

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° :01



DOMAINE : GENIE CIVIL

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION :STRUCTURE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

Haouas Houria Imane

Dahmani Nour El Houda

Intitulé

Étude de l'influence de l'interaction sol-structure (ISS)
sur la réponse sismique des structures portique en béton
armé (cas structure rigide)

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Titoum Messaoud

Université de M'sila

Président

Dr. Menasri Youcef

Université de M'sila

Encadreur

Dr. Rahmani Abd allah Yacine

Université de M'sila

Examineur

Dr. Seddiki Ahmed

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب}

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **Allah**, le Tout Puissant, de nous avoir donné la volonté, le courage, la santé et la patience afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Nous remercions nos parents qui nous ont soutenus beaucoup pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir.

Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre vie.

Sans oublier nos chers amis que nous avons rencontrés à l'école ou même à l'extérieur et précisément nos chers amis (es) de notre promotion.

Nous remercions très sincèrement notre promoteur, Monsieur **Menasri Youcef** pour tous les savoirs qui nous a apporté en master ainsi pour nous encadrer et diriger au cours de notre projet de fin d'étude.

à tous les professeurs de génie civil et les professeurs spécialisés structures en particulier (Dr Rahmouni, Dr Ouzandja, Dr Meddah, Dr Titoum, Dr Hamitouche, Dr Siline , Dr Rahmani,)

Notre pensée va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis le primaire.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté

DEDICACE

Grâce d'**Allah**

Louange à **Allah** tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

- ❖ **A**mes chères parents «**Mouhamed** et **Ouali yamina** », j'implore Allah pour ils accordent des bonnes santés et des vies longues et heureuses.
- ❖ **A** mes chers frère et sœurs « **Ala Eddine, Zinab, Manar** et **Fatima** »
- ❖ **A** tous mes amis (es) : sans exception, en particulier a mon amie proche et partenaire dans cette entreprise « **Nour Elhouda** »
- ❖ **A** tous ceux qui m'ont aidé tout au long de mon parcours universitaire.

Et tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Haouas Houria Imane

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à la personne la plus appréciée pour moi et la plus proche à mon cœur :

- ❖ A mes chères parents « **Salah, Abla, Noura** » j'implore Allah pour ils accordent des bonnes santés et des vies longues et heureuses.
- ❖ A mes chers frère et sœurs « **Oussama, Youssef, Akram, Zakia, Warda, Meryem, Hadjer et Marwa** ».
- ❖ A toute ma vertueuse famille **Dahmani** et **Ferahtia**.
- ❖ A mon cher mari «**Islam**» et toute sa famille « **Mairif**».
- ❖ A tous mes amis, en particulier a mon amie proche et partenaire dans cette entreprise « **Imane**»
- ❖ A que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

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

Dahmani Nour Elhouda

ملخص

تأثير التربة على الفعل الزلزالي في قاعدة المنشآت ممكن أن يكون كبيراً. بين التسارع في الصخور والتسارع على السطح (التربة) يمكن أن يحدث تكبيراً لا يمكن إهماله على الحركة الزلزالية بدلالة نوع التربة التي تتخللها الأمواج قبل أن تصل إلى السطح.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير علاقة التربة بالمنشآت. على الاستجابة الزلزالية للمنشآت الإطارية من الخرسانة المسلحة. تحليلات خطية بثلاث أبعاد بواسطة برنامج Sap2000 أنجزت على بناية من أربعة طوابق (R+3). هذه التحليلات سمحت لنا بدراسة حالة المنشآت الصلبة تحت فعل زلزال مرجعي.

الكلمات المفتاحية: الطيفية النموذجية , التفاعل المتبادل بين التربة والمبنى , الزلازل .

RESUME

L'influence du sol sur l'action sismique à la base des structures peut être importante. Entre l'accélération au rocher et l'accélération en surface, il peut y avoir une amplification non négligeable du mouvement sismique en fonction du type de sol que traversent les ondes sismiques avant d'arriver en surface. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse sismique des structures portiques en béton armé. Des analyses linéaires en 3D à l'aide du logiciel SAP 2000 à effectuer sur une structure rigide portique en béton armé à quater étages(R+3), ses analyses permettront d'étudier l'état de la structure rigide sous l'action d'un séisme de référence.

Mots-clés : Spectre de réponse, l'interaction sol-structure, séisme.

Abstract

The effect of soil on seismic motion at the base of structures can be significant. The acceleration in the rocks and the acceleration at the surface (soil) can have a significant effect that can not be neglected on the seismic movement in terms of the type of soil that the waves permeate before they reach the surface. The aim of this work is to study the effect of soil relationship with structure. Its effect on the seismic response of reinforced concrete frame structures. Its effect on 3D linear analyzes by SAP2000 program performed on a four storey (R+3). These analyzes allowed us to study the condition of the solid structure under the action of a reference earthquake.

Key Words: spectroscopic, soil relationship with structure, earthquakes.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement	I
Dédicace	II
Table des matières	III
Liste des figures.	IV
Liste des tableaux.	V
Table des Notations	VI
ملخص	VII
Résume	VIII
Abstract.....	IX
Introduction générale.....	X

Chapitre I :Notion De Base Sur Les Séismes

Introduction :.....	2
I.1. Définition :.....	2
I.2.Origine et actions des séismes :	2
I.3.Caractéristiques d'un séisme :	3
I.4. Nature et mode de propagation des ondes sismiques :.....	4
I.4.1. Ondes de volume :	4
I.4.2.Ondes de surface :.....	5
I.5.L'enregistrement des ondes sismiques :	6
I.5.1. Sismographes :.....	6
I.5.2. Sismogramme :	6
I.6.les échelles sismiques :	7
I.6.1.L'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik:	7
I.6.2.L'échelle de Richter :.....	7
I.7.Classification des zones sismiques en Algérie :.....	9
I.8.les catégories de séismes :	11
I.9. Mouvement Sismique:	12
conclusion :	12

Chapitre II :Interaction Sol-Structure (ISS)

Introduction :	14
II.1.Composantes de l'interaction sol-structure	15
II.1.1. Interaction inertielle :	15
II.1.2.Interaction cinématique :	15
II.2. Etude du problème d'interaction sol structure :	16
II.2.1.Formulation d'un problème d'interaction :	16
II.2.2.Mouvement du sol en champ libre :	18
II.3.Méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure:	19
II.3.1.Méthodes globales :	19
II.3.2. Méthode des sous-structures :	20
II.3.3. Méthodes hybrides :	21
II.4. Modélisation de l'interaction sol-structure :	22
II.4.1. Modélisation du sol par éléments ressorts :	23
II.4.1.1.Méthode de Newmark-Rosenblueth :	25
II.4.1.2. Méthode de Deleuze :	26
II.4.2. Modélisation par des éléments finis:	29
Conclusion :	29
II.5.Méthode d'analyse modale spectrale	30
1. Principe :	30
2.Caractéristiques d'analyse:	30
3 .Méthodologie de calcul :	30
4. Influence du sol sur le spectre de réponse :	34
Conclusion :	34

Chapitre III : Structure portique en béton armé

Introduction :	36
III.1.Différents type de structures en béton armé :	36
III.1.1.structure en voile :	36
III.1.2.Structure mixte (portique + voile) :	37

III.1.3.Structure en portique (poteau+poutre) :	38
1)Définition :	38
2)Différents types de structures portique :	39
3) Effets de séisme sur les structures portiques :	39
III.2.déformation des bâtiment:	44
III.3.Force d'inertie :	44
III.4.Types de dégâts :	46
III.4.1. Effets directs :	46
III.4.2. Effets indirects :	49
Conclusion :	50

Chapitre IV :Modélisation Numérique

Introduction :	52
IV.1. Présentation et caractéristiques des structures :	52
IV.1.1. Description du bâtiment étudier :	52
IV.1.2.Caractéristiques géométriques :	54
IV.1.3.Caractéristiques des matériaux :	54
Béton :	54
Acier :	55
IV.1.4.Charges gravitaires :	56
IV.2.Modélisation de la structure :	56
IV.2.1. Modélisation sans interaction sol-structure (ISS) :	56
IV.2.2. Modélisation avec interaction sol-structure (ISS)(ressorts de sol):	57
IV.3.Résultats et interprétation sur les structures:	58
IV.3.1. Résultats des déplacements :	58
IV.3.1.1. Déplacement maximal :	62
IV.3.2.Résultats de l'effort tranchant :	64
IV.3.2.1.Effort tranchant à la base :	67
IV.3.3. Résultats des Moments :	69
CONCLUSION GENERALE.....	73
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	75
ANNEXES.....	79

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: L'origine et la distribution des ondes sismiques	2
Figure I.2: Movement et caractéristiques d'un séisme	3
Figure I.3: Représentation schématisées des ondes P	4
Figure I.4: Représentation schématisées des ondes S.....	4
Figure I.5: Représentation schématisées des ondes R	5
Figure I.6: Représentation schématisées des ondes L	5
Figure I.7: Fonctionnement d'un sismographe.	6
Figure I.8: Enregistrement sismographique.....	7
Figure I.9: Echelle de Richter	8
Figure I.10: Zone sismique du territoire national.....	9
Figure I.11: Schéma simplifié Mouvement Sismique	12

CHAPITRE II

Figure II.1: Interaction sol – structure.....	14
Figure II.2 : Interaction inertielle.	15
Figure II.3: Interaction cinématique	16
Figure II.4: Décomposition du problème d'interaction sol-structure.	17
Figure II.5 : Accélération en champ libre.	18
Figure II.6 : Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS.....	19
Figure II.7 : Principe de superposition de Kausel	20
Figure II.8 : Méthode hybride.....	22
Figure II.9 : Types de modèles.....	23
Figure II.10: Modèle tenant en compte de l'ISS.....	24
Figure II.11:Modélisation du sol par un système de ressorts.....	24
Figure II.12 : Abaques donnant les coefficients de Newmark β_z ; β_x et β_ϕ	26
Figure II.13 : Modélisation par des éléments finis	29
Figure II.14 : principes de l'étude, du spectre de réponse.	31
Figure II.15 : Spectres de réponse élastiques normalisés	33

CHAPITRE III

Figure III.1: Construction d'une maison en voile béton armé.	36
Figure III.2 : structure mixte d'un bâtiment.	37
Figure III.3 : Rupture en zone nodale.....	40
Figure III.4 : Rotule dans le poteau.....	40
Figure III.5 : Rotule dans la poutre.	40
Figure III.6 : Dislocation de la section.	41
Figure III.7 : Cas de poteaux courts sans protection – tous les poteaux sont cisailés	41
Figure III.8 : Dommages dus aux poteaux courts dus au vide sanitaire.	42
Figure III.9 : Ecrasement du béton et flambement des aciers dans les poteaux dans l'escalier	42
Figure III.10 : Flambement de poteaux.	43
Figure III.11 : Rupture par flexion des poutres.....	43
Figure III.12 : les schémas illustrent des modes de déformation pour différents élément	44
Figure III.13 : Oscillation horizontales des constructions	45
Figure III.14 : Oscillation verticaux.	45
Figure III.15 : Oscillation de torsion.	45
Figure III.16 : Effondrement sous forme d'une galette.	46
Figure III.17 : Fissures en croix.	47
Figure III.18 : Les fissures en croix dans les bâtiments.	47
Figure III.19 : Etage souple	47
Figure III.20 : troisième étage de cet immeuble.	48
Figure III.21: Dommages dus à l'effet de poteau court en vide sanitaire et dû à la présence d'allèges en maçonnerie dans la structure principale en portiques	48
Figure III.22 : Martèlement.....	49
Figure III.23 : La liquéfaction (Turquie 1999).....	50
Figure III.24 : Glissement de terrain.	50

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Vue en plan d'un étage courant	53
Figure IV.2 : Sections et ferrailage des poteaux et poutres.	53
Figure IV.3 : Diagramme de déformation-contrainte pour le béton.....	55
Figure IV.4 : Diagramme de déformation-contrainte pour l'acier.	56

Figure IV.5 : Vue en 3D de structure sans interaction sol-structure (ISS).	57
Figure IV.6 : Vue en 3D de structure avec interaction sol-structure (ISS).	57
Figure IV.7 :Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sole S1).	60
Figure IV.8 : Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sole S2).	60
Figure IV.9 : Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sole S3).	61
Figure IV.10 :Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sole S4).	61
Figure IV.11 : Variation du déplacement en fonction du site sans et avec ISS.	62
Figure IV.12 :Comparaison des résultats des déplacements sans et avec ISS pour les différents type des sols.	63
Figure IV.13 :Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).	65
Figure IV.14 :Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S2).	66
Figure IV.15 :Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S3).	66
Figure IV.16 :Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S4).	67
Figure IV.17 : Variation de effort tranchant à la base en fonction du site avec et sans ISS.	68
Figure IV.18 :Comparaison des résultats sans et avec ISS pour l'effort tranchant entre les différents types de sol.	68
Figure IV.19 :Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).	70
Figure IV.20 :Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).	71
Figure IV.21 : Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).	71
Figure IV.22 :Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).	72

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Coefficient d'accélération de zone sismique	10
Tableau I.2 : Les périodes caractéristiques T1 et T2 de chaque catégorie de site	10
Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes catégories de site.....	11

Chapitre II

Tableau II.1 : Formules de Newmark Rosenblueth.....	25
Tableau II.2 : les coefficients de raideur en fonction des coefficients de transmittance f	26
Tableau II.3 : Rayons équivalents pour une fondation rectangulaire de dimensions a et b	27
Tableau II.4 : Coefficients de transmittance verticale f_v du sol.....	27
Tableau II.5 : Coefficients de transmittance horizontale f_h du sol.....	28
Tableau II.6 : Coefficients de transmittance en rotation f_r du sol.....	28
Tableau II.7 : Valeurs de $\xi(\%)$	32

Chapitre IV

Tableau IV.1 :Caractéristiques géométriques du bâtiment étudié.	54
Tableau IV.2 :Caractéristiques de béton.....	54
Tableau IV.3 :Caractéristiques d'acier.	55
Tableau IV.4 :Charge permanent et d'exploitation.	56
Tableau IV.5 : Caractéristiques mécaniques des types de sol et valeurs des coefficients de Newmark.....	58
Tableau IV.6 :Résultats des valeurs des Raideurs des sols.....	58
Tableau IV.7 :Déplacements [cm] sans ISS de poteau de rive pour les quatre type de sol (sens X).	59
Tableau IV.8 : Déplacements [cm] avec ISS de poteau de rive pour les quatre type de sol (sens X).....	59
Tableau IV.9 :Comparaison du résultatsdesdéplacements maximal [cm] sans et avec ISS.....	62

Tableau IV.10 :Les efforts tranchants [KN] sans ISS de poteau de rive pour les quatre type de sol (sens X)	64
Tableau IV.11 :Les efforts tranchants [KN] avec ISS de poteau de rive pour les quatre type de sol (sens X).	65
Tableau IV.12 :Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS	67
Tableau IV.10 : Les moments [KN.m] sans ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (sens X)..	69
Tableau IV.11 : Les moments [KN.m] sans ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (sens X)..	70

TABLE DES NOTATIONS

- A : Coefficient d'accélération de zone.
- A : Aire de la fondation.
- E : Module de Young.
- E_p : Module pressiométrique.
- f : Fréquence du mode de vibration fondamental.
- G : Module de cisaillement dynamique du sol.
- K_h : Raideur horizontal.
- K_v : Raideur vertical.
- K_θ : Raideur de basculement.
- M : Matrices de masse.
- K : Rigidité.
- $(\dot{})$: La dérivée par rapport au temps.
- P : Les ondes primaire.
- S : Les ondes secondaire.
- R : les Ondes de Rayleigh.
- L : Les ondes de Love.
- Q : Facteur de qualité.
- q_u : Contrainte ultime.
- R : Le coefficient de comportement.
- R : Rayon de la fondation circulaire.
- R_0 : Rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire.
- T_1, T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.
- $\ddot{u}$: Accélération.
- $\dot{u}$: Vitesse.
- u : Déplacement.
- V_s : Vitesse des ondes sismiques de cisaillement.
- ξ : Pourcentage d'amortissement critique.
- $\beta_z, \beta_x \text{ et } \beta_\phi$:
- η : Correction d'amortissement.
- ν : Coefficient de poisson.

- ρ : Masse volumique du sol.
- f_v : Transmittance verticale.
- f_h : Transmittance horizontale.
- f_r : Transmittance en rotation.
- γ_b : Masse volumique du béton.
- ϵ_{be} : Déformation limite élastique.
- ϵ_{bu} : Déformation ultime du béton.
- ϵ_{se} : Déformation limite élastique de l'acier.
- ϵ_{su} : Déformation ultime de l'acier.
- Q_f : le vecteur de charge.
- $[M]$: matrices de masse.
- $[C]$: matrices d'amortissement.
- $[K]$: matrices de rigidité du système.
- **RPA 99V2003** : Règles Parasismiques Algériennes 99 Version 2003.
- **ISS** : Interaction sol-structure.
- **IC** : Interaction cinématique.
- **II** : Interaction inertielle.
- **MSK** : Echelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik.
- **R+3** : Réez-de chaussée plus 3 étages.
- **BAEL** : Béton Armé Etat limite.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les tremblements de terre ont été et resteront probablement pour longtemps, les phénomènes naturels les plus dangereux, du fait de leur caractères imprévisibles (aléatoires) et leur effets particulièrement de structure surtout dans les villes où les dégâts peuvent aller jusqu'à l'effondrement complet des constructions engendrant des pertes économiques, sociales et surtout humaines comme cela a été le cas à Boumerdes en 2003 (plus de 2000 morts, 10000 blessés, 15000 sans abri et des pertes économiques se chiffrant par milliards). Le danger est aggravé par l'existence de nombreux bâtiments construits avant l'application des nouveaux règlements parasismiques (RPA99 V2003 par ex).

Après le séisme de Chlef en 1980, l'Algérie est passé de l'inconscience totale des Risques encourus à la mise en place d'actions d'information et de la prise en considération de l'aléa sismique dans la construction.

La structure est généralement soumise à trois types d'action, à savoir les actions permanentes, les actions variables et accidentelles, Parmi les actions accidentelles : Le séisme est un événement violent et extraordinaire qui peut provoquer l'endommagement, voire même l'effondrement des structures. L'étude des dommages subis à la suite des tremblements de terre a permis de mieux comprendre la nature des mouvements sismiques et d'identifier les faiblesses des structures et leur comportements .

L'influence de la structure sur le sol existe de manière concomitante. Plus généralement, l'interaction sol-structure résulte de l'interaction cinématique et de l'interaction inertielle. En effet, l'étude de la réponse dynamique du système sol-fondation sous l'effet de l'interaction inertielle nécessite une analyse cinématique préalable en vue d'obtenir le mouvement à la base de la structure pour déduire les efforts d'inertie induits par la superstructure. Cette interaction sol – structure est plus ou moins importante selon le type de sol, les caractéristiques de la structure et son mode de fondation (impédance d'une fondation).

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux phénomènes des séismes, zonage du risque sismique et la classification des catégories des sites adaptée par les règlements parasismique algériennes RPA99V2003.
- Le deuxième chapitre, on discute l'importance de l'interaction sol structure, la formulation, la modélisation d'un problème d'interaction et on utilise la méthode dynamique linéaire « méthode de spectre de réponse ».

- Le troisième chapitre est consacré aux types des structures et types des déformations, l'effet des séismes sur les structures.
- Le quatrième chapitre présentent l'analyse numérique de structure en portique en béton armé, l'étude comporte un calcul dynamique en utilisant le code de calcul SAP2000 qui nous permet de déterminer les déplacements et l'effort tranchants, les moments par la méthode de spectres de réponse et par conséquent l'évaluation de l'effet de l'interaction de sol –structure.

Enfin le travail se termine par une conclusion générale résumant tous les résultats obtenus.

Chapitre I

Notion De Base Sur Les Séismes

Introduction :

Les tremblements de terre sont à ce jour la catastrophe naturelle la plus meurtrière. Cette catastrophe résulte d'une rupture brutale des roches [1]. Prévoir ou empêcher les séismes, nous devons nous efforcer d'en limiter les dégâts. Cette démarche commence par la connaissance détaillée de l'action sismique à savoir : la naissance du séisme, la formation et la propagation des ondes, la représentativité des accélérogramme et des spectres associés, etc. L'aboutissement de toutes ces connaissances nous amènerons certainement à une construction parasismique [2].

I.1. Définition :

Le séisme est une secousse ou succession de secousses plus au moins violentes du sol. Un séisme résulte du relâchement brutal de contraintes dans la croûte terrestre qui provoque un glissement de deux compartiments le long d'une faille. Ces secousses peuvent être imperceptibles où très destructrices [3]. Parfois la pression est forte, qu'elle cause de grandes vibrations appelées ondes sismiques. Ces ondes sismiques sont les tremblements ressentis pendant les séismes [4].

I.2. Origine et actions des séismes :

Un séisme ou tremblement de terre correspond à des vibrations de la terre provenant de la fracturation ou rupture soudaine des roches de l'écorce terrestre (partie la plus superficielle du globe) [5], ces ruptures se produisent essentiellement dans les zones situées à proximité des limites entre les plaques, là où les tensions sont les plus élevées dans les roches [6].

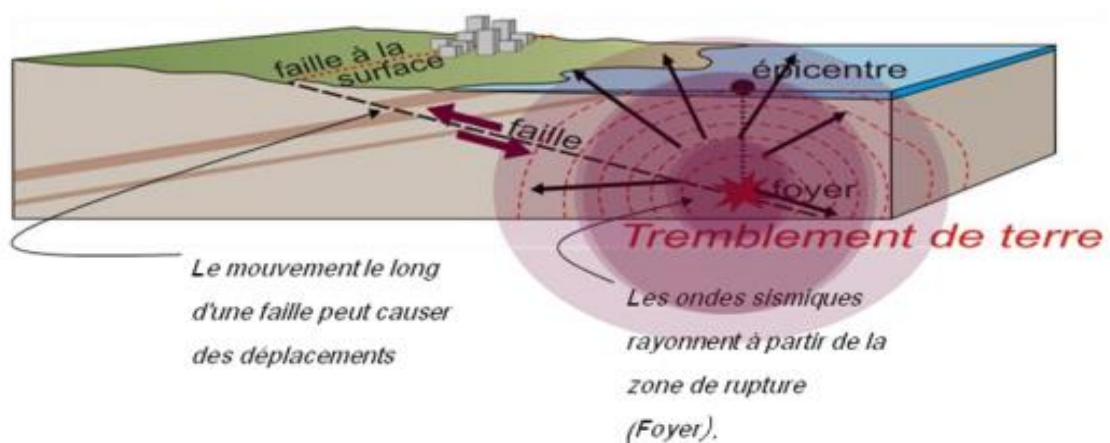


Figure I.1 : L'origine et la distribution des ondes sismiques [1].

I.3.Caractéristiques d'un séisme :

Un séisme est caractérisé par :

- **Un foyer** :est un point d'amorce de rupture en profondeur au niveau d'une faille.

On distingue trois classes de séismes selon la profondeur de leur foyer [7] :

- les séismes superficiels : moins de 60 km de profondeur.
- les séismes intermédiaires : entre 60 et 300 km de profondeur.
- les séismes profonds : supérieurs à 300 km de profondeur.
- au-delà de 700 km de profondeur, on considère qu'il n'y a plus de foyer sismique.

- **Des ondes** :

- ✓ Les ondes de fond.
- ✓ Les ondes de surface.

- **Un épicentre** : Lieu d'intensité maximale à la verticale du foyer.

- **Une magnitude** : Quantification de l'énergie libérée au foyer.

- **Une intensité** : Importance des dégâts en surface [8].

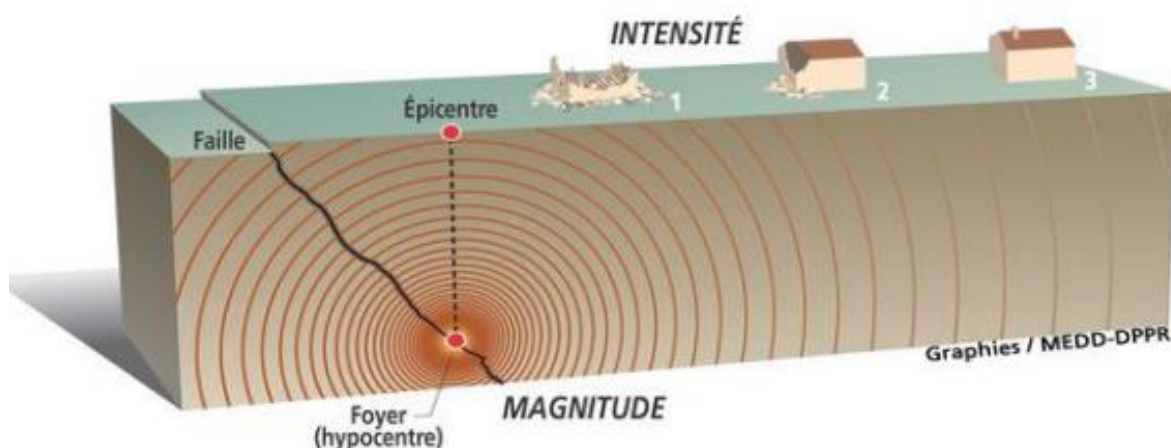


Figure I.2 : Mouvement et caractéristiques d'un séisme[1].

I.4. Nature et mode de propagation des ondes sismiques :

On distingue deux principaux types d'ondes sismiques :

I.4.1. Ondes de volume : Elles prennent naissance dans le foyer et se propagent à l'intérieur de la terre sous deux forme :

- **Ondes primaires (P) :** Sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui se propagent dans tous les états de la matière, les particules se déplacent selon un mouvement avant-arrière dans la direction de la propagation de l'onde [9], Elles se propagent dans la croûte terrestre avec une vitesse de 6 à 8 km/s et s'accompagnent d'un changement de volume (compression et dilatation alternées) [10].

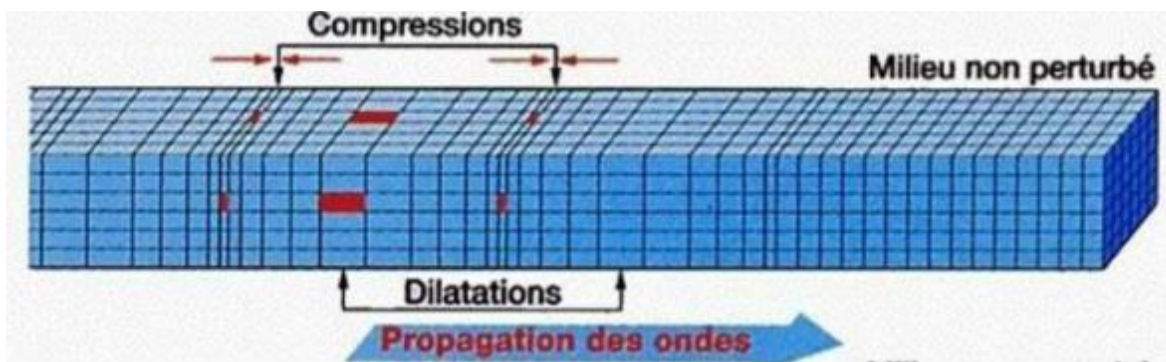


Figure I.3: Représentation schématique des ondes P [9].

- **Ondes Secondaires (S):** Sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides, les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde [9]. Ces ondes se déplacent avec une vitesse de 4 à 5 km/s provoquant un cisaillement sans changement de volume[7].

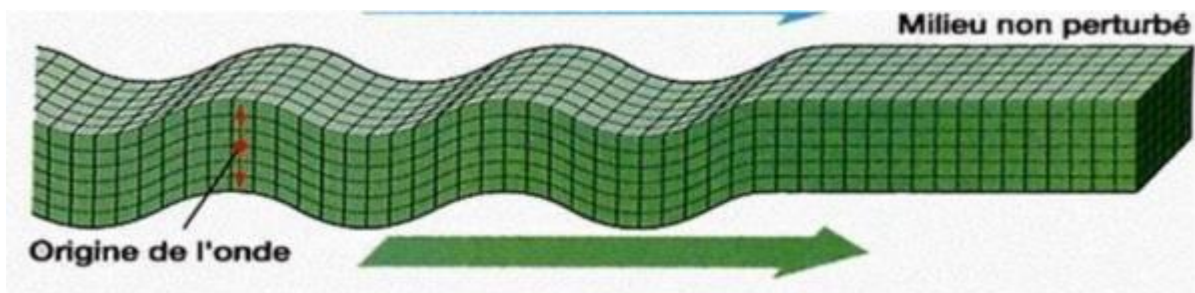


Figure I.4: Représentation schématique des ondes S [9].

I.4.2. Ondes de surface : Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre donnant naissance à des ondes de surface de deux types:

- **Ondes de Rayleigh ou onde (R):** Sont assimilables à une vague, les particules du sol se déplacent selon une ellipse, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre [11].

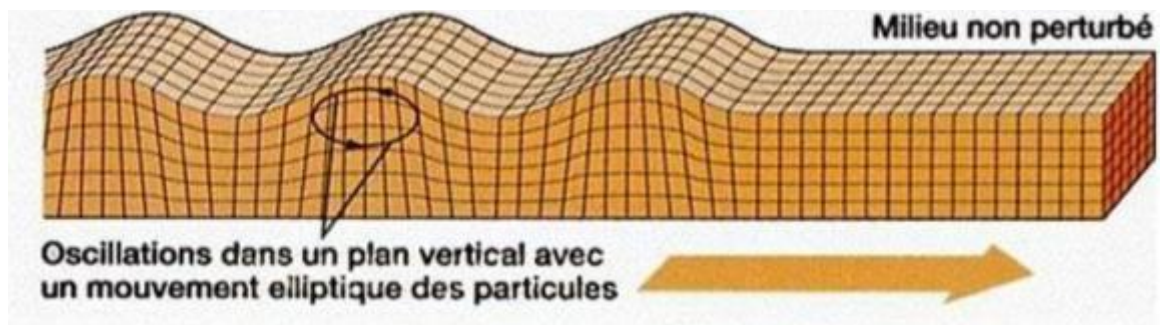


Figure I.5: Représentation schématique des ondes R [9].

- **Ondes de Love ou onde (L):** Sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral[7].

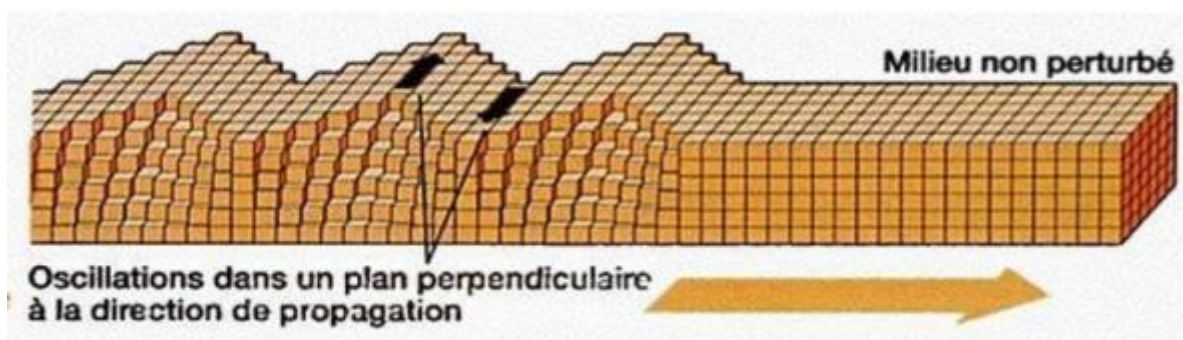


Figure I.6: Représentation schématique des ondes L[9].

Les ondes de cisaillement (S) et (L) sont plus dangereuses pour les constructions que les ondes (P) [10].

I.5.L'enregistrement des ondes sismiques :

I.5.1. Sismographes [1] :

Les sismographes sont des appareils très sensibles. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est très simplifié par rapport au mouvement réel du sol. Pour connaître le mouvement sismique il faut enregistrer ses deux composantes horizontales et sa composante verticale. Pour cela on utilise des sismographes à inertie dits « horizontaux » et des sismographes à inertie dits « verticaux » (figure I.7).

Le sismographe horizontal est construit de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement du sol que dans une seule direction horizontale. Le sismographe vertical est conçu de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement que dans la direction vertical. Dans des stations d'observation sismographiques il faut, au minimum, trois sismographes : 2 horizontaux et 1 vertical.

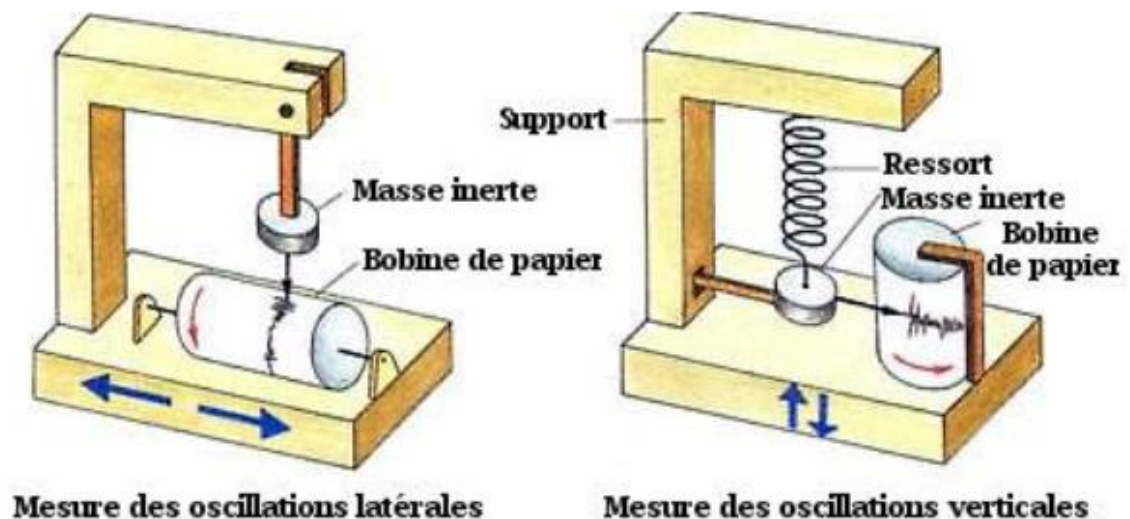


Figure I.7 : Fonctionnement d'un sismographe [12].

I.5.2. Sismogramme [12] :

Un sismogramme est l'enregistrement obtenu à partir des sismographes. C'est une courbe qui varie en fonction de l'énergie libérée au foyer sous la forme d'ondes sismiques, de la distance foyer station sismographique, de la nature et la structure du milieu traversé par les ondes et enfin, du type de sismographe utilisé.

Le fait que les ondes sismiques arrivent aux stations d'enregistrement comprend non seulement les ondes qui ont suivi le chemin le plus direct entre le foyer et la station mais aussi des ondes qui n'y sont parvenues qu'après une série de réflexions et/ ou réfractions.

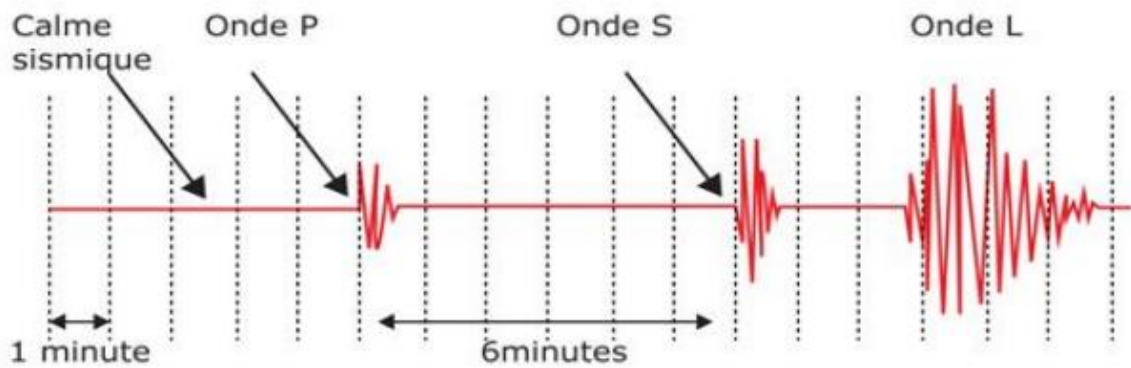


Figure I.8 : Enregistrement sismographique [1].

I.6. Echelles sismiques :

Les séismes ne sont pas tous aussi puissants. Leur force dépend du type de séisme, mais aussi de l'énergie déployée par le séisme. Il existe plusieurs moyens de calculer la force d'un séisme. L'échelle MSK, du nom de ses développeurs, Medvedev, Sponheuer et Karnik, prend en compte les dégâts produits par le séisme, tandis que l'échelle de Richter permet de calculer la force d'un séisme en fonction de sa magnitude, de son énergie.

I.6.1. Echelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik [13]:

Cette échelle est issue de l'échelle de Mercalli, mise au point par le sismologue italien Giuseppe Mercalli en 1902. L'échelle de Mercalli était considérée trop subjective, puisqu'elle prenait en compte les réactions des victimes face au séisme. Elle a été modifiée à de nombreuses reprises, avant d'être définitivement remplacée par l'échelle de MSK en 1964. C'est l'échelle la plus employée pour mesurer les dégâts provoqués par un séisme de nos jours.

I.6.2.L'échelle de Richter :

Cette notion a été introduite en 1935 par le sismologue Américain Richter. Elle caractérise l'énergie libérée par la rupture de la faille au point de déclenchement du tremblement de terre ou foyer (dans la zone épicentrale)[15], Cette échelle est logarithmique de telle sorte qu'un séisme ayant une unité de magnitude de plus qu'un autre sera en fait 1000 fois plus puissant. Puisque cette échelle est logarithmique, elle n'a théoriquement pas de limite supérieure. Ainsi, le séisme de Valdivia, au Chili, de 1960, avait une magnitude de 9,5 tandis que l'échelle de Richter ne comporte que 9 unités [16].

Chapitre I : Notion De Base Sur Les Séismes

De nos jours, on utilise d'avantage l'échelle de magnitude du moment, mise au point en 1979 par le japonais Hiroo Kanamori. Elle dépend également d'un logarithme, mais est plus précise que l'échelle de Richter [13].

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

Figure I.9 : Echelle de Richter [13].

I.7. Classification des zones sismiques en Algérie [10]:

L'évaluation du risque sismique par zone, c'est à dire le découpage du territoire en « zones de sismicité » à l'intérieur desquelles l'aléa sismique peut être considéré comme uniforme, constitue une base essentielle pour la définition de règles régissant les constructions résistantes aux séismes. Le zonage sismique consiste à classer les régions. Le zonage sismique adopté en Algérie est donné par la représentation suivante:

Zone 0 : Sismicité négligeable.

Zone 1 : Sismicité faible.

Zone 2: « a » et « b » : Sismicité moyenne.

Zone 3 : Sismicité élevée.

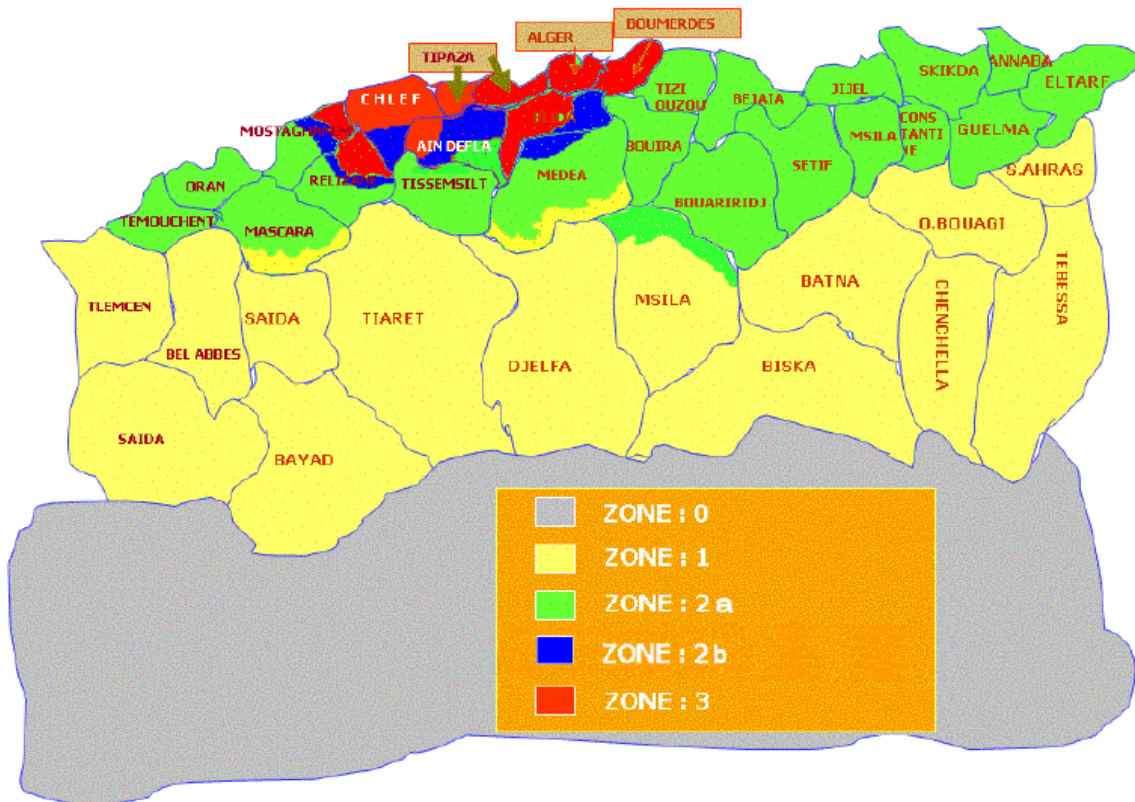


Figure I.10 : Zone sismique du territoire national [10].

Chapitre I : Notion De Base Sur Les Séismes

Tableau I.1 : Coefficient d'accélération de zone sismique [17]

Groupe	Les zones				Classification des ouvrages selon leur importance
	Zone I	Zone IIa	Zone IIb	Zone III	
1A	0,15	0,25	0,3	0,4	Ouvrages d'importance vitale: sécurité - hôpitaux
1B	0,12	0,2	0,25	0,3	Ouvrages de grande importance: scolaire et culte
2	0,1	0,15	0,2	0,25	Ouvrages courants : Habitations - bureaux
3	0,07	0,1	0,14	0,18	Ouvrages de faible importance : hangars

• Classification des sites [18]:

Selon le RPA99V2003 les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent (RPA 99V2003). Les différentes catégories des sites sont les suivantes :

- **Catégorie S1 (site rocheux):** caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement $V_s \geq 800$ m/s.
- **Catégorie S2 (site ferme) :** caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement $V_s \geq 400$ m/s à partir de 10m de profondeur.
- **Catégorie S3 (site meuble):** caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement $V_s \geq 200$ m/s à partir de 10m de profondeur.
- **Catégorie S4 (site très meuble) :** caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement $V_s \leq 200$ m/s dans les 20 premiers mètres.

Tableau I.2 : Les périodes caractéristiques T1 et T2 de chaque catégorie de site[17]

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

Tableau I.3 : Caractéristiques des différentes catégories de site[17]

Sites	Description	Vitesse V_s (m/s)	E_p (MPa)	q_u (MPa)	P_l (MPa)
S1	Rocheux	≥ 800	>100	>10	>5
S2	Ferme	≥ 400	>20	$>0,4$	>2
S3	Meuble	≥ 200	5-20	1-0,4	1-2
S4	Très meuble	≥ 100	<5	$<0,1$	<1

- V_s : vitesse moyenne d'ondes sismique de cisaillement.
- E_p : module pressiométrique.
- q_u : la contrainte ultime.
- P_l : pression limite pressiométrique.

I.8.Les catégories de séismes :

Il existe quatre catégories de séismes :

- les séismes tectoniques.
- les séismes d'origine volcanique.
- les séismes d'origine polaire.
- les séismes d'origine induite (ou artificielle).

1-Les séismes tectoniques :

Les séismes causé par une libération soudaine de l'énergie aux limites des plaques, au niveau de ces limites les roches sont soumises à des contraintes dues à des chocs, la rupture a lieu lorsque les roches ne résistes plus à ces contraintes [19].

2-Les séismes d'origine volcanique :

Sont associés à l'activité volcanique et dus à des remontés de magma au-dessous du volcan, les ondes sont provoqué par des frottements des blocs ou de gaz contre les parois de la cheminée si la majorité de ces séismes ne cause pas des dégâts mais ils annoncent l'imminence d'une éruption volcanique [13].

3-Les séismes d'origine polaire :

Se passent dans les glaciers et sont de faible magnitude, ils sont provoqué par des coulées de glace et sont bien plus fréquent en été [20].

4-Les séismes d'origine induite :

Sont également de faible magnitude, ils sont dus à des activités humaines, toutes modification du sous-sol par des actions humaines peuvent entraîner des séismes [21].

I.9. Mouvement Sismique:

Pour les séismes, il peut s'agir de caractériser le déplacement des particules du sol, leur vitesse de déplacement et leur accélération. Les caractéristiques du mouvement ondulatoire dépendent de l'action des ondes sismiques sur les constructions [22].

- **Période (T):** c'est la durée d'un cycle d'oscillations, ou bien le nombre de cycles par seconde.
- **Amplitude (A) :** elle est généralement définie par la valeur du pic d'accélération.
- **Fréquence (f) :** la fréquence (en **Hz**) est l'inverse de la période (T) en (S).

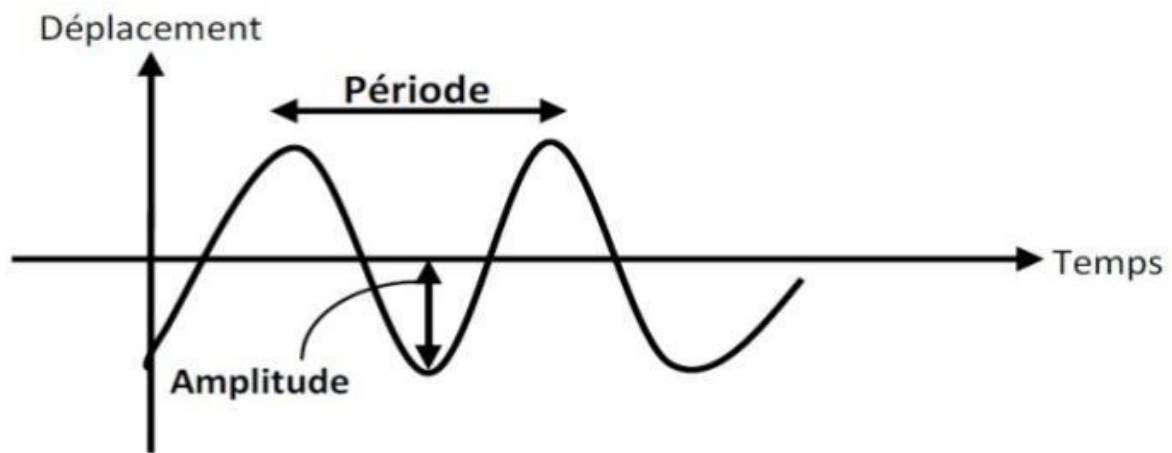


Figure I.11 : Schéma simplifié Mouvement Sismique [23]

Conclusion:

Le but de ce chapitre est de clarifier comment se produit un séisme et ses risques sur un ouvrage, l'importance des zones sujettes à des séismes d'importance moyenne à grande, le calcul et la réalisation de constructions parasismiques, afin de parvenir à une démarche cohérente pour la conception.

Chapitre II

Interaction Sol-Structure (ISS)

Introduction :

L'influence de la structure sur le sol existe de manière concomitante. Plus généralement, l'interaction sol-structure résulte de l'interaction cinématique et de l'interaction inertielle. En effet, l'étude de la réponse dynamique d'un système sol-fondation sous l'effet de l'interaction inertielle nécessite une analyse cinématique préalable, l'obtention du mouvement à la base de la structure donne les efforts d'inertie induits par la superstructure [24]. Cette interaction sol – structure est plus ou moins importante selon le type du sol, les caractéristiques de la structure et son mode de fondation (impédance d'une fondation) [10].

La résolution du problème d'interaction sol – structure, dépend de celle des problèmes suivants [25] :

- La définition du risque sismique et du mouvement résultant.
- L'étude du comportement du sol sous chargement cyclique.
- L'évaluation du comportement du sol en champ libre.
- L'évaluation de la réponse de la structure sous chargement dynamique.

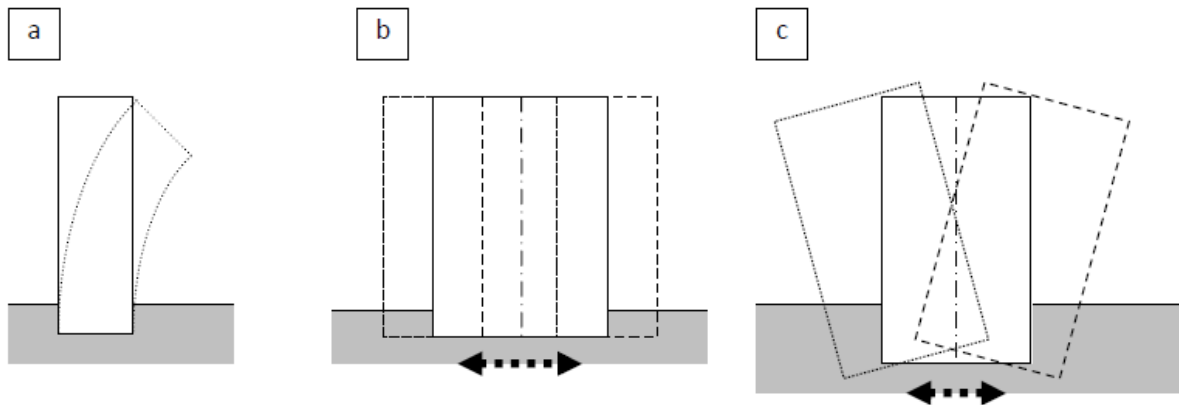


Figure II.1 : Interaction sol – structure a) **sans ISS**, bâtiment souple et sol de très bonne résistance mécanique ; b) **sans ISS**, bâtiment raide et sol de très bonne résistance mécanique ; c) **avec ISS**, bâtiment raide et sol de faible ou moyenne résistance mécanique [25].

II.1.Composantes de l'interaction sol-structure :

Ils existent deux types d'interaction dont on doit tenir compte dans le dimensionnement des structures et fondations, dénommés interaction inertielle et interaction cinématique.

II.1.1. Interaction inertielle : L'interaction inertielle provient des efforts d'inertie engendrés par la masse de la structure à sa base, donc dans le sol sous effet du mouvement imposé à la fondation [24], (liée à la différence de masse entre le sol et la structure)[25].

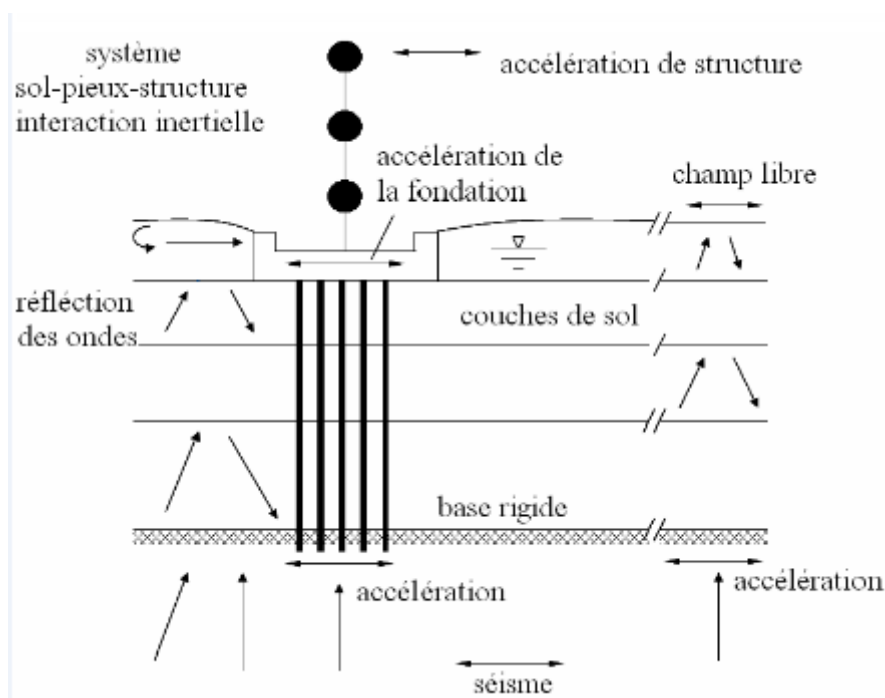


Figure II.2: Interaction inertielle [26]

II.1.2.Interaction cinématique : L'interaction cinématique est souvent négligée dans les codes parasismiques qui adoptent généralement une méthode simplifiée consiste à calculer les efforts sismiques à partir des forces inertielles [24],liée à la différence de raideur entre le sol et la structure dans les domaines communs [25].

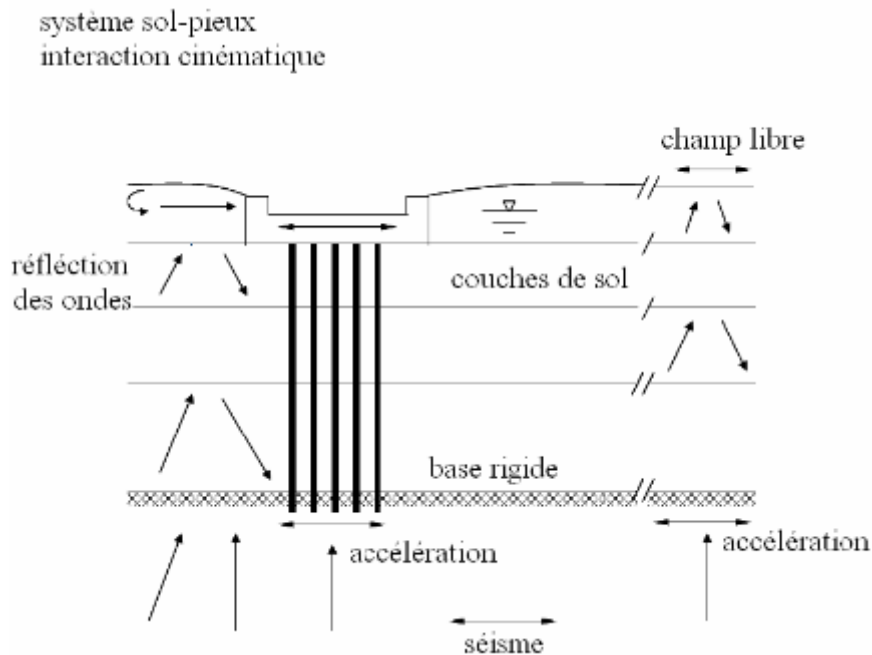


Figure II.3: Interaction cinématique [26]

II.2. Etude du problème d'interaction sol structure :

II.2.1. Formulation d'un problème d'interaction :

L'analyse complète d'un problème d'interaction doit prendre en compte [25] :

- La variation des caractéristiques du sol avec la profondeur.
- Le comportement non linéaire du sol.
- Le caractère tridimensionnel du problème.
- Le schéma complexe de propagation des ondes qui engendrent le mouvement.
- L'interaction avec les structures voisines.

Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la **figure II.4** qui schématise un ensemble sol-structure, l'équation du mouvement s'écrit [27] :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{Q}_f \quad (\text{II-2-1})$$

$\mathbf{M}$: matrice de masse ; $\mathbf{C}$: matrice d'amortissement du système ;

$\mathbf{K}$: matrice de raideur du système; $\mathbf{Q}_f$: le vecteur de charge.

Comme la source du mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge $\mathbf{Q}_f$ n'a de valeurs non nulles que sur la frontière extérieure du modèle.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

En l'absence de structure, l'équation du mouvement du champ libre est analogue en sa forme à l'équation (II-2-1), les indices **f** désignant les matrices masses, amortissement et raideur relative au seul champ libre, cette équation s'écrit :

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{u}}_f + \mathbf{C}_f \dot{\mathbf{u}}_f + \mathbf{K}_f \mathbf{u}_f = \mathbf{Q}_f \quad (\text{II-2-2})$$

Posant : le déplacement total pour le problème d'interaction :

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_i + \mathbf{u}_f \quad (\text{II-2-3})$$

Le déplacement d'interaction $\mathbf{u}_i$ est donné par l'équation :

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{K} \mathbf{u}_i = -\mathbf{Q}_i \quad (\text{II-2-4})$$

Avec :

$$\mathbf{Q}_i = [\mathbf{M} - \mathbf{M}_f] \ddot{\mathbf{u}}_f + [\mathbf{C} - \mathbf{C}_f] \dot{\mathbf{u}}_f + [\mathbf{K} - \mathbf{K}_f] \mathbf{u}_f \quad (\text{II-2-5})$$

Le vecteur de charge $\mathbf{Q}_i$ est déterminé à partir des déplacements en champ libre. Pour les systèmes linéaires, on a alors le théorème de superposition illustré sur la **figure II.4**.

Le problème d'interaction est décomposé en la somme d'un problème de réponse du sol en champ libre (II-2-2) et d'un problème source (II-2-4) où les forces appliquées $\mathbf{Q}_i$ n'ont de composantes non nulles qu'aux nœuds communs à la structure et au sol. Ce dernier problème est analogue à un problème de vibration de machine. Le déplacement total pour le problème d'interaction est alors donné par l'équation (II-2-3).

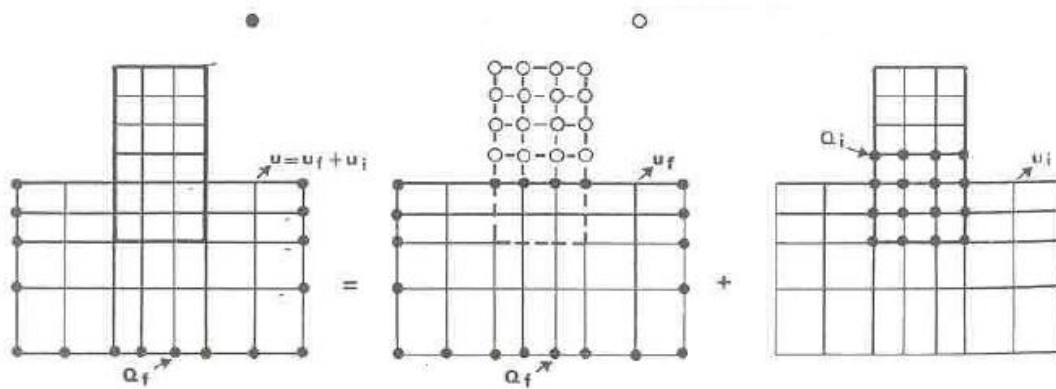


Figure II.4 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure [27]

II.2.2.Mouvement du sol en champ libre [28]:

Le mouvement sismique est défini par un accélérogramme ou par un spectre de réponse. Ce mouvement est très influencé par les conditions géotechniques locales. L'étude d'un site doit suivre les principes suivants :

- Définition du mouvement à la surface du sol.
- Niveau d'accélération réaliste pouvant être transmis par le sol.
- Caractéristique fréquentielle du mouvement compatible avec les caractéristiques physiques du site.
- Variation de l'accélération avec la profondeur dans des limites raisonnables.

On peut utiliser la méthodologie suivante :

- Définition d'un spectre sur un affleurement rocheux représentatif de l'environnement sismotectonique du site.
- Calcul de la réponse du site.
- Ajustement éventuel du spectre de réponse pour compenser la prise en compte d'un seul type d'onde à propagation verticale montre les spectres de réponses calculés à partir des enregistrements en champ libre et dans la structure à un même endroit. L'interaction sol structure est marquée par une atténuation des accélérations spectrales pour les fréquences supérieures [1].

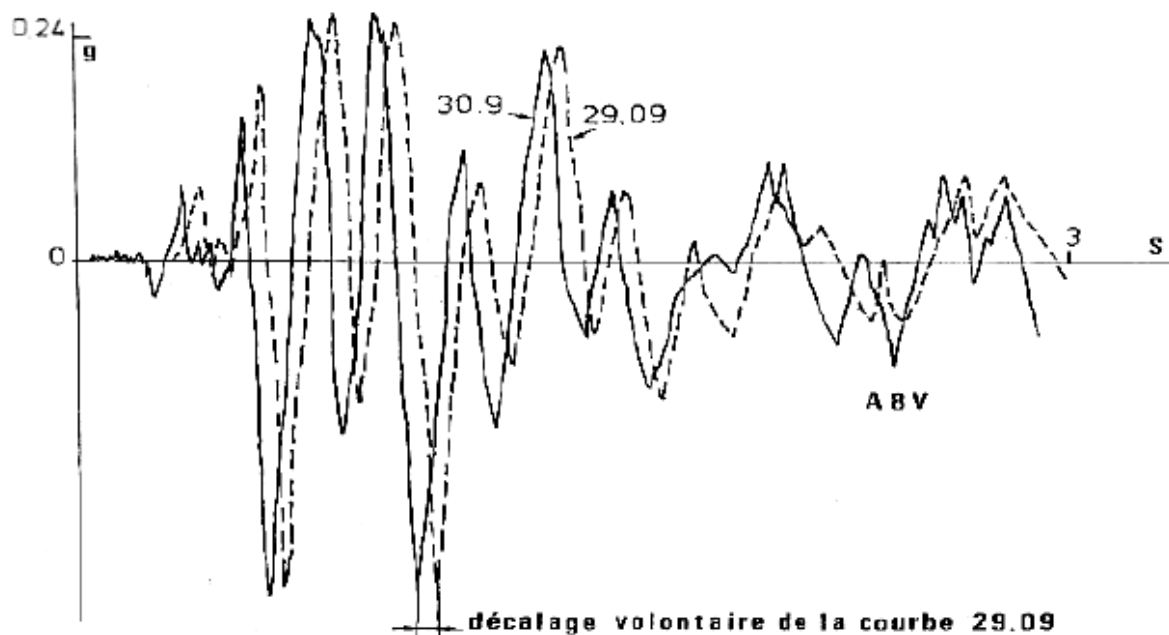


Figure II.5: Accélération en champ libre [28]

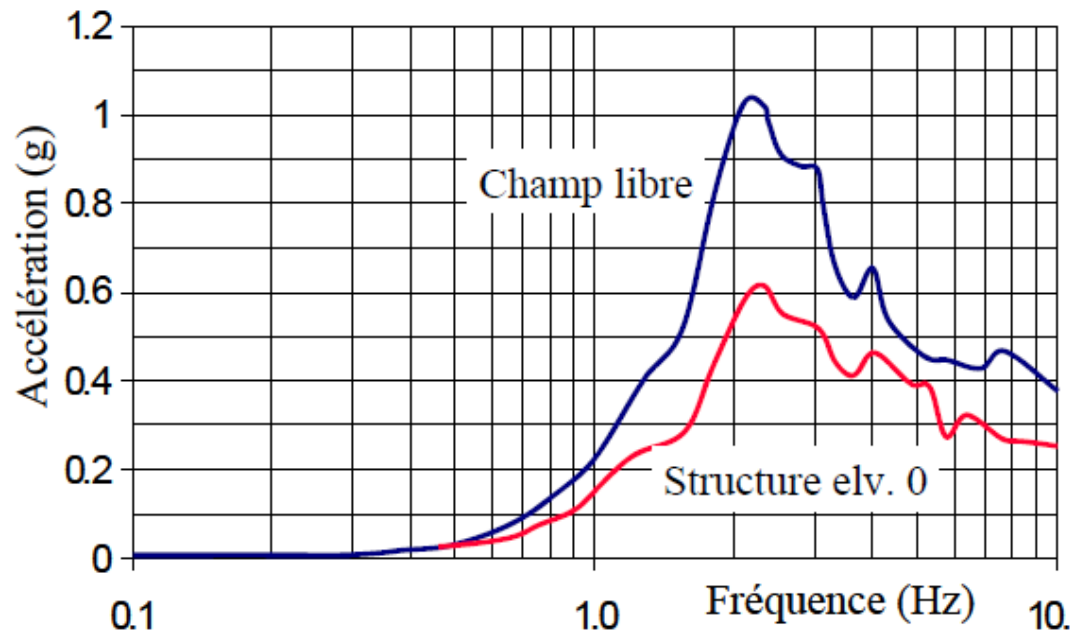


Figure II.6:Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS [27]

II.3.Méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure :

Il y a trois méthodes classiques pour tenir compte de l'interaction sol-structure :

- Méthodes globales.
- Méthodes de sous-structure.
- Méthodes hybrides.

II.3.1.Méthodes globales :

Les méthodes globales sont celles conduisant à une détermination simultanée du mouvement dans le sol et dans la structure. Le problème à résoudre est celui défini par l'équation du mouvement du système sol-fondation suivante :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = Q_f \quad (\text{II-3-1})$$

- $u, \dot{u}, \ddot{u}$: Représentent les vecteurs de déplacement, vitesse et accélération, Successivement.
- $[M], [C], [K]$: Sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système.
- Q_f : le vecteur de charge.
- Le symbole(.) : la dérivée par rapport au temps.

En théorie, les méthodes globales peuvent être étendues aux cas tridimensionnels et sont susceptibles d'appréhender les comportements non linéaires dus à la loi de comportement d'un des matériaux (sol le plus souvent) ou aux interfaces Sol-Structure (décollement ou glissement d'ouvrages sur leur fondation). En pratique, le coût de résolution de problèmes tridimensionnels est nettement prohibitif et on doit se restreindre aux problèmes bidimensionnels. L'avantage des méthodes globales est leurs capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès, soit des variations des caractéristiques de sol provenant de non linéarités plus prononcées dans certaines zones (angle des radiers,...etc.). Par ailleurs, l'expérience montre qu'elles sont généralement mieux adaptées et plus faciles de mise en œuvre pour l'étude d'ouvrages enterrés [29].

II.3.2. Méthode des sous-structures :

Les méthodes de sous-structures, contrairement aux méthodes directes, se basent sur la décomposition du problème global en sous-problèmes plus simples à traiter avant de faire appel au principe de la superposition afin d'obtenir les résultats globaux. Il est à noter que ces méthodes, comme tout problème de superposition ne sont applicables que pour des problèmes entièrement linéaires. L'approche utilisée est le principe de superposition de Kausel et al.(1978) est illustré dans la figure II.6 pour le cas des fondations rigides[24].

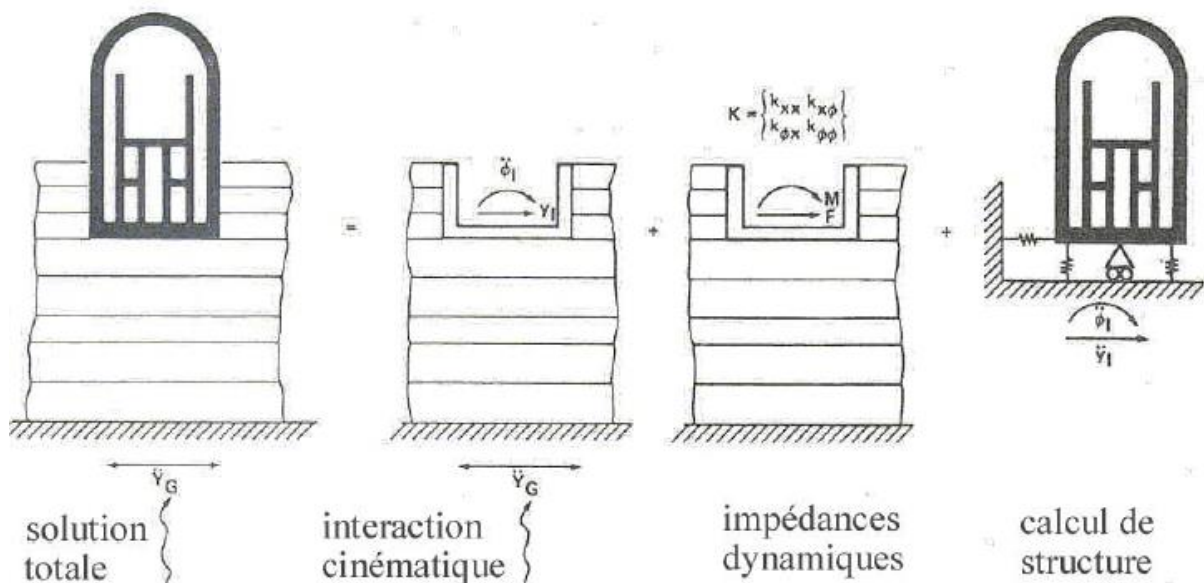


Figure II.7 : Principe de superposition de Kausel [27]

D'un point de vue pratique, cette méthode consiste à décomposer la résolution du problème en trois étapes successives [30]:

(i) Nous considérons le milieu {sol + fondation rigide sans masse}. En appliquant la sollicitation sismique à la base de ce milieu, nous déterminons l'accélération à laquelle sera soumise la fondation. C'est le calcul de l'interaction cinématique.

(ii) Nous calculons la matrice d'impédance dynamique de la fondation, permettant d'obtenir les raideurs ainsi que les termes d'amortissement dans les différentes directions.

(iii) Nous calculons la réponse dynamique de la structure supportée par les ressorts d'impédances trouvés en (ii) et soumise à la sollicitation calculée en (i).

II.3.3. Méthodes hybrides :

Dans la méthode de sous-structuration, la résolution du problème d'impédance constitue une étape longue et coûteuse, à l'exception du cas où une solution analytique existe. Pour éviter ce problème, Gupta et al. (Gupta et al., 1980), ont développé une méthode hybride. Cette méthode est intermédiaire entre la méthode directe et la méthode de sous-structuration. L'idée principale consiste à séparer le sol en deux domaines distincts dont le premier est un champ proche de la structure se trouvant à proximité de la fondation.

Il inclut toutes les hétérogénéités et non linéarités du système. Il s'intègre dans le modèle de la superstructure et peut être traité par une méthode directe, par exemple la méthode des éléments finis. Le deuxième est le champ loin de la semelle où le comportement du sol n'est pas affecté par l'interaction avec la fondation (Figure II.8). Le problème consiste alors à définir les coefficients de la matrice du champ lointain. Ainsi, le champ lointain peut être traité par les techniques adaptées pour les problèmes linéaires (exemple : impédances dynamiques), alors que le champ proche est incorporé dans le modèle de la superstructure et peut être traité par une méthode directe. Le point délicat des méthodes hybrides est la définition de la frontière entre le champ proche et le champ lointain, élément qui doit être déterminé indépendamment selon les particularités du problème traité [31].

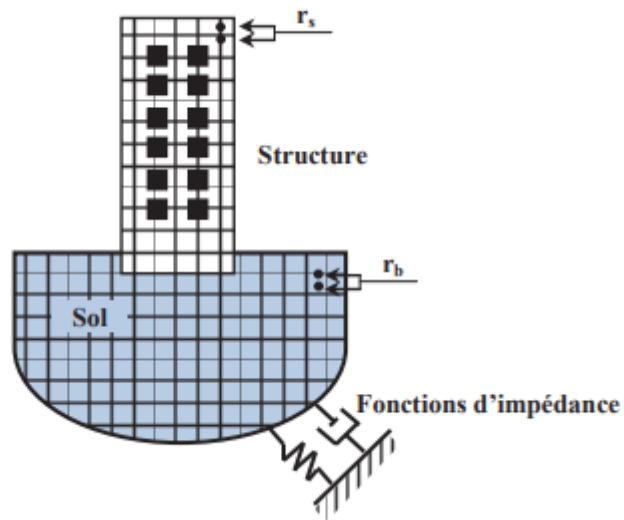


Figure II.8 : Méthode hybride [31]

II.4. Modélisation de l'interaction sol-structure :

La réponse d'une structure au mouvement sismique dépend de [28]:

- La nature de ce mouvement.
- Les propriétés dynamiques de l'ouvrage et de celles du sol.

Il ya deux méthodes utilisées pour modéliser l'ISS [28] :

- Soit intégrer dans un même modèle le sol associé et l'ouvrage (modélisé par des ressorts).
- Soit au contraire traiter par étape le sol jusqu'à sa surface puis la surface du sol et l'ouvrage (méthode globale ou directe).

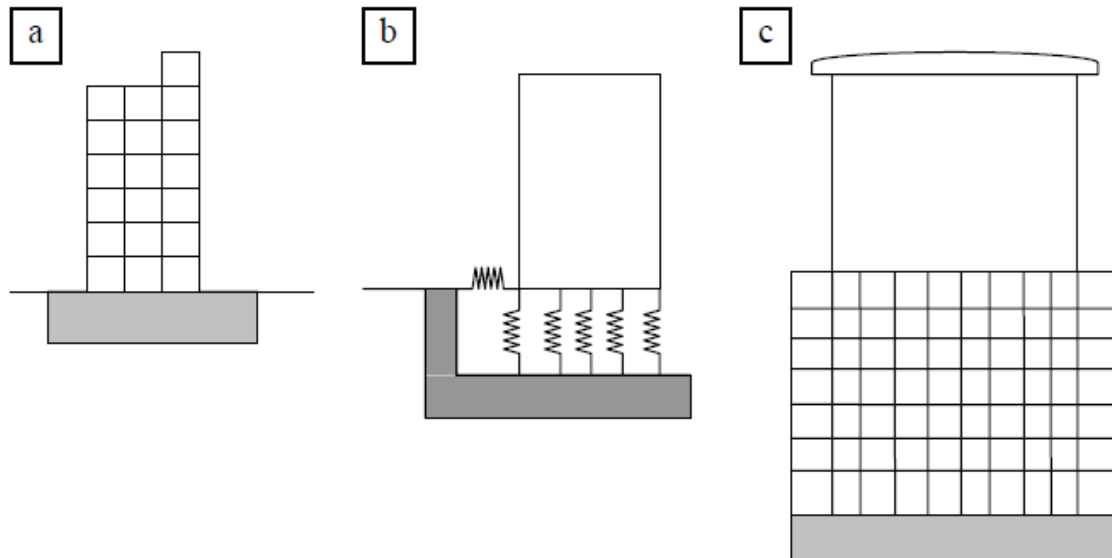


Figure II.9 : Types de modèles
a) Encastrement parfait ; b) Ressorts ; c) Eléments finis

II.4.1. Modélisation du sol par éléments ressorts :

Le comportement du sol a été tout d'abord modélisé par des ressorts de sol définissant les réactions élastiques de ce dernier à l'égard des composantes 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).

Comme il été indiqué précédemment le sol est représenté par des ressorts reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide, voir figure II.10.

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)

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 [32].

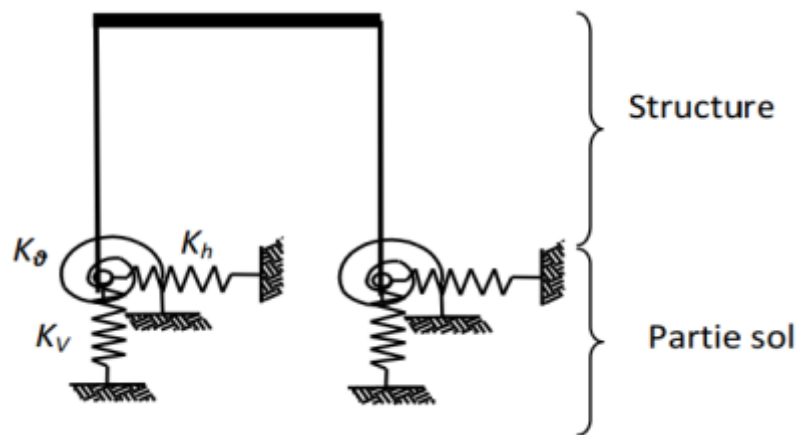


Figure II.10 : Modèle tenant en compte de l'ISS [1].

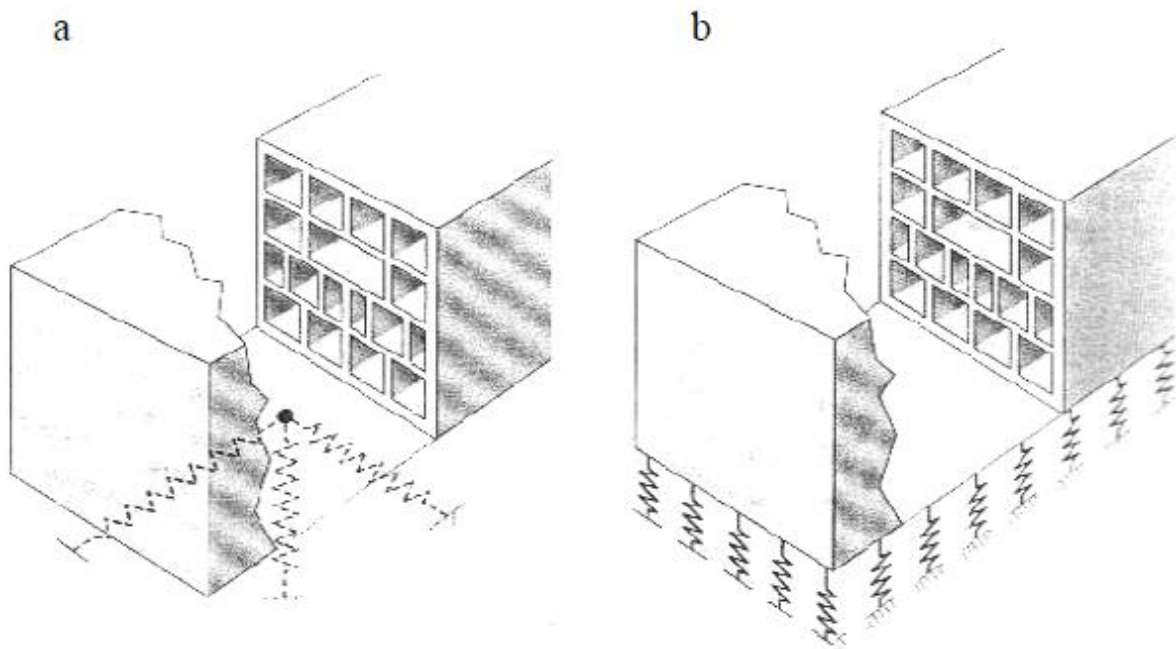


Figure II.11 : Modélisation du sol par un système de ressorts .
a) Ressorts concentrés ; b) Ressorts répartis [28].

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

II.4.1.1.Méthode de Newmark-Rosenblueth :

Cette méthode est indépendante de la fréquence de la structure et permet d'estimer et de contrôler les valeurs des raideurs et des amortissements du sol. Afin d'obtenir un meilleur ajustement dans la bande des bases et moyennes fréquences, qui sont celles présentant le plus d'intérêt en cas de séismes, Rosenblueth a introduit une masse virtuelle de sol, liée à la fondation du bâtiment. L'ajout de cette masse ne modifie pas radicalement la réponse dynamique de la structure. La masse du sol additionnelle est concentrée au nœud d'interface sol-fondation au niveau inférieur du radier. Les raideurs du sol ainsi que les amortissements sont donnés par le Tableau II.1 [33].

Tableau II.1 : Formules de Newmark Rosenblueth [33]

Mouvement	Hauteur du prisme de sol H	Amortissement Relatif ou critique η	Raideurs K	
			Fondation circulaire	Fondation Rectangulaire
Vertical	$0,27\sqrt{A}$	$2,71\sqrt{\frac{\rho H^3}{M_b+M_s}}$	$K_v = \frac{4G.r_0}{1-\nu}$	$K_v = \frac{G}{1-\nu}\beta_z\sqrt{A}$
Horizontal	$0,05\sqrt{A}$	$20,55\sqrt{\frac{\rho H^3}{M_b+M_s}}$	$K_h = \frac{32(1-\nu)G.r_0}{7-8\nu}$	$K_h = 2(1+\nu)G\beta_x\sqrt{A}$
Balancement	$0,35\sqrt{A}$	$0,485\sqrt{\frac{\rho H^3}{I_b+I_s}}$	$K_\phi = \frac{8G.r_0^3}{8(1-\nu)}$	$K_\phi = \frac{G}{1-\nu}\beta_\phi a^2 b$
Rotation autour de l'axe Vertical	$0,25\sqrt{A}$	$1,88\sqrt{\frac{\rho H^3}{J_b+J_s}}$	$K_R = \frac{16G.r_0^3}{3}$	$K_R = \frac{1+\nu}{4}G\beta_x(a^2 + b^2)\sqrt{A}$

Avec :

- **A** : Aire de la fondation ($A=a \times b$)
- **a** : Dimension parallèle à la direction du séisme.
- **b** : Dimension perpendiculaire à la direction du séisme.
- **M_b** : Masse du bâtiment.
- **M_s=A.H.ρ** : Masse de sol additionnelle ayant même aire que la fondation du bâtiment.
- **H_s** : Hauteur du prisme de sol.
- **J_b; I_b** : Inerties massiques du bâtiment par rapport à la fondation.
- **J_s; I_s** : Inerties massiques de la masse additionnelle de sol par rapport à la fondation.
- **r₀** : Rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire.
- **ν** : Coefficient de Poisson. ; **G** : Module de cisaillement dynamique du sol [KN/m²]
- **β_z; β_x; β_φ** : sont des paramètres dépendant du rapport a/b et ils sont donnés par l'abaque suivant :

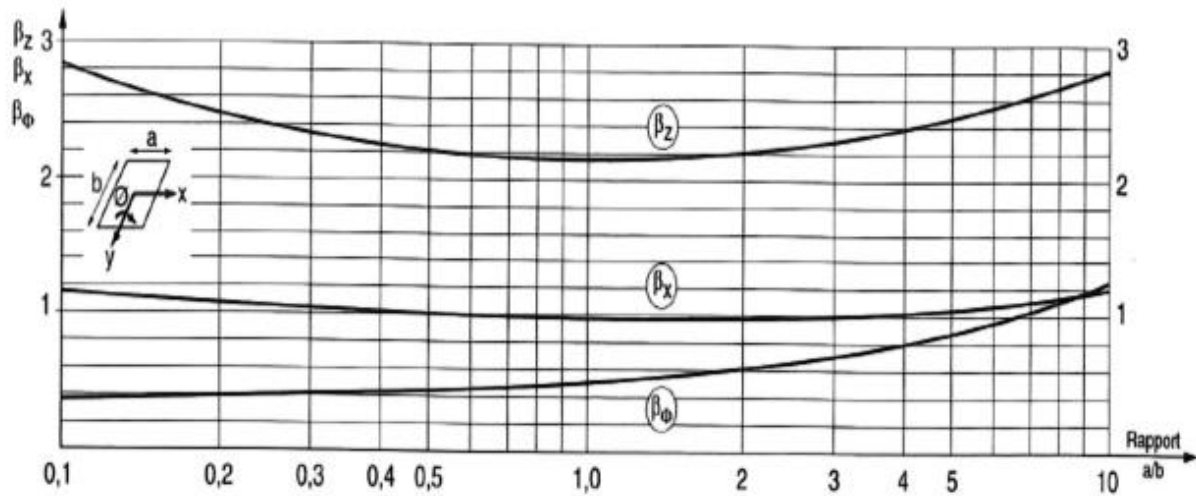


Figure II.12: Abaques donnant les coefficients de Newmark β_z ; β_x et β_ϕ [33]

II.4.1.2. Méthode de Deleuze [1] :

Cette méthode peut être appliquée dans le cas où les fondations, circulaires ou assimilées, peuvent être considérées comme superficielles et suffisamment rigides. Le sol est représenté par un système de ressorts qui relie le ou les nœuds représentatifs de la fondation de l'ouvrage au repère de sol en champ libre. La modélisation de l'ISS par ressorts concentrés 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 est plus complexe mais les efforts obtenus sont directement exploitables pour le dimensionnement du radier. Les coefficients de raideur sont calculés pour chaque direction sismique en fonction des coefficients de transmittance f (tableau II.4, II.5, II.6) par les expressions suivantes .

Tableau II.2 : Les coefficients de raideur en fonction des coefficients de transmittance f .

Translation vertical	Translation horizontal	Rotation
$K_v = GR_0 \frac{f v_1}{f^2_{v_1} + f^2_{v_2}}$	$K_h = GR_0 \frac{f h_1}{f^2_{h_1} + f^2_{h_2}}$	$K_r = GR_0 \frac{f r_1}{f^2_{r_1} + f^2_{r_2}}$

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

Pour les fondations rectangulaires ayant les dimensions a et b , les rayons équivalents sont indiqués dans le tableau II.3 suivant :

Tableau II.3 : Rayons équivalents pour une fondation rectangulaire de dimensions a et b .

Vertical	Horizontal	Rotation	Torsion
$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$	$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$	$R = \sqrt[4]{\frac{a^3b}{3\pi}}$	$R = \sqrt[4]{\frac{ab(a^2+b^2)}{6\pi}}$

Les coefficients de transmittance f_v, f_h, f_r ont été établis par Deleuze avec les hypothèses suivantes :

- Le sol est un solide semi-infini, élastique et homogène, isotrope et limité par un plan.
- La réaction de sol sous la fondation est linéaire. La surface d'appui n'est donc pas plane, elle est donnée par la résolution du second problème de Boussinesq. Les déplacements du nœud de la fondation sont assimilés à ceux du centre d'inertie de la fondation, la rotation de la fondation est celle du plan moyen de la surface d'appui.
- L'amortissement géométrique correspond au rayonnement des ondes dans le sol.

Tableau II.4: Coefficients de transmittance verticale f_v du sol.

a_0	$\nu = 0.01$		$\nu = 0.25$		$\nu = 0.5$	
	f_{v1}	f_{v2}	f_{v1}	f_{v2}	f_{v1}	f_{v2}
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

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

Tableau II.5 : Coefficients de transmittance horizontale f_h du sol.

a_0	$\nu = 0.5$		$\nu = 0.25$		$\nu = 0.01$	
	f_{h1}	f_{h2}	f_{h1}	f_{h2}	f_{h1}	f_{h2}
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 II.6 : Coefficients de transmittance en rotation f_r du sol.

a_0	$\nu = 0.5$		$\nu = 0.25$		$\nu = 0.01$	
	f_{r1}	f_{r2}	f_{r1}	f_{r2}	f_{r1}	f_{r2}
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** : dimension parallèle à la direction du séisme.
- **b** : dimension perpendiculaire à la direction du séisme.
- **R_0** : rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire (voir tableau II.3).
- **ρ** : masse volumique du sol.
- **G**: 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 avec les coefficients et masses de sol de

Roseblueth; $a_0 = 2\pi R_0 \sqrt{\frac{\rho}{G}}$

II.4.2. Modélisation par des éléments finis [35]:

Pour mieux prendre en compte les propriétés dynamiques du sol, on peut remplacer par des éléments finis les ressorts. Le sol est alors représenté par des couches successives d'éléments empilés sur une base qui représente le soubassement rocheux (figure II.13). Chaque couche est caractérisée par un module d'élasticité, un coefficient de Poisson, une masse volumique et un coefficient d'amortissement.

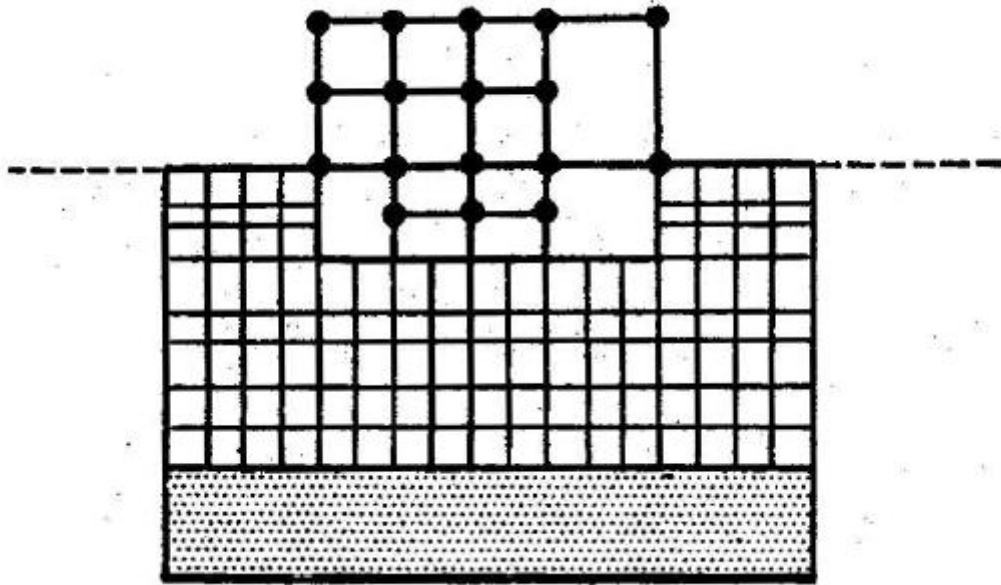


Figure II.13 : Modélisation par des éléments finis [35]

Conclusion :

Ce chapitre expose de façon sommaire le problème d'interactions sol-structure ainsi que la modélisation de cette interaction compte tenu de la nature du mouvement et des propriétés dynamiques de l'ouvrage et du sol [15].

II.5.Méthode d'analyse:

Les méthodes de calcul doivent tenir compte : de la séismicité du site, des caractéristiques dynamiques de la construction et des conditions du sol [3].

Choix de la méthode de calcul :

Le calcul des forces sismiques peut être mené par trois méthodes :

- la méthode statique équivalente.
- la méthode d'analyse modale spectrale.
- la méthode d'analyse dynamique par accélérogramme.

II.5.1.Méthode d'analyse modale spectrale :

1. Principe :

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure [17].

2. Caractéristiques d'analyse [3]:

Cette méthode est sans doute, la méthode la plus fréquemment utilisée pour l'analyse sismique des structures, elle est caractérisée par :

- La définition du mouvement sismique imposé aux supports sous la forme d'un spectre de réponse.
- L'hypothèse d'un comportement global linéaire de la structure permettant l'utilisation des modes propres.

3 .Méthodologie de calcul :

Elle comporte les étapes suivantes:

- Etablissement d'un modèle de calcul reproduisant au mieux le comportement dynamique réel de la structure.
- Calcul des modes propres et fréquences propres du modèle.
- Lecture sur le spectre de réponse des valeurs maximales et des modes propres.
- Calcul des réponses de la structure par combinaison des réponses modales.

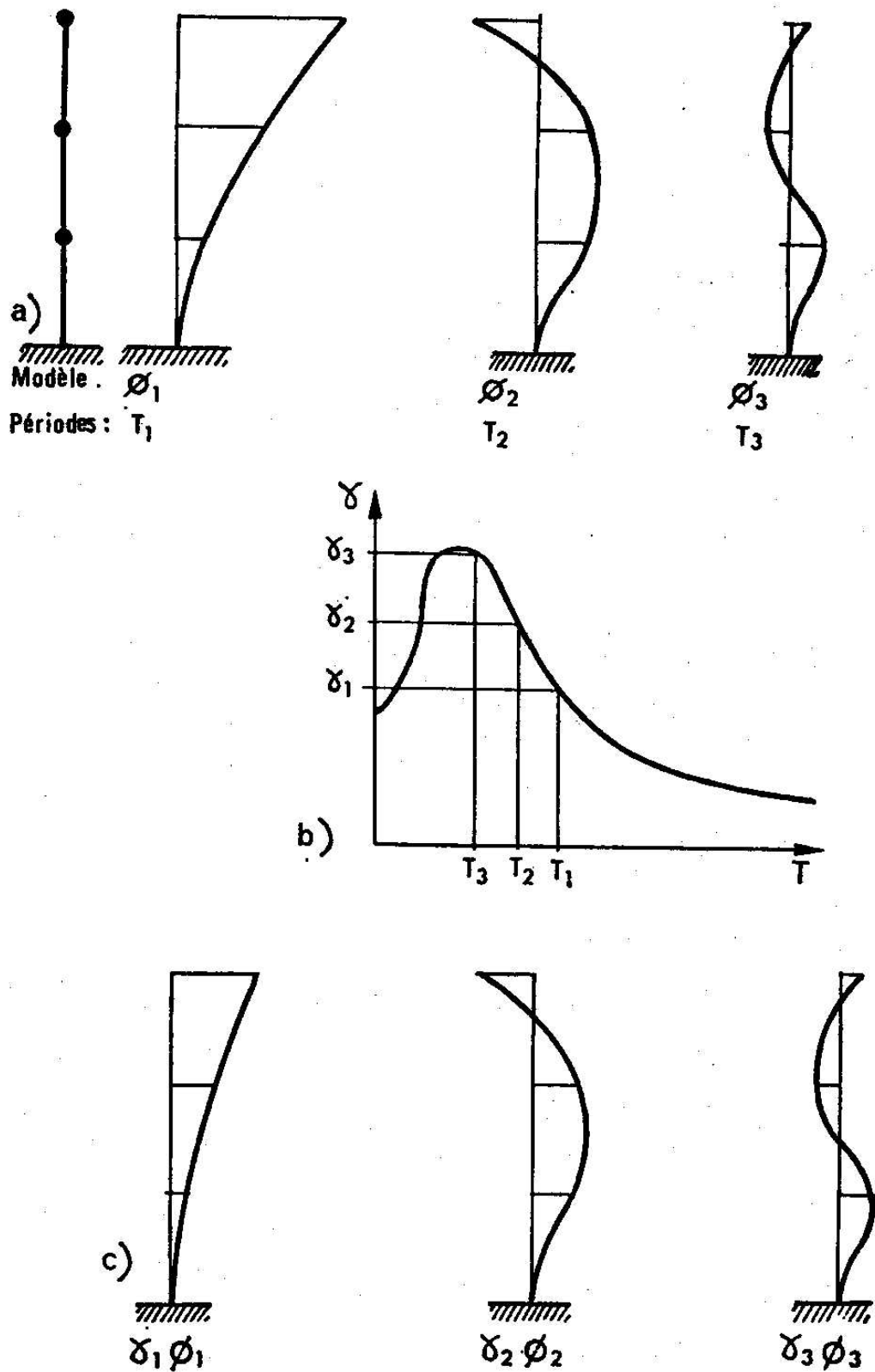


Figure II. 14: principes de l'étude, du spectre de réponse [35].

a) Calcul des vecteurs propres. b) Lecture du spectre. c) Réponses modales.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

1. Spectre de réponse de calcul :

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant [17]:

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

- **S_a** : Accélération spectrale associée au mode de vibration de période T du bâtiment.
- **A**: Coefficient d'accélération de zone (Tableau I.1)
- **η** :Facteur de correction d'amortissement (quant l'amortissement est différent de 5%)

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$$

- **ξ** : Pourcentage d'amortissement critique (Tableau II.7)
- **R**:Coefficient de comportement de la structure.
- **Q** : Facteur de qualité $Q = 1 + \sum_1^6 P_q$
- **T1, T2** : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (Tableau I.2)

Tableau II.7 : Valeurs de ξ (%)

Remplissage	Portiques		Voiles ou Murs
	Béton armé	Acier	Béton armé /maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

Chapitre II : Interaction Sol-Structure (ISS)

La réponse de la structure est évaluée en considérant les quatre spectres de calcul associés aux différentes catégories de site (S1, S2, S3 et S4) figure II.15

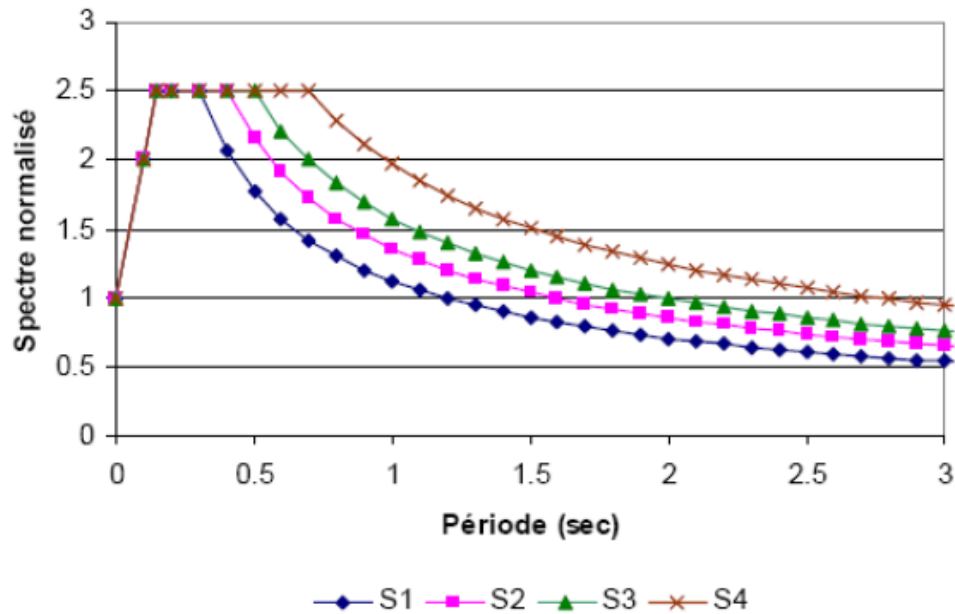


Figure II.15 : Spectres de réponse élastiques normalisés [17]

2.Situations à considérer [17]:

Les modes de vibration à considérer est :

- Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions
 - la somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit au moins égale à 90% de la masse totale de la structure,
 - ou que tous les modes retenus ont une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale;

- Dans le cas où les conditions citées ci-dessus alors :

Le nombre minimal de modes (K) : $K \geq 3\sqrt{N}$; $T_k \leq 0.2$ s

- N : est le nombre de niveaux au-dessus du sol
- T_k : la période du mode K.

4. Influence du sol sur le spectre de réponse :

Les ondes sismiques se propagent dans le rocher, puis en certains endroits à travers des sédiments dont les caractéristiques vont influencer sur le mouvement du sol enregistré en surface.

Les spectres seront donc différents selon qu'ils correspondent à un affleurement rocheux ou à un dépôt sédimentaire [37].

En effet, on constate souvent que les ouvrages édifiés sur un sol meuble subissent des dommages plus importants que ceux situés sur un sol rocheux. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les couches de sols meubles se comportent comme un oscillateur qui amplifie l'excitation appliquée à la base par le rocher [38]

Ainsi, lorsqu'il s'agit de choisir un spectre pour un site donné, il est très important de connaître la nature du sol, puisque les sols durs transmettent de préférence les hautes fréquences et les sols mous les basses fréquences [39].

Conclusion :

Les spectres de réponse constituent un outil très pratique pour les ingénieurs de quantifier les exigences du mouvement du tremblement de terre sur la capacité des bâtiments à résister aux tremblements de terre [38].

Chapitre III

Structure Portique en béton armé

Introduction :

La structure est généralement soumise à trois types d'action, à savoir les actions permanentes, les actions variables et accidentelles, Parmi les actions accidentelles «le séisme» [40], est un événement violent et extraordinaire qui peut provoquer l'endommagement, voire même l'effondrement des structures [13]. Les dommages rencontrés dans les structures en béton armé sous sollicitations sismiques diffèrent selon le type de contreventement choisi [41], et par L'étude des dommages subis à la suite des tremblements de terre a permis de mieux comprendre la nature des mouvements sismiques et d'identifier les faiblesses des structures et leur comportements[42].

III.1.Différents type de structures en béton armé :

III.1.1.structure en voile :

Le contreventement par les voiles apparaisse comme bien adapté à la construction parasismique parce qu'ils limitent les déformations relatives et protègent l'intégrité des éléments non structuraux [3], leur grande résistance et leur rigidité contribuent à contrôler les déplacements globaux et à minimiser les déplacements inter-étages excessifs. Reprenant la plus grande partie des efforts latéraux, ils améliorent le comportement des structures et jouent un rôle primordial pour la sécurité [43].



Figure III.1 : Construction d'une maison en voile béton armé.

III.1.2. Structure mixte (portique + voile) :

Les bâtiments formés par l'interaction des portiques et des voiles en béton armé sont connus sous le nom d'un system mixte où hybride.

Les voiles sont des éléments porteurs rigides en béton armé, destinés à transmettre les charges latérales dans les fondations, supportent la majorité des charges sismiques et une partie des charges verticales, cependant les portiques supportent une partie des charges horizontales et le reste des charges verticales. Les voiles deviennent ainsi la structure principale dont le rôle est de résister aux forces horizontales [44]. Ainsi la meilleure façon de rendre les bâtiments en portique parasismiques est des contreventer par des voiles en béton armé. Ce type de contreventement est souvent employé pour la construction des bâtiments à un nombre d'étages élevés, de grandes importances dans les zones de forte sismicité [45].



Figure III.2 : structure mixte d'un bâtiment.

III.1.3. Structure en portique (poteau+poutre) :

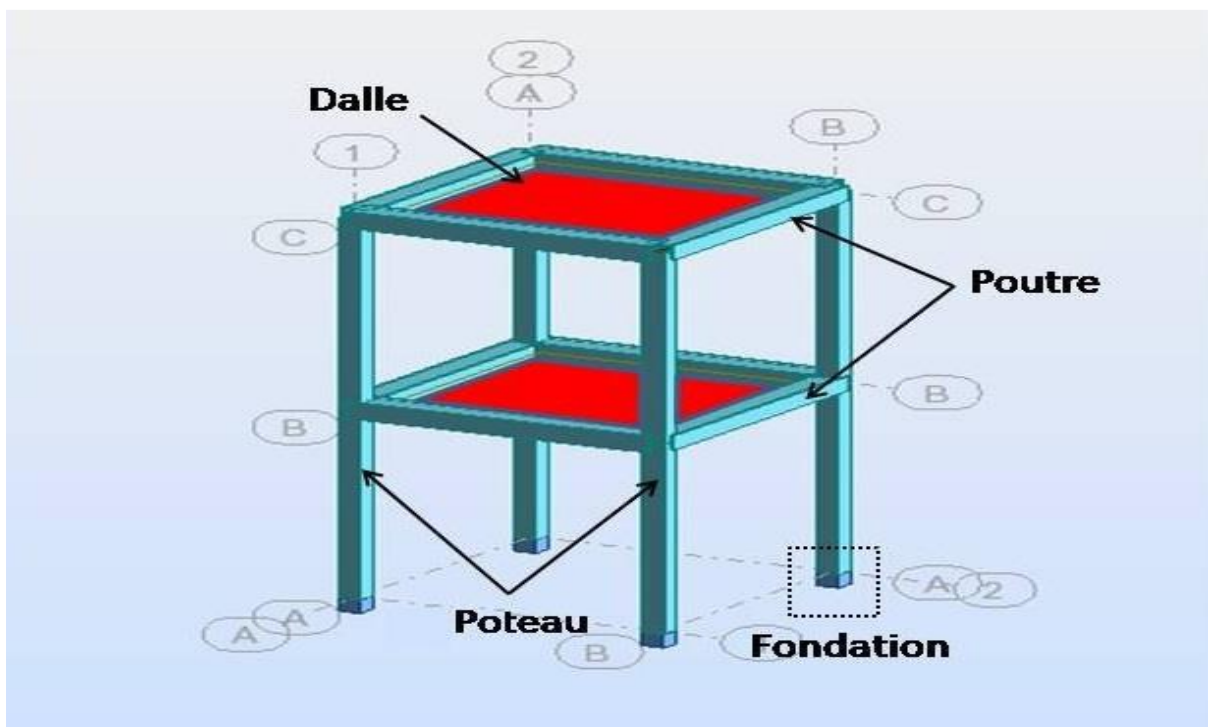
1) Définitions :

a) Définition des structures portiques :

Les structures portique sont des structures pour les quelles les charges dynamiques horizontales passent par les mêmes éléments de la structure que les charges statiques verticales [46].

b) Définition de portique :

Le portique est une structure élémentaire, constituée de deux poteaux supportant une poutre, ces trois éléments ayant leur axe contenu dans un même plan. Sa fonction structurelle est de porter les charges qui s'appliquent sur lui en les déviant vers ses fondations, pour générer ainsi un espace dégagé[47].



2) Différents types de structures portique :

Il y a deux types de portiques auto-stables en béton armé[17]:

a) Portiques auto- stables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide : C'est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.

Cette catégorie, les éléments de remplissage ne doivent pas gêner les déformations des portiques. Et les bâtiments concernés ne doivent pas dépasser **5 niveaux** ou **17 m** en zone **I**, **4 niveaux** ou **14m** en zone **IIa** et **3 niveaux** ou **11m** en zone **IIb** et **III**.

b) Portiques auto- stables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide : C'est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.

cette catégorie, les éléments de remplissage de la structure sont constitués par des murs en maçonnerie de petits éléments insérés dans le cadre poteaux poutres dont l'épaisseur ne dépasse pas 10 cm exception faite pour les remplissages périphériques ou les séparations entre deux (2) logements ou deux locaux d'un même niveau où une deuxième paroi de 5 cm, du côté intérieur est tolérée; Cette dernière peut éventuellement avoir une épaisseur de 10 cm à condition qu'elle ne soit pas insérée dans les cadres poteaux poutres pour ne pas aggraver les phénomènes d'interaction maçonnerie -structure.

Les bâtiments concernés ne doivent par ailleurs pas dépasser **5 niveaux** ou **17m**. En zone **I** et **4 niveaux** ou **14m** en zone **IIa** **3 niveaux** ou **11 m** en zone **IIb** et **2 niveaux** ou **8 m** en zone **III**.

3) Effets de séisme sur les structures portiques :

Les structures contreventées par portique auto-stables sont les plus touchées car par le séisme, et parmi ces dommages :

- **Rotule plastique aux nœuds poteau-poutre** : En cas de séisme fort, les nœuds sont les zones les plus touchées.



Figure III.3 : Rupture en zone nodale[48]



Figure III.4 : Rotule dans le poteau [48]



Figure III.5 : Rotule dans la poutre [48]



Figure III.6 : Dislocation de la section[48]

- **Cisaillement des poteaux :** Cette situation est très fréquente dans les cas où le joint sismique n'est pas suffisant.



Figure III.7 : Cas de poteaux courts sans protection – tous les poteaux sont cisailés[48]



Figure III.8 : Dommages dus aux poteaux courts dus au vide sanitaire[48]

- Rupture par écrasement :



Figure III.9 : Ecrasement du béton et flambement des aciers dans les poteaux dans l'escalier[48]

- **flambement des poteaux** : Ce phénomène se produit Dans le cas où la section des poteaux est faible et la qualité du béton est mauvaise.



Figure III.10 : Flambement de poteaux[48]

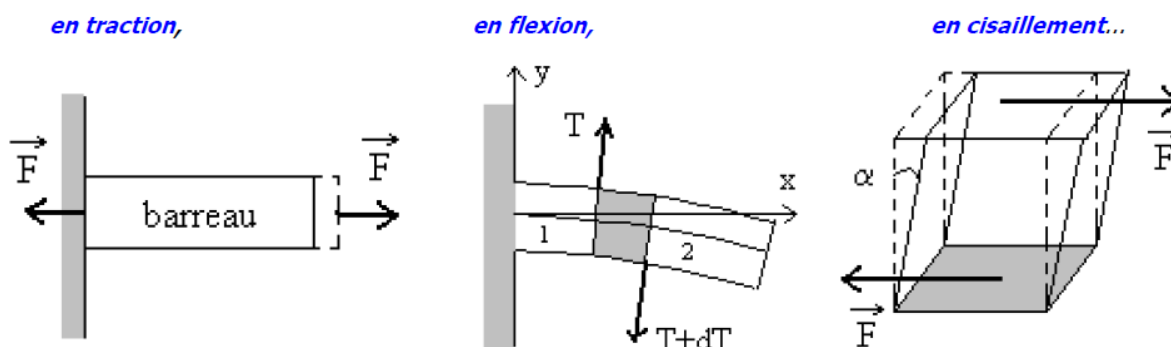
- **Endommagement des poutres par flexion** : La première cause de ce phénomène est la fissuration dans la travée des poutres, et être à cause des charges gravitaires ou les effets de la composante verticale du séisme.



Figure III.11 : Rupture par flexion des poutres[48]

III.2.Déformation des bâtiments:

Dans le domaine de la construction, tous les matériaux et l'élément subissent des déformations de différents types, Parmi les déformations pour différents éléments sont:



Traction : le matériau est soumis à deux forces opposées et s'étire.

Flexion : un matériau est soumis à deux forces opposées ; un côté s'allonge sous la traction et l'autre côté se raccourcit sous l'effet d'une compression.

Cisaillement : le matériau est soumis à deux forces opposées ; une diagonale s'allonge sous l'effet d'une traction et l'autre se raccourcit sous l'effet d'une compression.

On peut savoir quel sera le mode de déformation de chaque élément constructif sous l'action d'un séisme et déterminer où il faut le renforcer pour éviter sa rupture fragile. Il est également nécessaire de prévoir le schéma de déformation global du bâtiment [49].

III.3.Force d'inertie :

Lorsque la base du bâtiment subit les secousses sismiques, le haut du bâtiment ne suit pas le mouvement du sol et tend à rester immobile, principalement à cause de la force d'inertie que les immeubles et les infrastructures sont endommagés pendant un tremblement de terre. Ainsi, entraîne une déformation du bâtiment et son effondrement.

Les forces d'inertie, lors d'un séisme, s'exercent sur les bâtiments de la manière suivante :

- **Mouvements horizontaux :**

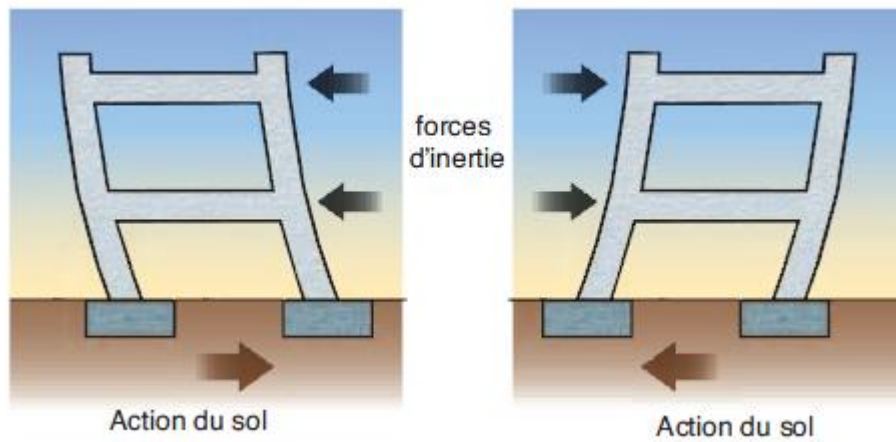


Figure III.13 :Oscillation horizontales des constructions.

- **Mouvements verticaux :**

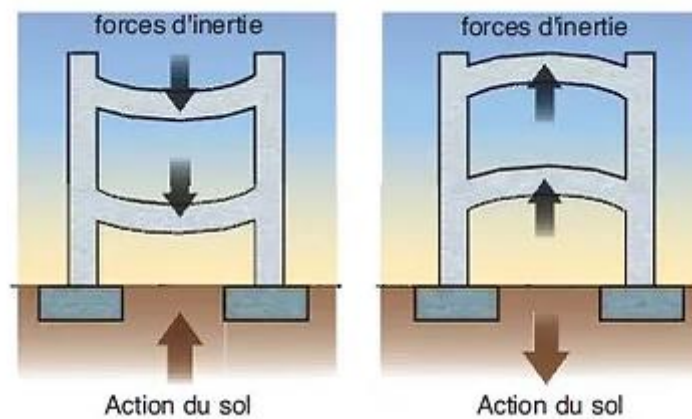


Figure III.14 :Oscillation verticaux.

- **Mouvements de torsion :**

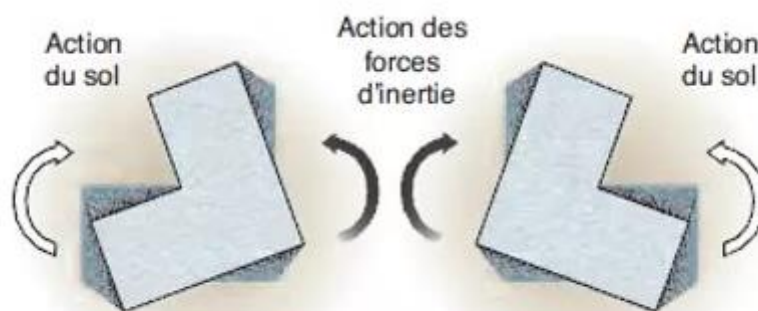


Figure III.15 :Oscillation de torsion.

III.4.Types de dégâts :

III.4.1. Effets directs :

Peut classer les dégâts typiques des tremblements de terre dans les catégories suivantes :

1. Effondrement en galette :

Ce type d'effondrement se produit lorsque la stabilisation latérale est insuffisante. Les étages s'effondrent alors les uns sur les autres.



Figure III.16 : Effondrement sous forme d'une galette.

2. Fissures en croix :

Fissures apparaissent principalement dans les murs en briques, qui présentent une faible résistance à la traction, ce qui peut conduire éventuellement à l'effondrement total du bâtiment. La forme en croix provient du fait que l'action sismique ne s'exerce pas uniquement dans une seule direction, mais qu'elle s'inverse plusieurs fois.

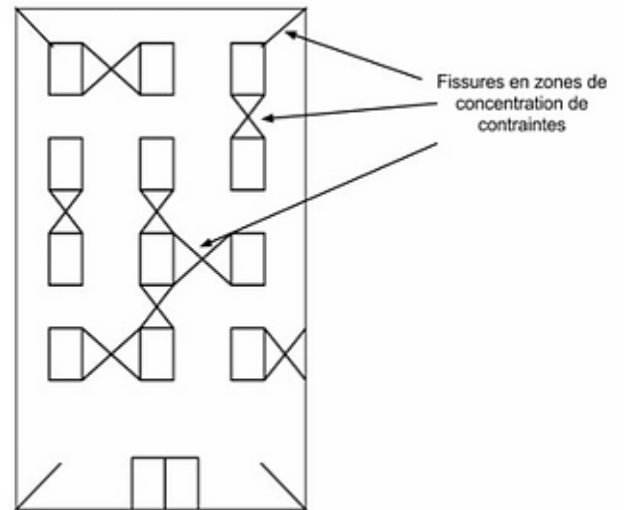


Figure III.17: Fissures en croix.

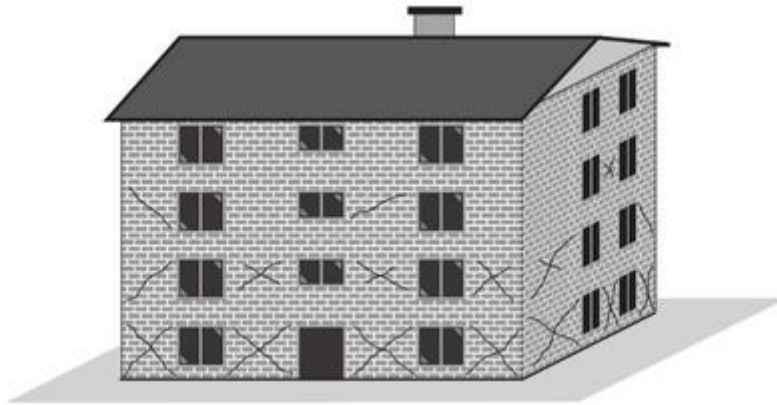


Figure III.18 : Les fissures en croix dans les bâtiments[14]

3. Etage souple :

C'est considéré le dégât sismique le plus répandu, Lorsqu'un seul étage est touché.

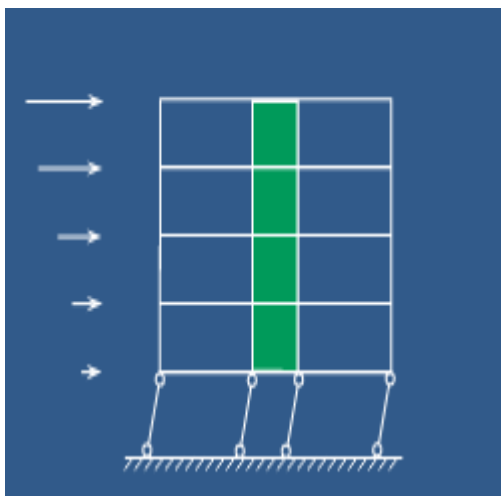


Figure III.19 : Etage souple[34]



Figure III.20 :troisième étage de cet immeuble[34]

4. Poteau courte :

Le poteau qui fait partie d'un cadre est entravée dans une partie de sa hauteur par des éléments de maçonnerie. Des dégâts se produisent en cas de Poteau captive ou de poteau courte.



Figure III.21 : Dommages dus à l'effet de poteau court en vide sanitaire et dû à la présence d'allèges en maçonnerie dans la structure principale en portiques[1]

5. Martèlement :

Les bâtiments sont soumis à des sollicitations horizontales importantes. Deux bâtiments voisins peuvent donc entrer en collision si l'espace qui les sépare n'est pas suffisant. Le danger est particulièrement important si les bâtiments n'ont pas la même hauteur ou que les étages ne coïncident pas.



Figure III.22: Martèlement.

III.4.2. Effets indirects :

1. Liquéfaction :

Le phénomène de liquéfaction intervient lorsque les sols sont chargés en eau. Sous l'effet des ondes sismiques, la pression de l'eau dans le sol va augmenter et le sol va alors perdre sa cohésion (**Figure III.23**)

2. Mouvements gravitaires (glissements, affaissements et éboulements de terrains) :

Un séisme fragilise les sols et peut être à l'origine de glissements de terrain ou de coulées de boues (**Figure III.24**)



Figure III.23 : La liquéfaction (Turquie 1999).



Figure III.24 : Glissement de terrain.

Conclusion :

Pour assurer une bonne résistance aux séismes, les ouvrages doivent des forme simples (rectangle), car les formes géométriques simples sont les plus résistants. Pour éviter les dommages nous avons utilisé contreventement.

Les structures portique en béton armé subissent des dommages très importants lors d'un séisme, leur comportement est lié aux comportements intrinsèques des matériaux constitutifs ainsi qu'à l'interaction entre le portique et le panneau de maçonnerie [42].

Chapitre IV

Modélisation Numérique

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation numérique dont l'objectif principal est l'évaluation de l'interaction sol- structure (ISS) d'un bâtiment multi étages en portiques en béton armé comme système de résistance aux charges latérales, en utilisant l'analyse Dynamique-linéaire(spectre de réponse) pour déterminer les déplacements , les efforts tranchants et les moments dans le deux cas sans et avec l'interaction sol- structure (ISS),en prend en considération différents types de sol (S1: rocheux; S2:ferme; S3:meuble; S4:très meuble). La modélisation consiste à effectuer une analyse dynamique –linéaire par spectre de réponse en 3D d'un bâtiment R+3 à l'aide du logiciel SAP 2000. Cette analyse en 3D permettra principalement d'évaluer les réponses sismiques dans les deux principaux sens, ensuite on compare les résultats pour connaître l'effet de l'ISS sur les structures en portiques en béton armé.

IV.1. Présentation et caractéristiques des structures :

IV.1.1. Description du bâtiment étudié :

Le projet que nous avons en train d'étudier est un bâtiment à usage d'habitation, composé de Rez de chaussée plus 3 étages (R+3) est classée dans le groupe d'usage 2, le bâtiment est implanté dans la commune de m'sila (wilaya m'sila), Qui est classée comme une zone de moyenne sismicité (IIa), d'après les règles parasismiques algériennes (RPA99V2003). Le système de contreventement est composé des portiques, 08 dans le sens transversal et 04 dans le sens longitudinal (voir figure IV.1). Les planchers de 20 cm d'épaisseur (16cm hauteur du corps creux + 4cm épaisseur de la dalle de compression). Les dimensions des poutres principales et secondaires sont (30x40) cm² et les poteaux ont des sections (40 x 40)cm² (voir figure IV.2).

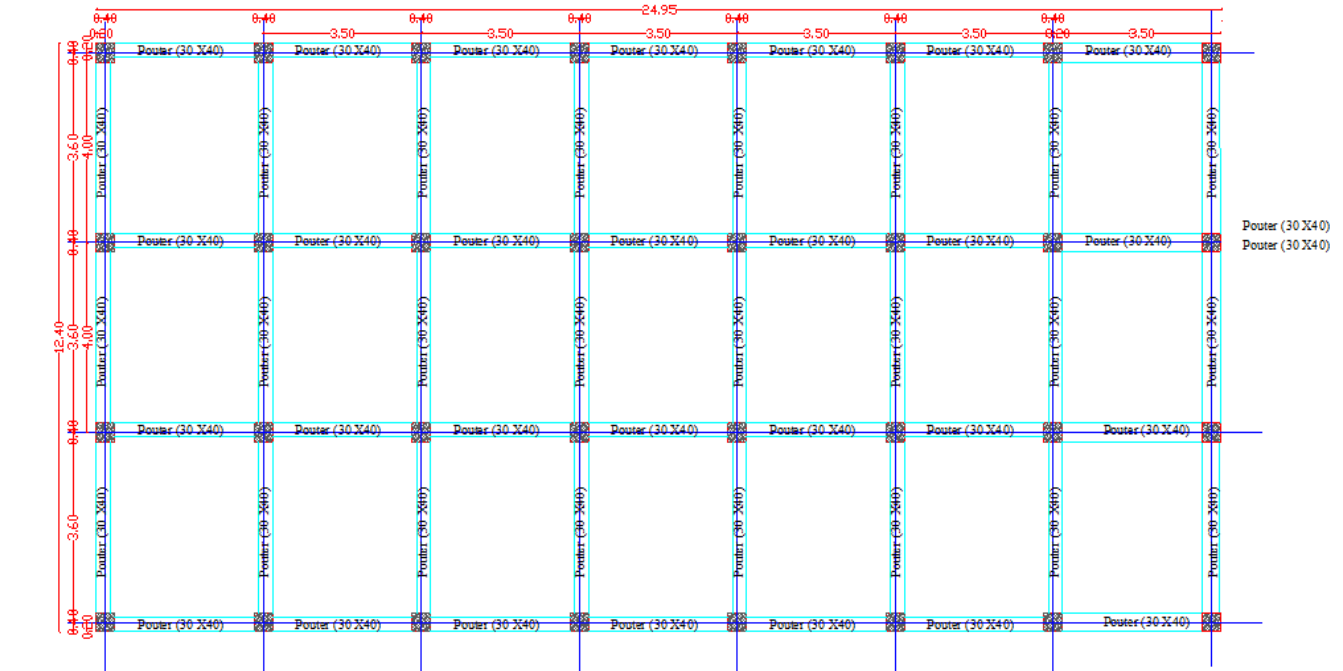


Figure IV.1 : Vue en plan d'un étage courant.

Poteaux et Poutres :

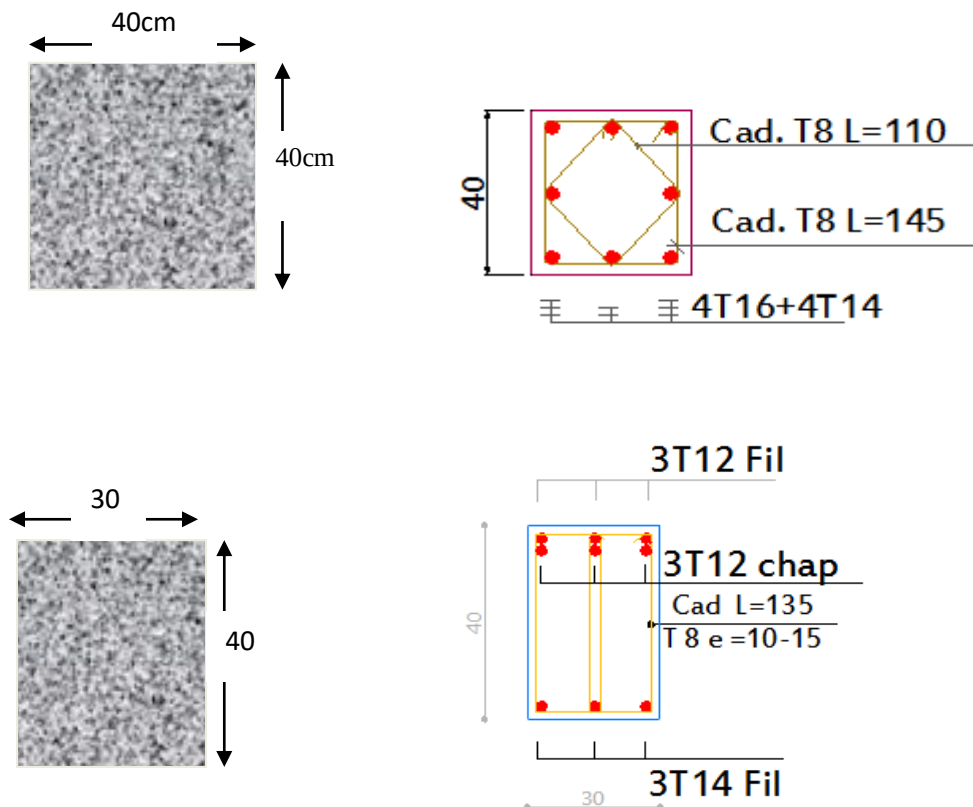


Figure IV.2 : Sections et ferrailage des poteaux et poutres.

Chapitre IV: Modélisation Numérique

IV.1.2.Caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques du bâtiment étudié sont récapitulées dans le tableau IV.1:

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du bâtiment étudié.

Les caractéristiques géométriques	Valeur [m]
Longueur Totale	24,9
Largeur Totale	12,4
Hauteur De Chaque étage	3,00
Hauteur Totale	12

IV.1.3.Caractéristiques des matériaux :

Les propriétés du béton et acier utilisés :

⇒ **Béton :**

Tableau IV.2 :Caractéristiques de béton.

La résistance caractéristique à la compression	$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$
La résistance caractéristique à la traction	$f_{t28} = 2,1 \text{ MPa}$
Le module de déformation longitudinal instantané	$E_{ij} = 32164,195 \text{ MPa}$
Le module de déformation longitudinal différé	$Ev_j = 10818,865 \text{ MPa}$
Coefficient de Poisson	à l'ELU : $\nu = 0$ calcul des sollicitations (béton fissuré)
	à l'ELS : $\nu = 0,2$ calcul des déformations (béton non fissuré)
Déformation limite élastique	$\varepsilon_{be} = 2\text{‰}$
Déformation ultime	$\varepsilon_{bu} = 3,5 \text{ ‰}$
Module de déformation transversale	$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

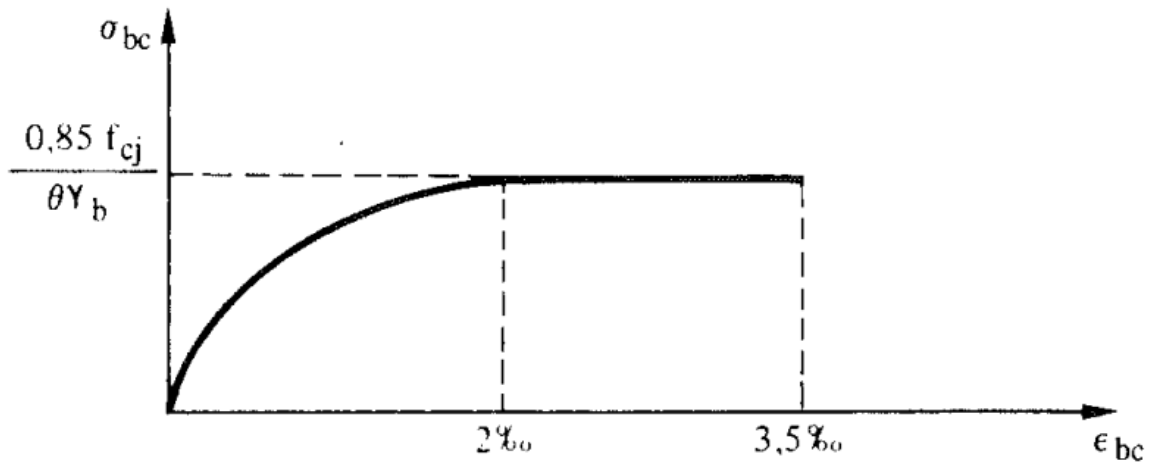


Figure IV.3:Diagramme de déformation-contrainte pour le béton [36]

⇒ **Acier :**

Tableau IV.3 :Caractéristiques d'acier.

Résistance limite élastique de l'acier Haute adhérence	$f_e = 400 \text{ MPa}$
Déformation limite élastique	$\epsilon_{se} = 2 \text{ ‰}$
Déformation ultime	$\epsilon_{su} = 10 \text{ ‰}$

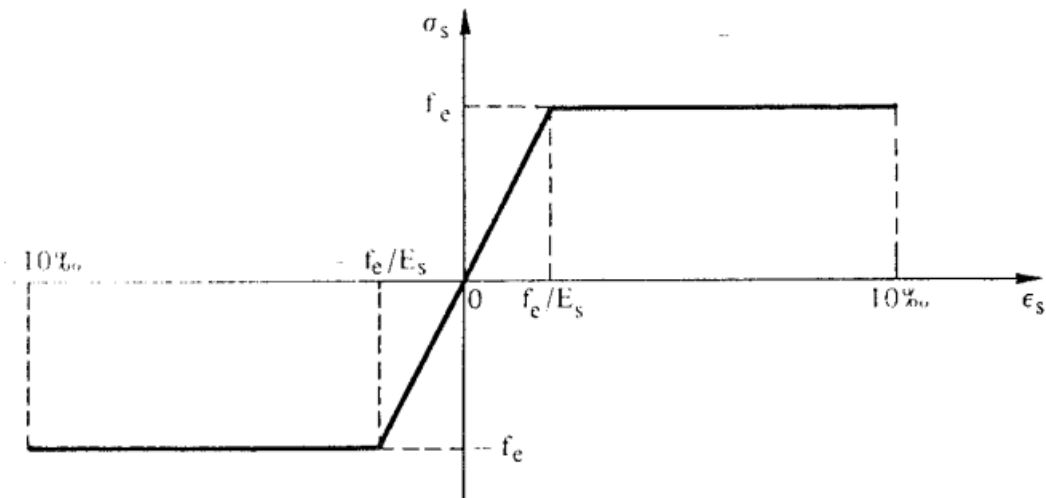


Figure IV.4 : Diagramme de déformation-contrainte pour l'acier [36]

IV.1.4.Charges gravitaires :

Les charges gravitaires utilisées sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.4 :Charge permanent et d'exploitation.

Charge permanente(G)	4,5KN/m ²
Charge d'exploitation (Q)	1,5KN/m ²

IV.2.Modélisation de la structure :

La structure est située en zone moyenne sismicité (IIa) et de groupe d'usage 2, le coefficient de comportement de la structure $R = 3,5$, Facteur de qualité $Q = 1$, et l'amortissement 5%.

IV.2.1. Modélisation sans interaction sol-structure (ISS) :

Dans le cas sans interaction sol-structure (ISS), on utilisera l'encastrement à la base. La réponse de la structure est évaluée en considérant les quatre spectres de calcul associés aux différents types de sol (S1:rocheux; S2:ferme; S3:meuble; S4:très meuble).La figure IV.5 représente la géométrie générale du modèle en 3D.

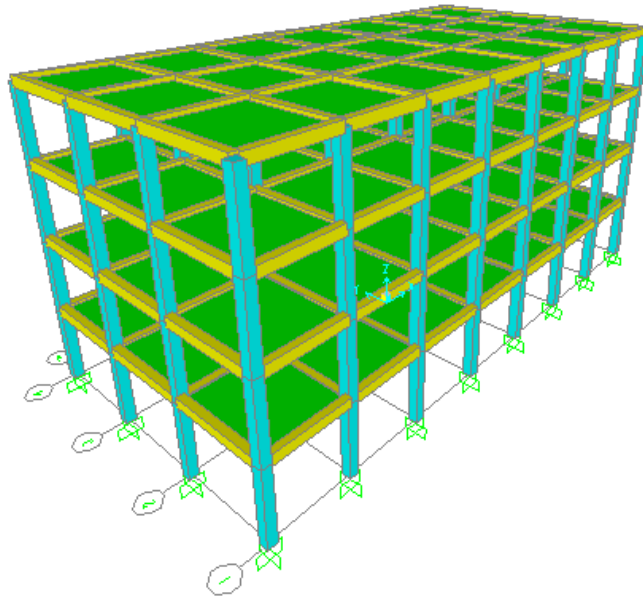


Figure IV.5: Vue en 3D de structure sans interaction sol-structure (ISS).

IV.2.2. Modélisation avec interaction sol-structure (ISS) (ressorts de sol) :

Dans le cas où interaction sol structure on utilisera le même modèle de la structure utilisé en cas sans ISS, Le modèle ressorts de sol définit la réaction élastique de sol à l'égard des composantes de déplacement et de rotation de la fondation(voire figure).

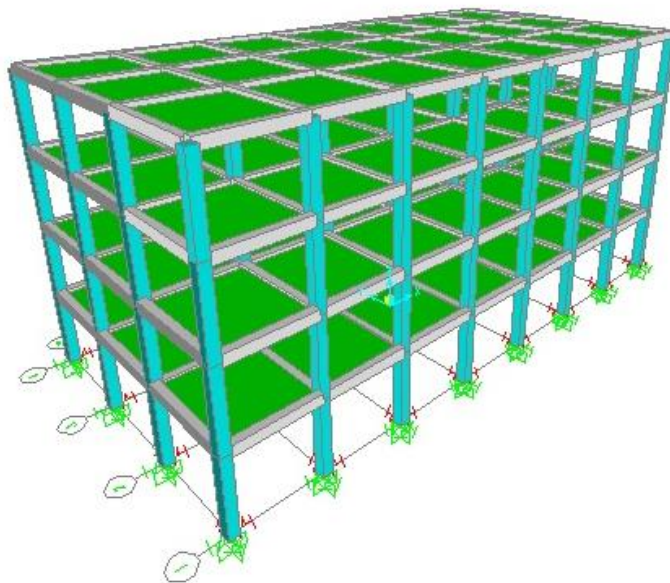


Figure IV.6: Vue en 3D de structure avec interaction sol-structure (ISS).

Chapitre IV: Modélisation Numérique

Tableau IV.5 : Caractéristiques mécaniques des types de sol et les valeurs des coefficients de Newmark.

Site	type de sol	Module de Young E(MPa)	Coefficient de poisson ν	Module de cisaillement dynamique G [KN/m ²]	dimensions de fondation (b/a)	coefficients Newmark		
						β_ϕ	$\beta_{x,y}$	β_z
S1	Rocheux	200	0,3	76923,08	1	0,5	1	2,19
S2	Ferme	60	0,3	23076,92	1	0,5	1	2,19
S3	Meuble	10	0,4	3571,429	1	0,5	1	2,19
S4	Très Meuble	2	0,4	714,2857	1	0,5	1	2,19

Le tableau ci-dessous donne le coefficient de raideur de ressort K de fondation rectangulaire, calculé par la méthode de Newmark et les lois en tableau II.1 p25.

Tableau IV.6 : Résultats des valeurs des Raideurs des sols.

Sol	K_v [KN/m]	K_h [KN/m]	K_ϕ [KN.m]/rad
S1(Rocheux)	240659,3	200000	54945,05
S2(ferme)	72197,8	60000	16483,52
S3(Meuble)	13035,71	10000	2976,19
S4(Très Meuble)	2607,143	2000	595,2381

IV.3.Résultats et interprétation sur les structures :

Les résultats obtenus sont calculés par SAP2000

IV.3.1. Résultats des déplacements :

Les déplacements horizontales de la structure sans et avec ISS pour les quatre types de sol sont présentées dans les tableaux IV.7, IV.8 respectivement :

Chapitre IV: Modélisation Numérique

Tableau IV.7 : Déplacements [cm] sans ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (sens X).

Sol Niveau (m)	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0
3	0,157	0,189	0,208	0,208
6	0,368	0,445	0,489	0,489
9	0,535	0,646	0,710	0,710
12	0,629	0,760	0,835	0,835

Tableau IV.8 : Déplacements [cm] avec ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (sens X).

Sol Niveau (m)	S1	S2	S3	S4
0	0,007	0,03	0,193	0,721
3	0,238	0,422	0,661	1,763
6	0,457	0,688	0,972	2,492
9	0,621	0,873	1,194	3,147
12	0,717	0,976	1,327	3,751

Tous les résultats montrés dans les tableaux précédents (IV.7 à IV.8) sont présentés sous forme graphique dans les figures IV.7, IV.8, IV.9, IV.10.

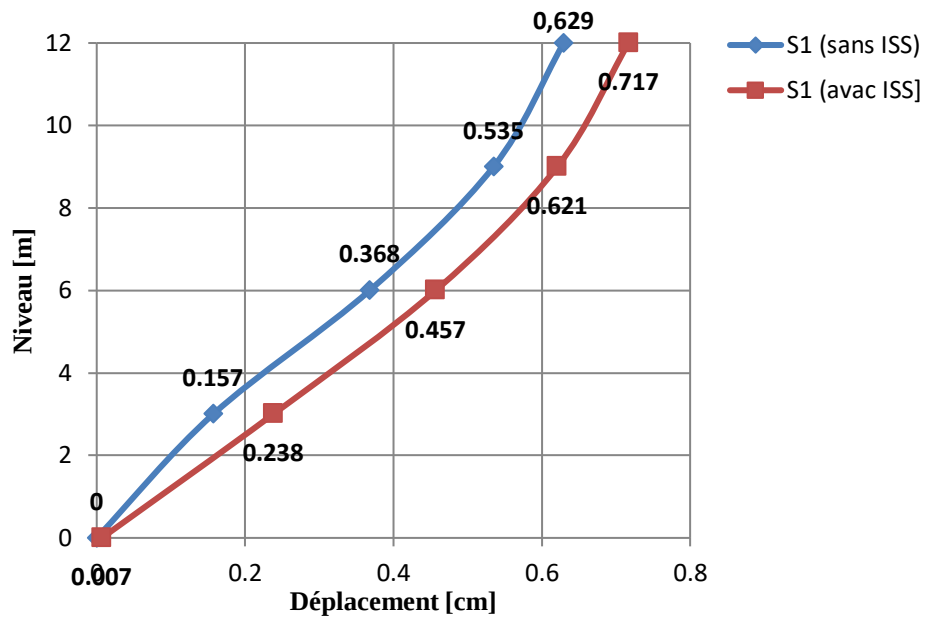


Figure IV.7: Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).

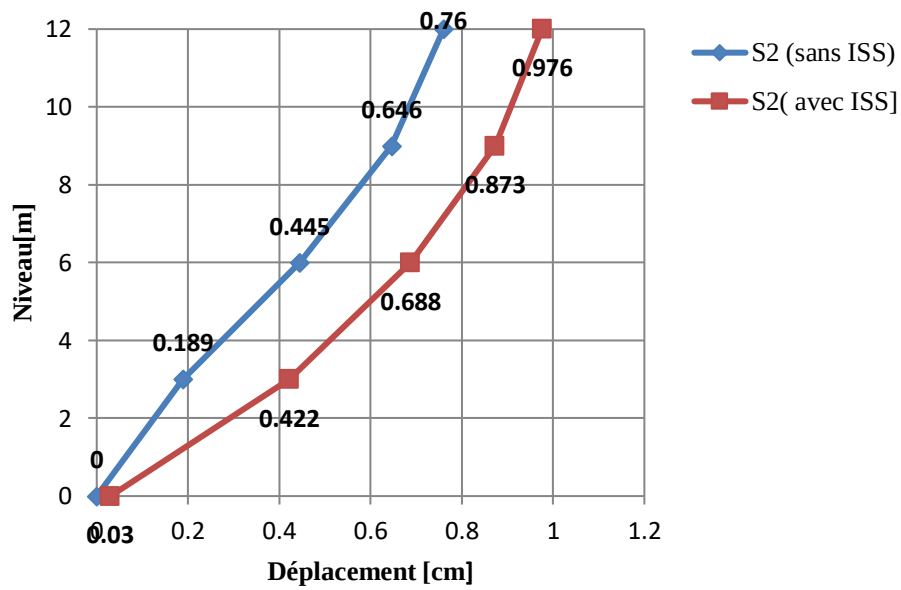


Figure IV.8: Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sol S2).

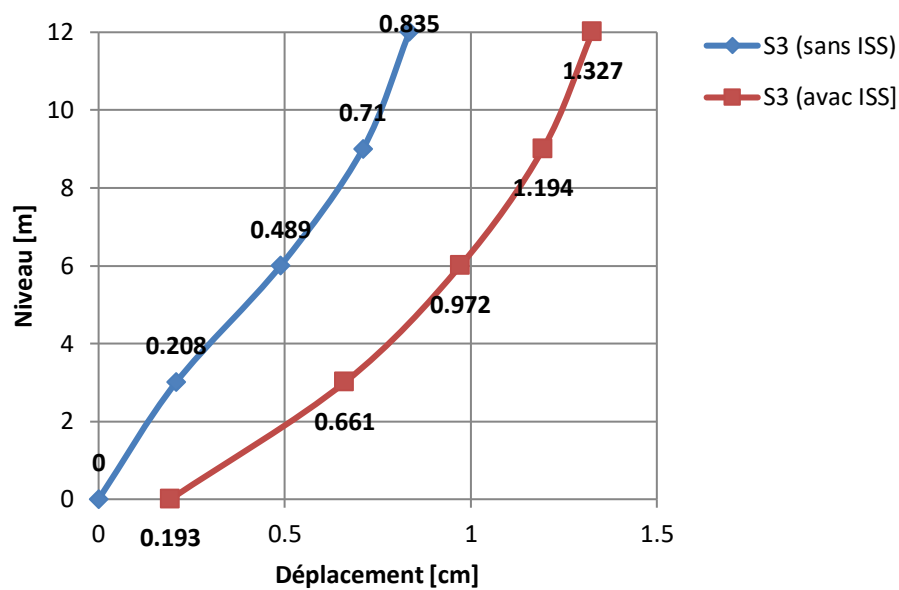


Figure IV.9: Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sol S3).

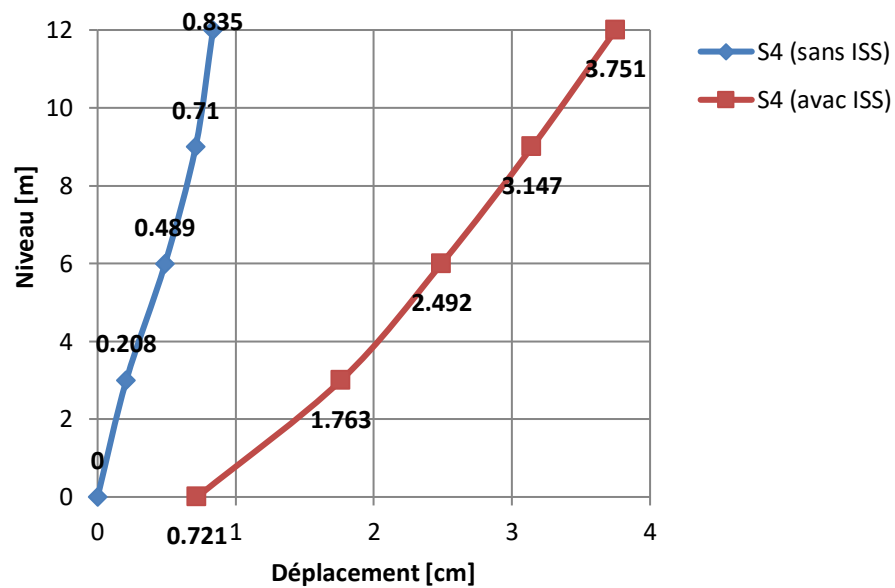


Figure IV.10: Déplacements horizontal (sens x) du poteau de rive sans et avec ISS (sol S4).

➤ **Commentaires :**

Le déplacement de chaque étage est représenté dans des tableaux (IV.7, IV.8) et des figures (figure IV.7, IV.8, IV.9, IV.10), à partir des quels on peut voir :

- Dans les deux cas sans et avec ISS, le déplacement augmente en fonction du niveau de la structure dans les quatre types de sol.
- Le déplacement dans le cas avec ISS augmente plus vite que dans sans ISS.

- Dans le cas sans ISS le déplacement à la base est nul.
- Dans le cas avec ISS le déplacement à la base augmente en fonction de sol.
- Les sols S3 et S4 dans le cas sans ISS ont mêmes valeurs de déplacements.

IV.3.1.1. Déplacement maximal :

Le tableau IV.9 et les figures IV.11, IV.12 ci-dessous présentent les résultats des déplacements maximaux obtenues pour la structure sans et avec l'interaction sol-structure :

Tableau IV.9: Comparaison des résultats des déplacements maximal [cm] sans et avec ISS.

Site	Sans ISS	Avec ISS	comparaison
S1	0,629	0,717	1,139
S2	0,76	0,976	1,284
S3	0,835	1,327	1,589
S4	0,835	3,751	4,492

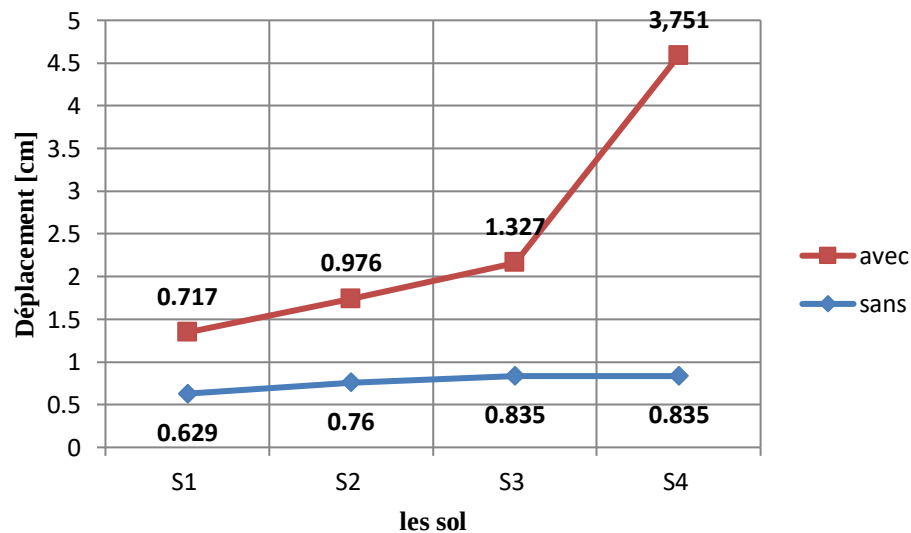


Figure IV.11: Variation du déplacement en fonction du sol sans et avec ISS.

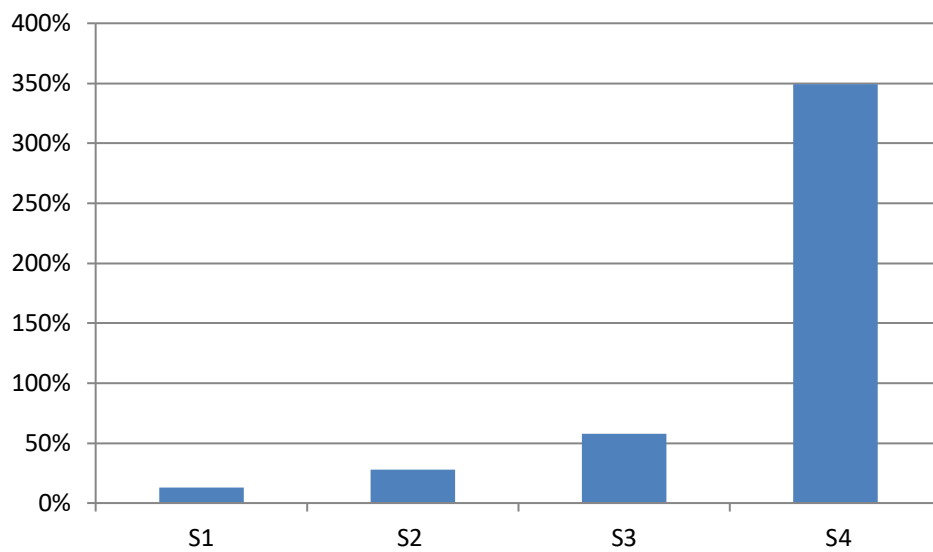


Figure IV.12: Comparaison des résultats des déplacements sans et avec ISS pour les différents type des sol.

➤ **Commentaires :**

- Dans la (figure IV.11)on remarque que dans le cas avec ISS, le déplacement de la structure est plus grand que dans le cas sans ISS pour tous les sols S1, S2, S3 et S4.
- La comparaison entre les sols sans ISS et avec ISS montre que le déplacement maximal augmente de 13% pour le sol1 (S1), 28% pour le sol 2 (S2), 58% pour le sol 3 (S3) et de 109% pour le sol 4 (S4).

IV.3.2. Résultats de l'effort tranchant :

Les efforts tranchants de la structure sans et avec ISS pour les quatre types de sol sont présentées dans les tableaux IV.10, IV.11 respectivement :

Tableau IV.10 : Les efforts tranchants [KN] sans ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (Sens X).

Niveau (m)	Sol			
	S1	S2	S3	S4
0	21,537	25,965	28,51	29,872
3	21,537	25,965	28,51	29,872
3	21,537	25,965	28,51	29,872
3	15,441	18,648	20,488	21,506
6	15,441	18,648	20,488	21,506
6	15,441	18,648	20,488	21,506
6	11,623	14,012	15,386	17,102
9	11,623	14,012	15,386	17,102
9	11,623	14,012	15,386	17,102
9	5,12	6,113	6,688	7,221
12	5,12	6,113	6,688	7,221
12	0	0	0	0

Chapitre IV: Modélisation Numérique

Tableau IV.11 : Les efforts tranchants [KN] avec ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (Sens X).

Niveau (m)	Sol			
	S1	S2	S3	S4
0	21,48	26,336	30,117	22,399
3	21,48	26,336	30,117	22,399
3	21,48	26,336	30,117	22,399
3	13,038	14,517	12,408	5,354
6	13,038	14,517	12,408	5,354
6	13,038	14,517	12,408	5,354
6	10,139	12,067	10,916	3,486
9	10,139	12,067	10,916	3,486
9	10,139	12,067	10,916	3,486
9	3,634	4,603	2,161	2,762
12	3,634	4,603	2,161	2,762
12	0	0	0	0

Tous les résultats montrés dans les tableaux précédents (IV.10 à IV.11) sont présentés sous forme graphique dans les figures IV.13, IV.14, IV.15, IV.16.

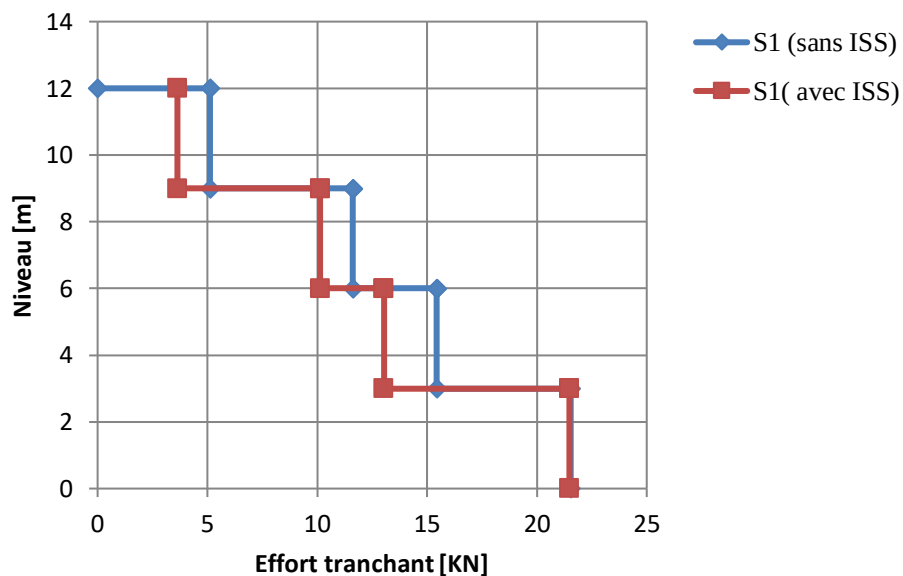


Figure IV.13: Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).

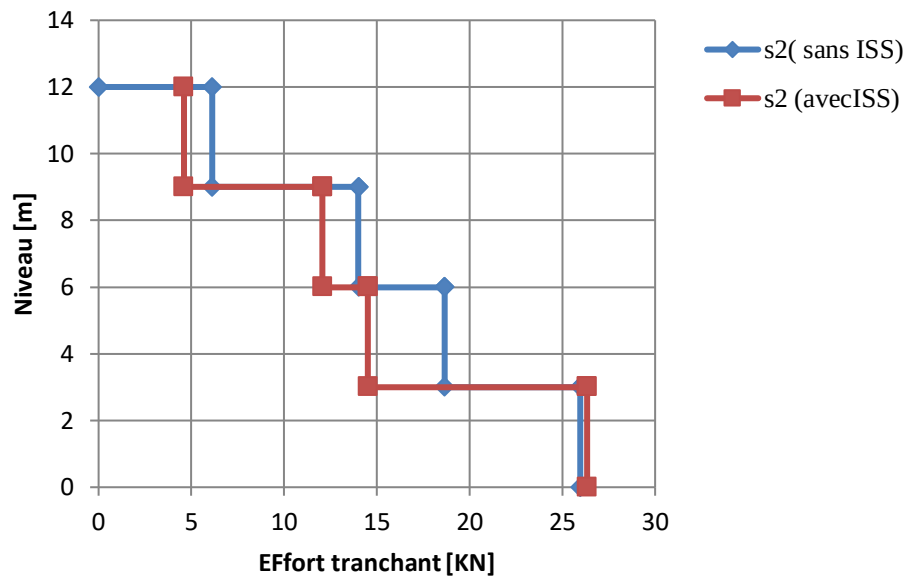


Figure IV.14: Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S2).

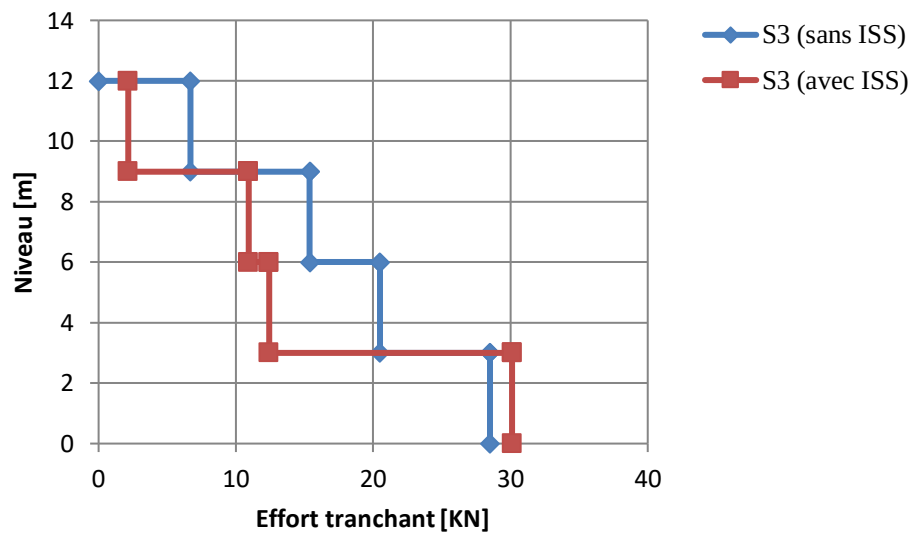


Figure IV.15: Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S3).

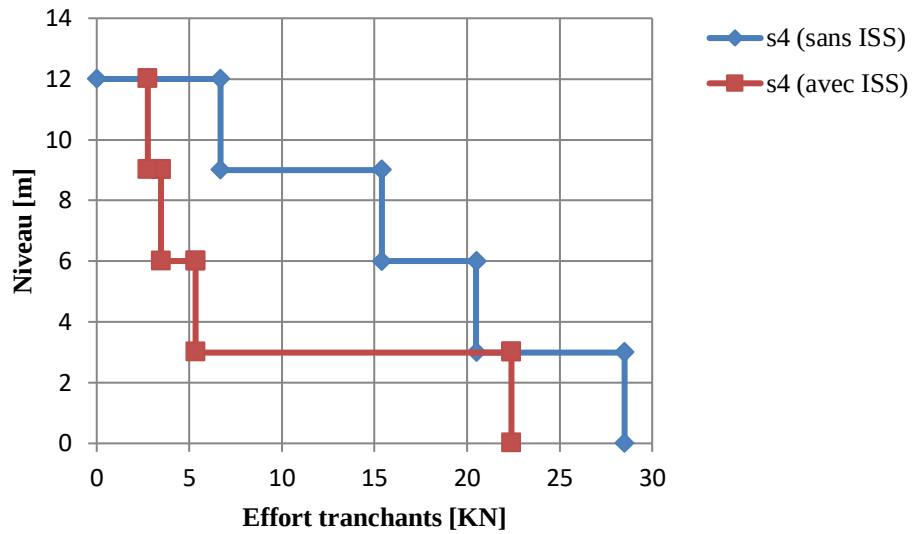


Figure IV.16: Effort tranchant (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (solS4).

➤ **Commentaires :**

Les tableaux (IV.10, IV.11) et les figures (IV.13, IV.14, IV.15, IV.16) montrent la distribution des efforts tranchants de poteau de rive sans et avec interaction sol-structure de la structure dans les quatre types de sol, et on constate que :

- Les efforts tranchants à la RDC dans le cas avec ISS est plus grand que dans le cas sans ISS.
- Les efforts tranchants de la structure diminuent dans les quatre types de sol dans les deux cas (sans et avec ISS).
- Les efforts tranchants de la structure sont identiques dans les deux types de sol meuble et très meuble dans le cas (sans ISS).

IV.3.2.1. Effort tranchant à la base :

Les efforts tranchant à la base sans et avec ISS sont donnés dans le tableau IV.12

Tableau IV.12 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS.

Site	Sans ISS	Avec ISS	comparaison
S1	156,043	141,239	1,104
S2	188,101	167,966	1,119
S3	206,528	164,645	1,254
S4	206,528	99,241	2,081

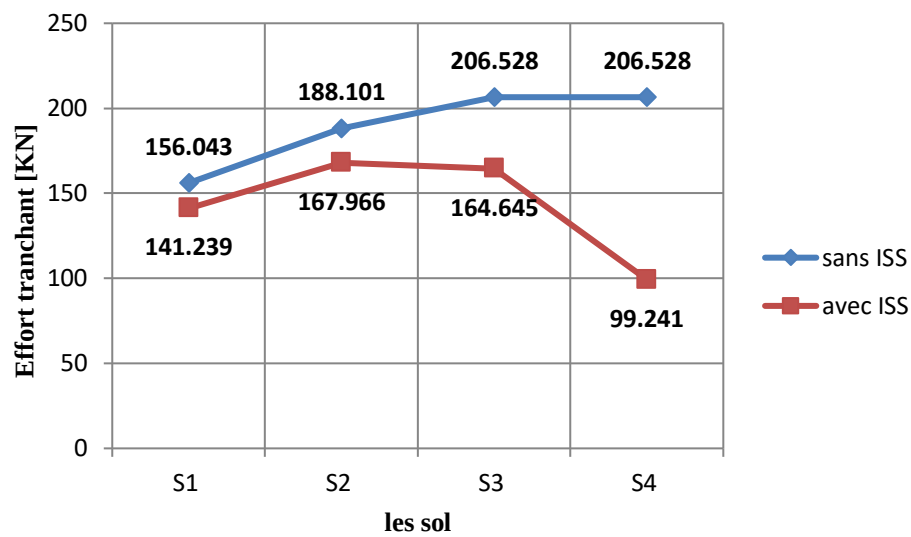


Figure IV.17: Variation de effort tranchant à la base en fonction du sol avec et sans ISS.

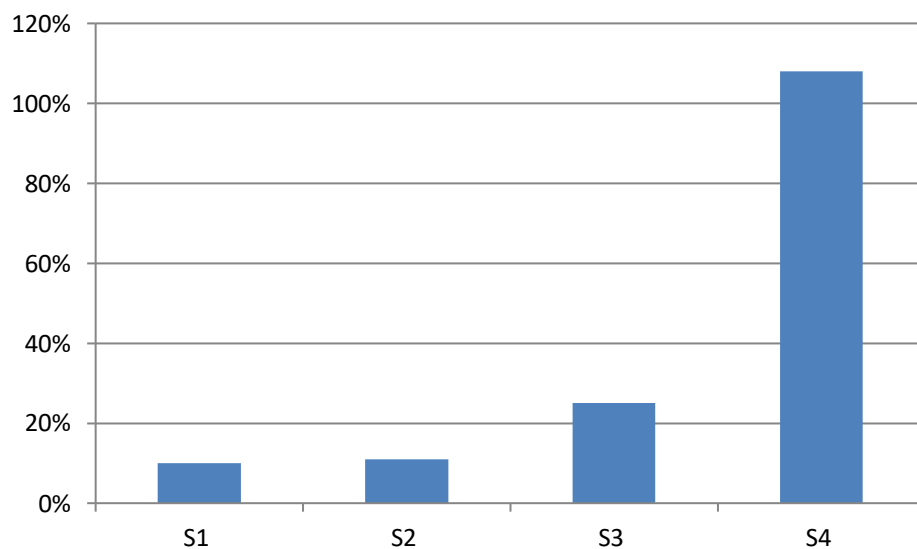


Figure IV.18: Comparaison des résultats sans et avec ISS pour l'effort tranchant entre les différents types de sol.

➤ **Commentaires :**

- Dans le cas sans ISS l'effort tranchant à la base de la structure augmente quel que soit le type de sol.
- Dans le cas avec ISS l'effort tranchant à la base diminue quel que soit le type de sol.
- La comparaison entre les sols sans ISS et avec ISS montre que l'effort tranchant à la base diminue de 10% pour le sol 1, 11% pour le sol 2, 25% pour le sol 3 et de 108% pour le sol 4.

IV.3.3. Résultats des moments :

Les moments de la structure sans et avec ISS pour les quatre types de sol sont présentées dans les tableaux IV.13, IV.14 respectivement :

Tableau IV.13 : Les moments [KN.m] sans ISS de poteau de rive pour les quatre types de sol (Sens X).

Niveau (m)	Sol			
	S1	S2	S3	S4
0	42,189	50,951	59,21	59,21
1,5	12,963	15,664	18,21	18,21
3	16,284	19,639	22,805	22,805
3	21,841	26,404	30,701	30,701
4,5	1,039	1,119	1,201	1,201
6	23,123	27,929	32,459	32,459
6	13,224	15,932	18,491	18,491
7,5	3,943	4,698	5,449	5,449
9	20,788	25,127	29,214	29,214
9	3,943	4,668	5,362	5,362
10,5	4,004	4,84	5,628	5,628
12	11,798	14,22	16,506	16,506

Chapitre IV: Modélisation Numérique

Tableau IV.14 : Les moments [KN.m] avec ISS de poteau de rive pour les quatre type de sol (sens X).

Niveau (m)	Sol			
	S1	S2	S3	S4
0	36,1568	31,7243	37,7785	5,7648
1,5	6,6427	4,7978	3,9139	23,3875
3	22,9609	41,276	45,4534	52,037
3	18,2223	17,564	16,6752	5,476
4,5	2,6169	5,8746	6,8661	9,8214
6	22,8222	28,9977	30,0589	20,1698
6	12,1362	13,7824	14,0811	8,8375
7,5	4,012	5,0643	5,4421	3,8646
9	19,7447	23,6504	24,7195	15,5795
9	3,3633	3,6441	2,85	3,144
10,5	3,7681	4,5405	4,6709	2,8978
12	10,6028	12,5457	11,9086	7,3653

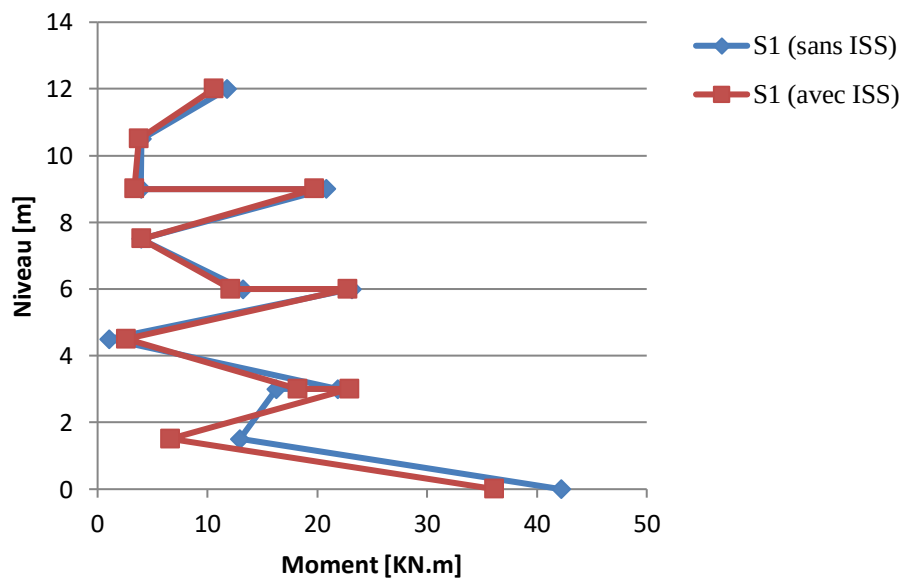


Figure IV.19: Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S1).

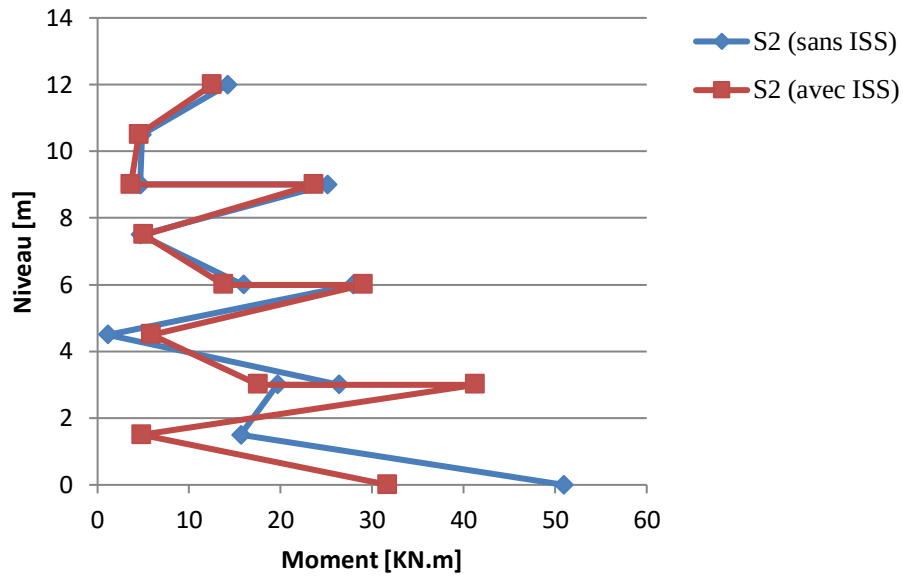


Figure IV.20: Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S2).

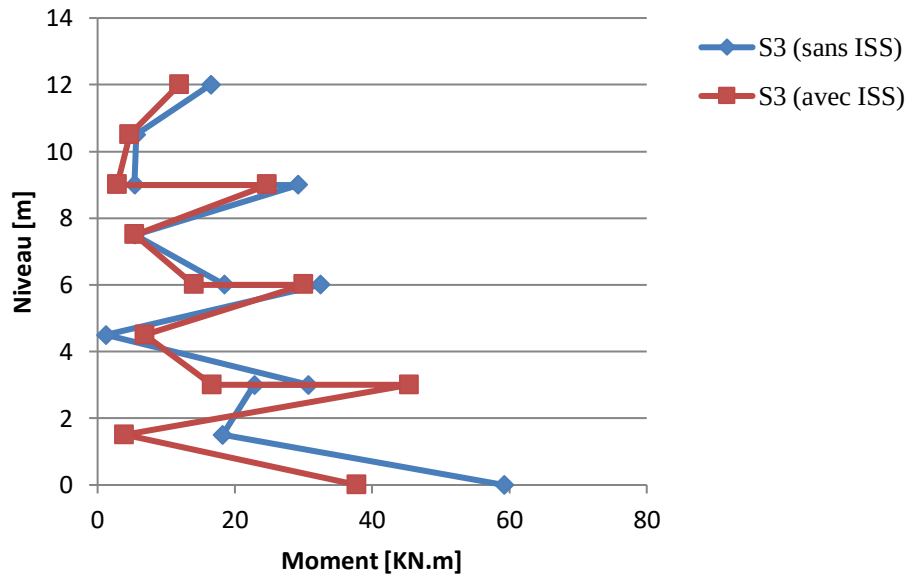


Figure IV.21: Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S3).

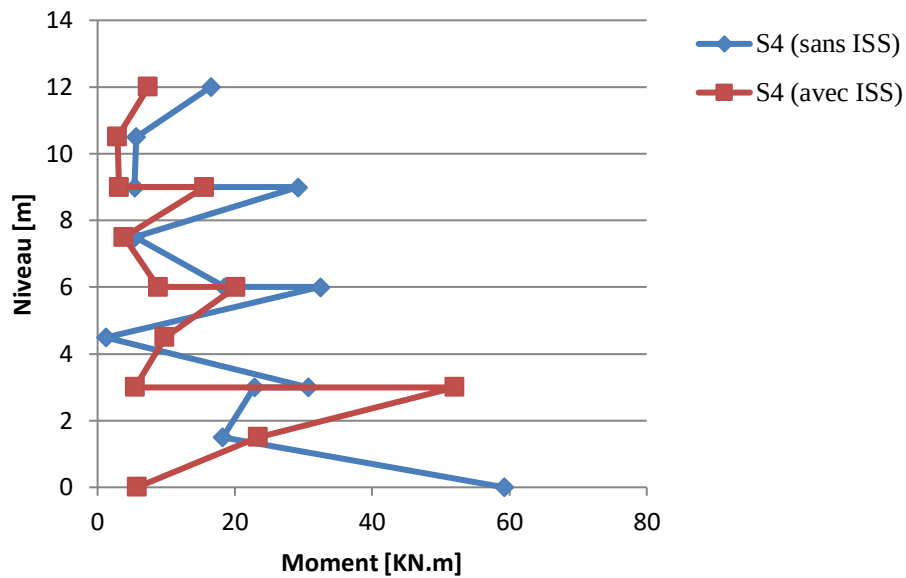


Figure IV.22: Moment (sens x) de poteau de rive sans et avec ISS (sol S4).

➤ **Commentaires :**

Les tableaux (IV.13, IV.14) et les figures (IV.19, IV.20, IV.21, IV.22) montrent la distribution des moments de poteau de rive sans et avec interaction sol-structure (ISS) de la structure dans les quatre types de sol, et on constate que :

- Dans le sol S3 et le sol S4, le cas sans ISS sont presque les mêmes.
- Les valeurs des moments dans les sols S3 et S4 sont incomparables.

CONCLUSION GENERALE

L'interaction sol-structure est composée de deux parties essentielles ; l'interaction cinématique et l'interaction inertielle. Ces deux interactions affectent le comportement sismique des bâtiments en termes de flexibilité et d'amortissement. On a constaté aussi, après présentation des différentes méthodes, que la méthode de sous structure semble la plus simple à utiliser pour modéliser un phénomène d'ISS. Cette méthode ne demande qu'une détermination facile des impédances dynamiques de la fondation qui sont représentées par des ressorts élastiques au court d'analyse.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de l'effet de l'interaction sol-structure des bâtiments en béton armé en portique. Le choix de ce type de bâtiments pour l'analyse s'est fait car ces derniers forment la plus importante catégorie en nombre de bâtiment pour les nouvelles villes algériennes.

Ce mémoire est constitué de deux parties essentielles, étude bibliographique et modélisation numérique :

• **Partie un** : Étude bibliographique consacrée à l'amélioration de nos connaissances sur les effets du séisme sur les constructions en béton armé en portique, un aperçu sur les différentes approches de l'interaction sol-structure. Dans le chapitre II, on a présenté la méthode de spectres de réponse adoptée pour l'interaction sol-structure à l'échelle d'une structure.

En utilise la méthode dynamique linéaire "spectres de réponse" pour déterminer les déplacements et les efforts tranchants, les moments de la structure qui permet de mieux appréhender le comportement linéaire des structures en simulant la succession des phénomènes caractérisant l'état de chaque élément.

• **Partie deux** Modélisation numérique : On a effectué une analyse linéaire en 3D d'un bâtiment en portique de 4 étages (R+3) à l'aide du logiciel SAP 2000. Cette analyse en 3D, nous a permis d'évaluer l'interaction sol-structure, les résultats présentés dans cette étude avec les hypothèses considérées ont montré l'importance de l'interaction sol-structure dans la réponse d'une structure.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- La comparaison entre les sols sans ISS et avec ISS montre que le déplacement maximal augmente de 13% pour le sol 1 (S1), 28% pour le sol 2 (S2), 58% pour le sol 3 (S3) et de 109% pour le sol 4 (S4).

- La comparaison entre les sols sans ISS et avec ISS montre que l'effort tranchant à la base diminue de 10% pour le sol 1, 11% pour le sol 2, 25% pour le sol 3 et de 108% pour le sol 4.

D'après les résultats obtenus, la modélisation d'une structure à base fixée (encastree)n'est pas suffisante sans tenir en compte l'effet ISS dans les cas des sols : (S3) meuble et (S4) très meuble.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Nedjai, A. (2018). L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments (cas des bâtiments portiques en béton armée) (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [2] Mr HASSANI Karim Effet des séismes proches et lointains sur la performance sismique des structures auto-stables en béton armé mémoire magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [3] Zeghichi, L., Merzougui, A., & Mezghiche, B. (2005). Lecture dans le règlement parasismique algérien.
- [4] Frank S : " les séismes "
- [5] CHEBANCE M., Les méthodologies d'évaluation de l'aléa sismique, période 1995-2001, Ecole Nationale Supérieure Des Sciences de l'Information et des Bibliothèques Université Claude Bernard Lyon 1, Rapport de Recherche Bibliographique, 2001.
- [6] BALANDIER P., Sismologie Appliquée A L'usage Des Architectes Et Ingénieurs, collection conception parasismique cahier 4, Mai 2004.
- [7] Menasri, Y. (2009). Thème: Évaluation de Vulnérabilité Sismique des Bâtis Existants «Structure portique en béton armé».
- [8] François M « Origine et localisation des séismes »
- [9] GHALEB, M. W., & ALMWALD, A. M. (2020). EVALUATION DE PERFORMANCE PARASISMIQUES D'UNE STRUCTURE PORTIQUE EN BA RENFORCE PAR CHEMISAGE EN BETON ARME (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [10] BENLAALA, N. (2012). Influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra)
- [11] IMENE, C. (2017). Interaction sol-fondation d'un PIPO (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [12] MESSAOUD, T. (2016). SIMULATION SISMIQUE DANS LES PROFILES DE SOL EN CHAMP LIBRE (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

- [13] Amina, B. E. N. O. U. M. H. A. N. I. (2016). MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BATIMENTS (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [14] Lestuzzi , P. (2008). Séismes et construction: éléments pour non-spécialistes. PPUR presses polytechniques.
- [15] BENTOUMI, R.(2018). INTERACTION SOL-STRUCTURE D'UN PASSAGE SUPERIEUR D'UNE VOIE FERREE (CAS D'UN PONT DALLE)(Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [16] Richter C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale, Bulletin of the Seismological Society of America, 25, pages 1—32.
- [17] (RPA99., Règles Parasismiques Algériennes 99 Version 2003, Algérie, OPU 2003.)
- [18] Oudjene, M., Meghlat, M., & Bouafia, Y. Influence de la catégorie de site sur le comportement sismique des structures rigides; application des règles parasismiques algériennes 99 (RPA 99).
- [19] Les Séismes. Planète Terre, Université Laval, Québec.
- [20] GöranEkström, Meredith Nettles et Victor C. Tsai, Seasonality and Increasing Frequency of Greenland Glacial Earthquakes ; Science 2006-03-24 ; pp 1756-1758 .
- [21] Bombs may have caused quake [archive], 6 mars 2002.
- [22] Patricia BALANDIER (élément de sismologie appliquées la construction à l'usage des techniciens du bâtiment.
- [23] Patricia Balandier, cours de construction parasismique, volume 1 sismologie appliquée, Juillet 2001, 9-10.
- [24] Yahiaoui, D. (2014). CONTRIBUTION A L'ANALYSE DYNAMIQUE NON LINEAIRE DES PORTIQUES EN BETON ARME (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [25] Aouadj, L. (2009). COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN BARRAGE EN BETON INTERACTION SOL-FLUIDE-STRUCTURE (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [26] AICHOUNE MERZAKA.(2017).Contribution à l'étude et à l'analyse du comportement sismique d'un barrage en remblais(ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-).

- [27] Dynamique_des_structures_ENPC_Alain_PEKER
- [28] AGRI, Y. (2007). Λ^{-} ΕΦΦΕΤΑ ΕΛ $^{-}$ ΙΝΤΕΡΑΧΤΙΟΝΣΟΛ $^{-}$ ΣΤΡΥΧΤΥΠΕΣΥΡΛΑΠΕΠΙΟΝΣΕΑ ΕΣΣΤΡΥΧΤΥΠΕΣΧαοδεσΠΙΟΡΤΘΥΕΣ (Doctoral dissertation, Université de Batna 2)
- [29] Achouri, A. (2014). Contribution à l'étude de l'interaction et l'isolation dynamique des structures (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra)
- [30] Grange, S. (2008). Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure: application au génie parasismique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [31] Mekki, M. (2015). Approche probabiliste dans la détermination des courbes de vulnérabilité des structures en génie civil (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. Mohamed Boudiaf (Algérie)).
- [32] Miloudi M, Ramdani F Z, étude dynamique non linéaire de l'interaction sol-structure , Mémoire de master, Département de Génie Civil, Université de Tlemcen, 2014.
- [33] TORKIA, H. (2017). Etude de l'effet de l'interaction sol structure ISS sur la réponse dynamique des structures en béton armé (Doctoral dissertation, Université de Batna 2)
- [34] Bachmann, H., Suisse. Office fédéral des eaux et de la géologie, & Marro, C. (2002). Conception parasismique des bâtiments: principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. office fédéral des eaux et de la géologie.
- [35] Capra, A., Davidovici, V., & Albigès, M. (1982). Calcul dynamique des structures en zone sismique. Eyrolles.
- [36] Béton Armé Etat Limit 91 révisées 99.
- [37] Alain CAPRA et Victor DAVIDOVIC (1982), Calcul dynamique des structures en zones sismiques, Edition Eyrolles.
- [38] LAHOUAL, A., & GUERROUD, L. (2017). Effets de caractéristiques sismiques sur les spectres de réponse (Doctoral dissertation).
- [39] WALID Ben saada (juin 2012), Mémoire de master 2, Réduction du risque sismique par l'introduction des amortissements dans les structures de génie civil, Université Ziane Achour de Djelfa.

[40] Youssouf, M. (2017). comparaison de la performance sismique d'une structure auto-stable en béton armée avec une structure mixte (portiques avec voiles) (Doctoral dissertation, FACULTE DE TECHNOLOGIE/UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA)

[41] AZZOUZ, B. (2018). Influence de la torsion sur le comportement sismique des structures portiques en béton armé (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

[42] GHALEB, M. W., & ALMWALD, A. M. (2020). EVALUATION DE PERFORMANCE PARASISMIQUES D'UNE STRUCTURE PORTIQUE EN BA RENFORCE PAR CHEMISAGE EN BETON ARME (Doctoral dissertation, Univ M'sila).

[43] Hemas M, Modélisation par macro éléments du comportement non linéaire des ouvrages en béton armés sous action sismique, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France, 2010.

[44] Milan Z, Conception parasismique des bâtiments, Tome 4, Septembre 2010

[45] SEBAI Khalifa, quantification de la ductilité des constructions autos-tables en béton arme dimensionnés selon le règlement parasismique algérien RPA 99/v-2003, magister en génie civil, université hassiba ben bouali de chlef, 2012

[46] ALEM. T, Influence des dimensions du bâtiment sur la valeur de la période (cas des structures auto-stable), Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Novembre 2009.

[47] Configurations géométriques – Portiques, fiche technique n°2

[48] Abdelghani SEGHIR, Séminaire organisé par SAVOIR PLUS, 26-27juin 2007 à Béjaia Les journées techniques et scientifiques du bâtiment et de la construction , Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003, Pathologie de construction et dommages sismiques.

[49] Document d'information à l'usage du constructeur - VOLUME 3Conçu par Mme Patricia BALANDIERLE SEISME ET LES BATIMENTSP ourquoi il ne suffit

pas qu'un bâtiment soit « costaud »pour résister aux séismes.

Logicielle :

- Sap 2000V2014.
- AutoCAD 2008.
- Expert 2007 ; Word 2007.

Annexe

1. Déplacements :

Les déplacements avec et sans ISS de poteau de rive selon Y pour les quatre type du sol :

Sol Niveau (m)	Sans ISS				Avec ISS			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0,006	0,028	0,177	0,616
3	0,152	0,183	0,213	0,213	0,232	0,414	0,646	2,187
6	0,369	0,446	0,519	0,519	0,465	0,701	1,003	3,554
9	0,544	0,658	0,765	0,765	0,645	0,907	1,271	4,855
12	0,647	0,782	0,91	0,91	0,755	1,026	1,445	6,101

2. Effort tranchant :

Les efforts tranchant avec et sans ISS de poteau de rive selon Y pour les quatre type du sol :

Sol Niveau (m)	Sans ISS				Avec ISS			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	19,488	23,527	27,336	27,336	19,699	24,332	27,739	19,132
3	19,488	23,527	27,336	27,336	19,699	24,332	27,739	19,132
3	19,488	23,527	27,336	27,336	19,699	24,332	27,739	19,132
3	14,978	18,103	21,047	21,047	13,656	15,494	15,544	7,362
6	14,978	18,103	21,047	21,047	13,656	15,494	15,544	7,362
6	14,978	18,103	21,047	21,047	13,656	15,494	15,544	7,362
6	11,319	13,671	15,889	15,889	10,593	12,454	12,911	8,041
9	11,319	13,671	15,889	15,889	10,593	12,454	12,911	8,041
9	11,319	13,671	15,889	15,889	10,593	12,454	12,911	8,041
9	5,222	6,274	7,271	7,271	4,603	5,363	4,86	3,243
12	5,222	6,274	7,271	7,271	4,603	5,363	4,86	3,243

3. Moments :

Les Moments avec et sans ISS de poteau de rive selon Y pour les quatre type du sol :

Sol Niveau (m)	Sans ISS				Avec ISS			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	44,9564	54,2235	59,547	59,547	37,8486	32,7829	38,6406	4,0237
1,5	12,6608	15,2837	16,7897	16,7897	5,6651	6,7365	6,5707	29,7475
3	19,6671	23,6829	25,9922	25,9922	26,6067	46,2289	51,7187	63,3358
3	22,0701	26,6591	29,2929	29,2929	16,6773	15,555	10,7704	10,4019
4,5	1,536	1,7002	1,8001	1,8001	3,1616	6,4167	8,056	11,9893
6	24,3014	29,324	32,2085	32,2085	22,5115	28,0845	26,5827	14,6154
6	13,812	16,5845	18,1822	18,1822	11,5966	13,6217	11,5162	5,2663
7,5	3,854	4,627	5,0724	5,0724	3,8455	4,6257	5,0021	3,6083
9	21,138	25,5212	28,0378	28,0378	18,9133	22,6382	21,2986	11,282
9	4,0755	4,7572	5,1577	5,1577	2,424	3,0243	1,5881	6,4325
10,5	3,7788	4,5625	5,0125	5,0125	3,3584	4,0404	3,7605	1,9792
12	11,3977	13,681	14,9972	14,9972	8,7249	10,9019	6,8387	4,5995

4. Période et fréquence :

4.1. Sans ISS :

Mode	Période (s) (S1,S2 ,S3,S4)	Fréquence (Hz) (S1,S2 ,S3,S4)
1	0,49	2,00
2	0,46	2,17

4.2. Avec ISS :

Mode	Période (s) (S1,S2 ,S3,S4)	Fréquence (Hz) (S1,S2 ,S3,S4)
1	0,55	1,80
2	0,50	1,96

الحمد لله الذي ما تم جهد ولا خُتِم سعى

إلا بفضلَه وما تخطى العبد من عقبات وصعوبات

إلا بتوفيقه ومعونته