARASISMIQUE ALGERIENNES RPA99/VERSION2003, Alger: Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, 1994, p. 106.
- [7] R.Mast, *Seismic Bridge Design Applications part 2*, UMD-ITV, 25Juillet1996, p. 320.

Annexe



Façade principale



Vue en plan des étages courants