



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : structure

THEME

Interaction sol-structure d'un Fondation

Dirigé par : Mr. Menasri abd.erezzake

Présenté par : Benziane Houda

Promotion : 2015/2016.



Remerciement

*Je ne remercie jamais assez **ALLAH**, le tout puissant de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie Mon encadreur **Mr. Menasri Abd errazek**, Professeur à l'Université de M'Sila qui m'ont proposé ce sujet de Master, pour leur aide précieuse et leur disponibilité durant toute la durée de notre projet.*

Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

A tous mes enseignants et à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci





Dedicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Je dédie ce modeste travail premièrement à
Mon père et ma mère qui ont sacrifiés leur vie pour notre bien, et,
que mes belles sœurs qui m'ont toujours soutenus durant toutes les
périodes de ma vie et mes frères pour leurs soutient.*

Je n'oublié pas tous mes amis.

Touts les enseignants de faculté de technologie.

Toute la promotion 2016.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.



sommaire

Remerciement

RESUME

Abstract

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES Tableaux

LISTS DES NOTIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les et les types du structure.

Introduction 3

I-1-Notion sur les séismes 3

I-1-1-Definition d'un séisme 3

I-1-2-Les risques sismiques 5

I-1-2-1-Le risque sismique dans la commune (l'Algérie) 5

I-1-3-Les caractéristiques principale d'un séisme 6

I-1-3-1-les Failles 6

I-1-3-2- Foyer et épicentre 9

I-1-3-3-Les ondes séismiques 9

I-1-3-4- Paramètres caractéristiques du mouvement sismique 12

1. La magnitude 12

2. L'intensité 13

I-1-3-5-Mouvement du sol 13

I-1-3-6-Accélérogramme du séisme 13

I-1-3-7-Accélération maximale 14

I-2-Généralité sur les structures 14

I-2-1-types des structures 14

I-2-1-1-structure en portique(poteau-poutre) 14

I-2-1-2-structure mixte 15

I-2-1-3-structure en voile..... 16

1-3-les fondations	16
I-3-1-Définition	16
I-3-2-les types des fondations.....	17
I-3-2-1-Fondation en semelle filante	18
I-3-2-2- Fondation en semelle isolé.....	19
I-3-2-3-Fondation en radier	20

Chapitre II : Interaction sol-structure.

Introduction	21
II-1-Notion d'interaction sol-structure	21
II-2- Comportement des sols sous sollicitations sismiques	22
II-2-1-Comportement élastique du sol.....	22
II-2-2-Comportement élastoplastique du sol	22
II-2-3-Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique	23
II-3-Caractéristiques dynamique des sols	24
II-3-1- Détermination de τ_{max}	24
II-3-2-Module de cisaillement maximum.....	24
II-3-3-Amortissement hystérétique dans le sol.....	25
II-4- Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structure	26
II-4-1-Interaction cinématique et interaction inertielle	26
II-4-2-L'amortissement radiatif.....	29
II-4-3-La liquéfaction	30
II-5- Fonctions d'impédance	31
II-6-Formulation d'un problème d'interaction sol-structure	32
II-7-Les différentes méthodes pour prendre en compte L'ISS	33
II-7-1-Les méthodes directes (Méthodes globales)	33
II-7-2- La méthode des sous-structures	34

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

Introduction	35
III-1-Le code plaxis	35
III-2-L'interface graphique de code plaxis	36
III-3-Modeles de comportement implémentées dans plaxis	39
III-3-1-Modèle élastique linéaire.....	40
III-3-2-Modèle élastoplastique	41
III-3-3-Modèle de Mohr-Coulomb	42

III-3-3-1- Les paramètres classiques de la Mohr coulomb.....	43
IV-3-4-Le module dynamique du code plaxis.....	46
Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence	
IV-1- La géométrie du modèle.....	48
IV-2 -Caractéristiques des matériaux	50
IV-2-1-Propriétés des couches de sols et des interfaces graphique de code plaxis	50
IV-2-2-Propriétés mécaniques de la fondation	51
IV-3-Generation de maillage	52
IV-4-Condition initiales	52
IV-4-1-Contraintes initiales.....	52
IV-4-2-Conditions hydrauliques.....	53
IV-5- procédure de calculs.....	54
IV-6-resultats des calculs	56
IV-6-1-Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base.....	56
IV-6-2-Cas d'un déplacement vertical imposé à la base	64

Résumé

L'utilisation de la méthode des éléments finis « PLAXIS » dans le domaine géotechnique est très courante pour l'étude des grands projets. Elle permet de réaliser des analyses par éléments finis afin vérifier la stabilité des ouvrages, en déterminer son vitesse et accélération en tenant compte de l'interaction sol-structure et de nous de procéder au dimensionnement des structures.

L'objectif principal de cette étude était :

- D'examiner les facteurs qui résument effectivement les caractéristiques des mouvements sismiques avec une attention particulière aux effets des séismes réels et simulés. Dans cette évaluation les réponses linéaire et non linéaire d'une couche de sol donnée ont été adoptées .Cette étude suggère la possibilité de caractériser le séisme par un nombre minimum de paramètres
- D'étudier l'effet de l'interaction sol-structure sur le mouvement sismique

Mots clés :

Séisme, Interaction sol-structure, Comportement de l'interaction sol-structure, PLAXIS,

Abstract

Using the finite element method "PLAXIS" in the geotechnical field is very common for the study of major projects. It allows for finite element analysis to check the stability of the works, determine its velocity and acceleration, taking into account soil-structure interaction and we are proceeding with the design of structures. The main objective of this study was:

- Examine the factors that effectively summarize the characteristics of seismic movements with particular attention to the effects of real and simulated earthquakes. In this evaluation the linear and nonlinear responses of a given soil layer were adopted .This study suggests the possibility of characterizing the earthquake minimum by a number of parameters
- To study the effect of soil-structure interaction on the seismic motion Keywords: Earthquake, soil-structure interaction, behavior of soil-structure interaction, PLAXIS.

ملخص

باستخدام طريقة العناصر المحدودة " PLAXIS " في مجال الجيوتقنية أمر شائع جدا لدراسة المشاريع الكبرى .لأن يسمح بتحليل العناصر المنتهية للتحقق من استقرار المنشآت وتحديد السرعة والتسارع مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل التربة البنية ونحن ماضون في تصميم الهياكل.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو:

•دراسة العوامل التي تلخص على نحو فعال خصائص الحركات الزلزالية مع الاهتمام خاص لأثار الزلازل الحقيقية والمحاكاة وفي هذا التقييم اعتمد على الردود الخطية وغير الخطية من طبقة تربة معينة للدراسة .وهذا يشير إلى إمكانية تميز الحد الأدنى للزلازل عدد من المعلومات

•لدراسة تأثير التفاعل التربة هيكل على الحركة الزلزالية

الكلمات المفتاحية:

زلازل , التفاعل التربة البنية والسلوك للتفاعل التربة البنية, PLAXIS .

Liste des figures

N° figures	Chapitre 01 : les caractéristiques des mouvements sismiques et les types du structures	N° Pages
Figure (1-1)	Représentation schématique d'un séisme	4
Figure (1-2)	Réponse des bâtiments au séisme	5
Figure (1-3)	intensités maximales observées Au nord de l'Algérie	6
Figure (1-4)	photo d'une faille	7
Figure (1-5)	Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique	8
Figure (1-6)	foyer et épicentre	9
Figure (1-7)	Les quatre modes de propagation des ondes sismique	12
Figure (1-8)	Eclatement de zones critiques, extrémités des poteaux et poutres	15
Figure (1-9)	structure mixte d'un bâtiment	16
Figure (1-10)	Types des fondations	17
Figure (1-11)	Fondation en semelle filante (sous un mur)	18
Figure (1-12)	principe de semelle filante	19
Figure (1-13)	Fondation en semelle isolée (sous un poteau)	19
Figure (1-14)	fondation superficielle de type en radier	20
Chapitre02 : Interaction sol-structure		
Figure (2-1)	modèle élastique de Hooke.	23
Figure (2-2)	modèle élastoplastique parfait	23
Figure (2-3)	Exemples de rupture des fondations lors d'un séisme : bâtiment à Kobé ayant basculé à sa base	27
Figure (2-4)	Interaction cinématique	28
Figure (2-5)	Interaction inertielle	29
Figure (2-6)	Le sol liquéfié entraîne l'inclinaison, voire le renversement, des bâtiments.	31
Figure (2-7)	Théorème de superposition pour l'interaction sol-structure.	32
Figure (2-8)	Schématisation d'une méthode de sous structure	34
Chapitre 03 : Présentation de code PLAXIS		
Figure (3-1)	interface utilisateur pour l'entrée des données	36
Figure (3-2)	Condition aux limites	37

Figure (3-3)	maillage	38
Figure (3-4)	Contraintes initiales (condition k_0)	39
Figure (3-5)	Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire	41
Figure (3-6)	Représentation du comportement élastique parfaitement plastique	42
Figure (3-7)	fenêtre des paramètres de Mohr coulomb	43
Figure (3-8)	Définition du module à 50 % de la rupture	44
Figure (3-9)	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb	45
Figure (3-10)	Le module dynamique du code PLAXIS	47
Chapitre 04 : Établissement d'un modèle de calcul déréférence		
Figure (4-1)	Vue de gauche et de dessus de la section d'une semelle.	48
Figure (4-2)	Modèle Géométrique du projet.	49
Figure (4-3)	interface utilisateur pour l'entrée des données.	51
Figure (4-4)	Maillage du projet.	52
Figure (4-5)	Génération des contraintes initiales.	53
Figure (4-6)	Conditions hydrauliques initiales.	53
Figure (4-7)	Phase de calcul.	54
Figure (4-8)	Trace des points sur le profil.	55
Figure (4-9)	Fenêtre pour calcul les différentes phases.	56
Figure (4-10)	déformation de maillage.	57
Figure (4-11)	Total stresses.	57
Figure (4-12)	les vecteurs des déplacements.	58
Figure (4-13)	Déplacement temps suivant l'axe xx' .	59
Figure (4-14)	Déplacement-temps l'axe yy' .	59
Figure (4-15)	Vitesse-temps suivant l'axe xx' .	60
Figure (4-16)	Vitesse-temps suivant l'axe yy' .	60
Figure (4-17)	Accélération-temps suivant l'axe xx' .	61
Figure (4-18)	Accélération-temps suivant l'axe yy' .	62
Figure (4-19)	La force (Fx) en fonction du temps.	62
Figure (4-20)	Cas vertical imposé à la base.	64
Figure (4-21)	déformation de maillage.	64
Figure (4-22)	Total stresses.	65
Figure (4-23)	Total déplacements.	66
Figure (4-24)	Déplacement-temps suivant l'axe xx' .	66
Figure (4-25)	Déplacement-temps l'axe yy' .	67

Figure (4-26)	Vitesse-temps suivant l'axe xx' .	67
Figure (4-27)	Vitesse-temps suivant l'axe yy' .	68
Figure (4-28)	Accélération-temps suivant l'axe xx' .	68
Figure (4-29)	Accélération-temps suivant l'axe yy' .	69
Figure (4-30)	La force (F_x) en fonction du temps.	69

liste des tableaux

N° tab	Chapitre02 : Interaction sol-structure	N°Pages
Tableau (2-1)	Valeurs de K (Hardin-Black, 1968).	25
Tableau (2-2)	coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).	25
Chapitre04 : Établissement d'un modèle de calcul de référence		
Tableau (4-1)	Variation du module d'élasticité E du béton en fonction de f_{c28}	48
Tableau (4-2)	Caractéristiques de la semelle d'une fondation	48
Tableau (4-3)	Propriétés des couches de sols et des interfaces	50
Tableau (4-4)	Propriétés mécaniques de la fondation	51
Tableau (4-5)	Données des points	55
Tableau (4-6)	Valeurs maximal (déplacements, vitesses, accélérations) des points concédérés	63
Tableau (4-7)	Valeurs maximal aux points considérés	70

Notation Et Abréviations

Lettres Grecques :

ν : le coefficient de poisson.

φ : angle de frottement effectif.

ψ : angle de dilatance.

γ : poids volumique.

E : Le module de Yong.

F : force due au renforcement.

R : force de réaction.

θ : angle du plan de rupture.

σ : contrainte.

τ : contrainte de cisaillement (tangentielle).

c : cohésion (effective).

Lettres Latines :

EA : Rigidité normale.

EI : Rigidité e flexion.

E_{0cd} : Module tangent dans un essai oedométrique.

f_i : force de volume.

F : force

G : le module de cisaillement.

G' : le module de cisaillement effectif.

K : Le module de compressibilité volumique.

k_x : perméabilité horizontale.

k_y : perméabilité verticale.

k : Coefficient de réaction.

$[K]$: Matrice de rigidité.

k_0 : Coefficient des terres au repos.

L :Longueur.

m :puissance.

P : pression.

U : déplacement.

w : poids.

u_f : déplacement amortissement.

u_i : déplacement d'interaction.

v_f : vitesse des ondes P.

v_s : vitesse des ondes S.

M : magnitude.

$\{\ddot{\mathbf{u}}\}$: Vecteur d'accélération.

$\{\dot{\mathbf{u}}\}$: Vecteur de vitesse.

$\{\mathbf{u}\}$: Vecteur de déplacement.

$\{\mathbf{Q}_f\}$: Vecteur de charge.

Abréviations :

MEF : Méthode des éléments finis.

ISS : Interaction sol-structure.

Introduction général

On présente tout d'abord le phénomène qu'il est convenu d'appeler interaction sol structure à travers une comparaison détaillée entre la réponse sismique d'une structure et la réponse de la même structure construite sur un profilé composée à 3 couches. Les principaux concepts : interaction cinématique, interaction inertielle, amortissement radiatif, sont illustrés de manière concrète sur cet exemple. Le cadre théorique, aussi rigoureux et général que possible, est formulé dans un deuxième temps en se limitant au domaine élastique. La notion d'impédance, qui joue un rôle central dans la plupart des études de l'interaction sol structure.

On entend généralement, improprement, par interaction sol-structure l'étude du comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique. L'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) lors d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol). Cette interaction est bien entendue plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation. Pour certains ouvrages, fondés superficiellement, elle peut être pratiquement négligeable. Par contre, la nécessité d'étudier la réponse sismique d'un ouvrage, en ne le considérant pas isolément mais comme partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures avoisinantes, rend les analyses d'interaction sol-structure impérieuses pour une part grandissante d'ouvrages importants.

Selon les caractéristiques de la structure et le mouvement du sol, l'interaction sol structure peut avoir un effet sur la magnitude des forces induites à la structure en question. La réponse sismique d'une structure se trouve toujours liée à la forme avec laquelle les mouvements sismiques du sol sont transmis à travers ses fondations au système fondation structure.

La complexité du problème d'interaction sol structure réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments, le sol et la structure. Ce phénomène peut décrire les effets qui se produisent dans le plan du contact sol/structure, de sorte que, dans l'analyse de la réponse dynamique, non seulement les propriétés structurelles soient incluses mais également les propriétés du sol sous-jacent. L'interaction sol structure peut donc contribuer à amplifier ou à diminuer la réponse dynamique de la structure.

Dans le premier chapitre, nous introduisons les paramètres qui participent à la description du mouvement sismique. Et expliqués les différents types de structures.

Dans le deuxième chapitre, présente le comportement des sols sous sollicitation sismique. Et traite de l'interaction sol-structure dans lequel sont évoqués les principes de la modalisation de l'interaction sol-structure. Ainsi que les méthodes de résolution de l'équation de la discrétisation par élément finis.

Le troisième chapitre est consacré à la description générale de l'outil de calcul (PLAXIS).

Le quatrième chapitre consacré à la mise en œuvre des calculs effectués à l'aide du « code PLAXIS » et études des paramètres de mouvement sismique, dans les différents cas d'interaction et l'interopération des résultats en utilisant le code de calcul (PLAXIS) qui nous a permis de déterminer les « déplacements, les vitesses et l'accélération ».

Chapitre 01 :

Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Introduction :

Pour les bâtiments simples ces effets réduisent souvent la vulnérabilité en raison d'un transfert des déformations au sol environnant apportant également un amortissement supplémentaire. L'interaction sol-structure peut devenir importante. Celle-ci peut être prise en compte via une analyse détaillée à l'aide de modèles numériques. Ces techniques se sont avérées très fiables par rapport à des expériences sur le terrain effectuées dans la zone à forte activité sismique.

Lors d'un tremblement de terre, les ondes sismiques se propageant dans le sol mettent en mouvement les fondations des ouvrages en les secouant principalement horizontalement. Accélération à sa base, chaque bâtiment est soumis à des forces d'inertie auxquelles sa structure doit résister. Pour maintenir son équilibre, l'ouvrage exerce sur le sol environnant des efforts importants. Si ce sol est très résistant, le mouvement initial de l'appui n'est pas modifié. Il n'y a pas d'interaction et pour assurer la tenue de l'ouvrage, le concepteur peut restreindre son analyse à la seule structure ; au prix toutefois, pour cette dernière, d'efforts internes et de demande de résistance parfois importants.

Si par contre le sol est de résistance plus faible, le support va se déformer et le mouvement de la fondation s'en trouve modifié, tout comme parfois le mouvement des fondations voisines.

I-1-Notion sur les séismes :

I-1-1-Definition d'un séisme :

Le séisme est l'un des phénomènes naturels des plus dévastateurs et destructeurs causant d'énormes dégâts humains et matériels.

Un tremblement de terre est une secousse du sol résultant de la libération brusque d'énergie accumulée par les contraintes exercées sur les roches.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Cette libération d'énergie se fait par rupture le long d'une faille, généralement préexistante. Plus rares sont les séismes dus à l'activité volcanique ou d'origine artificielle (explosions par exemple).

Le lieu de la rupture des roches en profondeur se nomme le foyer, la projection du foyer à la surface est l'épicentre du séisme. Le mouvement des roches près du foyer engendre des vibrations élastiques qui se propagent, sous la forme de trains d'ondes sismiques, autour et au travers du globe terrestre.

Il produit aussi un dégagement de chaleur par frottement, au point de parfois fondre les roches le long de la faille. [1]

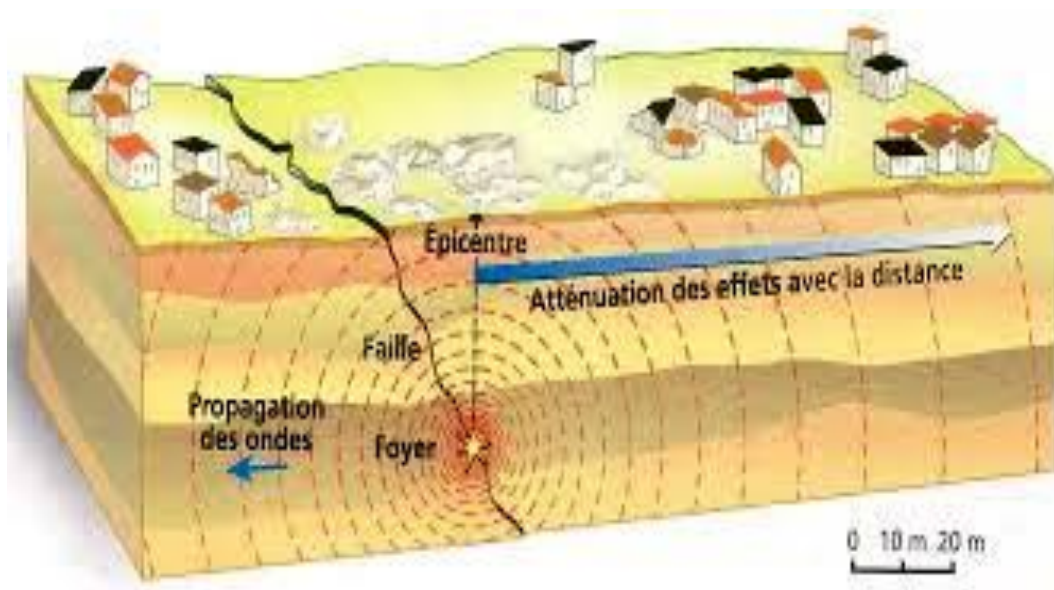


Figure (1-1) : Représentation schématique d'un séisme.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.



Figure (1-2) : Réponse des bâtiments au séisme.

I-1-2-Les risques sismiques :

(Seismic risk) est probabilité de pertes au cours d'une période de référence dans la région considérée.

Proportionnelle au nombre de vies humaines et à la valeur des biens exposés.
Dépend de l'occupation humaine de la région considérée.

Il est nécessaire d'approfondir l'analyse du risque sismique pour la réalisation d'ouvrages importants.

I-1-2-1-Le risque sismique dans la commune (l'Algérie) :

L'Algérie a de tout temps été soumise à une activité sismique interne avec comme résultats des pertes humaines et matérielles importantes dommageables non seulement aux individualités et collectivités locales; mais également au pays tout entier dont elle peut parfois obérer le développement pour un certain nombre d'années à l'instar du séisme de Chlef du 10

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

octobre 1980 dont nous continuons encore à payer les conséquences aujourd'hui ; en particulier sous forme de remboursements de dette. (Fig 1-3)[2]

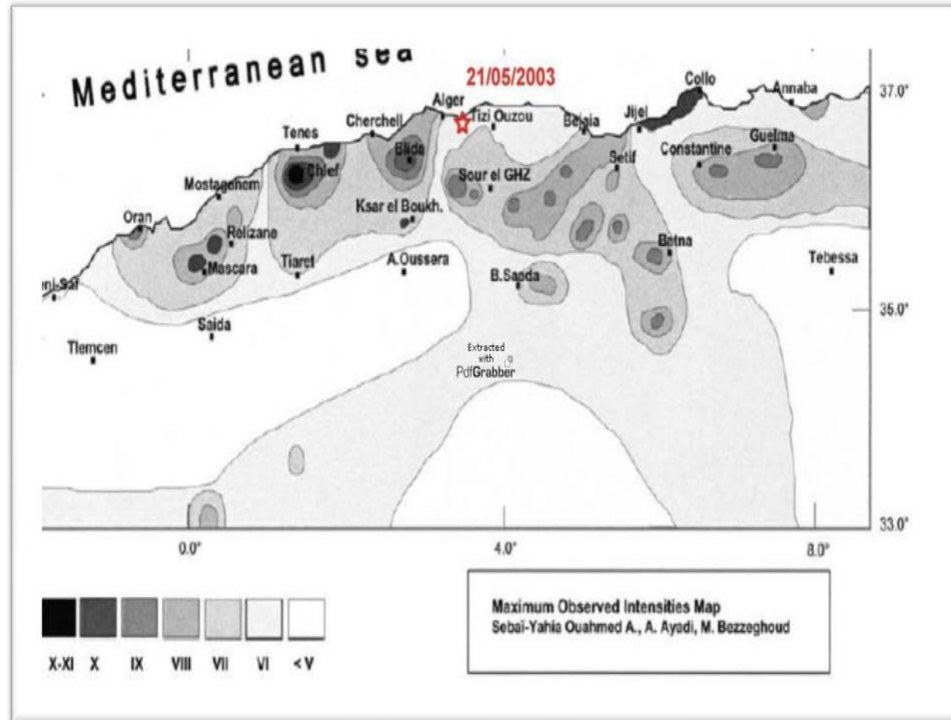


Figure (1-3) : intensités maximales observées Au nord de l'Algérie.

I-1-3-Les caractéristiques principale d'un séisme:

I-1-3-1-les Failles :

Une faille est une cassure de l'écorce terrestre qui partage un ensemble rocheux en deux compartiments décalés. [3]

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.



Figure (1-4) : photo d'une faille.

▪ Types de failles :

Suivant le type de mouvement relatif, on définit trois types de failles : faille normale, faille inverse, décrochement.

a) Faille normale :

Une faille normale est un plan incliné (le plus souvent d'environ 60°) séparant deux compartiments rocheux.

Le glissement sur ce plan de faille se traduit par un écartement des deux compartiments et par l'abaissement du bloc supérieur par rapport au bloc inférieur. Ce mouvement relatif accommode un allongement horizontal.

b) Faille inverse :

Ou failles de compression. Le plan de faille est incliné dans le sens du compartiment soulevé.

La composante horizontale du glissement correspond cette fois à un rapprochement qui s'accompagne du chevauchement d'un des blocs sur l'autre.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Ces failles se rencontrent dans les régions raccourcies et épaissies comme au front des chaînes de montagne.

c) Failles décrochantes :

Ce sont des failles à déplacement horizontal (m à km) provoquant le coulissement des deux compartiments le long du plan de faille.

Ce type de faille correspond à un plan vertical sur lequel se produit un glissement horizontal.

Ces failles que l'on appelle décrochements ne créent généralement pas de reliefs car les déplacements se font parallèlement à la surface de la terre.

Pour un observateur arbitrairement placé sur l'un des blocs, on parle de décrochement dextre lorsque l'autre bloc auquel il fait face, se déplace vers sa droite, et de décrochement sénestre lorsqu'il se déplace vers sa gauche. (fig. 1-5)

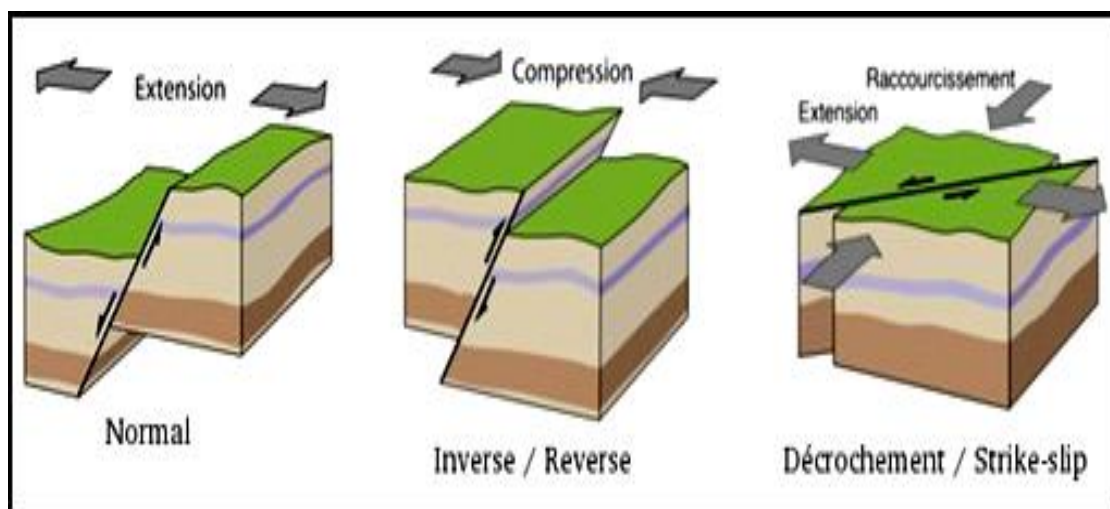


Figure (1-5) : Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

I-1-3-2- Foyer et épicentre :

C'est lieu origine d'un séisme sur une faille. Il est également appelé hypocentre (zone où s'est initialisée la rupture le long de la faille à l'origine du séisme). L'épicentre se trouve à la verticale de l'hypocentre, en surface.

Il est déterminé après un séisme par localisation, notamment en exploitant les enregistrements réalisés par les sismographes de la région concernée, voire de la planète.

(Fig 1-6)

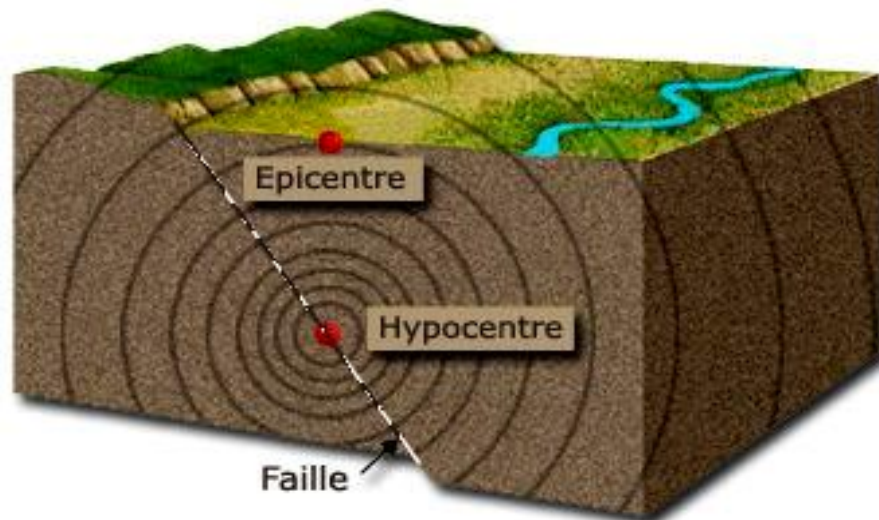


Figure (1-6) : foyer et épicentre.

I-1-3-3- Les ondes sismiques :

a) Les ondes de volume :

Elles se propagent à l'intérieur du globe suivant des lois proches de celles de l'optique géométrique. Lorsqu'elles se réfléchissent sur des surfaces de discontinuité (et notamment sur la surface du globe), elles interfèrent et génèrent des "ondes de surfaces".

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur.

▪ Les ondes P ou ondes primaires :

Appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales se propagent dans tous les milieux. Leur vitesse est égale à :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + 4/3\mu}{\rho}} \quad (1-1)$$

k : est le module d'incompressibilité : Il s'exprime en Pa mais il est de l'ordre du GPa.

μ : est le module de cisaillement qui rend compte de la résistance du matériau à changer de forme. Il se mesure en Pa mais il est de l'ordre du GPa.

ρ : est la masse volumique exprimée en Kg. m^{-3} .

Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre. Ce sont les plus

Rapides (6km.s^{-1} près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme, d'où leur nom.

▪ Les ondes S ou ondes secondaires :

Appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde.

Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, car il est impossible de déformer un liquide par cisaillement.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles sont donc enregistrées en second sur les sismogrammes.

Leur vitesse est égale à :

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1-2)$$

b) Les ondes de surface :

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte et elles concentrent le maximum d'énergie.

▪ l'onde de Love :

Elle se propage seulement dans les solides non homogènes. C'est une onde transversale polarisée dans le plan horizontal. Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S mais sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent donc un ébranlement horizontal, cause de nombreux dégâts par cisaillement des fondations des édifices. Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh.

▪ l'onde de Rayleigh :

Elle se propage au voisinage de la surface de milieux homogènes et non homogènes. Elle résulte d'interférences entre les composantes verticales des ondes P et S. Comme le montre le schéma, on peut l'enregistrer sur les trois composantes d'un sismographe et pendant une durée qui peut aller jusqu'à plusieurs minutes. [3]

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

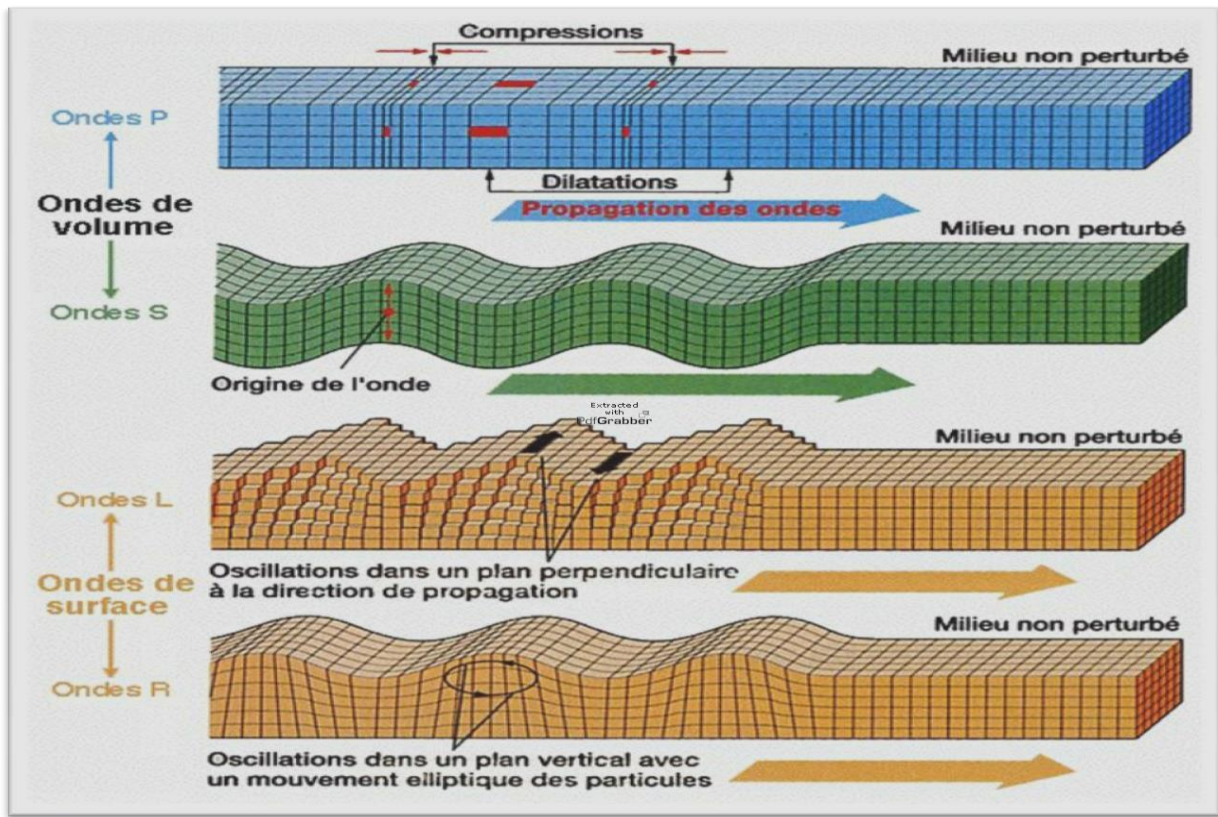


Figure (1-7) : Les quatre modes de propagation des ondes sismique.

I-1-3-4- Paramètres caractéristiques du mouvement sismique :

Les paramètres du mouvement sismique la plupart sont la longueur, la profondeur et l'orientation de la faille sur laquelle se localise le foyer, la direction, la vitesse et la longueur du déplacement lors la rupture, le spectre d'énergie dispersée sous forme d'ondes sismiques et l'histoire du mouvement cassant.

Pour classer un séisme en utilisant autres paramètres sont la magnitude et l'intensité.

1. La magnitude :

Est une mesure de quantité de l'énergie libérée au foyer d'un séisme. La magnitude dite de Richter se base sur la mesure de l'amplitude maximale des ondes sismiques sur un sismogramme. La magnitude est définie comme le logarithme décimal de cette valeur.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types du structures.

La définition originale donnée par Richter en 1935, appelée désormais magnitude locale (M_l), de forme :

$$M_l = \log(A) - \log(A_0) + c \times \log(\Delta) \quad (1-3)$$

A : représente l'amplitude maximale mesurée sur le sismogramme.

A_0 : est une amplitude de référence correspondant à un séisme de magnitude 0 à 100 km.

Δ : est la distance épacentrale (km).

c : est une constante d'étalonnage.

2. L'intensité :

L'intensité mesure l'importance d'un séisme en un lieu donné d'après les manifestations ressenties par la population et les dégâts qu'il a provoqués, Contrairement à la magnitude qui peut théoriquement atteindre n'importe quelle valeur, l'intensité est limitée par définition au degré douze.

I-1-3-5-Mouvement du sol :

La connaissance de la nature des sources sismiques ainsi que les lois de propagation des Ondes peut être fournie par des enregistrements sismographiques de l'accélération du sol ; les mouvements horizontaux du sol étaient souvent à l'origine de la ruine des bâtiments.

I-1-3-6-Accélérogramme du séisme :

La nature des Accélérogramme dépend d'un certain nombre de facteurs, tel que la magnitude du séisme, la distance de la source de libération d'énergie, les caractéristiques géologiques du rocher le long du trajet de la transmission d'onde.

Les types d'Accélérogramme :

- Accélérogramme naturel.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

- Accélérogramme synthétique (à partir d'Accélérogramme naturel).
- Accélérogramme artificiels.
- Accélérogramme de planchers (transférés).

Quelques paramètres caractéristiques : durée du séisme, la magnitude, distance à l'épicentre, nature du soletc.

I-1-3-7-Accélération maximale :

L'accélération max exprimée en fonction g , la vitesse et le déplacement maximale d . [3]

I-2-Généralité sur les structures :

I-2-1-types de structures :

I-2-1-1-structure en portique(poteau-poutre) :

Les structures en portique sont des structures pour lesquelles les charges dynamiques horizontales passent par les mêmes éléments de la structure que les charges statiques verticales.

L'ossature en portique en béton armé (contreventement par portique) conçue et réalisée de manière habituelle est très vulnérable aux séismes. En cas de séisme fort le béton qui se trouve dans les zones les plus sollicitées de la structure (nœuds) éclate. [4]

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.



Figure (1-8) : Eclatement de zones critiques, extrémités des poteaux et poutres.

I-2-1-2-structure mixte :

Dans les constructions mixtes en acier et béton, les poutrelles doivent être liées aux dalles de béton par des moyens mécaniques afin d'optimiser les matériaux. En outre, la dalle de béton armé, qui remplit déjà son office de surface porteuse horizontale, est utilisée en outre comme élément comprimé de la section mixte. Elle apporte ainsi un gain de résistance et de rigidité à la poutrelle, qui constitue essentiellement l'élément tendu de l'ensemble en flexion. Le béton et l'acier peuvent de même être combinés dans des poteaux mixtes de différents types de sections.

Dans le cas des bâtiments multi-étages, les poteaux mixtes (profilés enrobés de béton renforcé) contribuent non seulement à la protection anti-feu, mais aussi au transfert de charges verticales, assurant ainsi la stabilité de la structure et réduisant considérablement la section transversale et le nombre de poteaux nécessaire.

La forme creuse des profilés en H favorise un remplissage de béton à plat au sol avant montage des pièces, éliminant ainsi les frais de coffrage.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types du structures.

Cette technique permet de laisser une partie des semelles des profilés apparentes, pour des raisons d'architecture. Les structures mixtes ont une résistance sismique incomparable. [5]



Figure (1-9) : structure mixte d'un bâtiment.

I-2-1-3-structure en voile :

Les voiles, sont couramment utilisés dans les élancés en béton armé compte tenu de leur comportement considéré satisfaisant vis-à-vis des forces latérales (le séisme).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. [5]

1-3-les fondations :

I-3-1-Définition :

Une fondation se définit comme un élément architectural d'un bâtiment qui assure la transmission et la répartition des charges de cet ouvrage dans le sol (poids propre du bâtiment, forces climatiques et surcharges liées à son utilisation).

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types des structures.

Les fondations d'un bâtiment représentent un enjeu essentiel de son architecture, car elles forment la partie structurelle qui s'oppose au tassement et aux infiltrations. Selon la capacité portante, les forces mises en jeu et les tassements admissibles, le constructeur choisira une solution du type fondation superficielle, semi-profonde ou profonde, qui diffèrent par leur géométrie et leur fonctionnement. En dernier recours, si le sol en place ne possède pas les qualités suffisantes pour qu'on puisse y fonder l'ouvrage, des techniques de renforcement des sols sont utilisables. [6]

I-3-2-les types des fondations :

Il en existe trois types :

- la «semelle filante», cas le plus courant, que l'on retrouve sous les murs porteurs.
- les semelles isolées se trouvant sous les poteaux.
- Le radier, utilisé lorsque la contrainte admissible du sol ne peut supporter l'ouvrage.

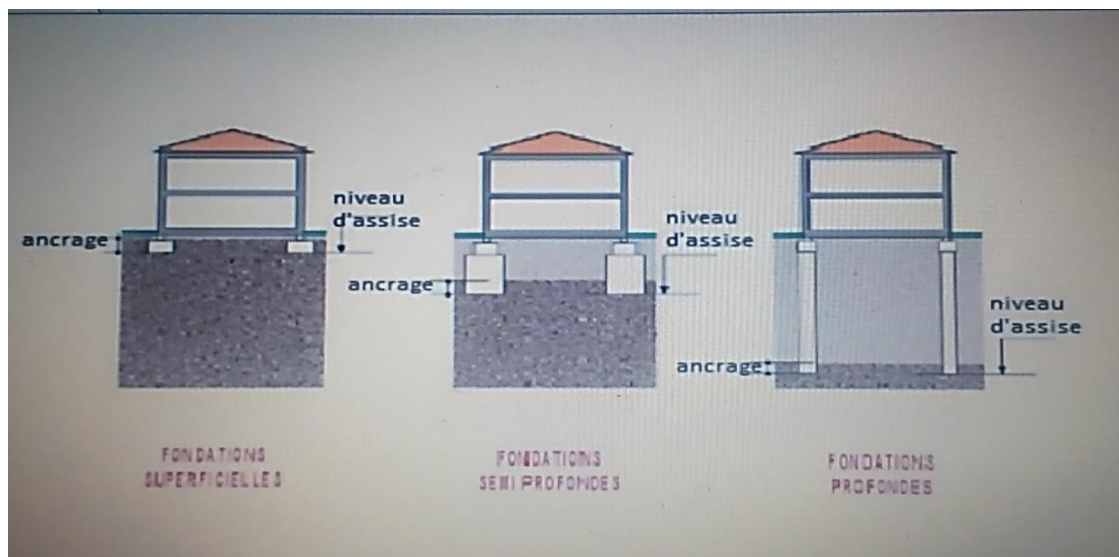


Figure (1-10) : Types des fondations.

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types de structures.

I-3-2-1-Fondation en semelle filante :

On parlera de semelles filantes ou linéaires si elles supportent un voile ou un mur, Réalisée à une profondeur hors-gel, la fondation est constituée d'une «semelle », espèce de poutre horizontale posée sur un béton de propreté en fond de fouille. La semelle peut-être armée ou non suivant les contraintes exercées par les charges.

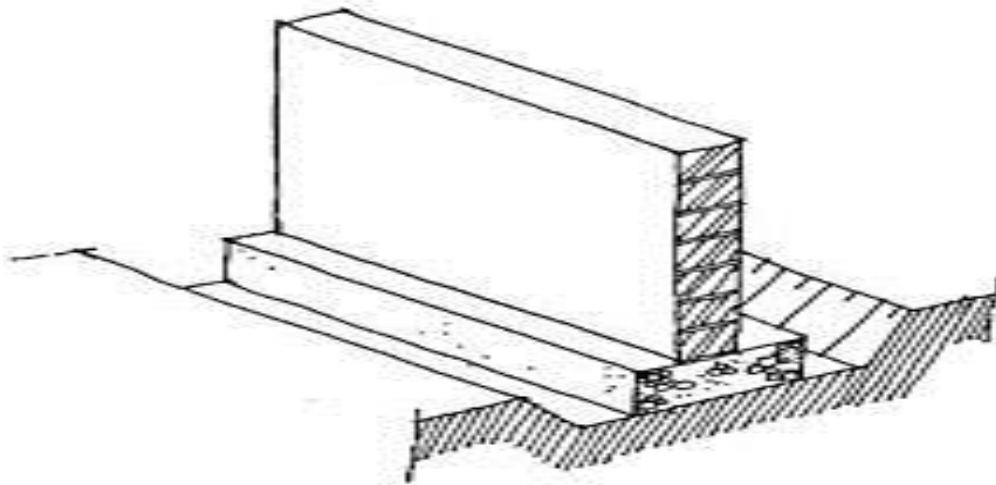


Figure (1-11) : Fondation en semelle filante (sous un mur).

Le calcul des charges se fait à partir des caractéristiques mécaniques des sols sur lesquels l'ouvrage va être fondé, obtenues à partir d'essais de laboratoire ou d'essais in situ.

La détermination de la section de la semelle de fondation est obtenue avec la formule générale $\nu = 1,35G + 1,5Q$ (1-4)

G représentant les charges permanentes (murs, planchers, charpente, ...) et Q les charges d'exploitations (mobilier, ...).

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types du structures.

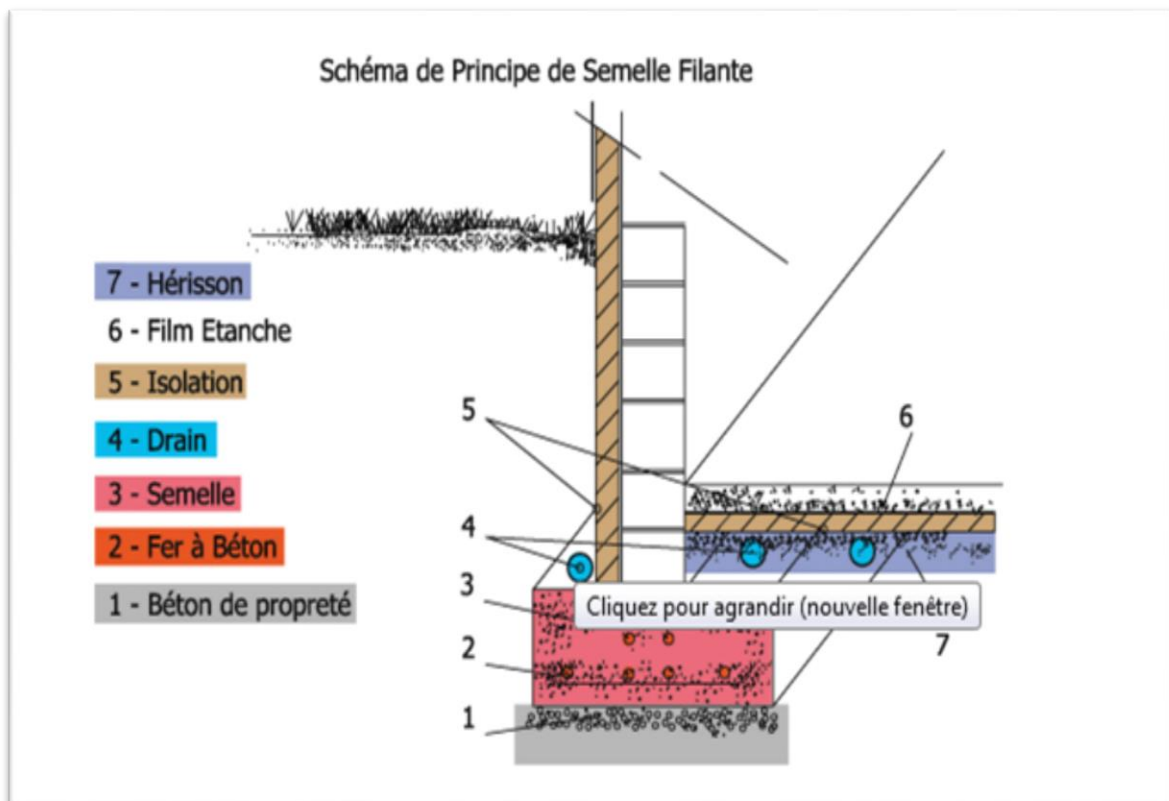


Figure (1-12) : principe de semelle filante.

I-3-2-2- Fondation en semelle isolé :

On parlera de plots de fondation ou semelles isolées si elles se trouvent sous un pilier ou un poteau.

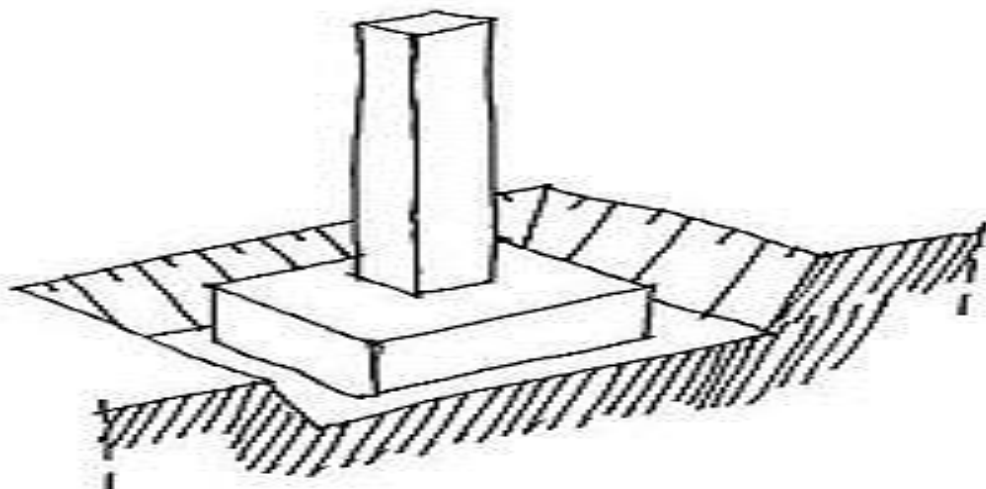


Figure (1-13) : Fondation en semelle isolée (sous un poteau).

1-3-2-3-Fondation en radier :

Chapitre 1 : Les caractéristiques des mouvements sismiques et les types du structures.

On parlera de radier si elles forment une dalle posée sur le sol (par exemple comme plancher de sous-sol).

Elle est nécessaire lorsque la nature du terrain ne peut supporter les charges.

Le radier se compose d'une plate-forme actuellement réalisée béton armé reposant sur le fond de terrassement et posé sur un "hérissron" (un lit de pierre), avec un drainage installé dans le lit de pierre permettant de garantir toute infiltration et d'évacuer les gaz telluriques (Radon).

Une isolation posée sous le radier et en périphérie permet d'améliorer sensiblement les performances énergétiques. [6]

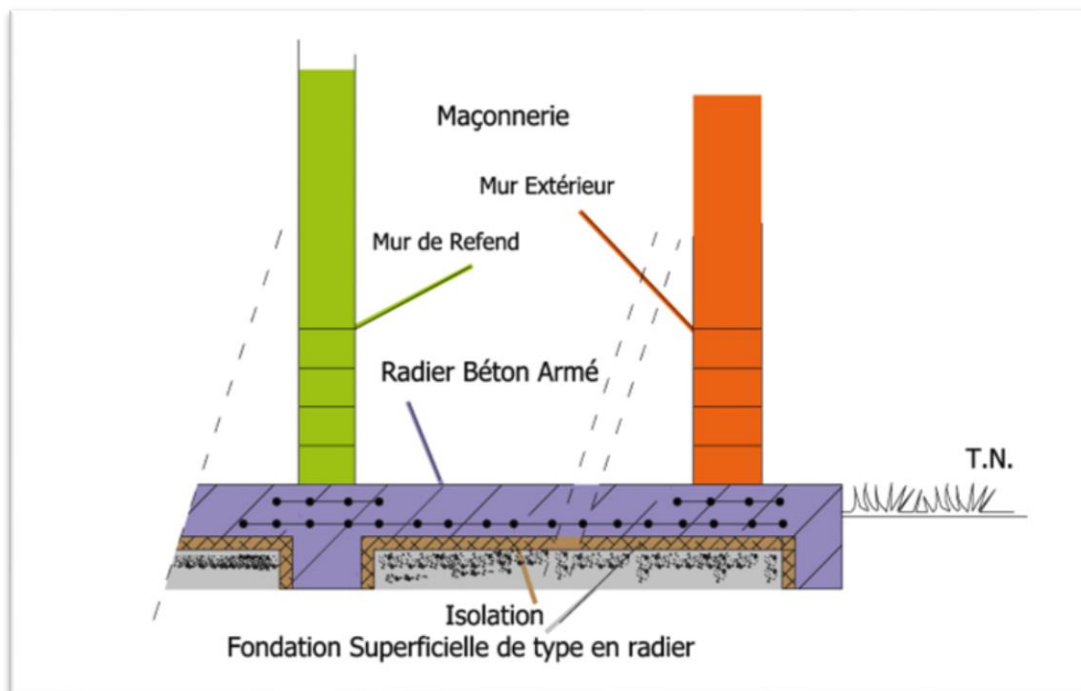


Figure (1-14) : fondation superficielle de type en radier.

Chapitre 02:

Interaction sol-structure

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

Introduction :

Selon les caractéristiques de la structure et le mouvement du sol, l'interaction sol structure peut avoir un effet sur la magnitude des forces induites à la structure en question.

La réponse sismique d'une structure se trouve toujours liée à la forme avec laquelle les mouvements sismiques du sol sont transmis à travers ses fondations au système fondation structure.

La complexité du problème d'interaction sol structure réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments, le sol et la structure. Ce phénomène peut décrire les effets qui se produisent dans le plan du contact sol/structure, de sorte que, dans l'analyse de la réponse dynamique, non seulement les propriétés structurelles soient incluses mais également les propriétés du sol sous-jacent. L'interaction sol structure peut donc contribuer à amplifier ou à diminuer la réponse dynamique de la structure.

L'influence de l'interaction sol structure sur les bâtiments en béton armé est étudiée. L'analyse de la réponse sismique des structures à savoir le déplacement et l'évolution de l'effort tranchant développé à la base des structures avec et sans interaction montre l'importance de la prise en compte de ce phénomène au stade de la conception du projet pour différents types de sol comme préconisé par la réglementation en vigueur.

II-1-Notion d'interaction sol-structure :

L'Interaction du Sol avec la Structure (ISS) est un phénomène important à considérer pour une bonne évaluation de la vulnérabilité des ouvrages situés en zone sismique. Les procédures simples proposées dans les règlements parasismiques ne sont pas suffisantes pour évaluer correctement l'influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse de la structure.

Les interactions sols-structures dépendent de l'ensemble des rigidités du sol, de la fondation et des structures. On distingue quatre modes d'interaction :

- Effets des mouvements de sol sur le comportement des structures.
- Action des structures sur le sol environnement.
- Interaction entre structures voisines par l'intermédiaire du sol.
- Effet du renforcement des sols. [7]

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

II-2- Comportement des sols sous sollicitations sismiques :

Le modèle de comportement doit être formulé en contraintes effectives, puisque le comportement des sols est régi par ces contraintes. Pour être valable, le modèle de comportement doit pouvoir être testé sous des chemins de contraintes différents de ceux ayant servi à l'établir. Par ailleurs, le modèle doit être simple et ne fait intervenir qu'un nombre limité de paramètres corrélables ou directement mesurable à partir des résultats d'essais courants de laboratoire. On distingue : [8]

II-2-1-Comportement élastique du sol.

Qui comprennent le modèle élastique de Hooke et le modèle viscoélastique linéaire de Type Kelvin-Voigt ; figure2.1.

Ce modèle est caractérisé par deux paramètres :

- le module d'Yong E .
- le coefficient de poisson ν .

II-2-2-Comportement élastoplastique du sol :

Ce modèle est de type élastique-parfaitement plastique. Il caractérisé par cinq paramètres :

- le module d'Yong E .
- le coefficient de poisson ν .
- le cohésion c .
- l'angle de frottement ϕ .
- l'angle de dilatance Ψ .

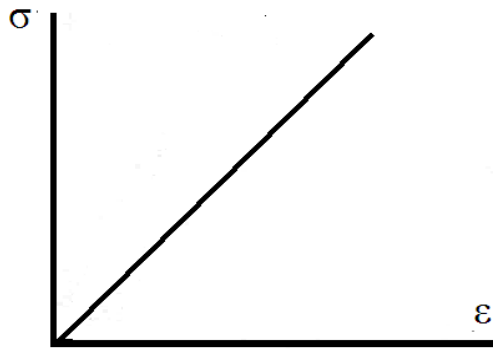


Figure (2-1) : modèle élastique de Hooke.

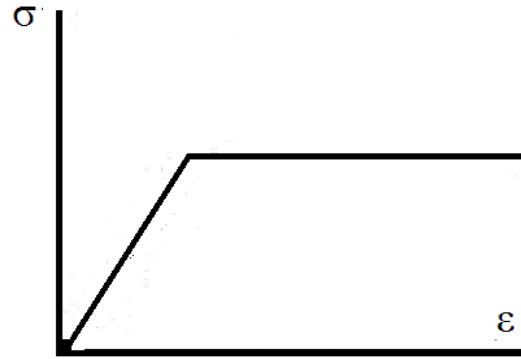


Figure (2-2) : modèle élastoplastique parfait.

II-2-3-Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique :

La plupart des déformations réversibles sont partiellement plastiques. On peut dire que la relation contrainte-déformation pour le sol, est élastique pour les petites amplitudes de chargement cyclique.

Théoriquement, cela n'est vrai que lorsque l'amplitude de la déformation tend vers zéro mais, en pratique, on la limite à 0.001%. Puisque toutes les autres déformations incluent le glissement entre les particules, elles peuvent être considérées comme des déformations plastiques.

Cela signifie que, en réalité, ces déformations sont quelquefois élasto-plastiques et non purement plastique. Avec cette définition des déformations.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

II-3-Caractéristiques dynamique des sols :

II-3-1- Détermination de τ_{max} :

En se basant sur un grand nombre d'essais en laboratoire, plusieurs chercheurs ont proposé des équations empiriques pour calculer le module de cisaillement maximum, d'une couche de sol.

Critère de Mohr-coulomb, par géométrie, on peut déduire une expression pour la résistance ultime en cisaillement τ_{max} d'un sol :

$$\tau_{max} : \left(\left| \left(\frac{1+K_0}{2} \sigma'_v \sin \varphi' + C' \cos \varphi' \right) - \left(\frac{1+K_0}{2} \sigma'_v \right) \right| \right)^{1/2} \quad (2-1)$$

C : cohésion effective du sol ; φ' : l'angle de frottement interne effectif du sol.

K_0 : Le coefficient des terres au repos.

Les résultats des expériences faites à l'aide des différents appareils (Triaxial, cisaillement simple, etc...) nous donnent :

$$(T_{max})_{Dynamique} = (T_{max})_{statique} \times (\text{Facteur de taux de déformation})$$

II-3-2-Module de cisaillement maximum :

Le module de cisaillement maximum G_{max} est défini par la relation suivante :

$$G_{max} = \left\{ \begin{array}{ll} k \frac{P_a}{F(e)} \left[\frac{\sigma'_m}{P_a} \right] & (\text{pour les sables}) \\ k \frac{(OCR)^n P_a}{F(e)} \left[\frac{\sigma'_m}{P_a} \right] & (\text{pour les argiles}) \end{array} \right\} \quad (2-2)$$

K, n : désignent des paramètres expérimentaux

P_a : pression atmosphérique.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

σ'_m : Contrainte moyenne effective

F(e) fonction qui dépend de l'indice des vides (e) du sol, propose par Hardin (1978) et égale à :

$$F(e) = 0.3 + 0.7e^2 \text{ avec } 0.4 \leq e \leq 1.2 ; \quad (2-3)$$

OCR : rapport de sur consolidation.

K : paramètre fonction de l'indice de plasticité (tableau 2-1).

Indice de plasticité	0	20	40	60	40	≥100
K	0	0.18	0.30	0.41	0.48	0.50

Tableau (2-1) : Valeurs de K (Hardin-Black, 1968).

II-3-3-Amortissement hystérétique dans le sol :

L'énergie dans un système est équivalente au produit de la contrainte et de la déformation, ou à l'aire sous la courbe suivie lors d'un chargement. Dans un système non-linéaire élastique, puisque le déchargement suit le même chemin que le chargement, l'énergie dans le système est conservée.

Il n'y a pas de dissipation d'énergie et donc pas d'amortissement. C'est pourquoi un terme d'amortissement visqueux est ajouté et que le sol est considéré comme un matériau viscoélastiques.

Le coefficient d'amortissement critique β max en fonction du type de sol considéré, du nombre de cycles de chargement N et de sa fréquence f (tableau 2.2).

Type de sol	β max (%)
Sable sec et propre	$33 - 1.5 \log N$
Sable propre et saturé	$28 - 1.5 \log N$
Argile saturé	$31 - (3 - 0.03f (\sigma'_m / \text{Pa})^{0.5} / 1.5f^{0.5} - 1.5 \log N$

Tableau (2-2) : coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).

N : Nombre de cycle de chargement.

σ'_m : Contrainte moyenne effective (Kg/cm²).

f: Fréquence moyenne du chargement(HZ). [8]

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

II-4- Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structure :

La principale conséquence de l'ISS est de briser le schéma séquentiel où est d'abord défini le mouvement sismique pour ensuite dimensionner l'ouvrage. Cette rupture est de deux ordres classiquement dénommés : interaction cinématique et interaction inertielle. [9]

II-4-1-L'interaction cinématique et interaction inertielle :

a) Interaction cinématique :

L'interaction cinématique traduit l'incompatibilité entre le champ d'onde incident et les mouvements possibles de la fondation. En effet, la fondation est souvent plus rigide que le sol environnant et ne peut donc se déplacer, en première approximation, que sous forme de translations et de rotations.

Ne pouvant accommoder qu'une partie des déplacements induits par les ondes sismiques incidentes, une partie des ondes est réfléchi, occasionnant des efforts significatifs sur la fondation, mais réduisant l'énergie pénétrant dans la structure. Cette interaction cinématique est également bénéfique pour les ouvrages ayant des fondations profondes car les ondes sismiques étant amplifiées au toit des formations géologiques, La recherche d'un point d'appui plus profond pour l'ouvrage réduit le chargement sismique.

Afin de caractériser précisément cet effet complexe car dépendant de la nature du sous-sol et de la géométrie de la fondation, il est d'usage de s'intéresser à la réponse dynamique de la fondation en l'absence du bâtiment, ce qui, dans l'hypothèse d'une fondation rigide, revient à trouver les déplacements et les rotations de cette dernière.

Si un balancement important est plutôt bénéfique pour l'ouvrage lui-même car il permet de réduire les efforts de flexion dans la structure, il peut être fortement dommageable pour le sol de fondation qui peut rompre et occasionner un Basculement d'ensemble de l'ouvrage (cf. fig 2-3).

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

La torsion est, par contre, beaucoup plus dangereuse pour la superstructure et des propriétés de symétrie de la fondation permettent de réduire ces effets néfastes.

En résumé, l'interaction cinématique induit un filtrage parfois significatif du mouvement sismique lors de son transfert au bâtiment mais occasionne des rotations d'ensemble de la fondation dont les effets sur l'ouvrage doivent être étudiés. La réponse de la fondation sans superstructure au mouvement sismique incident fournit au concepteur les efforts d'inertie nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage. Enfin, dans le cas de fondations superficielles et d'ondes à incidence verticale, il n'y a pas d'interaction cinématique et le mouvement de la fondation sans superstructure est égal au mouvement du sol sans ouvrage. (Fig 2-4)



Figure (2-3) : Exemples de rupture des fondations lors d'un séisme : bâtiment à Kobé ayant basculé à sa base.

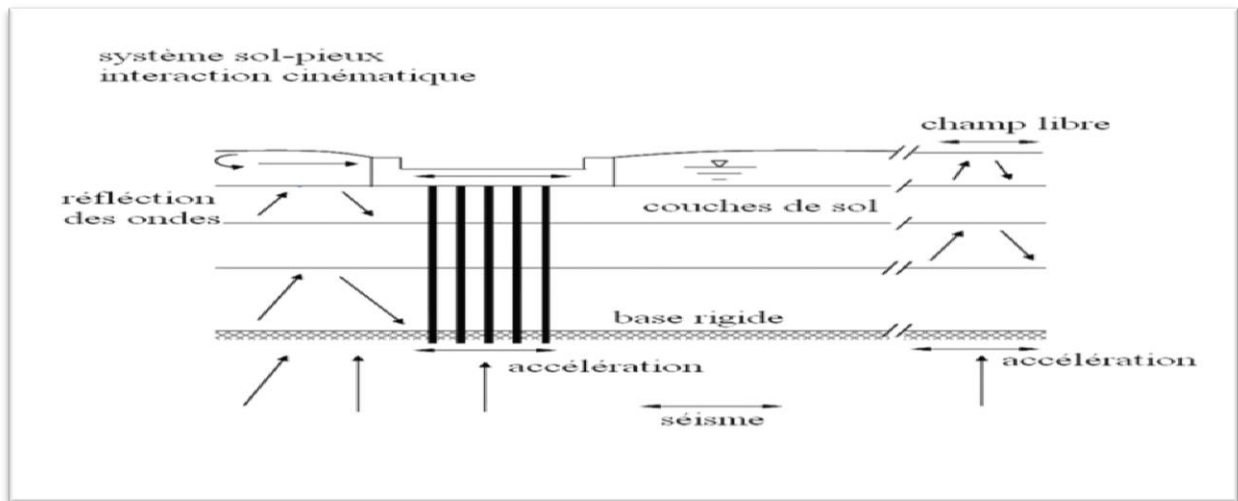


Figure (2-4) : Interaction cinématique.

b) Interaction inertielle :

L'interaction inertielle traduit, indépendamment de la modification du chargement décrite précédemment, le couplage que l'ouvrage entretient avec le sol environnant. Deux éléments sont essentiels ici : la modification des résonances de la structure par rapport à son comportement sur base fixe et la dissipation d'énergie dans le sol.

Ainsi, la période fondamentale du système sol-structure est toujours supérieure à celle de la structure sur base fixe car en prenant en compte le sol on ajoute de la flexibilité et de la masse. L'ampleur de cette augmentation est fonction des flexibilités relatives de l'ouvrage et du sol.

La première est globalement proportionnelle à la hauteur de la structure tandis que celle du sol est proportionnelle à la taille de la fondation. En conséquence l'interaction sol-structure peut devenir prépondérante pour des ouvrages d'élanement limité fondés sur des sols de faibles propriétés.

L'augmentation de la dissipation d'énergie dans le système par rayonnement d'ondes dans le sol ou par frottement interne dans le sol est sans conteste le principal bénéfice de l'interaction sol-structure car elle réduira l'ampleur des résonances. Cette dissipation dépend du mouvement relatif de la fondation par rapport au mouvement d'entraînement, et donc du rapport entre les souplesses du sol et de la structure.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

La dissipation étant proportionnelle à la souplesse, plus l'interaction est importante, plus la dissipation augmente. La part due au rayonnement d'ondes dans le sol dépendant par ailleurs de la vitesse relative de la fondation.

Ainsi, plus la fondation sera étendue, plus la vitesse des ondes et la période fondamentale seront faibles et plus l'amortissement augmentera.

Pour conclure sur l'interaction inertielle, il faut noter que si, dans la grande majorité des cas elle est bénéfique ou négligeable, il existe des cas pathologiques où elle a un effet néfaste en particulier pour une structure relativement légère reposant sur une fondation massive dont la Période fondamentale est proche de celle de la structure légère ; le mouvement sismique subit alors deux amplifications successives.

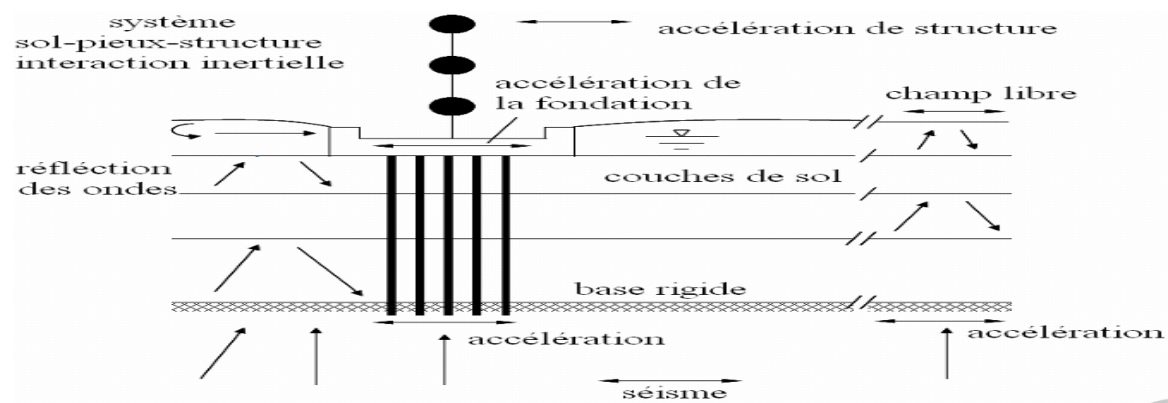


Figure (2-5): Interaction inertielle.

II-4-2--L'amortissement radiatif :

Lors de chargement dynamique, en considérant un massif de sol semi infini, l'énergie amenée par le mouvement de la structure est dissipée de deux manières: un amortissement hystérétique (matériel) dû aux non-linéarités présentes dans le sol et dans la fondation, et une dissipation due au rayonnement des ondes dans le milieu semi-infini. Cette dissipation de l'énergie rayonnée par la structure s'appelle l'amortissement radiatif. Ainsi, une influence existe aussi bien du sol sur la structure que de la structure sur le sol. C'est pour cela que nous parlons de problèmes d'interactions entre le sol et la structure.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

II-4-3-La liquéfaction :

La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique (éventuellement, en bord de mer sous l'effet de la houle ou par suite d'une activité sismique).

Le passage d'une onde sismique provoque, dans certaines formations géologiques, la perte de résistance d'un matériau sableux saturé en eau dans un état lâche, liée à une augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques.

La déconsolidation brutale du matériau se traduit par la déstructuration du sol, rendant particulièrement instables les constructions reposant sur ces formations.

La liquéfaction est donc effective lorsque les pressions interstitielles avoisinent la pression de confinement, diminuant ainsi (jusqu'à annuler) les contraintes effectives du matériau. Il est donc pour cela nécessaire que le matériau considéré soit saturé.

De plus, il apparaît que la Granulométrie du matériau considéré a une certaine importance, les sols susceptibles de liquéfier sous chargement cyclique étant limoneux à sableux.

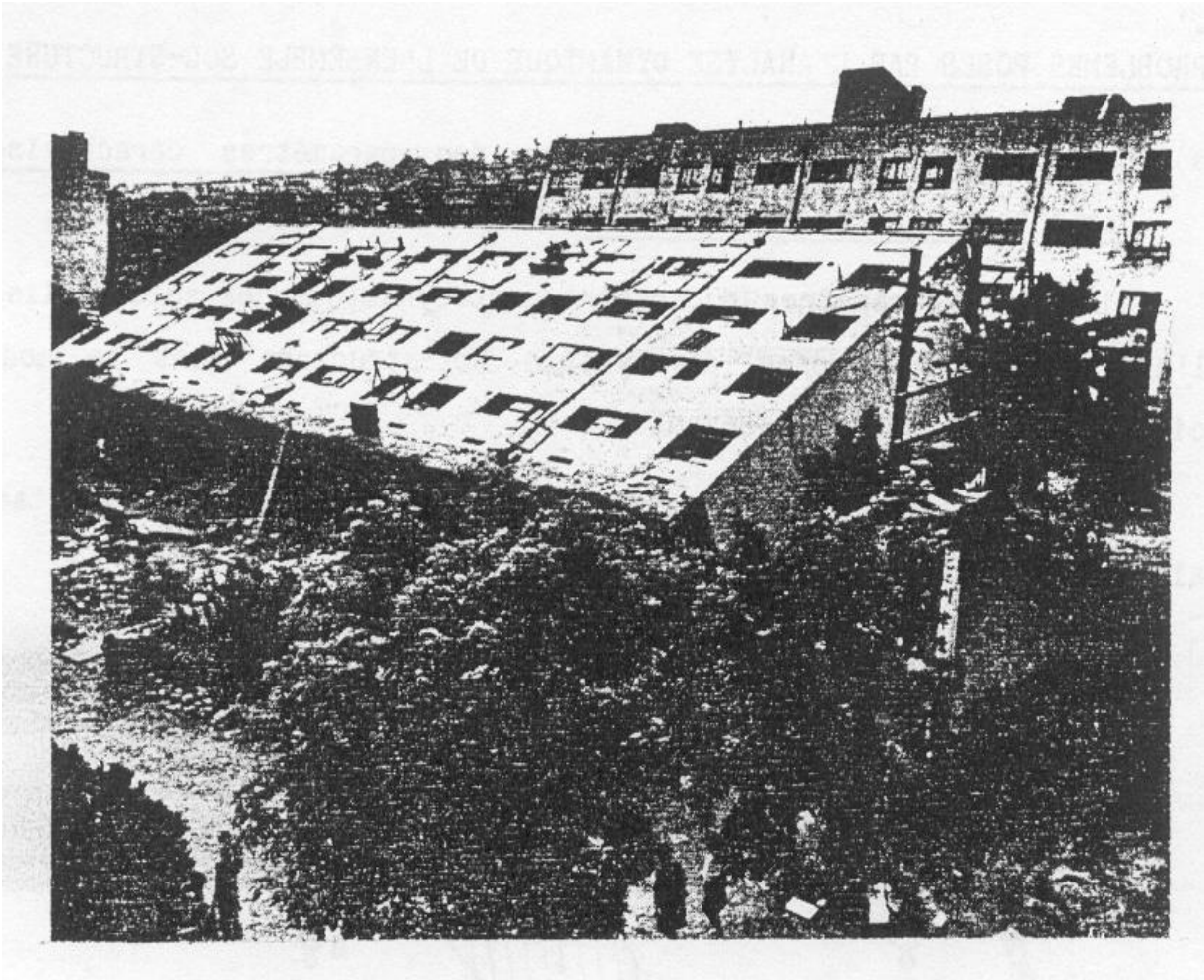


Figure (2-6) : Le sol liquéfié entraîne l'inclinaison, voire le renversement, des bâtiments.

II-5- Fonctions d'impédance :

Pour une meilleure approximation de la réponse de la structure, on introduit l'effet du sol sur cette dernière, des fonctions reliant les forces et les déplacements à l'interface sol- structure ont été développés, en particulier pour les problèmes de fondations de machines. Ces fonctions sont appelées fonction d'impédance de la fondation. Les fonctions d'impédance sont définies généralement sous une forme complexe comportant une partie réelle caractérisant la rigidité et une partie imaginaire caractérisant l'amortissement du sol. Ce genre de fonction d'impédance peut être utilisé dans une analyse dans le domaine fréquentiel. Cependant, l'analyse d'un système compliqué, nécessitant la mise en œuvre d'un grand nombre de degrés de liberté, ne peut être simplifiée que si les fonctions d'impédance sont considérées indépendantes de la fréquence d'excitation. En outre, la résolution dans le domaine fréquentiel ne peut plus être envisagée si l'analyse est étendue au domaine non linéaire. [9]

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

II-6- Formulation d'un problème d'interaction sol-structure :

Avant d'examiner les différentes méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure, il est utile de formuler de façon générale le problème. Cette formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction. En effet, la complexité du problème est telle que le recours aux méthodes numériques est pratiquement inévitable.

Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la figure (2-7) qui schématise un ensemble sol-structure. Par le théorème de superposition. [10]

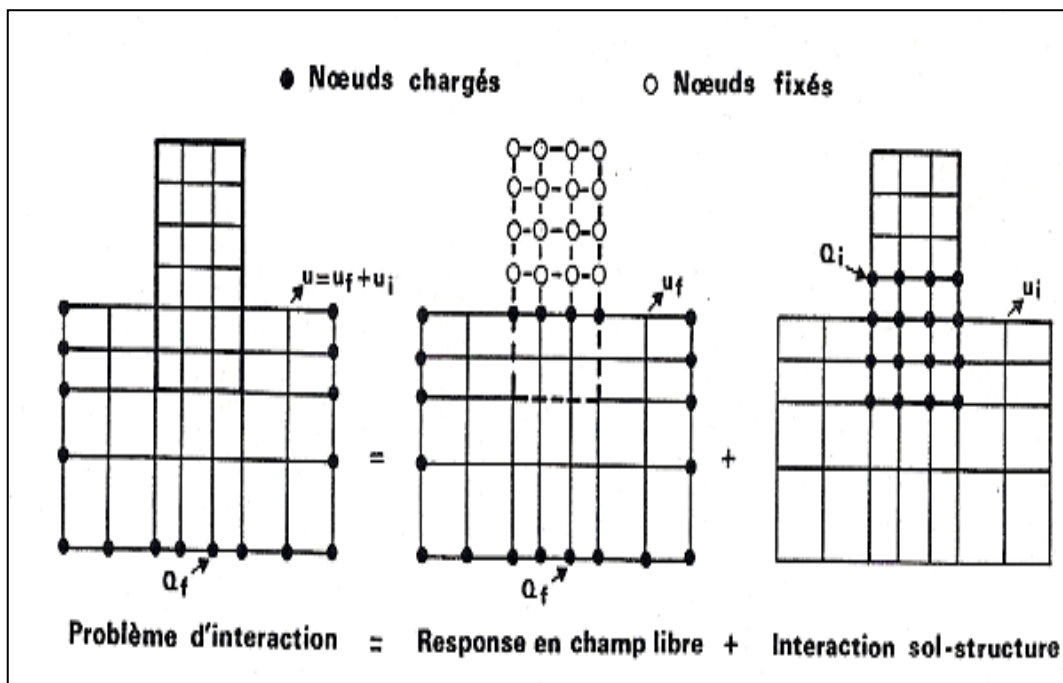


Figure (2-7): Théorème de superposition pour l'interaction sol-structure.

La formulation générale d'un problème d'ISS est présentée ci-dessous, cette formulation est celle utilisée dans le cadre d'une méthode aux éléments finis. La complexité d'un problème d'ISS se trouve dans la capacité à résoudre ces équations.

Dans l'équation générale donnée ci-dessous, [M], [C] et [K] représentent respectivement la matrice des masses, celle d'amortissement et celle de raideur $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ et $\{u\}$ représentent les vecteurs accélérations, vitesse et déplacement. $\{Q_f\}$ Est le vecteur de chargement. [11]

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{Q_f\} \quad (2-4)$$

II-7-Les différentes méthodes pour prendre en compte L'ISS :

Déférentes méthodes existent pour prendre en compte l'ISS. Elles sont décrites et détaillées dans [Pecker, 1984] [12] ou [Wolf, 1988] [13] ou encore dans la thèse [Crémer, 2001] [14]. Nous allons les présenter brièvement dans ce paragraphe.

II-7-1-Les méthodes directes (Méthodes globales) :

Les méthodes directes consistent à résoudre directement l'équation de la dynamique Régissant le comportement du système {sol+fondation+structure}:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = -M \cdot I a \quad (2-5)$$

Où \underline{u} représente le vecteur de déplacement du système parrapport au repère de référence soumis à l'accélération a par rapport à un repèr galiléen, \underline{I} un vecteur contenant des \underline{I} pour les direction ssoumises à l'accélération a , et \underline{M} , \underline{C} , et \underline{K} les matrices de masse , amortissement et raideur du système. Le ymbole représente les dérivées par rapport au temps. La résolution directe de ce système d'équation utilise les algorithmes classiques de la méthode des éléments finis (méthode de Newton-Raphson et algorithme d'intégration temporelle de Newmark).

La première difficulté est que cette résolution requiert une bonne connaissance des lois de comportements des matériaux et des frontières entre les différentes parties du système. Par exemple, des lois de contacts, entre la fondation et le sol doivent être prises en compte pour bien reproduire les différentes non linéarités (ex. les problèmes de décollement d'une fondation superficielle qui constituent une non-linéarité géométrique).

La deuxième difficulté est la différence de dimension qui existe entre la structure et le massif de sol supportant la fondation. La prise en compte de l'ISS nécessite un très grand nombre d'éléments ce qui engendre des temps de calculs contraignants. Il est d'ailleurs assez difficile de définir de manière précise la frontière de ce massif de sol.

Chapitre II : Interaction Sol-Structure

En effet, une onde frappant cette frontière peut numériquement se réfléchir et venir solliciter une nouvelle fois la structure, alors qu'en réalité, nous l'avons vu, cette onde part à l'infini et emmène avec elle une partie de l'énergie de la structure et du sol (amortissement radiatif). Des frontières absorbantes devront donc être ajoutées aux limites du massif de sol pour tenir compte de cet amortissement.

II-7-2- La méthode des sous-structures :

Cette catégorie de méthodes fait appel au principe de superposition. L'idée consiste à analyser le problème d'interaction sol structure en plusieurs étapes successives, chacune des étapes étant réputée plus facile à résoudre que le problème global.

Pour des raisons évidentes, les sous structures envisagées sont constitués d'une part par le sol et d'autre part par la structure comme indiqué sur la figure se dessous.

On écrit les équations d'équilibre de chaque sous système, puis les conditions de compatibilité à l'interface : continuité du déplacement et du vecteur contrainte.

Elle vise à décomposer le problème en la somme de sous problèmes plus simples à résoudre.

Dans le cas de fondations rigides cette méthode consiste à utiliser le principe de superposition de [Kausel *et al.* 1978]. Cette démarche est illustrée par la figure (2-7).

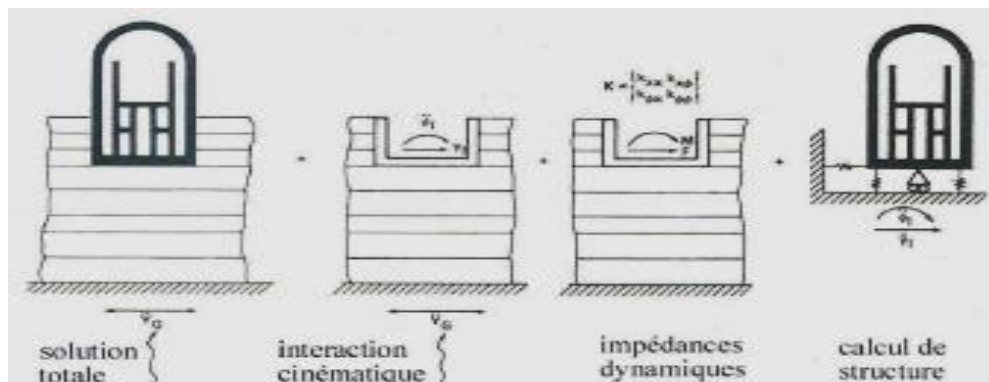


Figure (2-8) : Schématisation d'une méthode de sous structure.

Chapitre 03 :

Présentation de code plaxis

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

Introduction :

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien.

Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers [15].

III-1-Le code plaxis :

C'est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériciens de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code de calcul éléments finis *Plaxis* est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques.

Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques.

Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastique, élastoviscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée.

Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages de résolution récents comme la méthode de longueur d'arc.

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

III-2-L'interface graphique de code plaxis :

Le système d'option par défaut et de solutions approchées spécifique est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la Convivialité du logiciel.

Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent (figure 3-1). Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

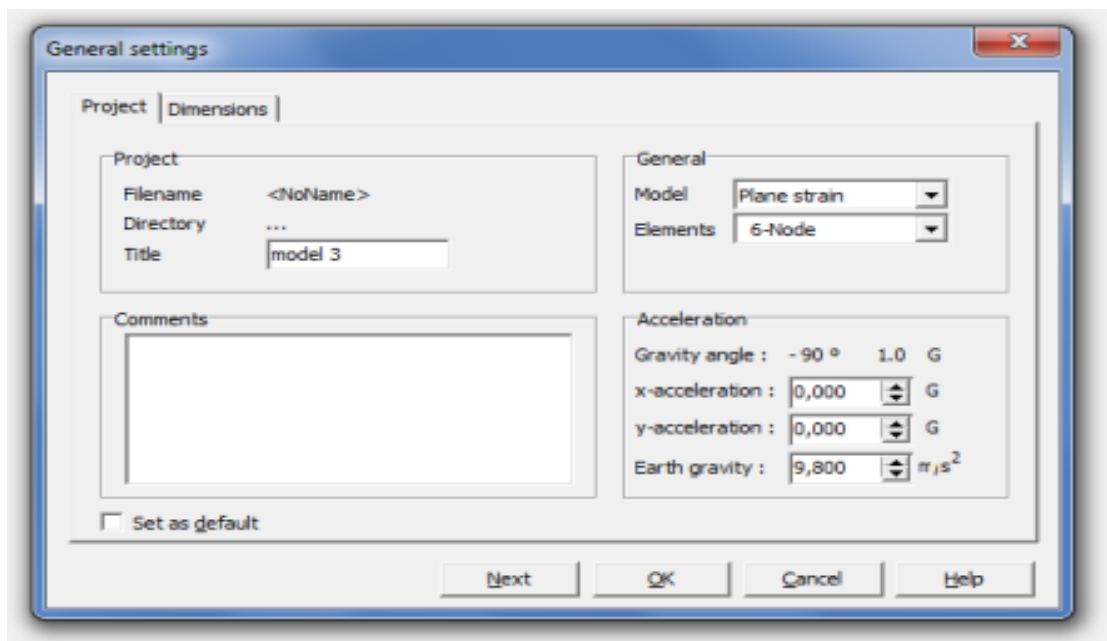


Figure (3-1) : interface utilisateur pour l'entrée des données.

En ce qui concerne les conditions aux limites en déplacement : Si celles-ci sont complexes (figure 3-2). L'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise.

Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

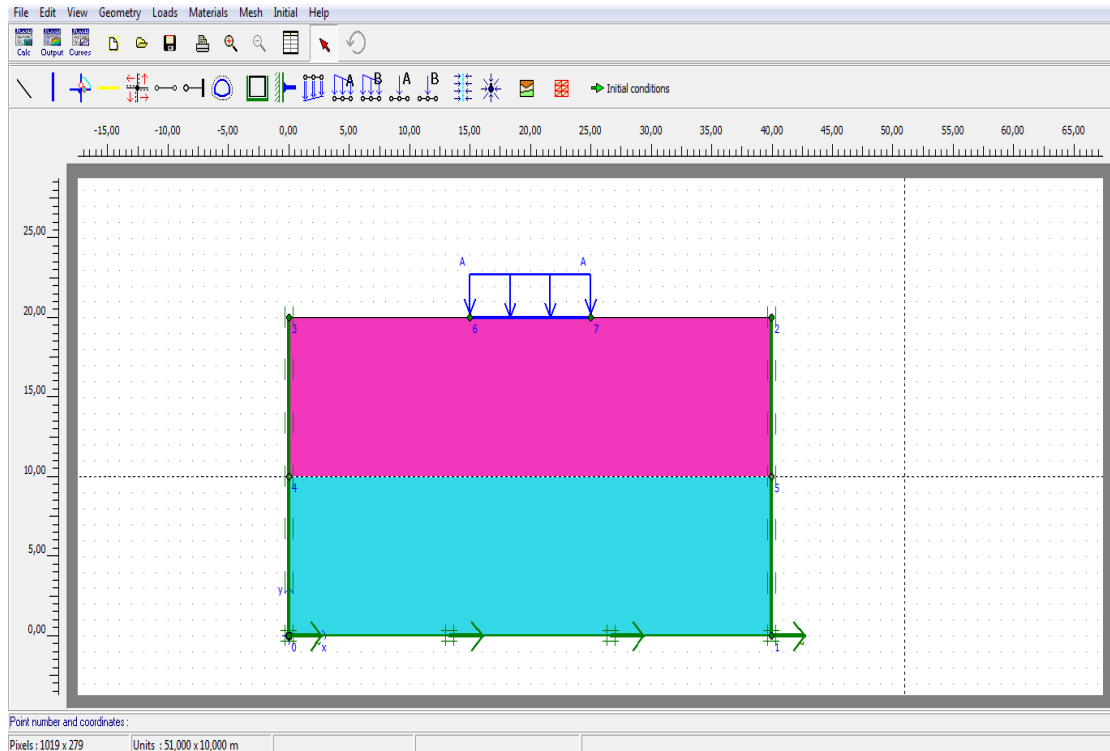


Figure (3-2) : Condition aux limites.

Les options par défaut commencent dès le maillage (figure 3-3).

L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci impotent, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement général par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran.

Le maillage est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

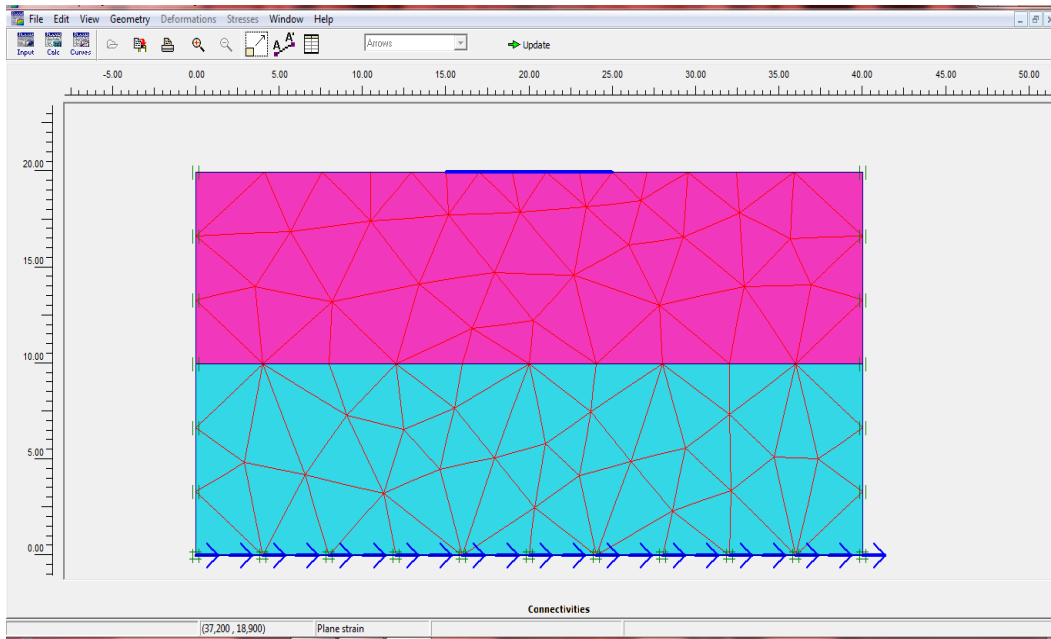


Figure (3-3) : maillage.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement.

Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques).

L'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple) (figure 3-4)

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

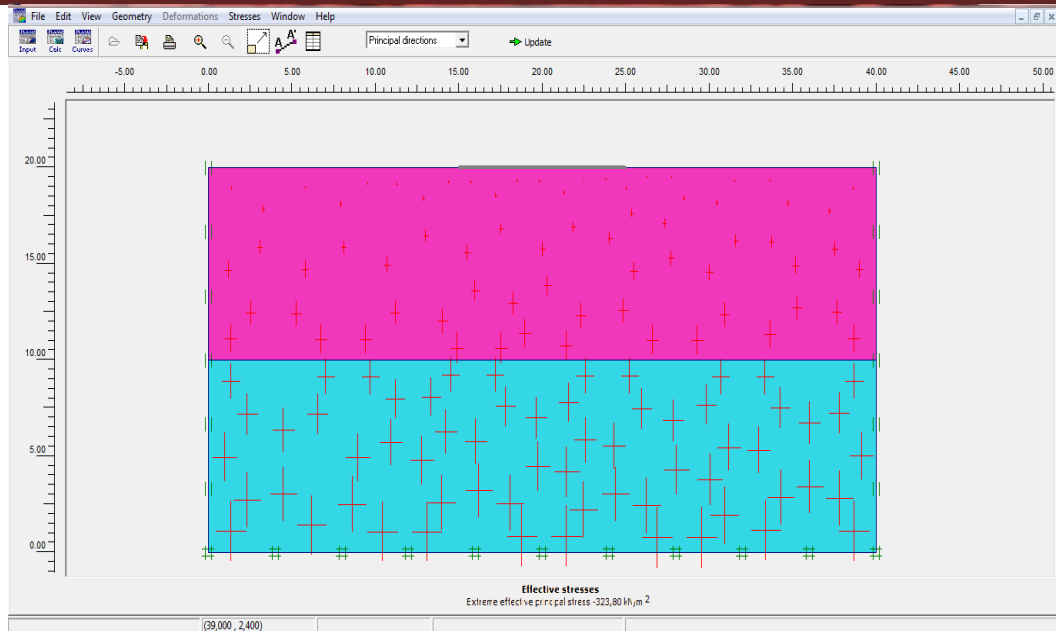


Figure (3-4) : Contraintes initiales (condition k_0).

III-3-Modeles de comportement implémentées dans plaxis :

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie.

L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale.

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc.

III-3-1-Modèle élastique linéaire :

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope.

Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young, E , et le coefficient de Poisson ν .

$$E = 2G(1 + \nu). \quad (3-1)$$

Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol.

Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol.

La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} ; \quad (3.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 + \nu)} ; \quad (3.3)$$

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}. \quad (3.4)$$

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la figure (3-5) :

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

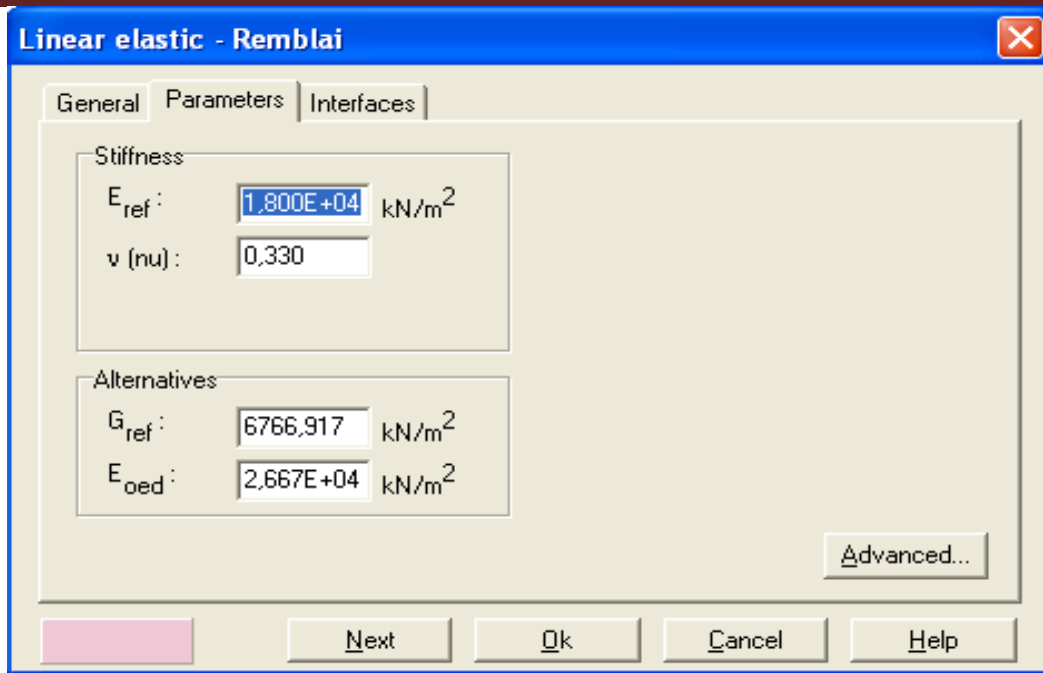


Figure (3-5) : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

III-3-2-Modèle élastoplastique :

La plupart des matériaux ont un comportement élastoplastique, qui n'est pas caractérisé par l'apparition de déformations réversibles élastiques et de déformations irréversibles plastiques. Sur la surface de charge, deux cas de comportement sont possibles :

La surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb; la surface de charge évolue au cours du chargement, on parle de modèle élastoplastique avec écrouissage dont le modèle Hardening Soil de Plaxis fait partie. [15]

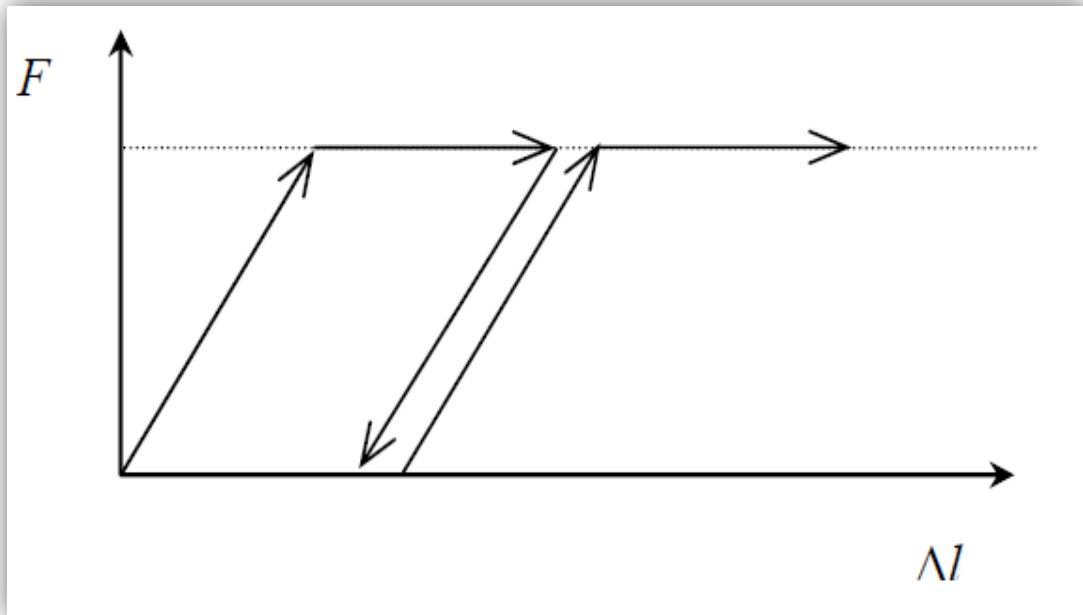


Figure (3-6) : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

III-3-3-Modèle de Mohr-Coulomb :

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité).

Les deux autres sont c et φ , respectivement, la cohésion et l'angle de frottement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, et nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

Enfin, ce modèle est non associé et ψ est l'angle de dilatance. [16]

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

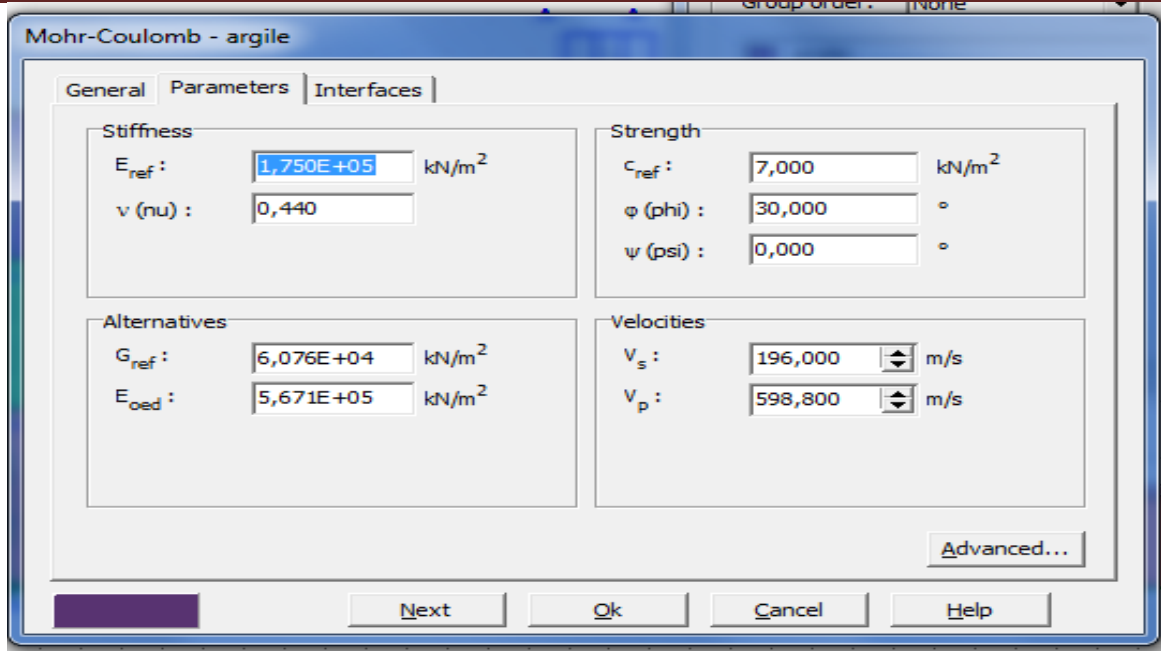


Figure (3-7) : fenêtre des paramètres de Mohr coulomb.

III-3-3-1- Les paramètres classiques de la géotechnique :

a) Module d'Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations).

Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (figure 3-8).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple.

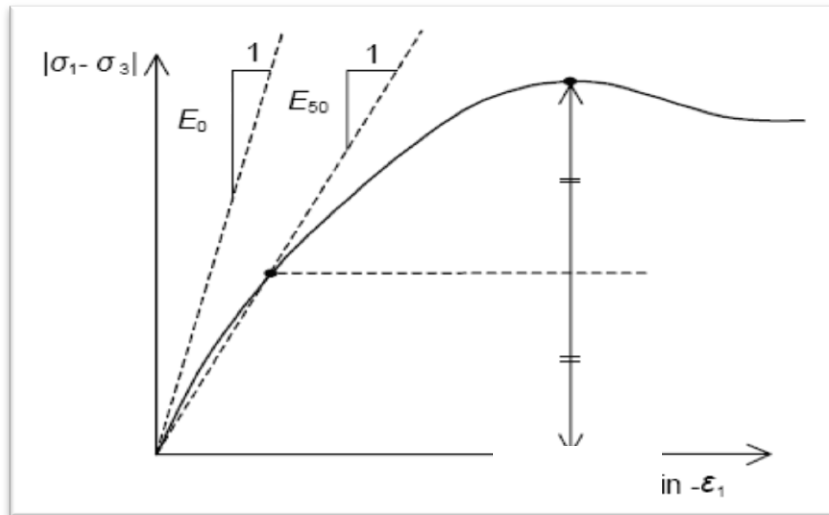


Figure (3-8) : Définition du module à 50 % de la rupture.

Dans la boîte de dialogue des paramètres avancés, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

b) Coefficient de Poisson :

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires).

Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) Angle de frottement :

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des Calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite.

Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement φ_{cv} (à volume constant, au palier).

En peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb (figure 3-9).

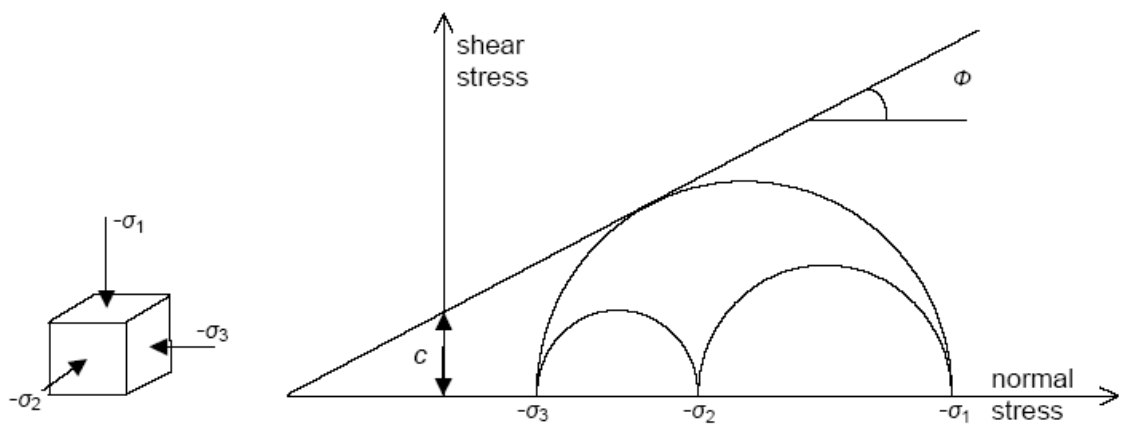


Figure (3-9) : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

d) Cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques.

Pour les analyses en non drainé avec $\varphi_u = 0$, Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur :

Ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante.

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (typiquement en kPa/m).

e) Angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ. \quad (3.5)$$

$$\psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ. \quad (3.6)$$

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

f) Les contraintes de traction :

La pyramide de Mohr-Coulomb permet des contraintes de traction. Celles-ci sont souvent peu réalistes pour les sols et il est possible de couper ces contraintes de traction (tension Cut-off) ou de les diminuer (T'ensile strength).[16]

III-3-4-Le module dynamique du code plaxis :

Le plaxis v8 nous permet d'étudier un problème dynamique. La charge dynamique est généralement appliquée le long du substratum de la structure. Cette action peut être représentée par une force, ou une accélération variable en fonction du temps. Dans le programme Input ;

Il faut spécifier quel est le système de chargement qu'on va choisir pour représenter l'action dynamique par l'option de « set dynamic load system ».

Chapitre III : Présentation du code plaxis.

Dans le programme de calcul on peut traiter la charge dynamique de plusieurs façons (harmonique ou arbitraire ; on peut même modéliser un séisme réel). [17]

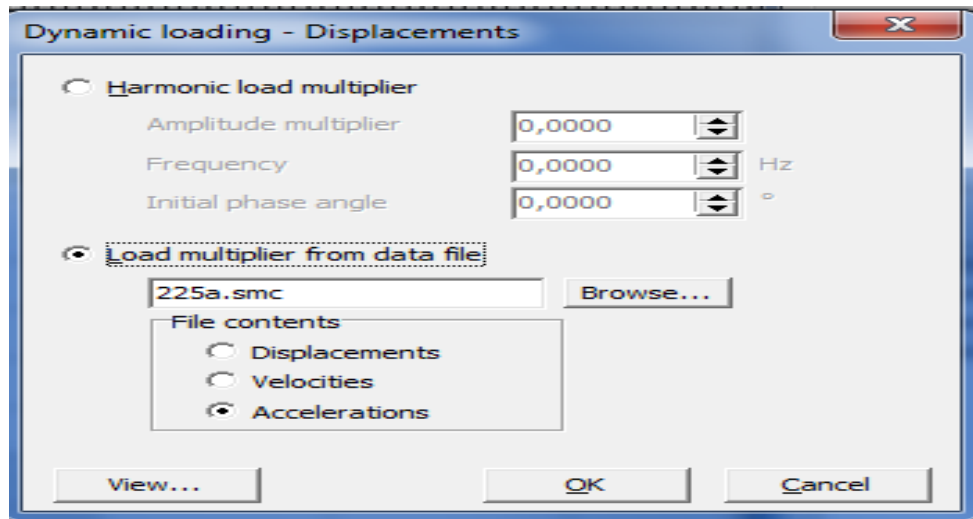


Figure (3-10) : Le module dynamique du code plaxis.

Chapitre 04 :

Établissement d'un modèle de calcul d'éréfence

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

IV-Calculs numériques :

IV-1- La géométrie du modèle :

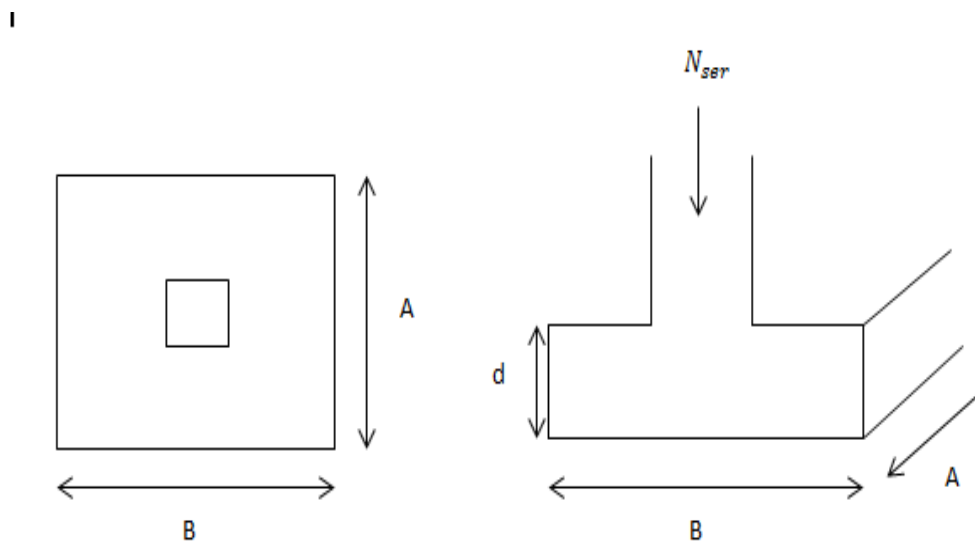


Figure (4-1): Vue de gauche et de dessus de la section d'une semelle.

Fc28 MPa	20	25	30	35
E MPa	29860	32160	34180	35980

Tab (4-1) : Variation du module d'élasticité E du béton en fonction de fc28.

Semelle	Ns(KN)	A(m)	B(m)	d (m)
S1	1745	2,5	2,15	0,5

Tab (4-2) : Caractéristiques de la semelle d'une fondation.

Le projet n'est pas symétrique (figure 4-1), il sera modélisé par un modèle géométrique Plan (2D) de 30 m de largeur sur 16 m de profondeur. Ce modèle est présenté sur la figure (4-2) :

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Conditions aux limites : on choisit les conditions aux limites par défaut, déplacements Bloqués sur trois coté (fixée).

3 couches de sol composent la géologie du site :

- Une couche de remblai en surface de 5 m de profondeur.
- Une couche sable uniforme compacte d'une profondeur 5 m.
- Une couche d'argile d'une profondeur 6 m.

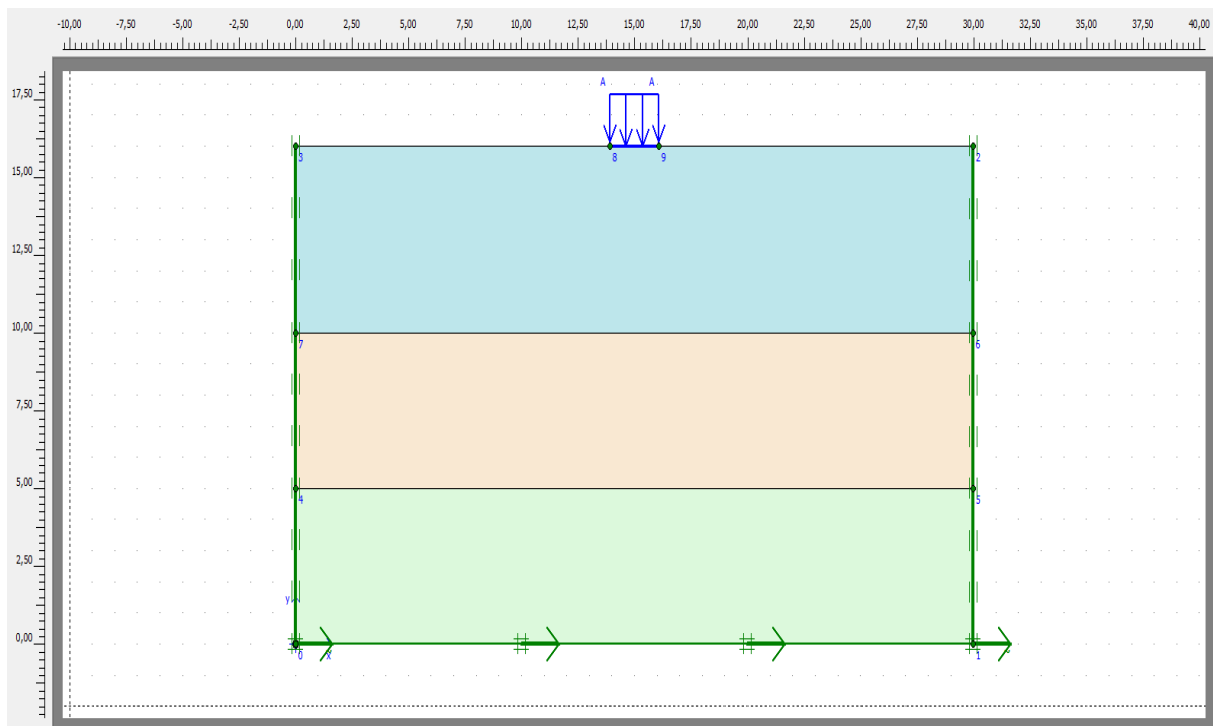


Figure (4-2) : Modèle Géométrique du projet.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

IV-2 -Caractéristiques des matériaux :

IV-2-1-Propriétés des couches de sols et des interfaces graphique de code plaxis :

Les propriétés des couches de sols et des interfaces sont résumées dans le tableau 4.1 :

	Unité	remblai	Sable u c	argile
H	M	5	5	6
γ_{sec}	KN/m ³	18	17	15
γ_{sat}	KN/m ³	19	19	18
E_{re}	MPA	300	135	175
G	MPA			
ν		0,4	0,3	0,44
C_{re}	Kpas	0,2	0,2	7
φ	°	32	34	30
ψ	°	2	4	0
R_{inter}	-	1	1	1

Tab (4-3) : Propriétés des couches de sols et des interfaces.

γ : Poids volumique.

E : module d'Yong.

ν : Coefficient de poisson.

α Et β : constante de proportionnalité.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

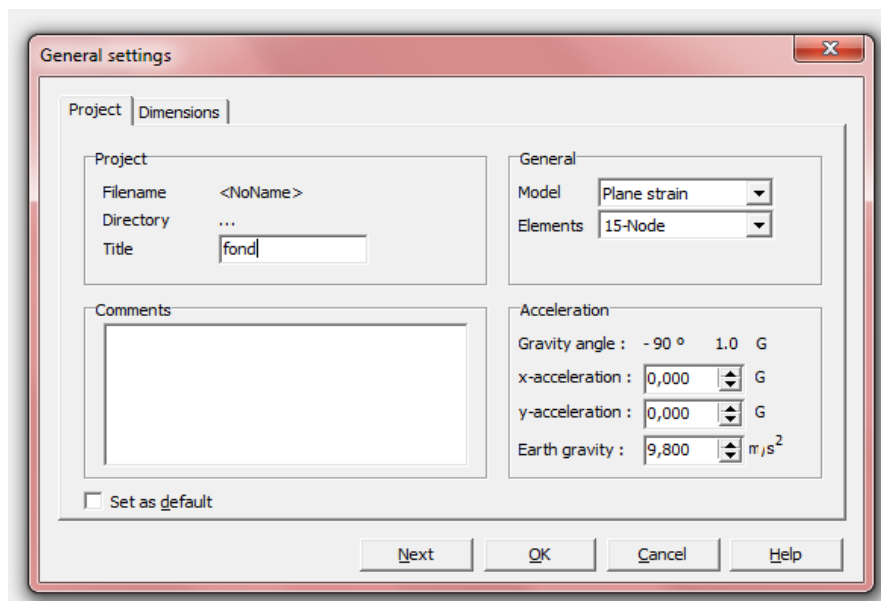


Figure (4-3) : interface utilisateur pour l'entrée des données.

IV-2-2-Propriétés mécaniques de la fondation :

Paramètre	Nom	valeur	Unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normale	EA	$1,608 \cdot 10^7$	KN/m
Rigidité de flexion	EI	$3,350 \cdot 10^5$	KNm ² /m
Épaisseur équivalente	d	0,5	m
Poids	w	12,5	KN/m/m
Coefficient de Poisson	v	0,2	-

Tab (4-4) : Propriétés mécaniques de la fondation.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

La valeur de charge répartie uniformément :

Chargement statique appliqué sur l'élément $N_s=1754$ KN.

IV-3-Generation de maillage :

Plaxis offre une génération entièrement automatique de maillages non structurés d'éléments finis, avec des options pour raffiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage peut contenir des milliers d'éléments.

Le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 111 et le nombre des nœuds est de 959 nœuds.

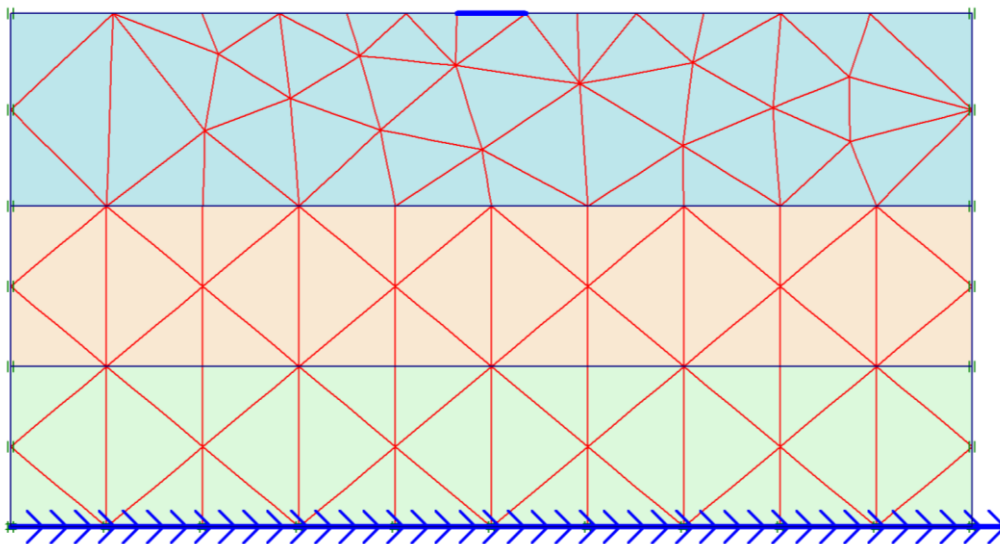


Figure (4-4) : Maillage du projet.

IV-4-Condition initiales :

IV-4-1-Contraintes initiales :

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments structuraux ainsi que l'élément de sol créé par défaut au niveau de la fondation. En prenant les valeurs de K_0 par défaut. La valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données.

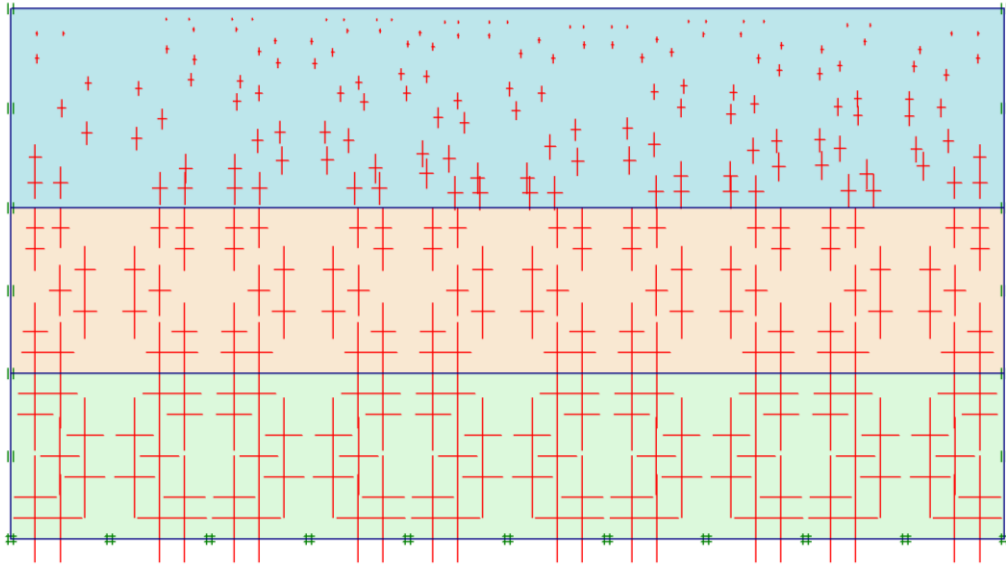


Figure (4-5) : Génération des contraintes initiales.

IV-4-2-Conditions hydrauliques :

Le niveau de la nappe phréatique initiale est à 0 m de la surface, on néglige la nappe phréatique.

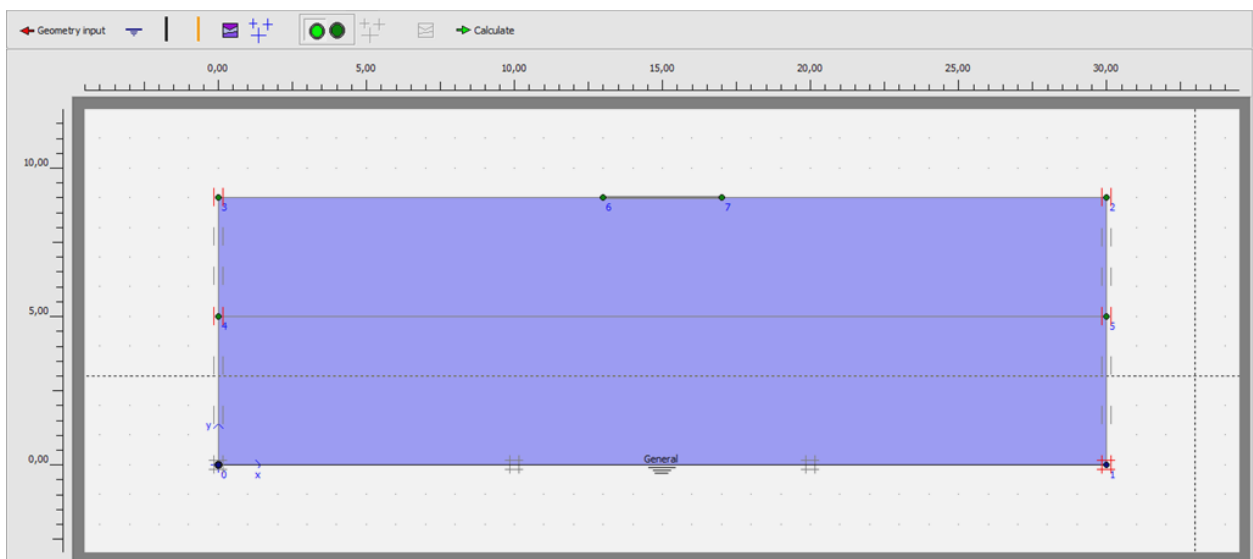


Figure (4-6) Conditions hydrauliques initiales.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

IV-5- PROCEDURE DE CACULS :

Le calcul du modèle de référence se fait défini en 3 phases dans l'ordre :

Phase 0 : Initiation des contraintes (procédure $K0$) ; on détermine les contraintes effectives initiales suivie de deux phases, phase (01) et phase (02).

Phase 1 : Calcul plastique avec la procédure « stage construction », en condition drainée avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load système $A=250\text{ KN}$ ».

Phase 2 : Chargement dynamique « dynamique analysis » et « harmonique load multiple » excitation harmonique. La figure (4-7) montre les phases de calculs.

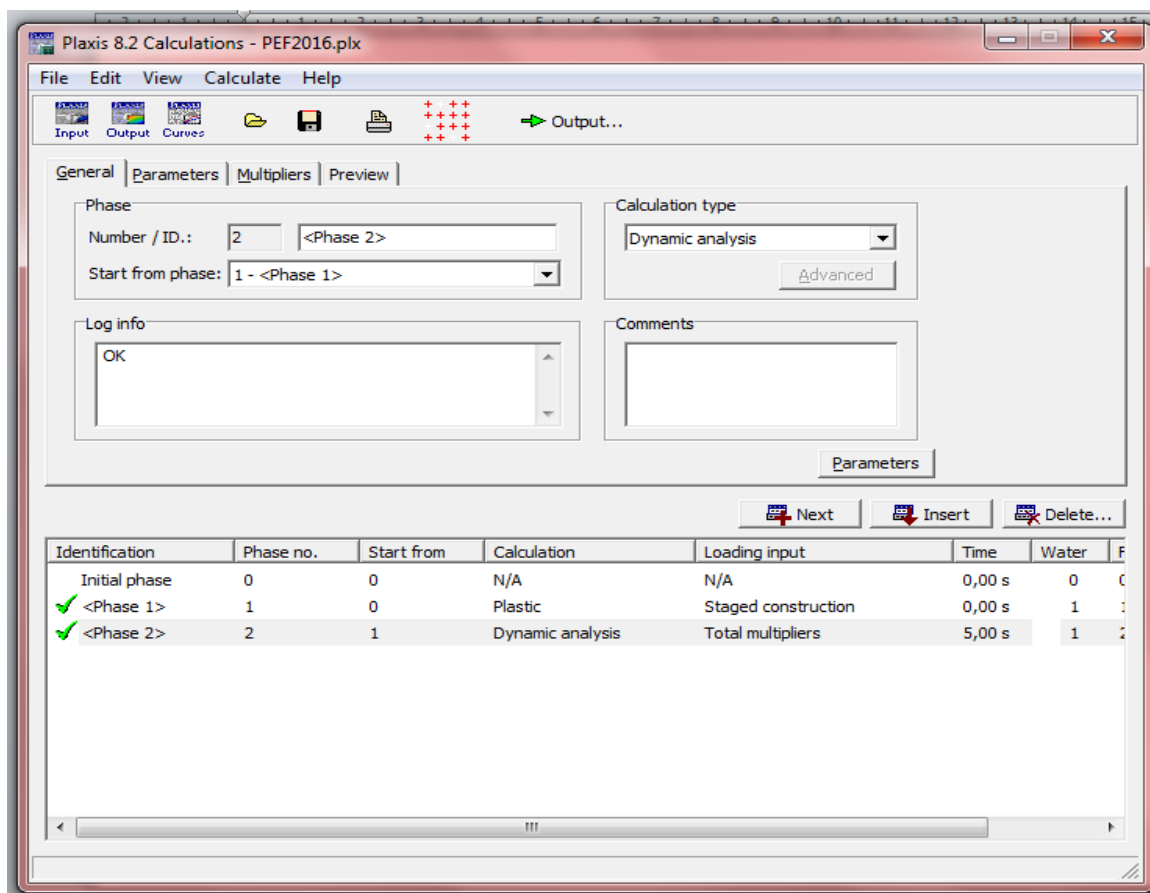


Figure (4-7) : Phase de calcule.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

▪ Trace des points sur le profil :

La figure (4-8) montre le tracé des points sur le profil de sol étudié.

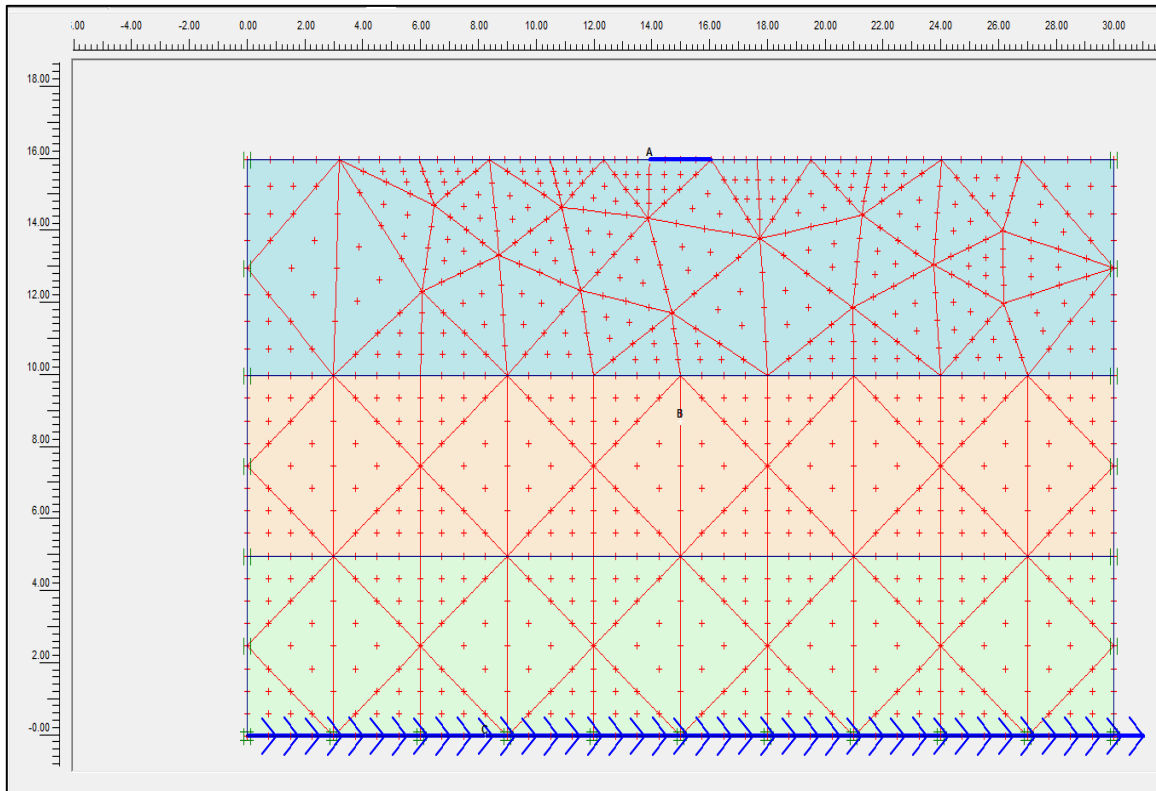


Figure (4-8) : Trace des points sur le profil.

Le tableau ci-dessous montre les coordonnées des différents du profil étudié.

N° de point	Point A	Point B	Point C
X(m)	13,93	15	8,25
Y(m)	16	8,75	0

Tab (4-5) : Données des points.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

La figure (4-9) montre la fenêtre de calcul des différentes phases du modèle étudié.

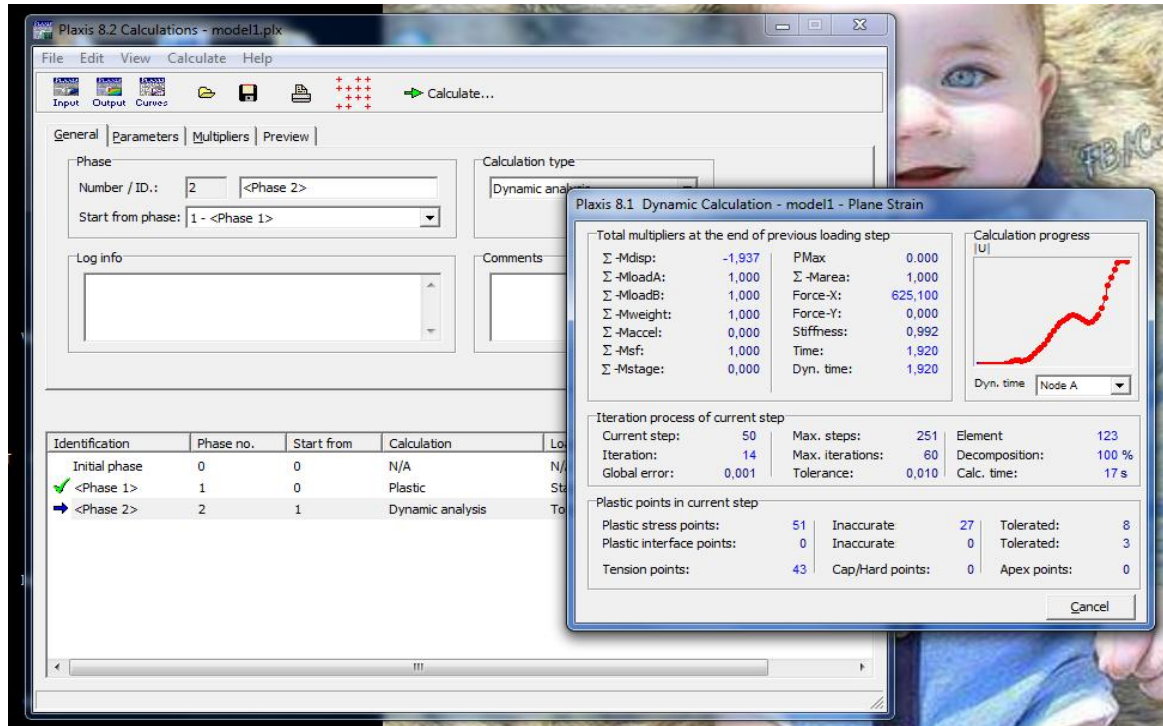


Figure (4-9) : Fenêtre pour calcul les différentes phases.

IV-6-RESULTATS DES CALCULS :

IV-6-1-Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base :

L'onde sismique horizontale imposée à la base du modèle de calcul produit les effets sur le modèle étudié pour cela on procède aux étapes de calculs suivantes :

1. Maillage déformé.
2. Contraintes.
3. Déplacements.
4. Synthèse.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

a) Maillage de déformation :

Le maillage déformé du modèle de calcul et représenté sur la figure (4-10) :

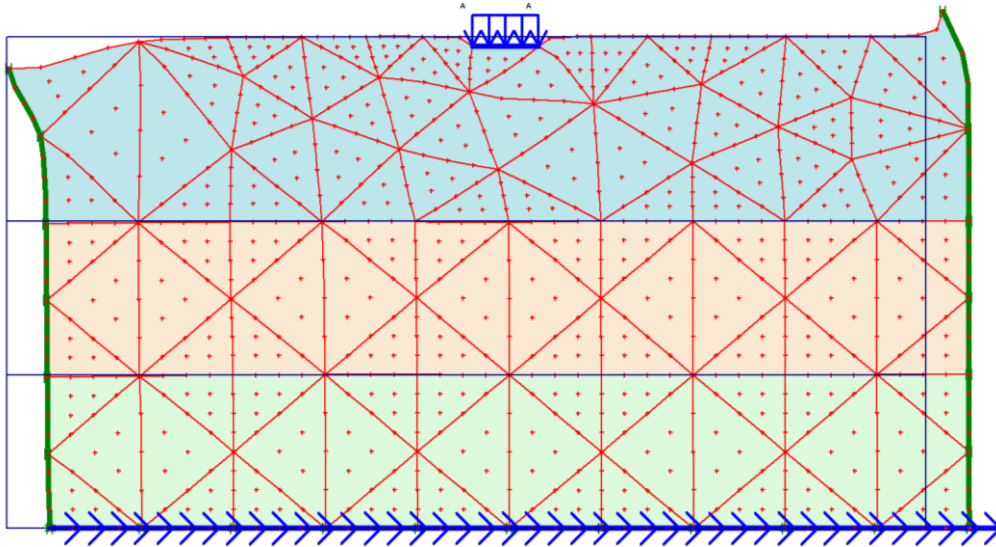


Figure (4-10) déformation de maillage.

b) Contraintes :

La figure (4-11) représente le champ des contraintes totales dans notre modèle de calcul.

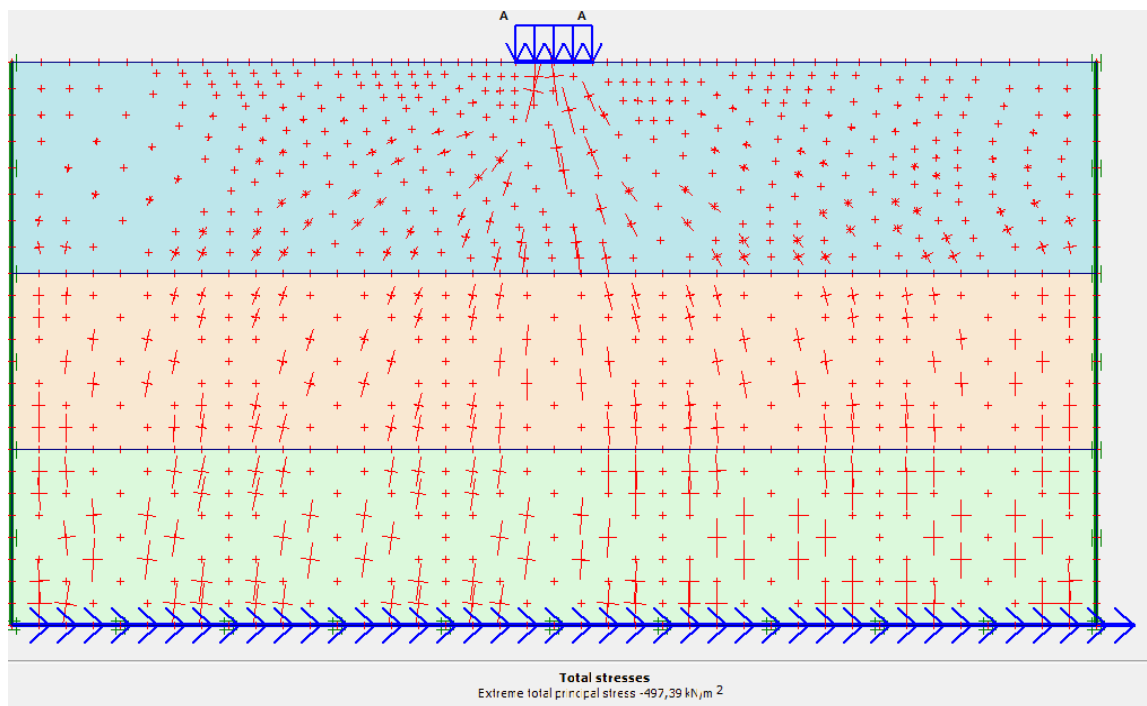


Figure (4-11) : Total stresses.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

c) Déplacements :

La figure (4-12) montre les champs des vecteurs de déplacements sous la fondation on remarque que les vecteurs de champ sont intense a proximité de la fondation et sous moins intense en s'éloignant de la fondation et suivent le chemin du même sens du séisme imposé.

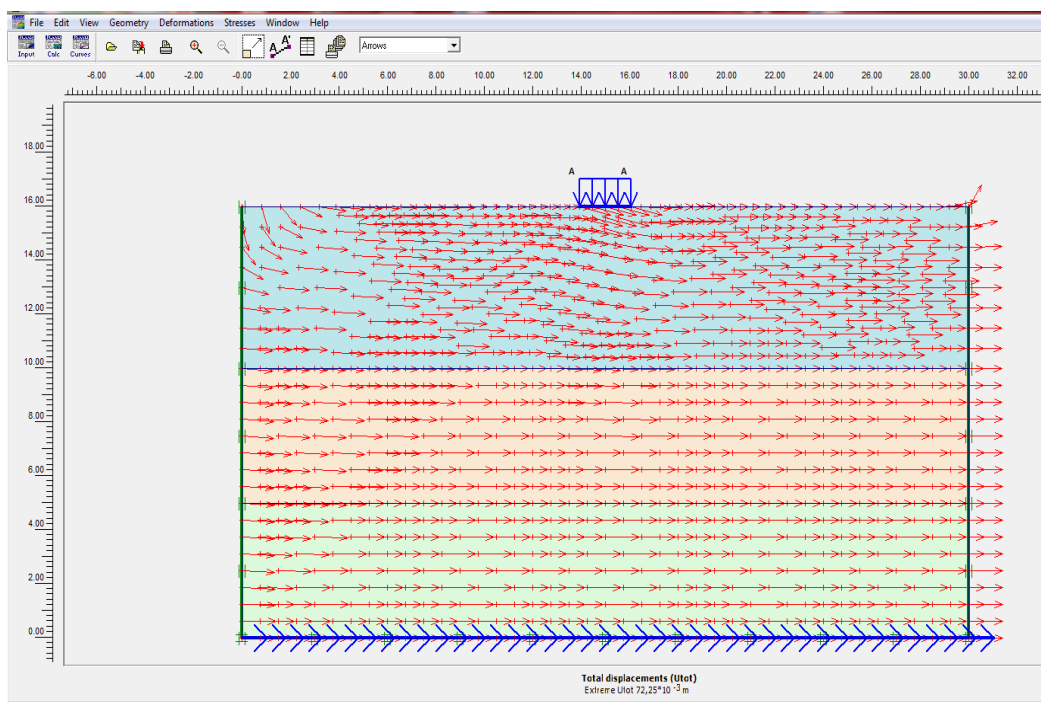


Figure (4-12) : les vecteurs des déplacements.

- **Courbes déplacement-temps :**

Les figures (4-13) et (4-14) montrent les déplacements des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY' .

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Axe XX' :



Figure (4-13) : Déplacement temps suivant l'axe xx'.

Axe YY' :

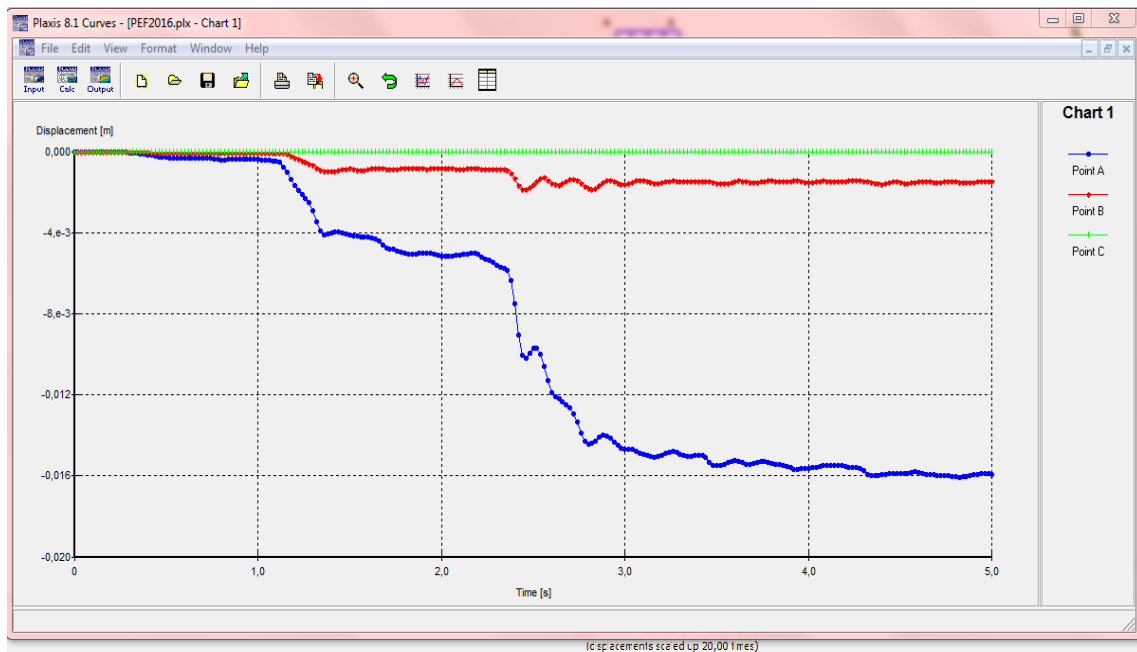


Figure (4-14) : Déplacement-temps l'axe yy'.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

- **Courbe vitesse-temps :**

Les figures (4-15) et (4-16) montrent les vitesses des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY' .

Axe XX' :

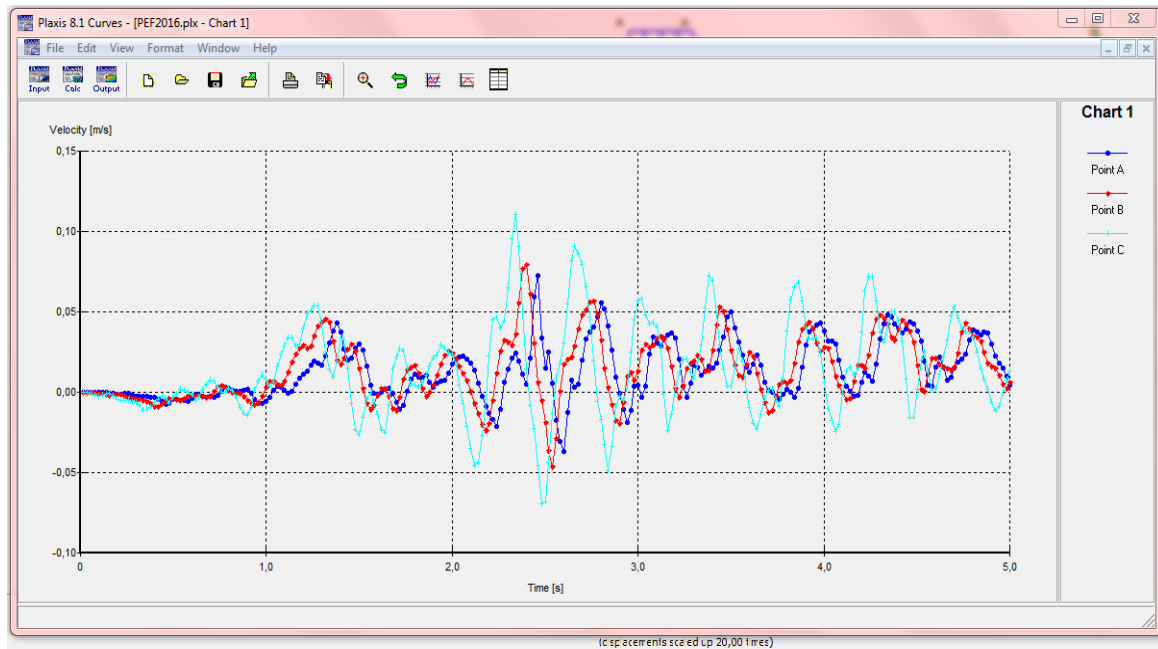


Figure (4-15) : Vitesse-temps suivant l'axe xx' .

Axe YY' :

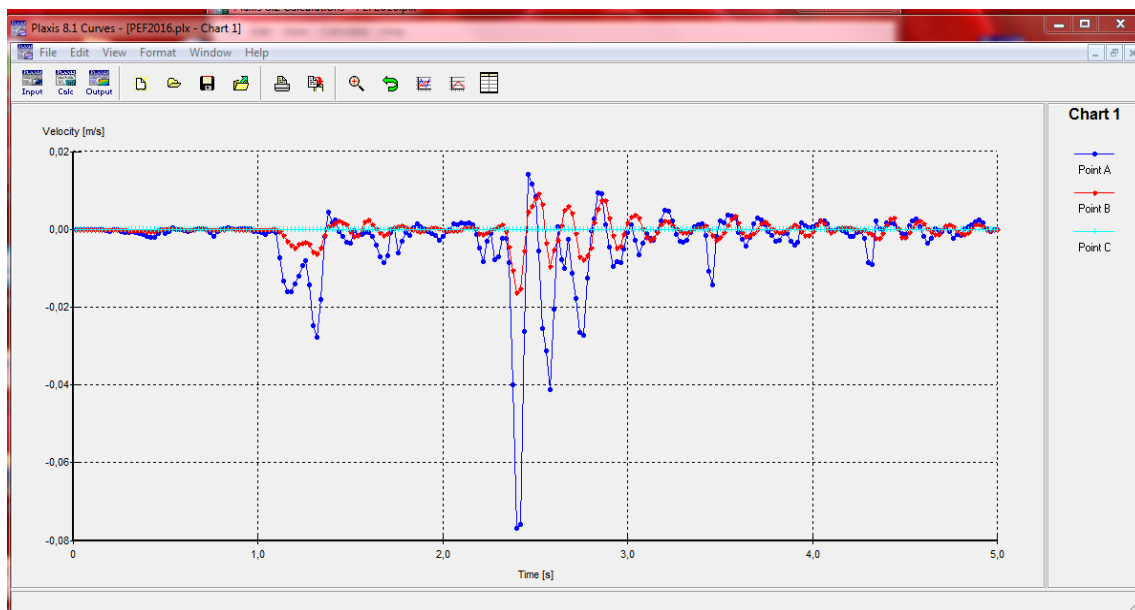


Figure (4-16) : Vitesse-temps suivant l'axe yy' .

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

- **Courbe accélération-temps :**

Les figures (4-17) et (4-18) montrent les accélérations des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY' .

Axe XX' :

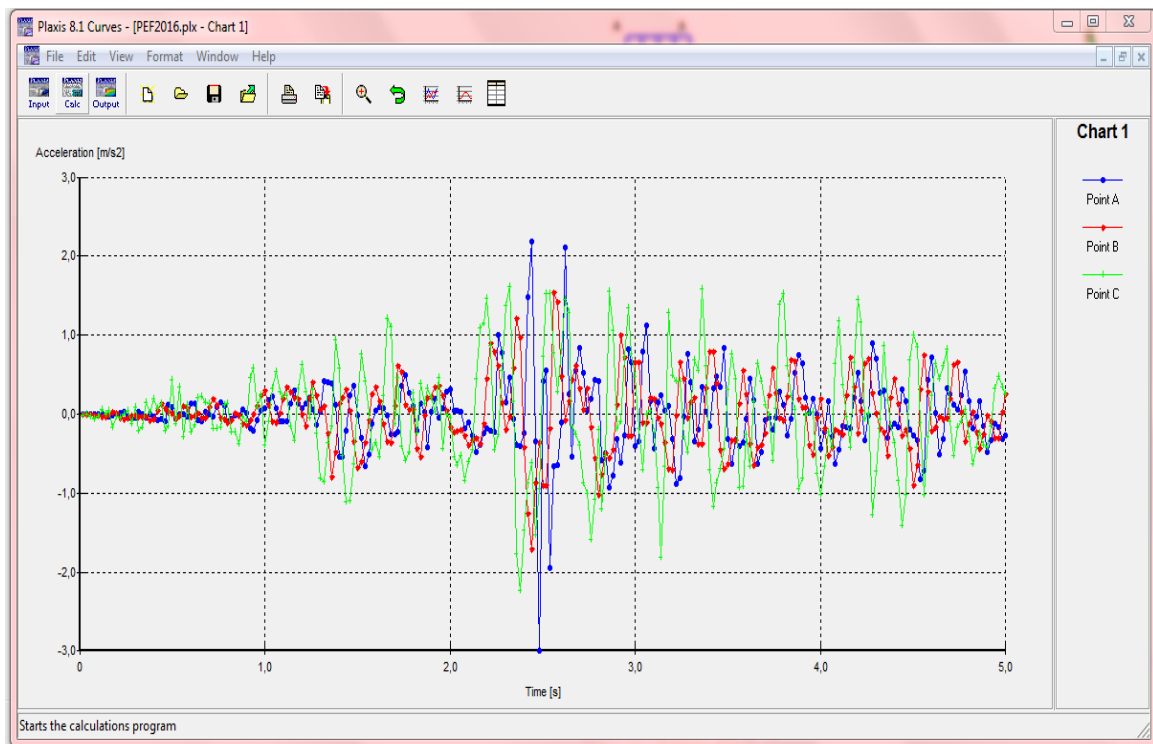


Figure (4-17) : Accélération-temps suivant l'axe xx' .

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Axe YY' :

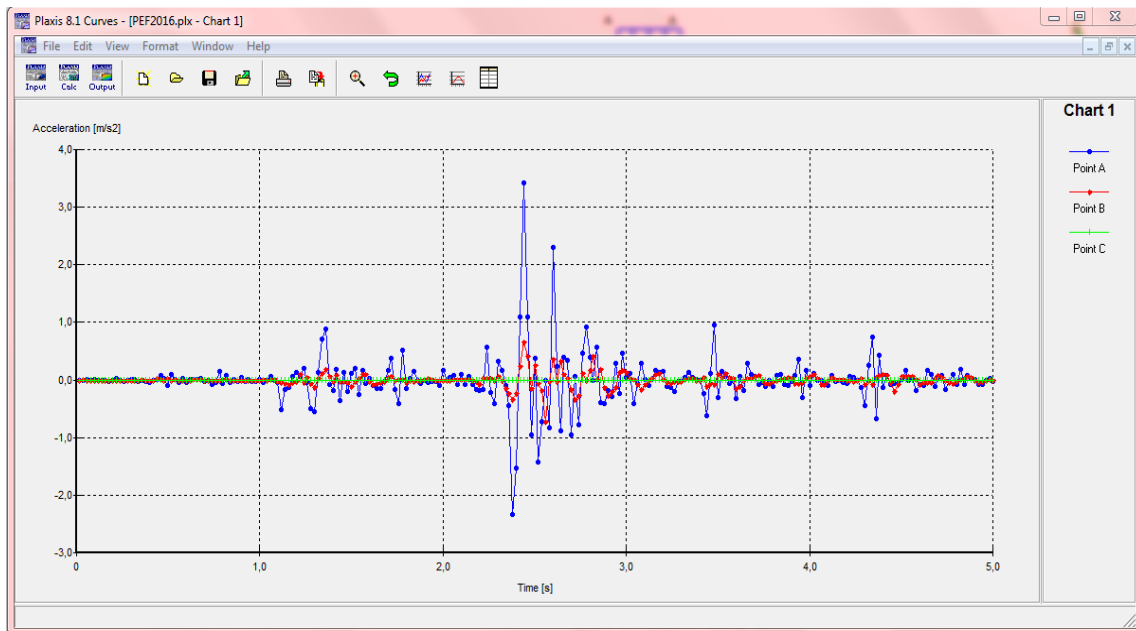


Figure (4-18) : Accélération-temps suivant l'axe yy'.

- **Courbe force-temps :**

La figure (4-19) montrent la variation de la force (F_y) en fonction du temps ; cette force à une allure d'une fonction vibratoire aperiodique.

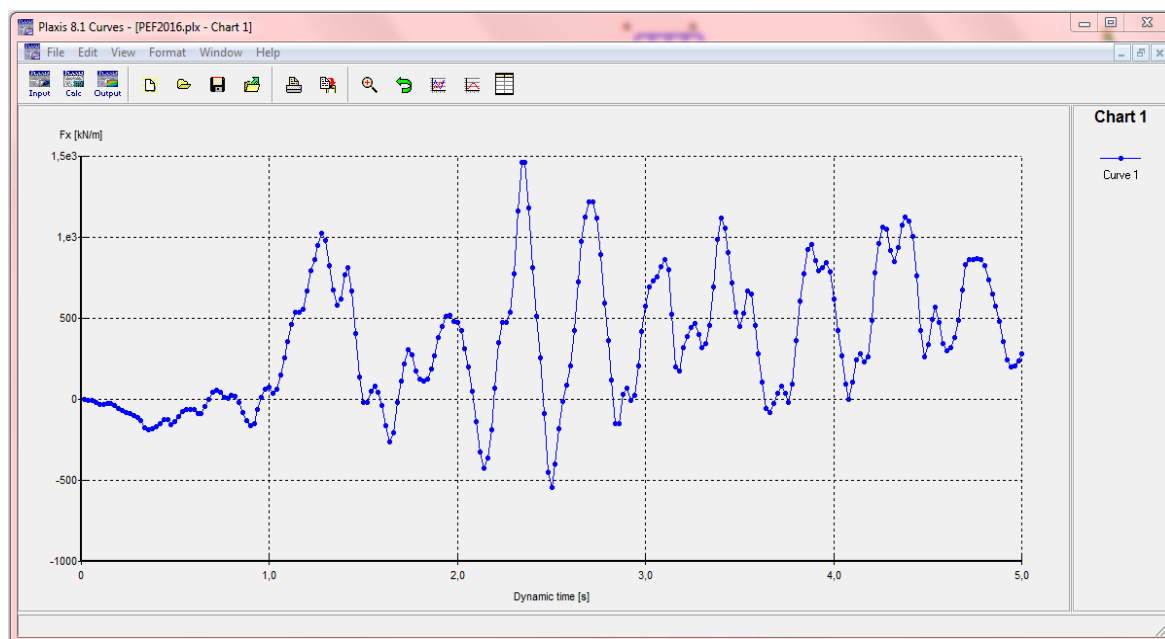


Figure (4-19) : La force (F_x) en fonction du temps.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

▪ Synthèse :

Le tableau (4-6) donne les valeurs maximales de déplacement, accélération, vitesse, pour les différents points du profil étudié.

	N° point	Point A	Point B	Point C
Déplacement (m/s)	XX	0,070	0,071	0,070
	YY	0,016	$1,856 \times 10^{-3}$	0
Vitesse (m/s)	XX	0,072	0,079	0,110
	YY	0,077	0,016	0
Accélération (m/s ²)	XX	2,992	1,704	2,225
	YY	3,415	0,716	0
Force (KN)	XX	544,790		

Tab (4-6) : Valeurs maximal (déplacements, vitesses, accélérations) des points concédérés.

On remarque que le déplacement selon l'axe XX est invariable (constant), par contre selon l'axe YY diminue progressivement ; le cas particulier du point C est nul pour choisis au niveau de la base de la dernier couche.

Pour la vitesse elle augmente dans le sens XX' et diminue dans le sens YY'.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

IV-6-2-Cas d'un déplacement vertical imposé à la base :

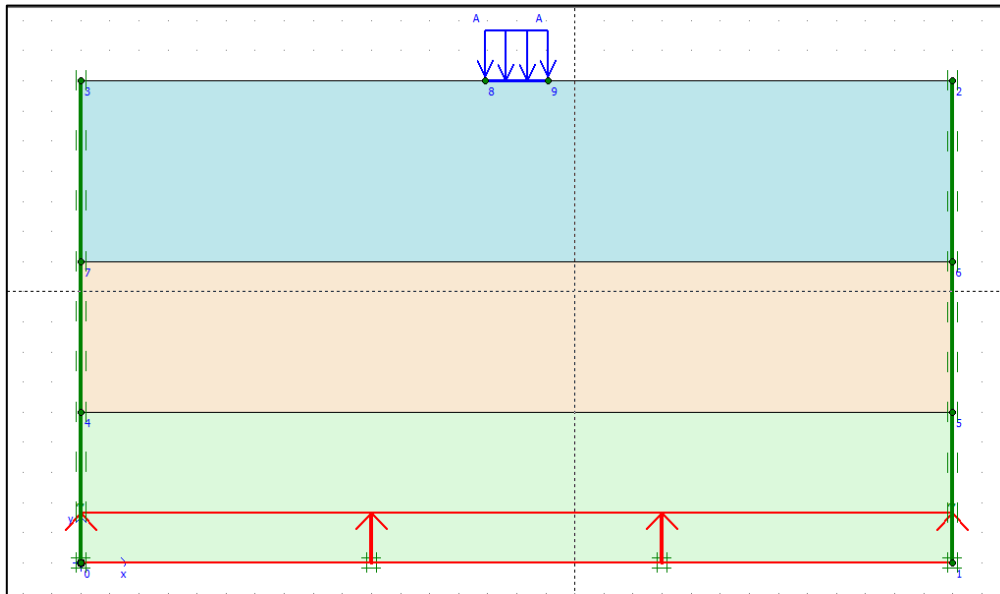


Figure (4-20) : Cas vertical imposé à la base.

a) Maillage de déformation :

Le maillage déformé du modèle de calcul et représenté sur la figure (4-21) :

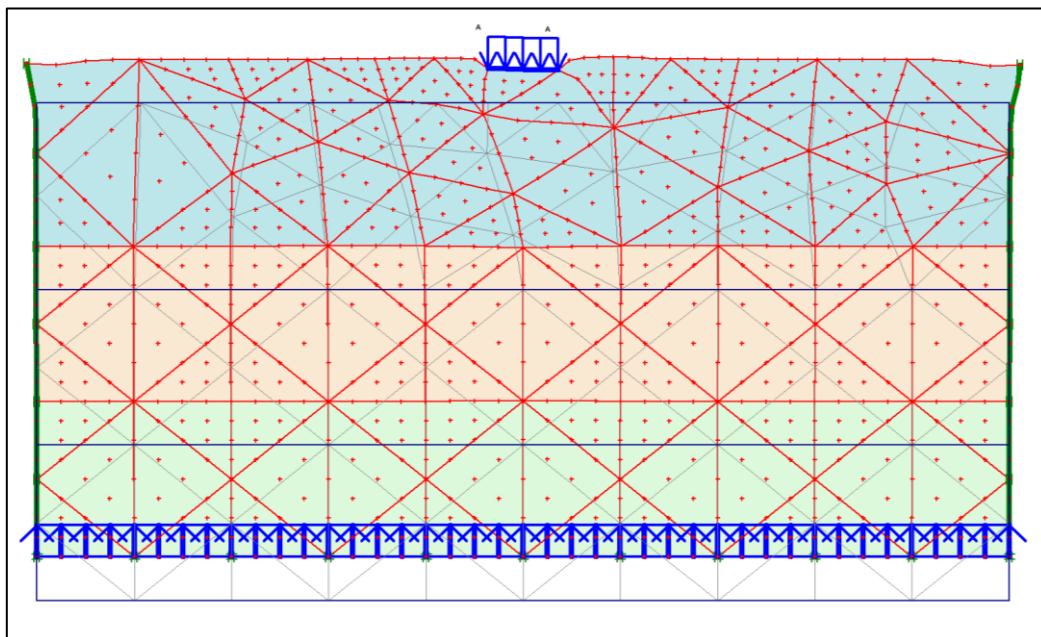


Figure (4-21) déformation de maillage.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

b) Contraintes :

La figure (4-22) représente le champ des contraintes totales dans notre modèle de calcul.

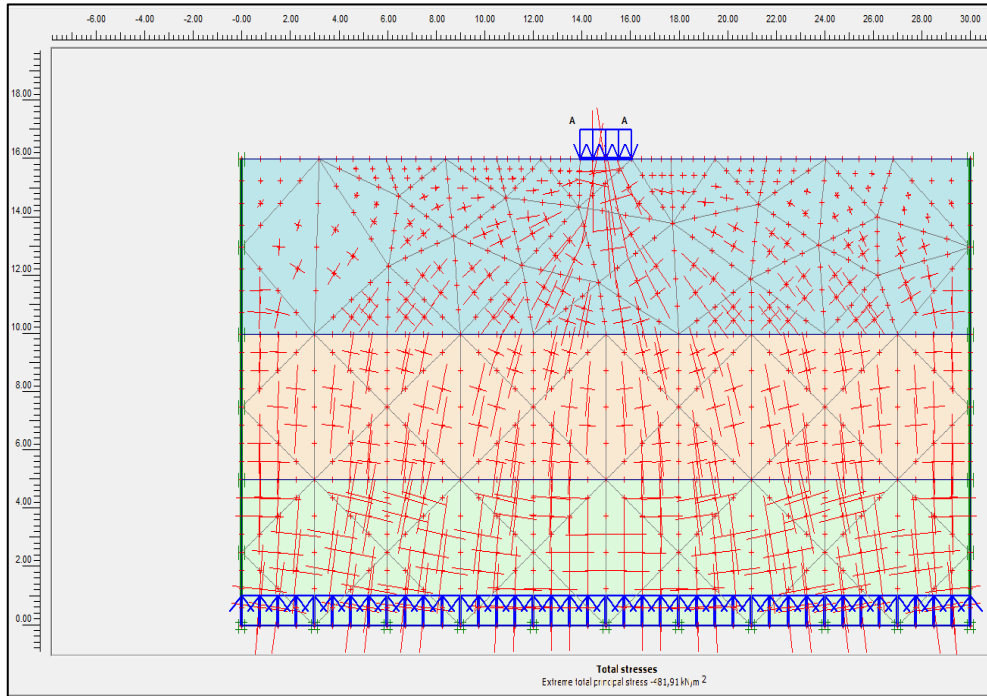


Figure (4-22) : Total stresses.

c) Déplacements :

La figure (4-23) montre les champs des vecteurs de déplacements sous la fondation on remarque que les vecteurs de champ sont intense a proximité de la fondation et sous moins intense en s'éloignant de la fondation et suivent le chemin du même sens du séisme imposé.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

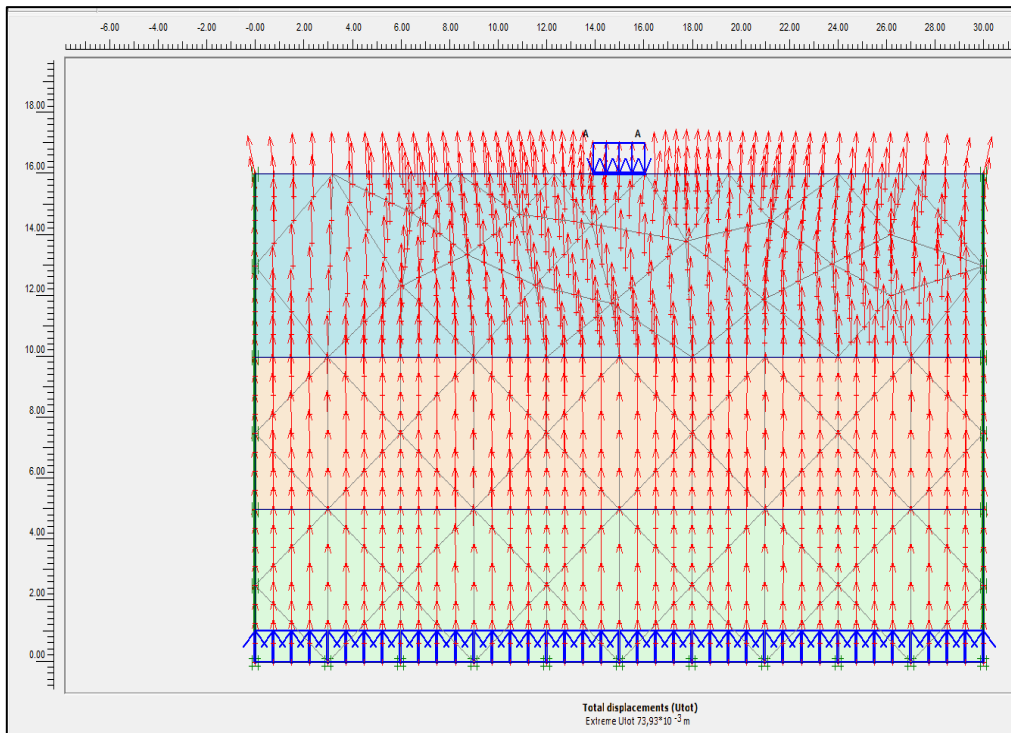


Figure (4-23) : Total déplacements.

- **Courbes déplacement-temps :**

Les figures (4-24) et (4-25) montrent les déplacements des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY' .

Axe XX' :



Figure (4-24) : Déplacement-temps suivant l'axe xx' .

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Axe YY' :



Figure (4-25) : Déplacement-temps l'axe yy'.

- Courbe vitesse-temps :

Les figures (4-26) et (4-27) montrent les vitesses des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY'.

Axe XX' :

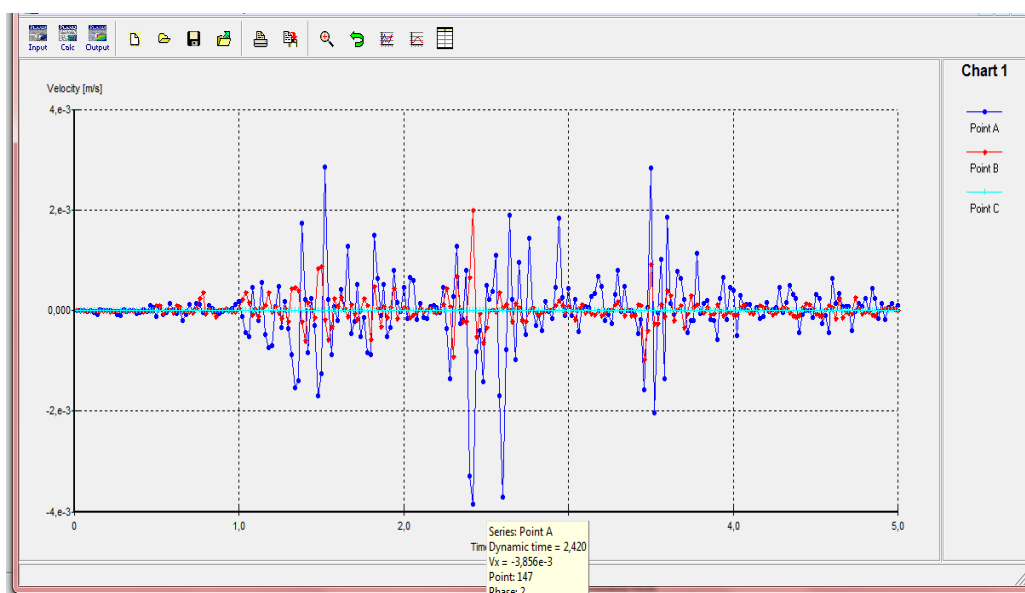


Figure (4-26) : Vitesse-temps suivant l'axe xx'.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Axe YY' :

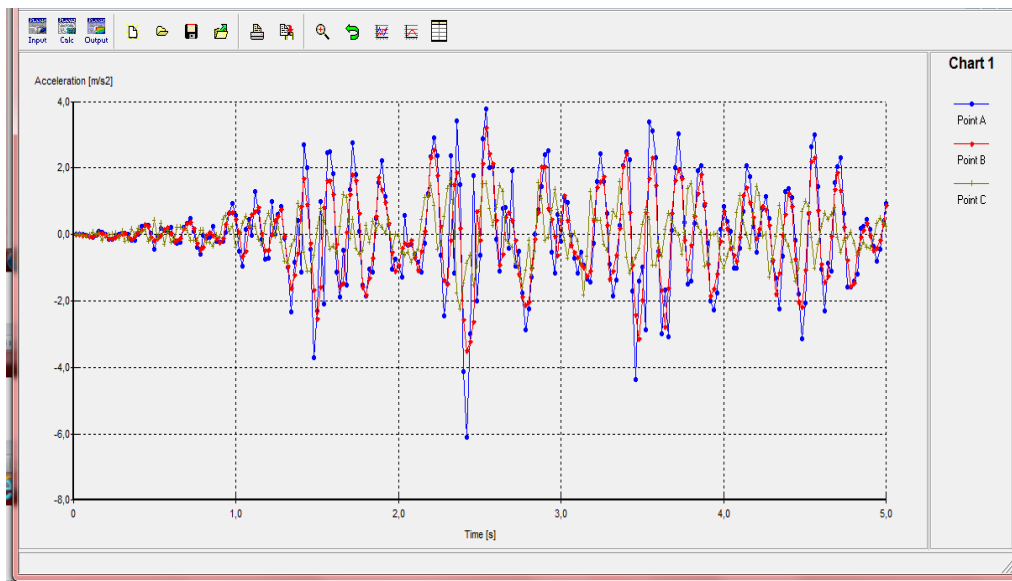


Figure (4-27) : Vitesse-temps suivant l'axe yy'.

- Courbe accélération-temps :

Les figures (4-28) et (4-29) montrent les accélérations des différents points étudiés fonction du temps selon les axes XX' et YY'.

Axe XX' :

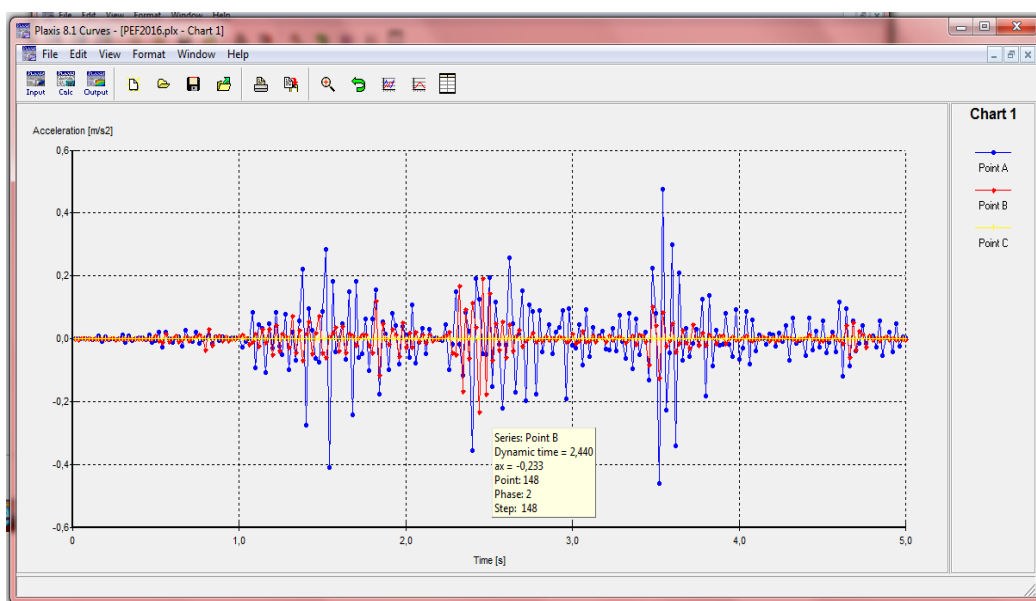


Figure (4-28) : Accélération-temps suivant l'axe xx'.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

Axe YY' :

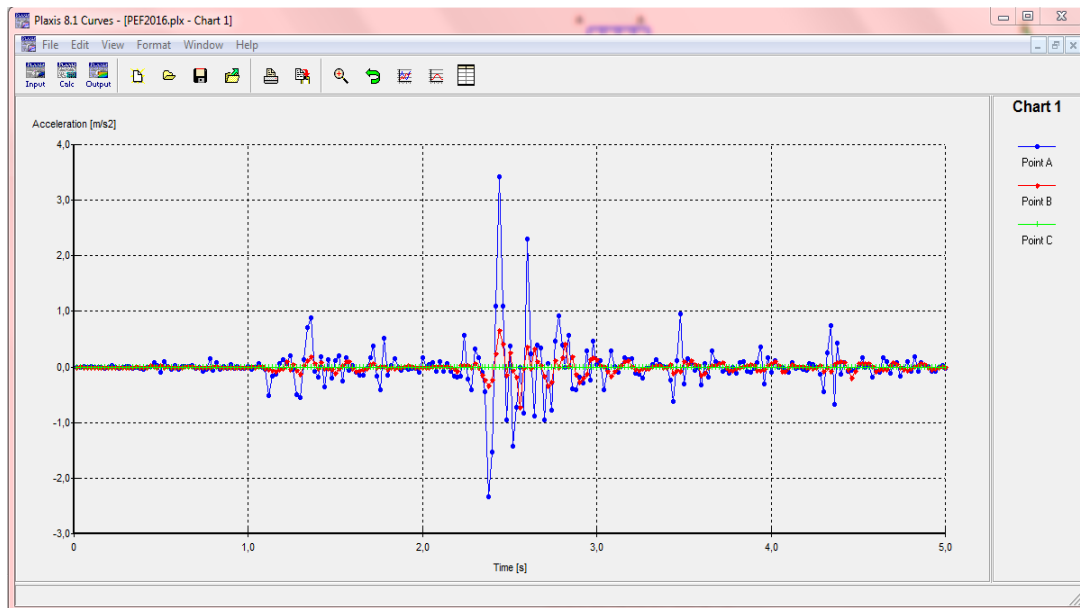


Figure (4-29) : Accélération-temps suivant l'axe yy'.

- Courbe force-temps :

La figure (4-30) montrent la variation de la force (F_x) en fonction du temps ; cette force à une allure d'une fonction vibratoire aperiodique.

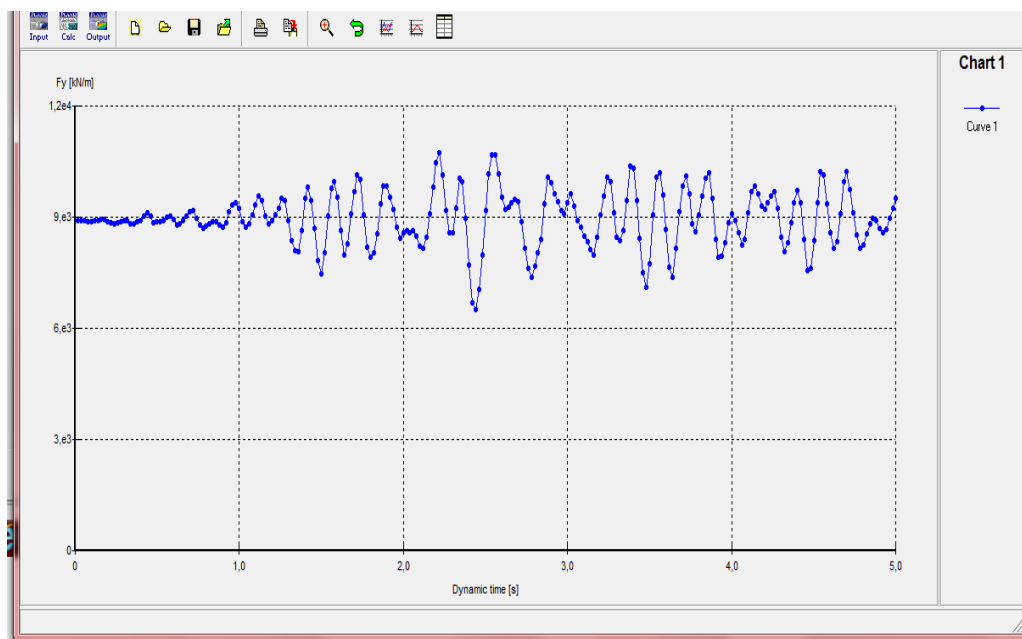


Figure (4-30) : La force (F_x) en fonction du temps.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

▪ Synthèse :

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques cinématiques des points considérés.

	N° point	Point A	Point B	Point C
Déplacement (m/s)	XX	$3,057 \times 10^{-4}$	$1,108 \times 10^{-4}$	0
	YY	0,056	0,057	0,057
Vitesse (m/s)	XX	$3,856 \times 10^{-3}$	$2,003 \times 10^{-3}$	0
	YY	0,138	0,117	0,110
Accélération (m/s ²)	XX	0,474	0,233	0
	YY	6,091	3,504	2,225
Force (KN)	YY	$1,067 \times 10^4$		

Tab (4-7) : Valeurs maximal aux points considérés.

Pour le déplacement :

On remarque que le déplacement selon l'axe YY est invariable (constant), par contre selon l'axe XX diminue progressivement ; le cas particulier du point C est nul pour choisis au niveau de la base de la dernier couche.

Remarque :

Les résultats montrent que :

L'influence des ondes qui trouve dans le sens horizontal sur le profil du sol-structure est supérieure à celle des ondes dans les sens verticale.

On peut conclure que le chargement sismique influé sur le « sol-structure » par plusieurs facteurs, notamment en facteur de distance. On peut dire que : l'étude effectuée sur le facteur de profondeur.

La valeur du déplacement est augmentée au voisinage de la structure « la plus proche de la zone de contact ». Et diminue en s'éloignant du plan de contact vers le plan de source.

Chapitre IV : Établissement d'un modèle de calcul de référence

conclusion générale

Cette mémoire expose le problème des interactions sol-structure ainsi que la modélisation de ces interactions compte tenu de la nature des mouvements et des propriétés dynamiques de l'ouvrage et du sol. Et l'étude de l'impédance de la fondation.

On se doit être extrêmement prudent lorsqu'on effectue une analyse d'interaction sol-structure. Les résultats, même pour une analyse très complexe, sont très sensibles aux paramètres de mouvement sismique utilisés pour modéliser le sol. On ne peut pas estimer ces paramètres avec une grande précision, et c'est pourquoi on doit faire preuve de jugement dans l'analyse d'interaction sol-structure.

L'application numérique qu'on a utilisé a montré que la prise en compte de l'interaction sol structure sous son aspect général nécessite la mobilisation de moyens et de temps de calcul considérables dont la mise en œuvre ne se justifie que pour des structure exceptionnelles.

Références bibliographiques

- [1] Mémoire L'Ahmadi Azzeddine ; Etude paramétrique de l'interaction Entre ouvrage (tunnel-bâtiment-excavation) ; 2006.
- [2] RUE KADOUR RAHIM BP 252 Hussein Day Alger ; Ministère de l'habitat « Le risque sismique », centre national de recherche appliquée en génie parasismique.
- [3] JEAN-ARTHUR OLIVE, Notes de cours de sismologie-Ecole normale supérieure, Département Terre-Atmosphère-Océan.
- [4] ALEM. T, Influence des dimensions du bâtiment sur la valeur de la période ; mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Novembre 2009.
- [5] MILAN Zacek, Conception parasismique des bâtiments, Tome 4, Septembre 2010.
- [6] Fondation : www.al-mohandiss.com
- [7] Stéphane Grange. Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure: application au génie parasismique, Matériaux. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008.
- [8] Mindlin, R.D., (1949) -"II Compliance of Electric Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, Transaction, ASME, vol. 71, pp. A-259-268.
- [9] Interaction sol-structure et interaction site-ville: Aspects fondamentaux et modélisation. Thèse de doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2006.
- [10] A. Pecker, Advanced earthquake engineering analysis, Springer Wien New York, 2007.
- [11] J.L. Wegner, X. Zhang: "Dynamic wave soil structure interaction analysis in the Time Domain"
- [12] Alain Pecker : "Dynamique des ouvrages", Presses de l'ENPC, Paris, 1986.
- [13] Soil-structure-Interaction Analysis in time domain, prentice Halle Interaction séries, Englemood. Cliff, New Jersey.
- [14] Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séisme ; Thèse de doctorat LMT Cachan-ENS, Cachan.
- [15] BRINK GREVE.R.B.J, et Vermeer PA .Plaxis v8 manuel de référence, DELFT Université de Technologie et plaxis BV. Pays-Bas,(2003).
- [16] Plaxis 2002, finit Element code for Soil and rock analysis, Professional version Balkaema/Rotterdam/Brook Field.
- [17] Université Badji Mokhetar Annaba. Etude par éléments finis du comportement du sol environnant un pieu sous sollicitation horizontale par : Ali Rachedi Mohamed- 2011.

