



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE:structure

THEME

**INTERACTION SOL-STRUCTURE
D'UNE CULEE DE PONT**

Dirigé par :

Mr. MENASRI Abderrazak

Présenté par:

ZEMOURI DJIHAD

Promotion : 2015/2016

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTS DES NOTIONS

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I

I-1-Sismogénèse :	3
I-2- les risques sismiques.	5
I-3- Failles :	6
I-4- Nature et mode de propagation des ondes sismiques :	9
I-5- Foyer et épicentre :	11
I-6- Paramètres caractéristiques du mouvement sismique :	11
I-7- Mouvement du sol :	13
I-8- L'accélérogramme du séisme :	13
I-9- Accélération maximale :	14
I-10- Durée du séisme :	15
I-11- Le spectre de réponse :	16
I-12- Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique :	17
I-13- Mouvements sismiques du champ libre et interaction sol-structure.	17

Chapitre II

II-1-conception d'une culée.	19
II-2geometrie des culée des ponts.....	20
II-2-1-les types des culées.	20
II-3-géométrie des sommiers d'appuis.	22
II-3-1 les élément de la culée.....	22

Chapitre III

III-1- NOTION D'INTERACTION SOL-STRUCTURE (ISS) :	26
III-2- COMPORTEMENT DES SOLS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES :	27
III-2-1- Comportement élastique du sol :	27
III-2-2- Comportement élasto-plastique du sol :	27
III-2-3- Description expérimentale :	27
III-2-4- Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique.	28
III-2-5- Caractéristiques dynamique des sols.....	29
III-2-5-1- Détermination de τ_{max} :	29
III-2-5-2- Module de cisaillement maximum :	29
III-2-5-3- Amortissement hystérétique dans le sol1	30
III-2-6- Lois de comportement.	31
III-2-6-1- Loi élastique linéaire :	31
III-2-6-2- Méthode équivalente linéaire	31
III-2-6-3- Les lois non linéaires.	32
III-2-7- COMPORTEMENT SOL-STRUCTURE :	32
III-3- MODALISATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :	33
III-3-1- Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structures :	33
III-3-1-1- Interaction cinématique et interaction inertielle :	33
III-3-1-2- L'amortissement radiatif :	33
III-3-1-3- La liquéfaction :	34
III-3-2- Fonctions d'impédance :	34
III-3-3- Formulation d'un problème d'interaction sol-stru.....	35

III-3-4- Les différentes méthodes pour prendre en compte	36
III-3-4-1- Les méthodes directes (Méthodes globales) :	36
III-3-4-2- La méthode des sous-structures :	37
Chapitre IV	
IV-1- LE CODE PLAXIS :	42
IV-1-2- L'INTERFACE GRAPHIQUE DE CODE PLAXIS :	42
IV-1-3- MODELES DE COMPORTEMENT IMPLEMENTEES DANS Plaxis.	46
IV-1-3-1- Modèle élastique lin.....	46
IV-1-3-2- Modèles élastoplastiqu.....	48
IV-1-4- LE MODULE DYNAMIQUE DU CODE PLAXIS.....	50
IV-2- MODELE DE CALCUL RETENU :	52
IV-2-1 CARACTERISTIQUE DES MATRIAUX :	53
IV-2-2- GENERATION DE MAILLAGE :	54
IV-2-3- CONDITION INTIALES :	55
IV-2-4- SOLLICITATION SISMIQUES :	62
IV-2-5- PROCEDURE DE CACULS :	65
IV-3- RESULTATS DES CACULS ET INTERPRETATION :	68
IV-3-1- Coordonnées des points : voir le tableau (4-3).	68
IV-3-2- RESULTATS DES CACULS :	68
IV-3-2-1- Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base (1 ^{ere} cas) :	68
IV-3-2-2- Cas d'un déplacement vertical imposé à la base (2 ^{eme} cas) :	74
IV-3-2-3- Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (3 ^{eme} cas) :	80
IV-3-3-INTERPRETATION DES RUSULTATES :	86
IV-3-3-1-Comparaison des calculs :	86
IV-3-4- Effet des ondes horizontal :	87
IV-3-5- Effet des ondes vertical :	90
IV-3-6- synthèses :	93
CONCLUSION GENERAL	94
BILIOGRAPHIE	95

REMERCIEMENTS

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

En premier lieu, nous remercions à m'encadreur Mr.menasri

Abderrazak, professeur à l'Université de M'Sila et Mr.alal mefteh qui ont bien voulu proposer le thème de Master, pour son aide précieux, sa disponibilité durant toute la durée de notre projet.

Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

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



Résumé

La résolution d'un problème d'interaction sol-structure (pieux, ouvrages souterrains, terre armée ;.....) Nécessite la connaissance du comportement des interfaces, 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

The resolution of a problem of interaction soil-structure (piles, works underground, reinforced earth;) requires the knowledge of the behavior of the interfaces. 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,

Keywords: Earthquake, soil-structure interaction, behavior of soil-structure interaction, Plaxis.

الملخص

حل مشاكل تربة -هيكل (أوتاد و هياكل 'ارض مسلحة) يتطلب معرفة سلوك السطح البيئي السطح البيئي باستخدام طريقة العناصر المحدودة " plaxis " في مجال الجيوتقنية أمر شائع جدا لدراسة المشاريع الكبرى .لأنه يسمح بتحليل العناصر المنتهية للتحقق من استقرار المنشآت وتحديد السرعة والتسارع مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل تربة بنية الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو :

*دراسة العوامل التي تلخص على نحو فعال خصائص الحركات الزلزالية مع الاهتمام الخاص لآثار الزلازل الحقيقية والمحاكاة في هذا التقييم اعتمد على الردود الخطية وغير الخطية من طبقة تربة معينة للدراسة ، وهذا يشير إلى إمكانية تمييز الحد الأدنى للزلازل عدد من المعلمات

*لدراسة تأثير التفاعل التربة هيكل على الحركة الزلزالية

الكلمات المفتاحية: زلازل والتفاعل التربة البنية والسلوك للتفاعل التربة البنية ، "plaxis"

ABSTRACT

The resolution of a problem of interaction soil-structure (piles, works underground, reinforced earth;) requires the knowledge of the behavior of the interfaces. 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,

Keywords: Earthquake, soil-structure interaction, behavior of soil-structure interaction, Plaxis.

الملخص

حل مشاكل تربة - هيكل (أوتاد و هياكل 'ارض مسلحة) يتطلب معرفة سلوك السطح البيني السطح البيني باستخدام طريقة العناصر المحدودة " plaxis " في مجال الجيوتقنية أمر شائع جدا لدراسة المشاريع الكبرى .لأنه يسمح بتحليل العناصر المنتهية للتحقق من استقرار المنشآت وتحديد السرعة والتسارع مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل تربة بنية الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو:

*دراسة العوامل التي تلخص على نحو فعال خصائص الحركات الزلزالية مع الاهتمام الخاص لآثار الزلازل الحقيقية والمحاكاة في هذا التقييم اعتمد على الردود الخطية وغير الخطية من طبقة تربة معينة للدراسة ، وهذا يشير إلى إمكانية تمييز الحد الأدنى للزلازل عدد من المعلمات

*لدراسة تأثير التفاعل التربة هيكل على الحركة الزلزالية

الكلمات المفتاحية: زلزال والتفاعل التربة البنية والسلوك للتفاعل التربة البنية ، "plaxis"

LISTE DES FIGURES

Chapitre I	
FIGURE – 1 les région sismique dans le monde	5
FIGURE – 2 sismicité du nord algérien.....	5
FIGURE – 3 Sismicité de boumerdes (2003).....	6
FIGURE – 4 Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.....	8
FIGURE – 5 les quatre mode de propagation.....	10
FIGURE – 6 Les différentes phases d'un accélérogramme	15
FIGURE – 7 Graphique de Hussit; la définition de la durée effective d'après Brady (1975) et Dobry et al(1978).....	16
FIGURE – 8 spectre de réponse en pseudo vitesse (Elcentro, californie mai 1944, composante NS).....	16
FIGURE-9 Comparaison des spectres du champ libre et au sein du bâtiment d'après Crouse (1978).....	18
Chapitre II	
FIGURE – 1 schémas type d'une culée en terre armée et du sommier d'appui du pont ...	20
FIGURE – 2 culée fermée à murs en retour.....	21
FIGURE – 3 culée ouverte à murs en aile incurvés.....	21
FIGURE – 4 culée ouverte à murs en aile oblique	22
FIGURE – 5 déformation amplifiées d'un massif de culée (éléments finis).	23
FIGURE- 6 détails types de sommiers d'appui	24
FIGURE-7 détails type d'un sommier de pont à poutre.....	25
Chapitre III	
FIGURE – 1 les boucles hystériques de contrainte -déformation(Hardin et Drnevich,1972).Un essai cyclique.....	28
FIGURE - 2 définition du module ,de l'amortissement et de l'amplitude de déformation.....	31
FIGURE – 3 courbes moyennes des modules de cisaillement et des coefficient d'amortissement des	32
FIGURE-4 Types des fondations.....	33.
FIGURE – 5 Impédance d'une fondation superficielle circulaire.....	35
FIGURE -6 Décomposition du problème d'interaction sol structure.....	36
FIGURE – 7 Représentation schématique d'un calcul interaction sol-structure méthode globale.....	37
FIGURE – 8 Schématisation d'une méthode de sous structure.....	38
FIGURE-9 Principe de superposition de Kausel.....	40
Chapitre IV	
FIGURE – 1 Interface utilisateur pour l'entrée des données.	43
FIGURE – 2 Maillage.	43
FIGURE – 3 Contraintes initiales (condition K0).	44
FIGURE – 4 Option pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.	45
FIGURE – 5 Option de « Output ».	46
FIGURE – 6 Option de « Viewcalculation ».	46
FIGURE – 7 Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.	47
FIGURE -8 Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	47
FIGURE – 9 Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.	48

FIGURE – 10 Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.	48
FIGURE-11 Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.....	49
FIGURE – 12 Fenêtre des paramètres de Mohr-coulomb.	49
FIGURE – 13 Fenêtre de command d'une excitation harmonique.	50
FIGURE – 14 Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogramme.	51
FIGURE – 15 Accélérogramme de l'U.S (Geological Survey).	52
FIGURE – 16 Profil géométrique retenu.	52
FIGURE – 17 Maillage du modèle.	54
FIGURE – 18 Génération des contraintes initiales.	55
FIGURE – 19 Sollicitations sismiques.	56
FIGURE –20 Phases de calcul.	57
FIGURE – 21 Activation load multiplier data file	58
FIGURE – 22 Fenêtre pour calcul les déférentes phases.	58
FIGURE – 23 Trace des points sur le profil.	59
FIGURE – 24 Maillage déformation du profil (1 ^{ère} cas).	60
FIGURE – 25 Total stresses (1 ^{ère} cas).	60
FIGURE – 26 Total déplacements (1 ^{ère} cas).	61
FIGURE – 27 Déplacement-temps suivant l'axe xx' (1 ^{ère} cas).	61
FIGURE - 28 Déplacement-temps l'axe yy' (1 ^{ère} cas).	62
FIGURE – 29 Vitesse-temps suivant l'axe xx' (1 ^{ère} cas).	62
FIGURE – 30 Vitesse-temps suivant l'axe yy' (1 ^{ère} cas).	63
FIGURE – 31 Accélération-temps suivant l'axe xx' (1 ^{ère} cas).....	63
FIGURE – 32 Accélération-temps suivant l'axe (1 ^{ère} cas).	64
FIGURE – 33 La force (Fx) en fonction du temps.	64
FIGURE – 34 Maillage déformé du profil (2 ^{ème} cas).	66
FIGURE – 35 Total stresses (2 ^{ème} cas).....	66
FIGURE – 36 Total déplacements (2 ^{ème} cas).	67
FIGURE – 37 Déplacement-temps suivant l'axe xx' (2 ^{ème} cas).	67
FIGURE – 38 Déplacement-temps l'axe yy' (2 ^{ème} cas).	68
FIGURE – 39 Vitesse-temps suivant l'axe xx' (2 ^{ème} cas).	68
FIGURE – 40 Vitesse-temps suivant l'axe yy' (2 ^{ème} cas).	69
FIGURE – 41 Accélération-temps suivant l'axe xx' (2 ^{ème} cas).	69
FIGURE – 42 Accélération-temps suivant l'axe yy' (2 ^{ème} cas).....	69
FIGURE – 43 La force (Fx) en fonction du temps.	70
FIGURE – 44 Maillage déformé du profil (3 ^{ème} cas).	72
FIGURE – 45 Total stresses (3 ^{ème} cas).....	72
FIGURE – 46 Total déplacements (3 ^{ème} cas).	73
FIGURE – 47 Déplacement-temps suivant l'axe xx' (3 ^{ème} cas).	73
FIGURE – 48 Déplacement-temps suivant l'axe yy' (3 ^{ème} cas).	74
FIGURE – 49 Vitesse-temps suivant l'axe xx' (3 ^{ème} cas).	74

FIGURE – 50 Vitesse-temps suivant l'axe yy' (3 ^{ème} cas).	75
FIGURE – 51 Accélération-temps suivant l'axe xx' (3 ^{ème} cas).	75
FIGURE – 52 Accélération-temps suivant l'axe yy' (3 ^{ème} cas).	76
FIGURE – 53 La force (F_x) en fonction du temps.	76
FIGURE-54 Schématisation des points de l'axe xx'	78
FIGURE – 55 Déplacement-distance xx'	79
FIGURE – 56 Déplacement-distance yy'	79
FIGURE -57 Schématisation des points de l'axe yy'	80
FIGURE – 56 Déplacement-profondeur xx'	81
FIGURE – 57 Déplacement-profondeur yy'	81

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau – 1 Echelle macrosismique internationale d'intensité (A rapprocher de l'échelle de Mercalli modifiée)	12
---	----

Chapitre III

Tableau – 1 Coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).	30
---	----

Chapitre IV

Tableau – 1 Propriétés des couches de sols.....	53
Tableau -2 propriétés de l'élément structural (plate).....	54
Tableau – 3 Données des points.....	59
Tableau – 4 Valeurs maximal aux points considérés.	65
Tableau – 5 Valeurs maximal aux points considérés.	71
Tableau – 6 Valeurs maximal aux points considérés.	77
Tableau – 7 Comparaison entre les trois cas.	77
Tableau – 8 Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal.	78
Tableau – 9 Résultats des paramètres de mouvement dans le cas vertical.....	80

NOTATION ET ABREVIATIONS

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.

F : force

G : le module de cisaillement.

G' : le module de cisaillement effectif.

K : Le module de compressibilité volumique.

Kx : perméabilité horizontale.

ky : perméabilité verticale.

k : Coefficient de réaction.

[K] : Matrice de rigidité.

K0 : Coefficient des terres au repos.

L :Longueur.

m :puissance.

P : pression.

U : déplacement.

w : poids.

V_p : vitesse des ondes P.

V_s : vitesse des ondes S.

M : magnitude.

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

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

$\{u\}$: Vecteur de déplacement.

$\{Q_f\}$: Vecteur de charge.

Abréviations :

ISS : Interaction sol-structure.

PHA :peak horizontal accélération

MEF :Méthode élément fini

TUD : Université Technologique de delft

INTRODUCTION GENERALE

Les mouvements de terre sont parmi les phénomènes géodynamiques les plus répandus et souvent les plus graves à la surface de la terre. Ils provoquent une modification naturelle et continue du relief et se produisent ou se réactivent généralement de façon inopinée, notamment lors des tremblements de terre (séismes, explosions souterraines ou sous-marines, etc..)

Le comportement sismique d'un ouvrage dépend du mouvement sismique imposé par le sol à la réponse dynamique de l'ouvrage, du comportement des fondations pendant et après le séisme, ainsi que la capacité de résistance de la superstructure. La prise en compte des caractéristiques du sol, qui jouent un rôle important sur les aspects dynamiques de la structure, revêt donc une importance particulière dans l'étude des effets de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique de l'ouvrage. L'étude menée consiste à montrer l'influence de l'interaction sol-structure sur le comportement des structures en portiques.

On entend généralement 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. 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 : ponts, barrages, centrales nucléaires, réservoirs de gaz naturel liquéfié.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres, une introduction générale et des conclusions.

Dans le premier chapitre, nous introduisons les paramètres qui participent à la description du mouvement sismique. Nous évoquons les imperfections qui subsistent dans la définition de certains paramètres et les incertitudes qui accompagnent leur détermination.

Nous essayons de répertorier les facteurs qui influent sur les paramètres du mouvement sismique en un point donné de la surface du sol et, nous mettons l'accent sur le rôle des facteurs liés à la source, rôle souvent sous-estimé par les calculs courants.

Dans le deuxième chapitre, on présente un culée de pont leur conception et les types et les éléments

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

Dans le quatrième chapitre est consacré à la description générale de l'outil de calcul (Plaxis), ainsi que consacré à la mise on ouvre des calculs effectués à la l'aide du « code Plaxis » et études des paramètres de mouvement sismique, dans les défirant 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 I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

CHAPITRE 1: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

INTRODUCTION

Les dommages directs causés par un séisme proviennent soit du mouvement de la faille ou des vibrations du sol. Ces dernières sont responsables de la majorité des dommages causés aux structures.

La résolution des problèmes de la construction des ouvrages qui pourraient résister, dans une certaine marge admissible de sécurité à des secousses sismiques probables, ne peut se faire sans une bonne connaissance des caractéristiques du mouvement sismique.

Au cours de ce chapitre, nous discuterons de certains termes et notions couramment utilisés et des importances qui résident dans les définitions des paramètres qui doivent décrire le mouvement sismique ainsi que la marge d'incertitude qui accompagne la détermination de ces paramètres.

I-1- sismogénèse :

La sismogénèse étudie les mécanismes provoquant les tremblement de terre. Cette discipline essaie de comprendre non seulement ce qui se passe lors d'un tremblement de terre sur la ou les failles impliquées, mais aussi tente d'appréhender (si elles sont appréhendables) les conditions associées au déclenchement (le terme technique est nucléation) d'un tremblement de terre dans le temps et dans l'espace.

La sismogénèse utilise deux types de représentation de la source sismique qui tendent petit à petit à se rejoindre. L'approche cinématique représente le séisme à partir de la différence de l'état de la faille avant et après la rupture. La source sismique est alors décrite principalement par la vitesse (et ses variations) du glissement d'un point sur la faille (de l'ordre du $m \cdot s^{-1}$) lors du séisme et par la vitesse à laquelle se propage la rupture sur cette même faille (de l'ordre de quelques $km \cdot s^{-1}$). La seconde représentation est dynamique. Cette représentation part d'un état initial de la faille qui est portée à un état critique où la rupture commence (nucléation). La rupture se développe suivant des lois constitutives (par exemple la loi reliant la vitesse de glissement au frottement). La représentation dynamique a sûrement plus de sens physique que la

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

représentation cinématique mais est beaucoup plus complexe à manipuler. On peut dans la plupart des cas déduire une représentation cinématique d'une représentation dynamique (le contraire n'est pas possible).

Comprendre la source sismique est fondamental pour pouvoir un jour espérer prévoir les séismes. Certains groupes de chercheurs estiment qu'il est possible de prédire certains événements sismiques mais ces recherches n'ont pas le consensus de toute la communauté sismologique et sont souvent l'origine de débats très enflammés. Ces instabilités de la croûte terrestre surviennent dans les zones sismiques dites « actives ». Ces zones sont associées à toute une série "d'accidents" géologiques tels que les fossés tectoniques, les dorsales océaniques, les chaînes de montagnes les volcans et les fossés marine fig. (I-1).

-Le premier type de zone sismique est représenté par d'étroites bandes de terrain centrées sur l'axe des dorsales médio-océaniques qui sont le siège de tremblements de terre superficiels (moins de 70 Kms de profondeur) .Ces séismes sont liés à une importante activité volcanique issue de l'expansion des fonds océaniques,

-Le deuxième type de zone sismique est associé aux failles telles que la faille de San-Andréas en Californie ou la faille anatolienne dans le nord de la Turquie .Ces zones sismiques sont caractérisées par des tremblements de terre superficiels .Les déplacements horizontaux le long de ces failles s'avèrent être très importants.

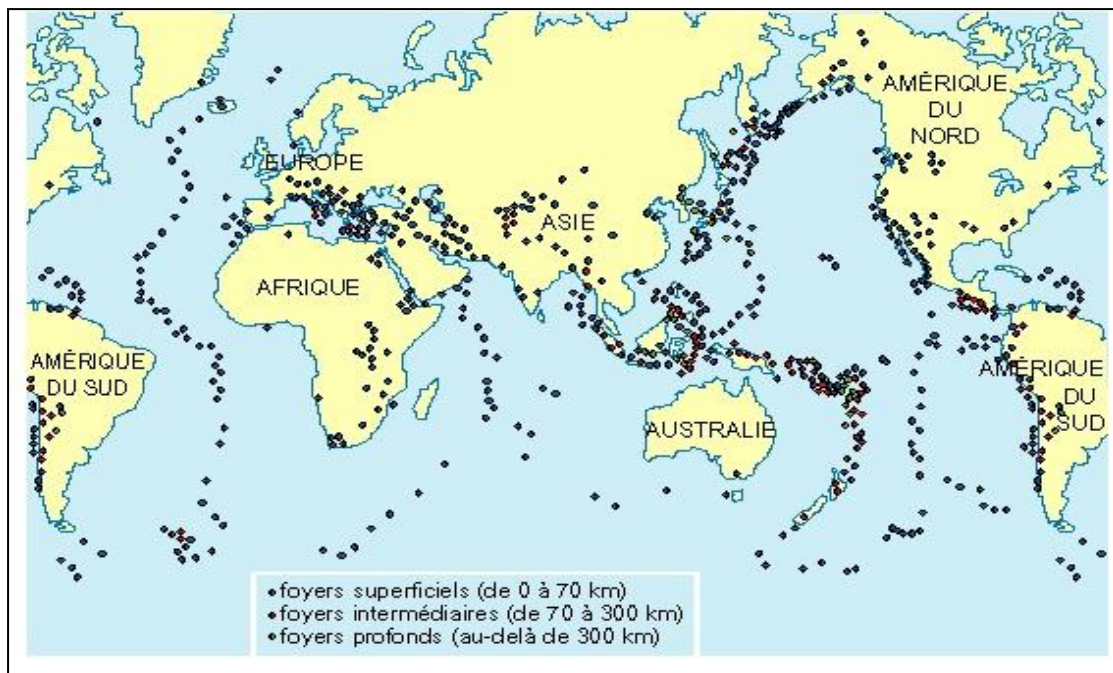
-Le troisième type de zone sismique est très lié aux zones de subduction où il y'a enfoncement d'une plaque lithosphérique sous une autre qui la chevauche" Ces zones sismiques inclinées sont le siège de tremblements de terre superficiels (moins de 70 Kms) intermédiaires (70 à 300 Kms) et profonds (plus de 300 Kilomètres) selon l'endroit.

-Le quatrième type de zone est associé à l'orogénèse des chaînes de montagnes qui sont le produit de fortes compressions horizontales .Ce sont pour la plupart, des tremblements de terre superficiels.

Selon leurs états géologiques et morphologiques, il est possible de distinguer quatre types de zones

Il est à remarquer que les plus grands sinistres sont provoqués par les séismes superficiels qui dissipent à peu près les trois quarts de l'énergie totale libérée par les séismes à travers le monde. En Algérie, la région Nord apparaît particulièrement active.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE



Figure(I-1):les région sismique dans le monde

I-2- le risque sismique :

Pour la réalisation d'ouvrages importants, tels que les barrages, les ponts, les immeubles de grande hauteur, les plates-formes de forage pétrolier en mer et les installations nucléaires, il est nécessaire d'approfondir l'analyse du risque sismique afin de s'assurer de la stabilité de telles constructions

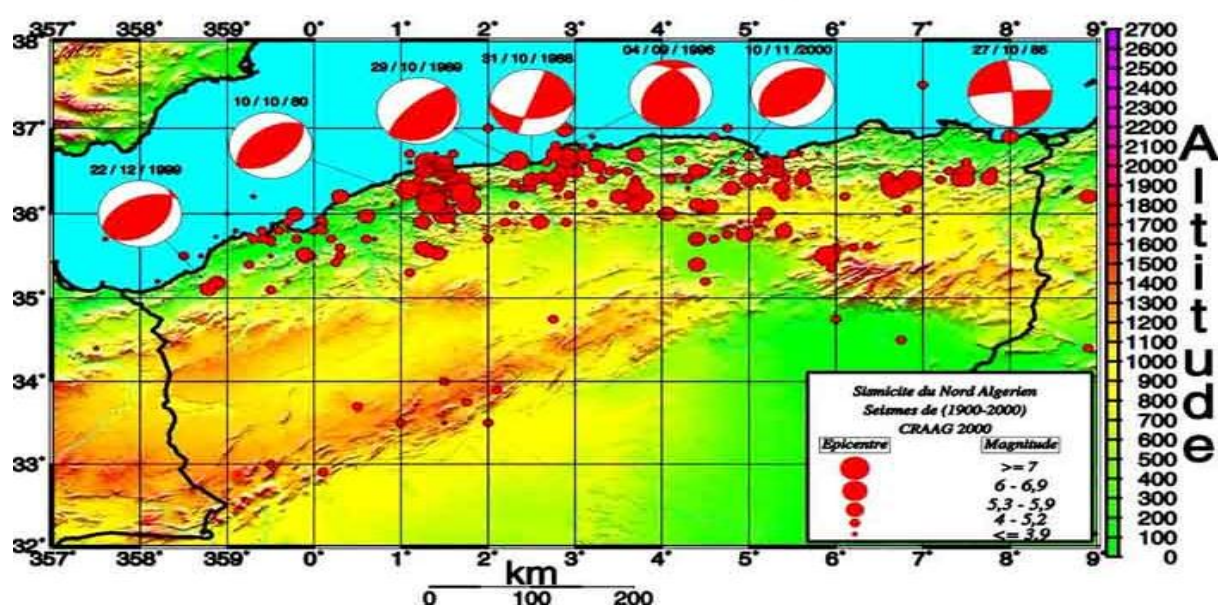


Figure (I-2) :sismicité du nord algérien

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

Le séisme de Boumerdes, d'une magnitude de 6,8 sur l'échelle de Richter, s'est solde par plus de 2000 morts et plus de 10000 blessés. Les dommages sévères aux structures dans les régions urbaines ont fait plus de 15000 sans abri (Adams et al., 2003). À Seattle, en février 2001, le séisme de Nisqually bien qu'ayant également une magnitude de 6,8, a eu des conséquences beaucoup moins graves, les dommages s'évaluent à environ deux milliards de dollars US. En 1995, le séisme de Kobe au Japon, d'une magnitude de 7,2 a entraîné dans la mort 5000 personnes et causé des dommages majeurs aux propriétés (Shinozuka). En Californie, le séisme de Northridge (1994) d'une magnitude de 6,7, bien que moins mortel (57 morts) a causé des dommages aux infrastructures et aux structures, dont 3000 bâtiments jugés non sécuritaires figure(I-3), entraînant des pertes évaluées à 40 milliards de dollars américains.



Figure (I-3) :Séisme de boumerdes 2003

I-3- Failles :

Une faille est un ensemble de surface discontinue qui présente des milliers de ramifications dans des directions multiples qui suivent, dans leur ensemble la trace de la faille représentée par une ligne sur les cartes sismotectoniques dans une zone sismique.

Au cours d'un séisme, les surfaces de glissement ne sont pas toujours continues le long d'une faille, et ne suivent pas toujours la trace déjà établie de la faille .Elles suivent plutôt un

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

chemin de résistance minimale au sein d'une zone de cisaillement relativement large, se transférant successivement d'un plan de faible résistance à un autre [1].

La nature des ondes sismiques au voisinage de la source dépend du type de faille qui engendre le séisme On distingue quatre types de failles [2], figure(I-4) carte 1.

a-Faille normale ou d'extension :

Dans ce type de faille, les forces d'extension provoquent le glissement vers le bas d'une des deux plaques de la faille c'est le cas du séisme de 1954 de Peak-Dixie Valley au NEVADA.

b- Faille inverse (Compressive. Overthrust F):

A l'inverse du cas précédent les forces de compression provoquent un glissement vers le haut de l'une des plaques de la faille qui est en pente Ce genre de rupture de faille fut à l'origine du séisme d'El Asnam (Chlef) en 1980 et du séisme de San Fernando en 1971.

c- Faille coulissante ou de glissement longitudinal (Srick Slip F):

Le séisme résulte du déplacement relatif horizontal des deux fronts de la faille (cisaillement) le long du plan de la faille qui est alors vertical .C'est le cas de la faille de San Andreas en Californie. Fig. (I-4).

d- Faille à Petit angle (LowAngle.Underthrust F):

C'est le cas des plaques des fonds marins qui s'enfoncent au dessous des plaques continentales adjacentes .C'est le cas de la côte ouest de l'Amérique du sud, de la côte du Japon; les grands séismes de l'Alaska en 1964 et du Chili en 1960 sont de bons exemples de ce genre de faille.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

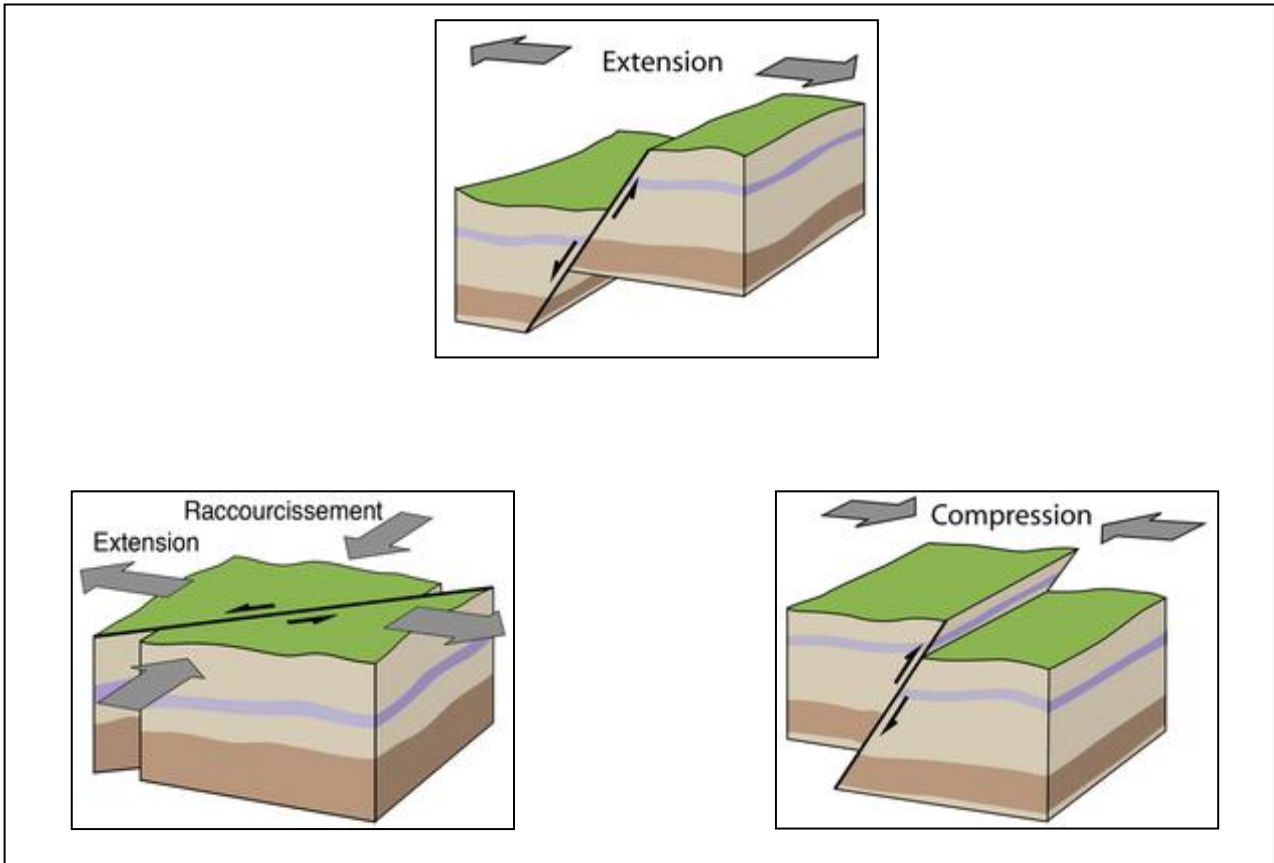
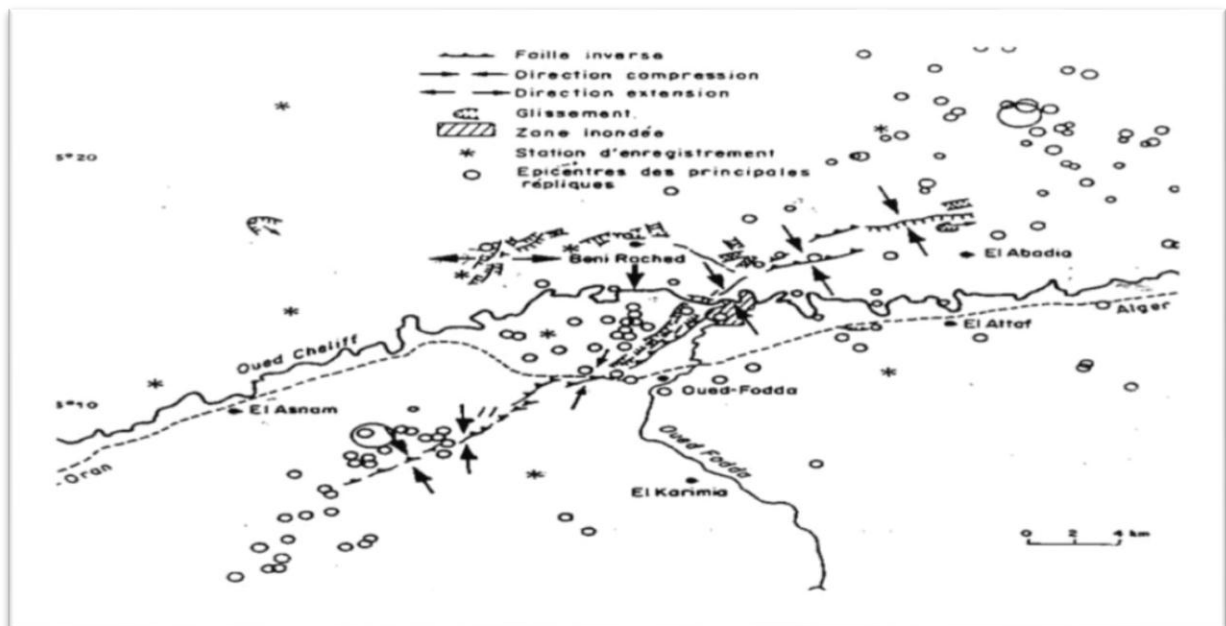


Figure (1-4) :Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.



Carte. 01 .Les différentes failles observées à Chlef lors du séisme du 10-10-1980.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

I-4- nature et mode propagation des ondes sismique :

lors du déclenchement du séisme il y a propagation d'ondes .il existe exactement deux types d'ondes différent :

1-les ondes de volume :

a-les ondes P :

sont des ondes de compression longitudinales, les plus rapides peuvent atteindre une vitesse V_p dans les milieux solides. La vitesse diminue quand les ondes atteignent un milieu liquide ou de densité plus faible.

b- les ondes S :

sont des ondes transversales , perpendiculaires à la direction de propagation .ces des ondes moins rapides que les précédents , la vitesse V_s augmente en rencontrant une densité plus élevée , les ondes ne traversent pas les milieux liquides ; elles sont alors réfléchies vers la surface.

2- les ondes surface :

sont engendrées par le séisme. Elle sont destructrices puisqu'elles ne se propagent qu'à la surface, on peut ainsi évaluer facilement le niveau de destruction atteint par le séisme .

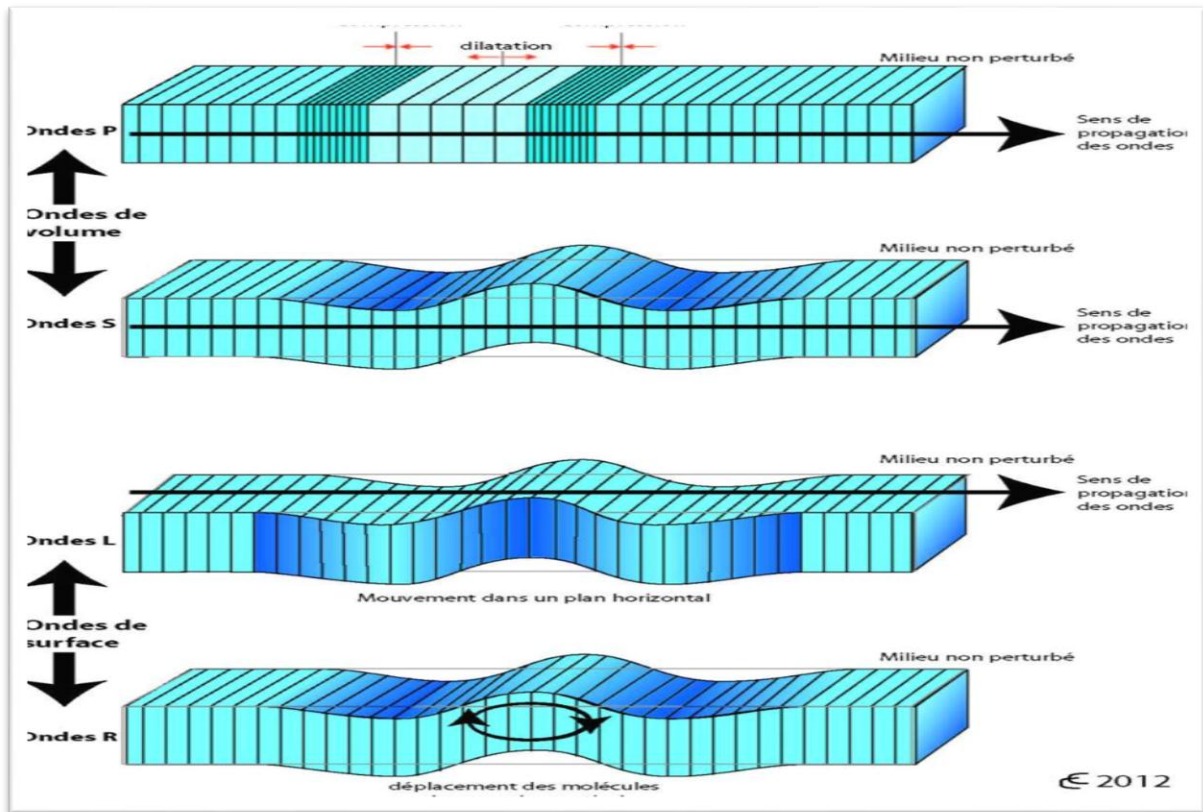
a- Les ondes R ou ondes de Rayleigh :

Ce sont des ondes dont le mouvement des particules est elliptique et rétrograde dans le plan vertical de propagation. Ces ondes ont une vitesse . La composante horizontale du mouvement est plus faible que la composante verticale, et elles sont déphasées de 90° l'une par rapport à l'autre. L'amplitude du mouvement devient négligeable à une profondeur égale à la longueur d'onde .Le mouvement de ces ondes s'effectue parallèlement à la surface et perpendiculairement à la direction de propagation. Les ondes de love provoquent un ébranlement horizontal qui peut être la cause de nombreux dégâts sur les fondations des édifices.

b-Ondes de Love:

ce sont des ondes pour les quelles les points du sol se déplacent dans un plan tangent à la surface et perpendiculairement à la propagation. Leur mouvement n'engendre que des contraintes de cisaillement.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE



Figure(1-5) :Les quatre mode de propagation des ondes sismique.

Si on assimile le sol à milieu élastique et homogène caractérisé par le module d'élasticité longitudinal E et le coefficient de poisson V et la masse volumique p. la vitesse v_p des ondes p est donnée par :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \dots\dots\dots(I-1)$$

Et la vitesse des ondes S par : $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots(I-2)$

Ou $\lambda = \frac{v.E}{(1+).(1-2v)} \dots\dots\dots(I-3)$

Désigne la constante de lamé et :

P: Densité du milieu.

E: Module d'élasticité dynamique.

G : Module de cisaillement.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

ν : Coefficient de Poisson.

λ : constante de lamé.

I-5-foyer et épicentre :

Le foyer (ou hypocentre) d'un séisme est le lieu sur la faille où se déclenche la rupture et d'où partent les ondes sismiques. La plupart des séismes enregistrés sont situés entre 0 et 70 kilomètres de profondeur. L'épicentre est le point théorique situé à la surface terrestre à la verticale du foyer du séisme.

Le foyer est calculé à partir des ondes sismiques captées mais ces calculs sont généralement entachés d'erreurs dues à la sélection des stations d'enregistrement par rapport à la source du séisme et de la précision de ces enregistrements.

I-6-paramètres caractéristiques des mouvements sismiques :

L'importance d'un séisme se caractérise par deux paramètres , sa magnitude et son intensité :

***La magnitude :**

traduit l'énergie libérée par le séisme. La magnitude de Richter est l'échelle la plus connue, mais aujourd'hui, d'autres échelles de magnitude, comme la magnitude de moment, sont davantage utilisées. Augmenter la magnitude d'une unité signifie que l'énergie libérée lors du séisme sera multipliée par 30 (par exemple, un séisme de magnitude 7,2 libère 30 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 6,2).

L'expression mathématique de la magnitude locale d'un séisme peut s'écrire :

$$A = \log \frac{A}{A_0} \dots\dots\dots(I-4)$$

Ou :

A : est l'amplitude maximale mesurée en millimètres sur l'enregistrement d'un sismographe standard (Wood Anderson avec une période de 0,8 secondes), à la distance de 100 Kms.

A_0 : l'amplitude de référence d'un séisme standard choisi préalablement (1 micron pour une distance de 100 Kms) qui correspond à une magnitude.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

Les logarithmes de base 10 sont utilisés.

*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.

Degré	Observations	Accélération cm.s ⁻² a/g
I	Secousse imperceptible à l'homme	1 -0.001g
II	Secousse ressentie par un petit nombre d'observateurs	2-3
III	Secousse ressentie par un certain nombre d'habitants. La durée et la direction peuvent parfois être appréciées	4-7
IV	Ebranlement constaté par quelques personnes en plein air, vibration de vaisselle	8 9 10 0.01 g
V	Ebranlement constaté par toute la population, réveil des dormeurs	20 30
VI	Des personnes effrayées sortent des habitations. Vaisselle brisée, cloches mises en branle.	40 50 60
VII	Maisons légèrement endommagées, lézardes dans les murs	80 90 100 0.1g
VIII	Fentes béantes dans les murs, chute de cheminées et de clochers, renversement des statues	200 300

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

IX	Un grand nombre de maisons sont rendues inhabitables	400
		500
		600
		700
X	La plupart des bâtiments sont détruits, dommages aux ponts	800
		900
		1000
		Lg
XI	Destruction totale des bâtiments, des ponts, des digues. Larges déchirures et crevasses dans le sol	2000
		3000
XII	Rien ne demeure des œuvres humaines, dislocations horizontales et cisaillement du sol	4000
		5000
		6000

tableau(1-1) :Echelle macrosismique internationale d'intensité(A rapprocher de l'échelle de mercallimodifiée)

Relation approximative reliant l'intensité du séisme à l'accélération maximale du sol.

I-7-Mouvement du sol :

le mouvement de sol regroupent tous les déplacements, lents ou plus ou moins brutaux , qui affectent le sol ou le sous –sol la quantité de matériaux mis en mouvement peu importante jusqu'à affecter des masses énormes (plusieurs millions de mètres cube)

I-8-l'accélérogramme du séisme :

Le mouvement du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent sous la forme d'une accélération qui représenté la variation de l'accélération, la vitesse et le déplacement dans une direction donnée en fonction du temps ;

Les mouvement lors d'un séisme s'effectuent dans toutes la direction à l'horizontal comme à la vertical .c'est-à-dire il est enregistré pour un même séisme 03 accélérogrammes :

-un accélérogramme de direction Nord-Ouest.

-un accélérogramme de direction Est-Ouest.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

-un accélérogramme à la direction verticale.

Les trois données les plus importantes d'un accélérogramme sont :

***l'amplitude**, qui est généralement définie par la valeur du pic d'accélération

***la fréquence**, qui est une fréquence moyenne déterminée en comptant le nombre de fois que l'accélérogramme coupe l'axe des abscisses par unité de temps

***la durée**, définie par le temps qui s'écoule entre le premier et le dernier pic au dessus d'un certain niveau ou l'amplitude des accélération est notablement plus élevée.

I-9-Accélération Maximale :

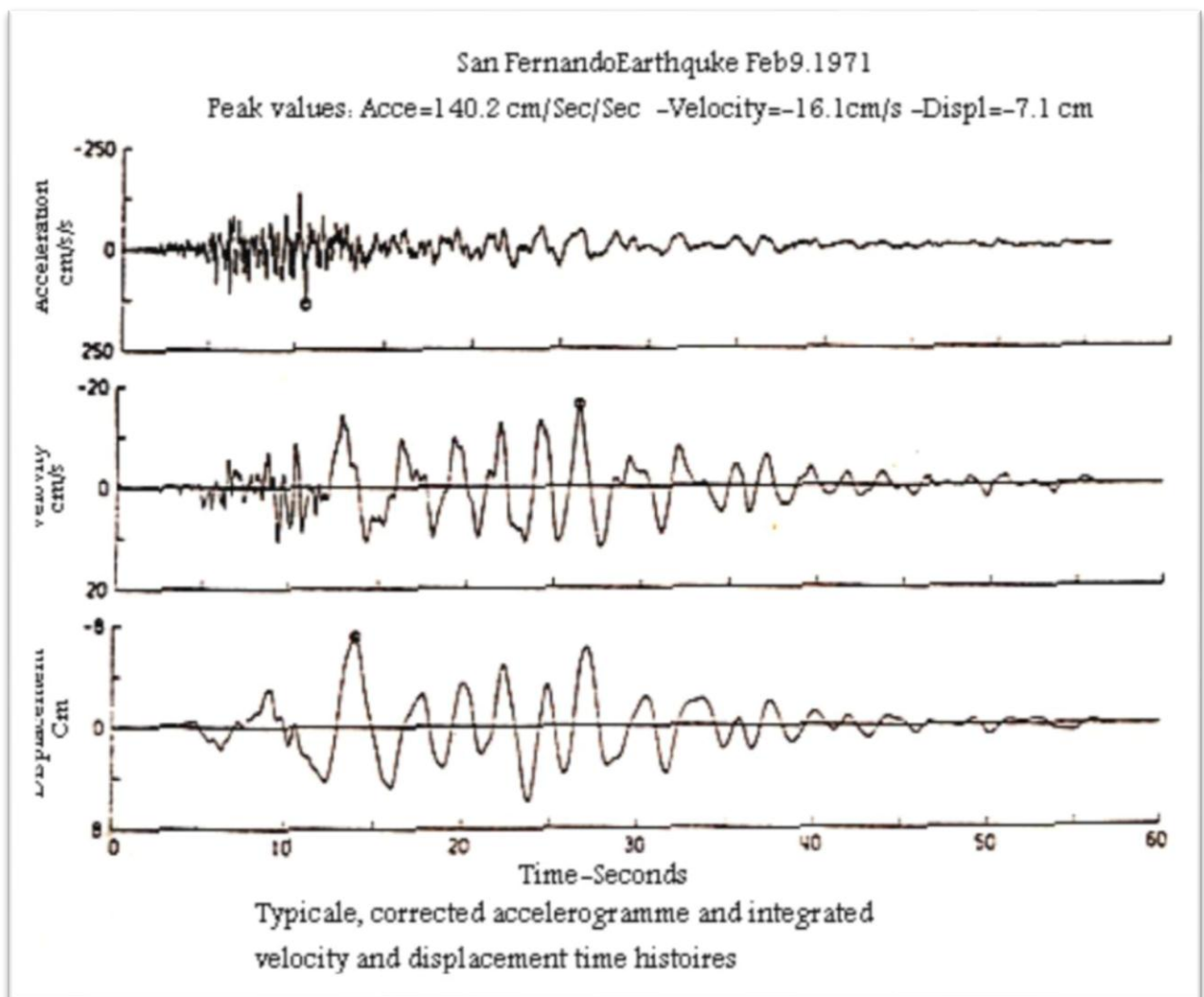
L'accélération a_{max} exprimée en fonction g , la vitesse et le déplacement maximale d .

Dans un accélérogramme fig. (I-6) on peut distinguer quatre phases différentes :

- (1) Une phase initiale pendant laquelle les accélérations sont faibles de 0 à 4 secondes.
- (2) une phase à fort niveau d'accélération entre 4 et 12 s.
- (3) une phase modérée entre 12 et 38 s.
- (4) une phase très faible de retour progressif au repos après 38 secondes.

Pour les études, les phases (1) et (4) sont à éliminer.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE



Figure(I-6) : Les différentes phases d'un accélérogramme

I-10-Durée du séisme :

La durée d'un mouvement sismique est le facteur important de destruction en zone épiscopentrale. On emploie quelques fois cette durée comme mesure des dégâts possibles. Cette durée dépend de la taille de la faille et la durée de la rupture. C'est le graphique de (Husit Plot) qui est le plus utilisé pour définir la durée effective ainsi que d'autres paramètres des vibrations sismiques reliés au temps.

Cette durée de mouvement sismique est au maximum de l'ordre de 60 secondes en zone très sismique .mais quelques secondes en zone peu sismique

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

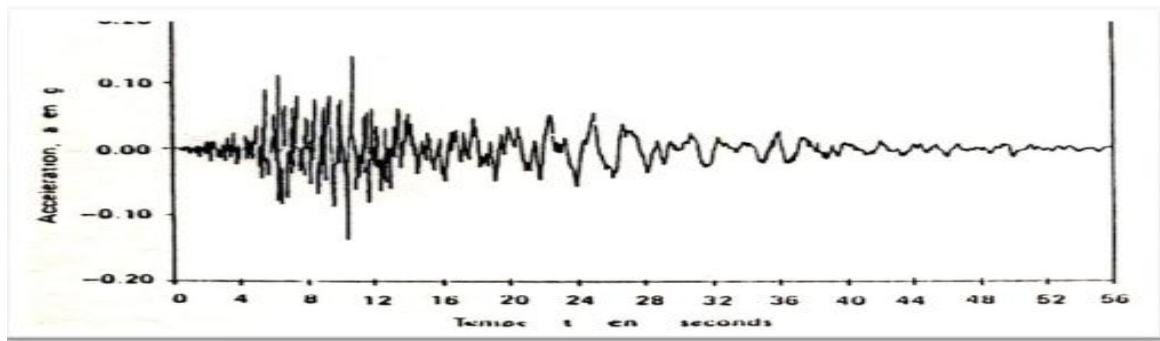
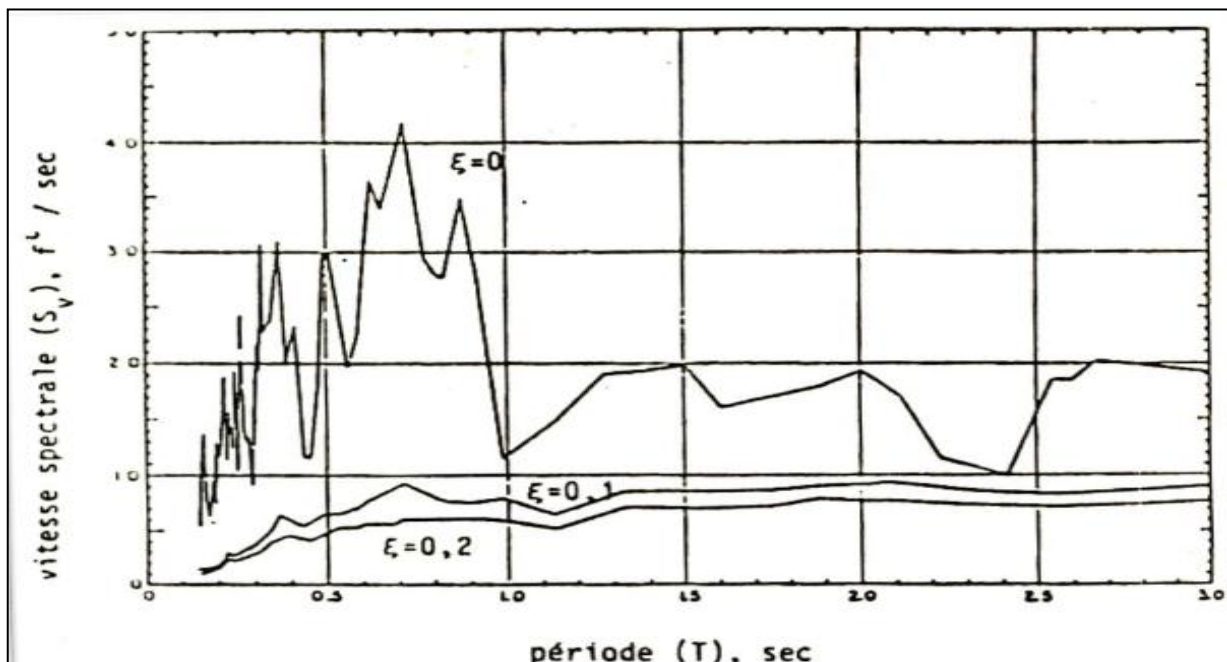


Figure (I-7) : Graphique de Hussit; la définition de la durée effective d'après Brady (1975) et Dobry et al(1978).

I-11-Le spectre de réponse :

Le spectre de réponse associé à un accélérogramme s'obtient en traçant la courbe de réponse maximale de différents, C'est-à-dire, Il est une interprétation graphique du déplacement maximal d'un oscillateur simple lorsqu'il est soumis à un séisme donné; en fonction de la fréquence, l'amplitude maximale du déplacement, de la vitesse ou l'accélération d'une série d'oscillateurs simples fréquences propres différentes.



Figure(I-8):spectre de réponse en pseudo vitesse (Elcentro, californie mai 1944, composante NS)

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

I-12-les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique :

Le mouvement sismique est un phénomène très complexe et il est affecté par un nombre élevé de facteurs qui peuvent intervenir sur les paramètres du mouvement sismique en un point donné. Mais d'après l'ensemble des études déjà effectuées on peut admettre que les différents facteurs peuvent être classés en trois séries principales:

a) Facteurs liés à la source (mécanismes de génération du séisme), le trajet parcouru entre le foyer et le site et les facteurs liés à des conditions locales propres au site [3, 4].

b) Les facteurs de la source englobent le genre de la faille génératrice, les dimensions de la zone de rupture, la profondeur de la source, les valeurs des contraintes le long de la surface de rupture, les mécanismes de rupture et les caractéristiques de propagation le long de la faille.

c) Une partie de l'énergie libérée à la source se propage par. Radiation d'ondes sismiques lors de leur trajet entre le foyer et le site à la surface de la terre.

I-13- Mouvements sismiques du champ libre et interaction sol-structure :

Les vibrations de la surface du sol dues aux mouvements sismiques en l'absence de l'influence de toute construction, étant définies comme mouvement sismique dit de champs libres.

Le phénomène d'interaction sol structure correspond à une perturbation du mouvement incident sous l'effet du mouvement propre de la structure, perturbation, d'où il résulte que le mouvement de l'interface de contact sol structure n'est pas le mouvement dit de champs libres.

L'interaction est d'autant plus forte que la structure est rigide et le sol déformable. D'autant plus faible que la structure est souple et que le sol est rigide.

L'évaluation de l'interaction sol structure et l'influence de celle-ci sur les enregistrements sismiques mérite ainsi plus de considération.

CHAPITRE I: LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

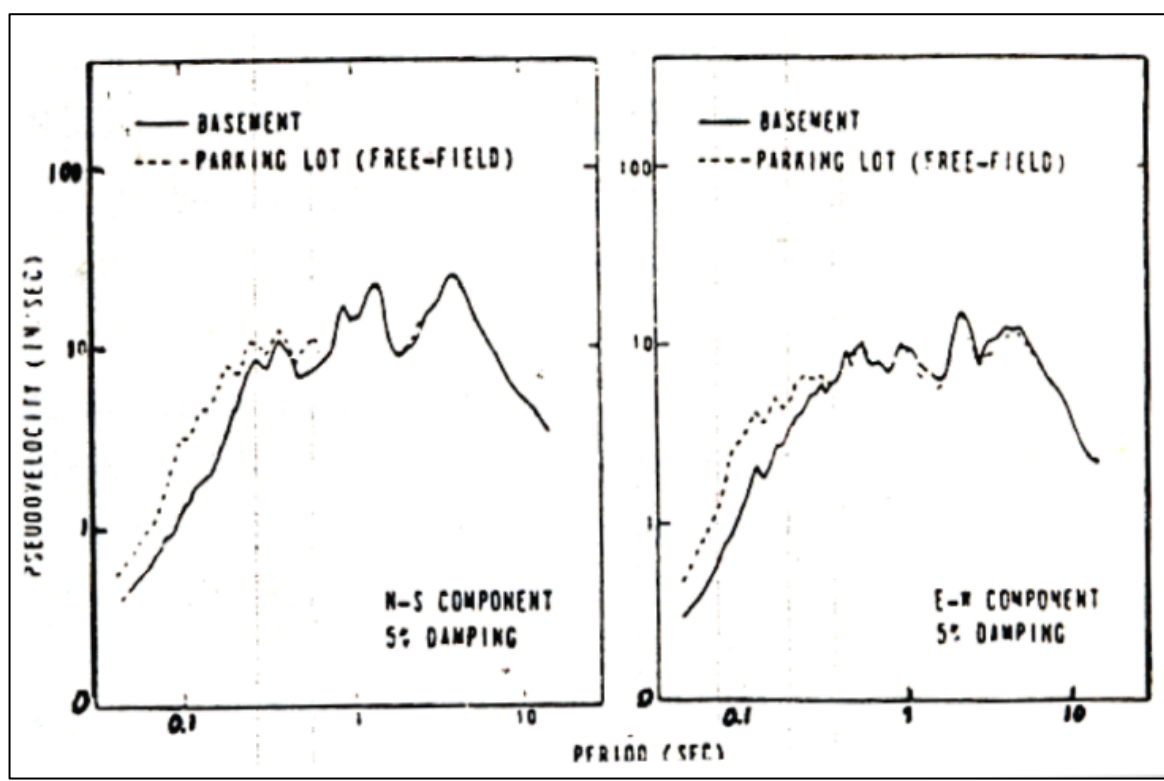


Figure (1-9). Comparaison des spectres du champ libre et au sein du bâtiment d'après Crouse (1978)

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES CULEES DES PONTS

Introduction

La construction de murs de soutènement de grande hauteur , ou soumise à de fortes charges , a permis très tôt d'étendre l'utilisation de la terre armée aux massifs de culée qui supportent directement des tabliers de pont .si le principe général est le même, les charges concentrées de la superstructure influent cependant beaucoup sur la distribution des contraintes et des efforts dans les armatures . comme pour les massifs de soutènement , l'analyse des effets de ces charges et la mise au point de méthode de calcul de plus en plus précises sont passées par des mesures sur des ouvrages réels ou des modèles réduits , aussi bien que par des études aux éléments finis .

La conception d'une culée porteuse suppose une mise au point détaillée de sa géométrie , des organes d'appui du pont et des dispositifs de collecte des eaux .sa construction requiert, elle le respect scrupuleux des règles sur le choix des remblais et sur le compactage.

La souplesse de la terre armée permet souvent de réaliser des culées de pont sur des terrains compressibles , sans fondations spéciales , mais quelque fois en association avec des techniques simples d'amélioration du sol .dans la conception de chaque ouvrage, dans le phasage des travaux , on tient compte alors tout à la fois des caractéristiques de la superstructure, des sujétions de délai, des données de la géotechnique et des possibilités propres à la terre armée .

Dans quelques cas particuliers on peut être amené à dissocier les deux fonction de soutènement et d'appui, et à retenir une solution de culée mixte .sur bon sol ,les « piles-culées » constituent un type intéressant de culée mixte à appuis internes.

Le développement de ces diverses formes de culées en terre armée, et l'expérience ainsi acquise dans le monde entier permettent aux ingénieurs de nos bureaux d'étude d'élaborer les solutions les mieux adaptées à chaque cas d'espèce

II-1 -conception d'une culée :

Une culée en terre armée est constituée essentiellement d'un massif classique. Dimensionné pour supporter en premier lieu les poussées des terres mais aussi et surtout les fortes charges concentrées qui viennent du tablier du pont (figure II-1).les réactions du tablier

CHAPITRE II :GENERALITES SUR LES CULEES DES PONTS

sont transmises par un “sommier d’appui ” en béton armé , qui en assure la répartition en tête du massif (figure II-1).

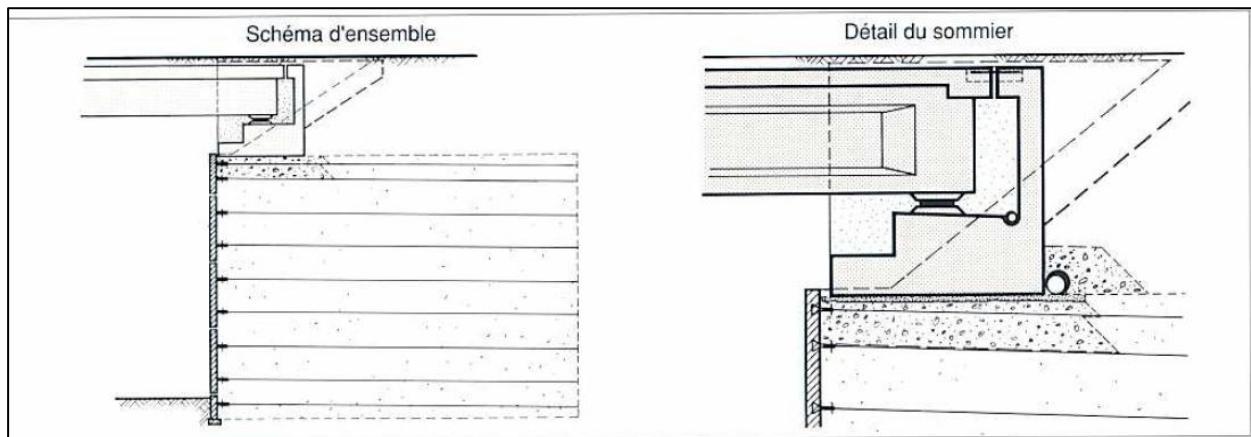


Figure (II-1) : schémas types d'une culée en terre armée et du sommier d'appui du pont

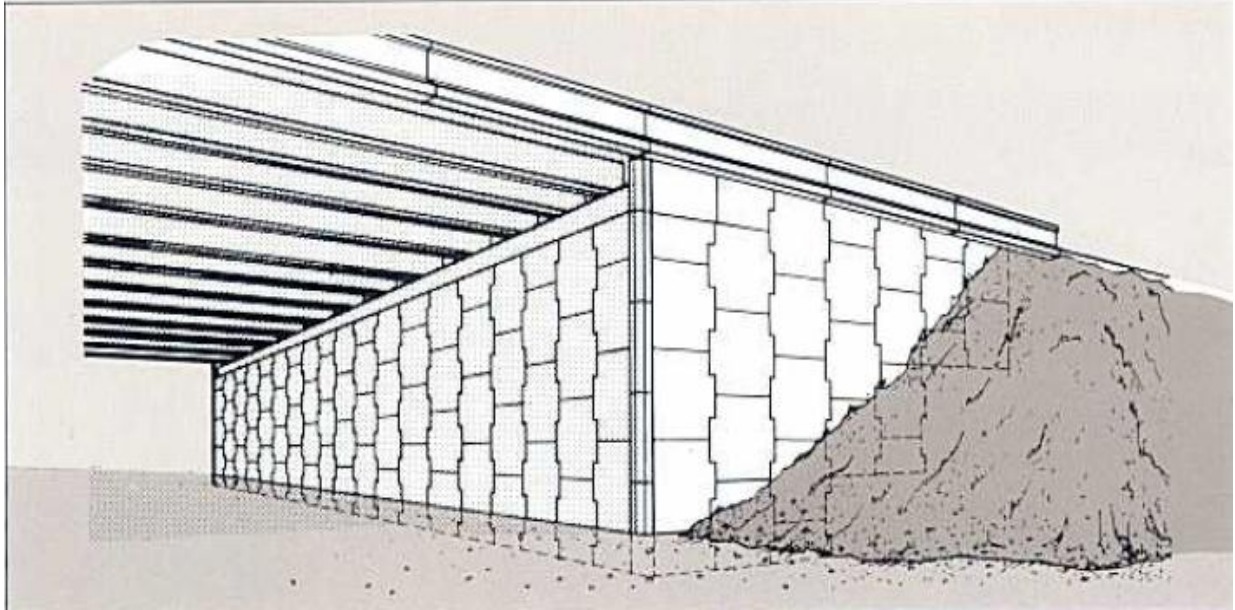
II-2-GEOMETRIE DES CULEES DES PONTS :

II-2-1-les types des culées :

Il existe essentiellement deux types de culée de pont en terre armé : les culées fermées à murs en retour , et les culées ouvertes à murs en aile. Le choix entre ces deux modèles dépend d'abord des emprises disponibles autour de l'ouvrage.

a -culées fermées :

les murs en retour s'imposent quand la rampe d'accès au pont est limitée par de longs soutènements.si on adopte aussi cette solution pour des murs courts (figure II-2), c'est au prix de quelques sujétions de mise en œuvre (plusieurs niveaux de fondation successifs dans le remblai des quart de cône ; achèvement de la partie haute des murs une fois le sommier et son garde-grève terminés , etc.....)



Figure(II-2) :culée fermée à murs en retour

b- culées ouvertes :

les murs en aile peuvent être rectilignes (dans le prolongement de la culée proprement dite légèrement incurvés (figure II-3) , ou obliques (figure II-4). L'ensemble du massif est en général fondé à un seul et même niveau, et il est construit en une seule phase , avant qu'on réalise le sommier . il n'ya pas d'équipement ni de corniche à prévoir en haut des murs , qui se terminent par des écailles biseautées spéciales . en revanche il convient de bien protéger les extrémités du sommier contre le ravinement . On peut noter que des murs en aile rectilignes se prêtent commodément à un élargissement ultérieur du pont.

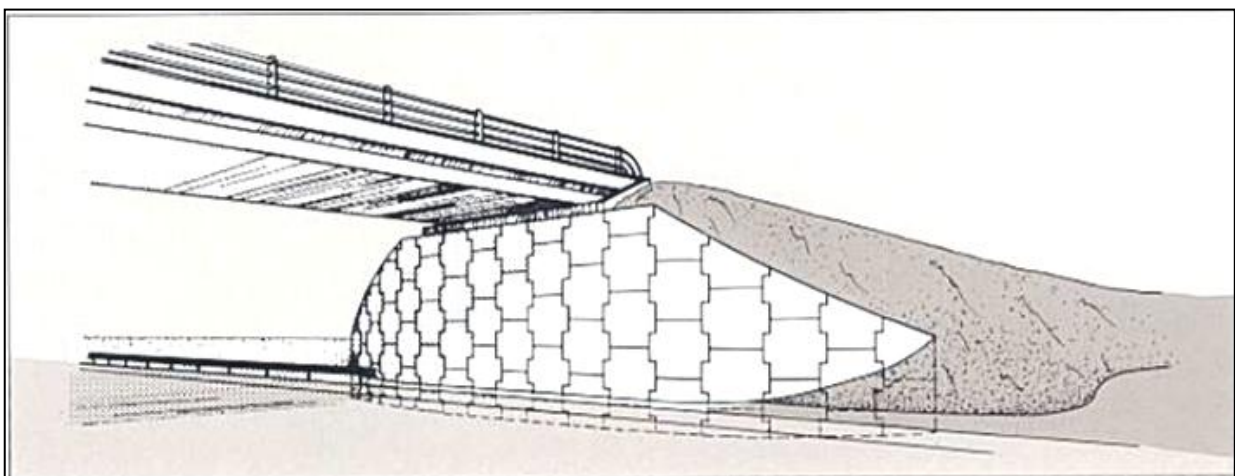
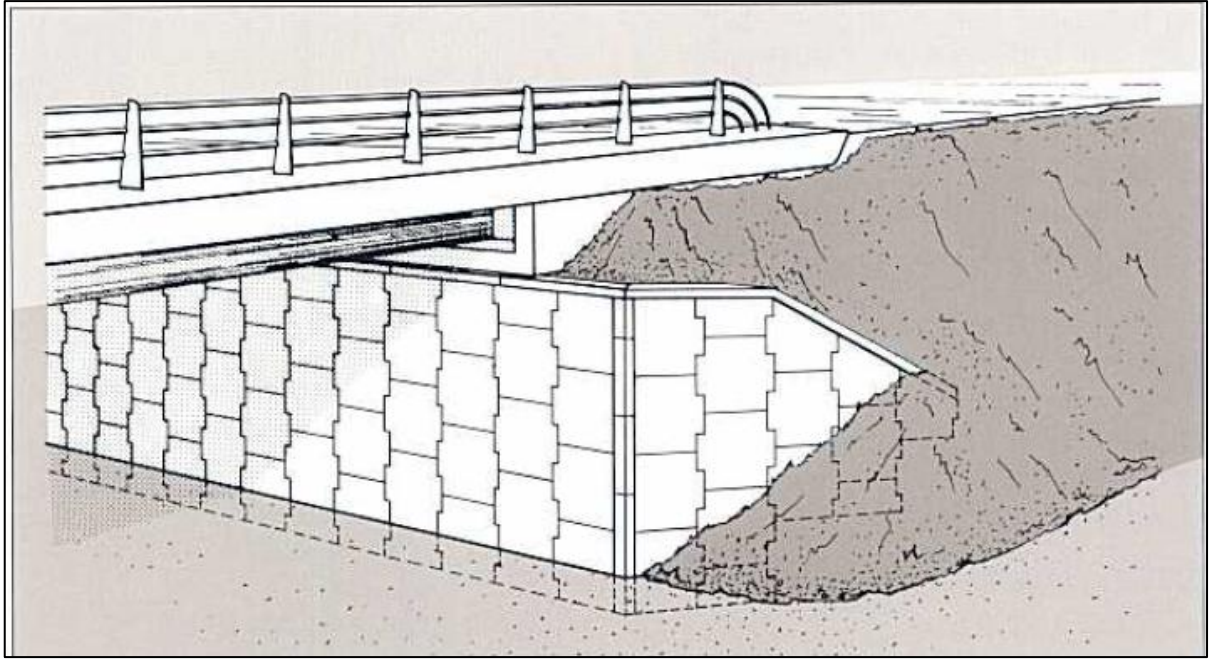


Figure (II-3) :culée ouverte à murs en aile incurvés



Figure(II-4) :culée ouverte à murs en aile obliques

III-GEOMETRIE DES SOMMIERS D'APPUIS :

III-1 -les élément de la culée :

a-largeur du sommier :

en règle générale les sommiers d'appui en béton armé sont dimensionnés de manière que la pression transmise au massif de terre armé soit aussi uniforme que possible et reste inférieure à 150 KPa sous charges permanentes . en outre , la ligne d'appui du pont est située a 1m au mois du parement . il s'agit là de règle de bonne construction qui visent à rendre négligeable le tassement sous le sommier . (dans les modèles aux éléments finis le tassement trouvé dans ces conditions , avec la densité normale d'armatures métalliques , est de l'ordre de 7.5 mm.) (figure II-5)

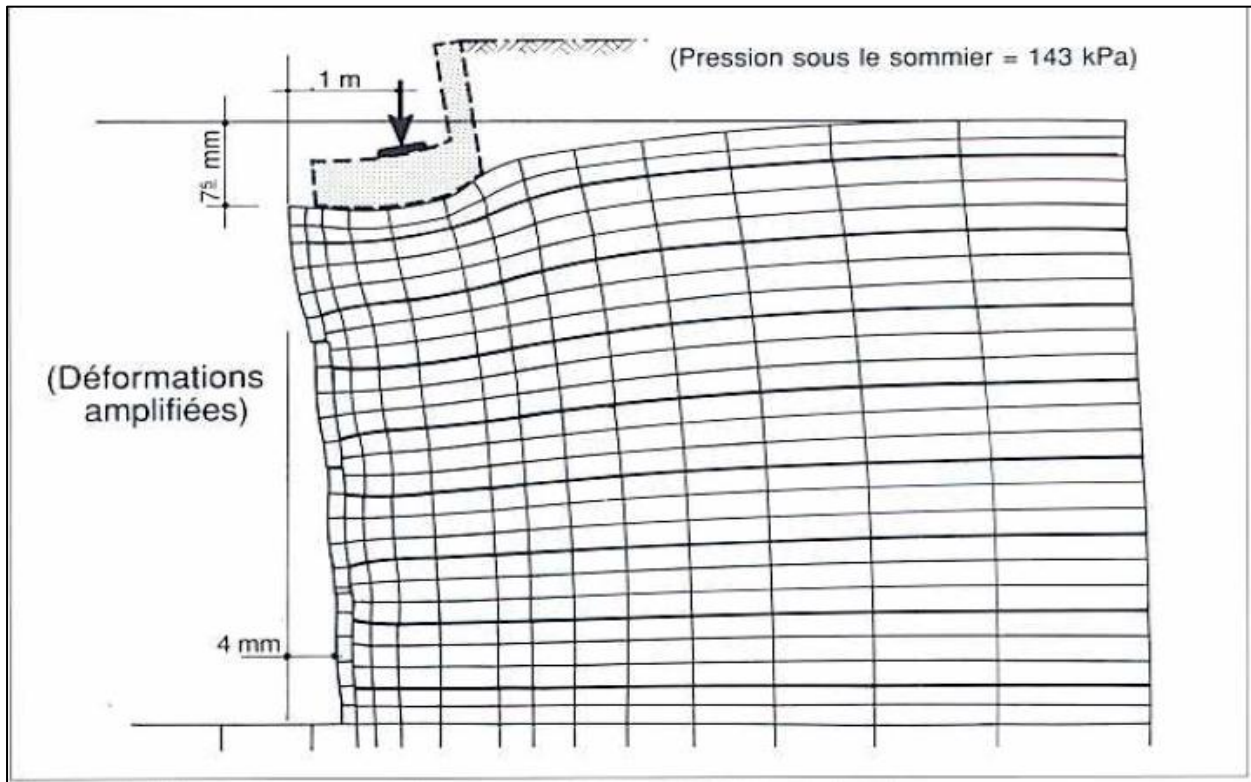
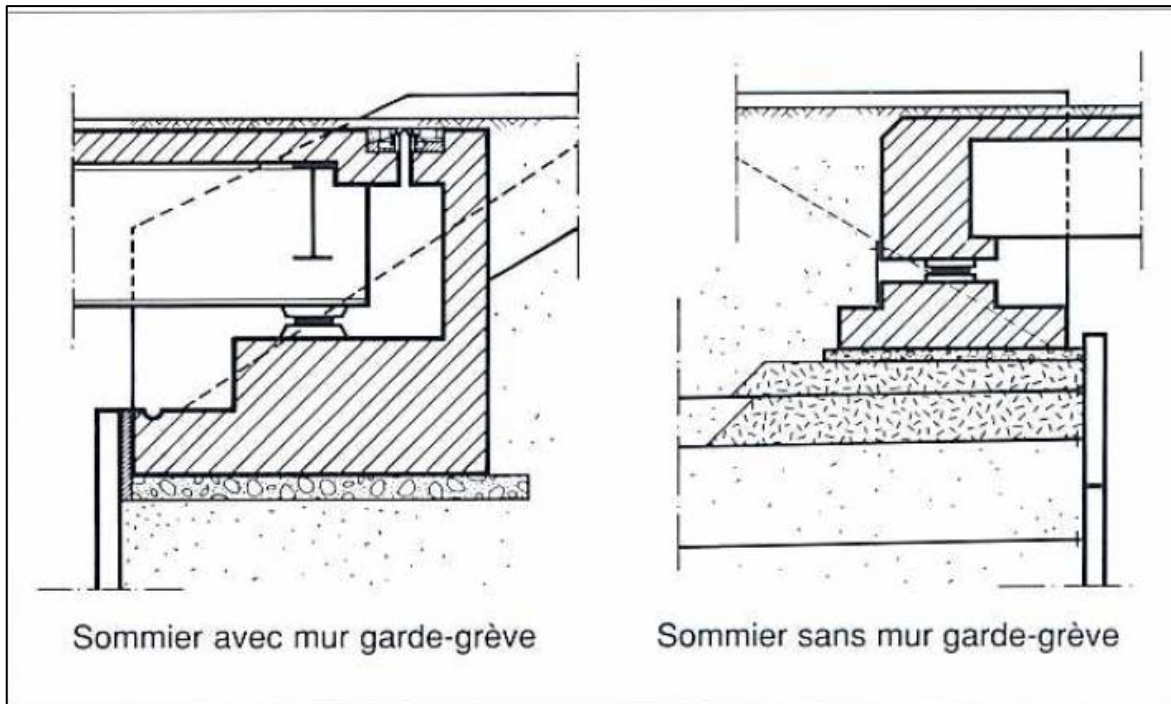


Figure (II-5) : déformations amplifiées d'un massif de culée (élément finis)

b-Garde-grève :

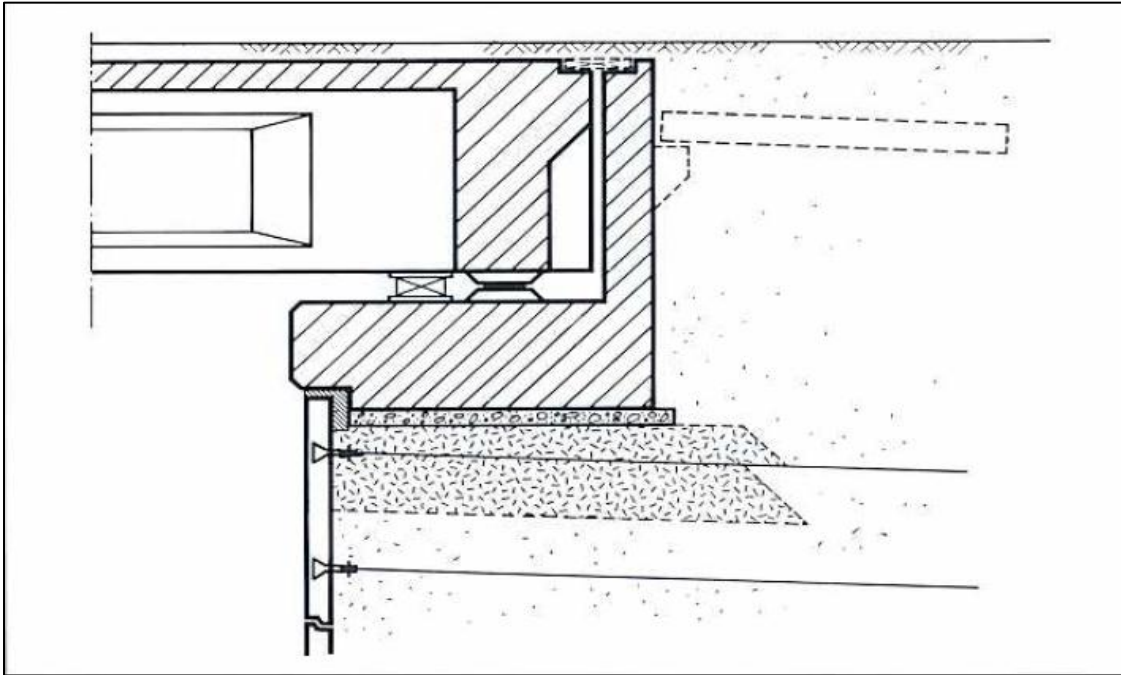
pour les ponts les plus importants (soit du fait de leur portée, soit du fait de l'intensité du trafic) le sommier comporte un mur garde-grève ou est scellée la partie fixe du joint de chaussée(figure II-6). Sur les autres, on peut faire l'économie de ce joint , le sommier est une simple semelle filante.les appareils d'appui y sont isolés du remblai par une retombée du tablier ou une bavette rapportée(figureII-6)



Figure(II-6) :détails types de sommiers d'appui.

c-dalle de transition :

les dalles de transition ne sont pas nécessaires sur les culées en terre armée .En effet.il y'a pas à craindre de tassement différentiel entre le remblai d'accès au pont et le tablier puisque celui-ci est porté par le remblai lui-même . tout au dalle courte avec les grande ponts à tassement du remblai sur la hauteur même du grade-grève (figure II-7)



Figure(II-7) :détails types d'un sommier de pont à poutres

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

INTRODUCTION :

L'interaction sol structure est importante pour le cas des structures devant résister aux séismes telles que les grands barrages, les ouvrage d'art, les bâtiments de grandes hauteurs,.. etc. L'énergie de vibration impartie sur structure par le séisme est partiellement dissipée à travers la dimension latérale du massif. Selon les caractéristiques relatives du système sol-structure-couche de fondation, cette perte d'énergie peut devenir importante pour charge sismique décisive.

Les progrès récents dans les domaines de l'informatique et du calcul numérique (méthode des éléments finis). Plusieurs méthodes existent pour prendre en compte l'ISS. La plus utilisée est la méthode des éléments finis traitant les problèmes au niveau local (lois constitutives en contraintes déformations). Elles semblent appropriées puisqu'elles permettent de définir précisément le comportement de tous les éléments (sol, fondation, structure ect....).

Ce chapitre présente le comportement des sols sous sollicitations sismiques et traite de l'interaction sol-structure dans lequel sont évoqués les principes de la modélisation de l'interaction sol-structure, le choix de la loi de comportement convenable, ainsi que les méthodes de résolution des équations de la discrétisation par élément finis.

III-1-notion d'interaction Sol-Structure(ISS) :

L'interaction structure-sol-structure (ISSS) est un champ interdisciplinaire, qui se trouve à l'intersection du comportement dynamique du sol, de la dynamique structurale, de la technologie de tremblement de terre, de la géophysique, de la géomécanique, des méthodes de science des matériaux, du calcul numériques et de diverses autres disciplines et techniques. Le succès de diverses méthodes de la modélisation de l'interaction sol-structure, des théories spécifiques et des installations expérimentales ont favorisé l'étude d'ISSS. La méthode des éléments finis (MEF) est bien adaptée aux problèmes de génie civil et principalement pour simuler des cas complexes en charge et en géométrie. Jusqu'ici, il y a beaucoup de programmes d'usage universel développés par des sociétés commerciales pour la recherche dans le domaine de technologie, FLAC, PLAXIS, spécifiquement employés fréquemment dans les études d'ISS.

III-2- comportement des sols sous sollicitations sismiques :

III-2-1 :comportement élastique du sol :

Pour de petites amplitudes de chargement autour d'un état de contrainte donné, on peut considérer que la relation contrainte-déformation du sol est élastique. L'un des moyens d'étude des chargements cycliques de faibles amplitudes consiste à étudier la propagation dans le sol des ondes de faible amplitude. Etant donné que la rigidité élastique est liée à la vitesse de propagation des ondes, les modules d'élasticité peuvent être déterminés en mesurant la vitesse de propagation des ondes.

$$\sigma_{ij} = F_{ij} \cdot \epsilon_{ijk} \quad (\text{III-1})$$

La fonction tensorielle (F_{ij}) traduit l'indépendance du comportement du matériau vis-à-vis de l'histoire des chargements auxquels le matériau a été soumis, c'est la fonction de la réponse élastique du matériau aux sollicitations.

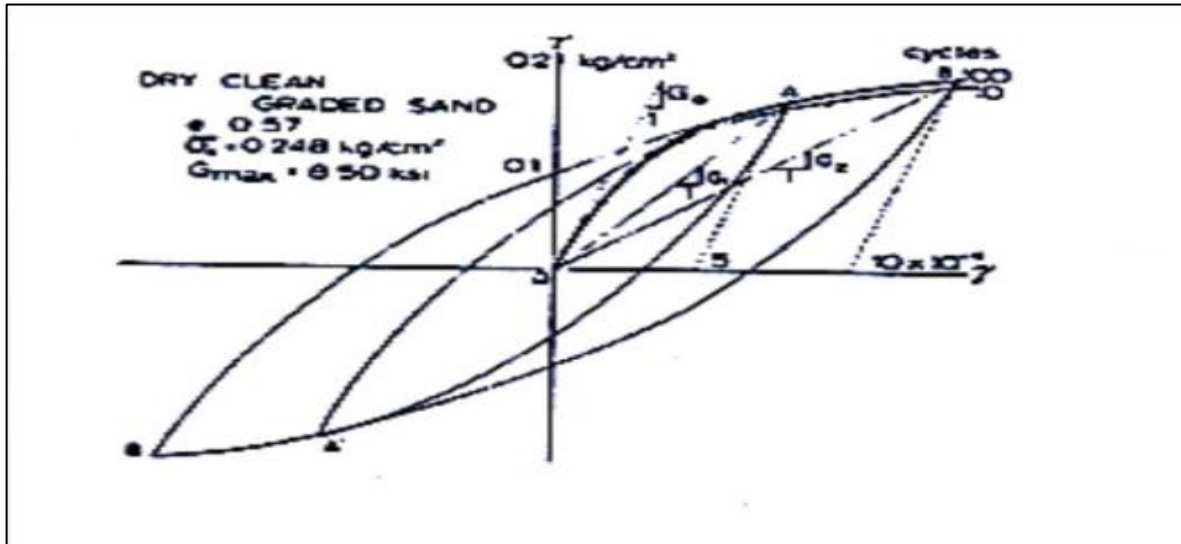
III-2-2- comportement élasto-plastique du sol :

Le modèle de comportement élastoplastique est caractérisé par l'apparition de déformations réversibles et de déformations irréversibles. Ce comportement laisse de côté, en ce qui concerne la plasticité, tout effet de vieillissement et de viscosité du matériau. En conséquence, la relation fonctionnelle entre le tenseur des contraintes et le tenseur des déformations est indépendante de l'incrément de temps pendant lequel la sollicitation a été appliquée.

La contrainte de cisaillement à la circonférence de contact est infinie. Donc, le glissement doit se produire même pour la plus petite force tangentielle. Mindlin [5] admet le glissement en limitant la contrainte de cisaillement à la résistance de frottement, donc le glissement se produit sur une partie de la surface de contact

III-2-3- description expérimentale :

Une description complète du comportement des sols est obtenue si, partant d'un état d'équilibre caractérisé par un champ de contraintes σ et un champ de déformation ϵ , il est possible de déterminer le nouvel état de déformation correspondant à l'application d'un incrément de contrainte $d\sigma$. La relation entre les champs de contrainte et de déformation constitue la loi de comportement.



fig(III-1) : Les boucles hystérétiques de contrainte-déformation (Hardin et Drnevich,1972).

Un essai cyclique

III-2-4-définition de la déformation élastique et de la déformation plastique :

La déformation plastique est la déformation irréversible d'un objet ; elle se produit par un réarrangement de la position relative des atomes, ou plus généralement des éléments constitutifs du matériau.

Lorsque l'on sollicite une pièce, un objet (on le tire, on le comprime, on le tord...), celui-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. Certains matériaux, dits fragiles, cassent dans ce mode de déformation si la sollicitation est trop forte.

Pour les matériaux dits ductiles, lorsque l'on augmente la sollicitation, on déforme de manière définitive la pièce ; lorsque l'on arrête la sollicitation, la pièce reste déformée. C'est par exemple le cas d'une petite cuillère qui a été tordue: on ne pourra jamais la redresser pour lui faire reprendre sa forme initiale.

La déformation élastique intervient pour les faibles sollicitations. Si l'on augmente les sollicitations, on change le mode de déformation :

- rupture (endommagement) pour les matériaux dits « fragiles » :
- déformation plastique (irréversible et non linéaire) puis rupture pour les matériaux dits « ductiles » ;

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

- éventuellement fluage pour les matériaux ductiles si la vitesse de déformation est lente ou la température élevée.

La contrainte délimitant le domaine élastique des autres domaines est appelée limite d'élasticité .

III-2-5-caractéristique dynamique des sols :

III-2-5-1-détermination de τ_{\max} :

On a vu que le module de cisaillement pour les petites déformations (G_0) et la résistance ultime de cisaillement (τ_{\max}) sont nécessaires pour évaluer la courbe de contrainte-déformation de cisaillement.

$$\tau_{\max} = \left(\left| \left(\frac{1+K_0}{2} \right) \bar{\sigma}_v \sin \phi' + C' \cos \phi' \right|^2 - \left| \left(\frac{1-K_0}{2} \right) \bar{\sigma}_v \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-2})$$

Ou ($\bar{\sigma}_v$) la contrainte verticale effective, (ϕ') est l'angle de frottement interne effectif, c' est la cohésion effective et (K) est le coefficient de pression des terres au repos. L'équation (3-18) est basée sur la théorie de la rupture de Mohr-Coulomb. Il faut modifier la valeur obtenue par (3-18) afin de tenir compte de l'effet de la vitesse de chargement. Les résultats des expériences faites à l'aide des différents appareils (Triaxial, cisaillement simple, etc...) nous donnent :

$$(\tau_{\max})_{\text{dynamique}} = (\tau_{\max})_{\text{statique}} \times (\text{facteur de taux de déformation})$$

III-2-5-2-Module de cisaillement maximum :

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

$$G_{\max} = K P_a F(e) \left[\frac{\sigma_m'}{P_a} \right]^n \quad (\text{III-3})$$

$$G_{\max} = K P_a (OCR)^K F(e) \left[\frac{\sigma_m'}{P_a} \right]^n \quad (\text{III-4})$$

K : Paramètre fonction de l'indice de plasticité.

P_a : Pression atmosphérique.

σ_m' : Contrainte moyenne effective.

$F(e)$: Fonction qui dépend de l'indice des vides (e) du sol, propose par Hardin 1978.

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

$$F(e) = 0.3 + 0.7 e^2 \text{ avec } 0.4 < e < 1.2$$

OCR : Rapport de sur consolidation.

III-2-5-3- Amortissement hystérétique dans le sol :

Le mouvement des structures soumises à des forces ou des mouvements imposés, variables au cours du temps, dépend, en particulier des propriétés d'amortissement, c'est-à-dire de la dissipation

d'énergie dans les matériaux constitutifs de la structure et dans les liaisons des différents éléments de structure entre eux et avec le milieu environnant. L'amortissement hystérétique (dit aussi "amortissement structural") : énergie dissipée proportionnelle au déplacement telle que la force d'amortissement est de signe opposée à celui de la vitesse.

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 III.1).

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	$31 - (3 - 0.03f (\sigma' m/Pa)^{0.5} / 1.5f)^{0.5} - 1.5 \log N$

Tableau (III-1) : coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).

N : Nombre de cycle de chargement.

m : Contrainte moyenne effective (Kg/cm²).

f : Fréquence moyenne du chargement(HZ).

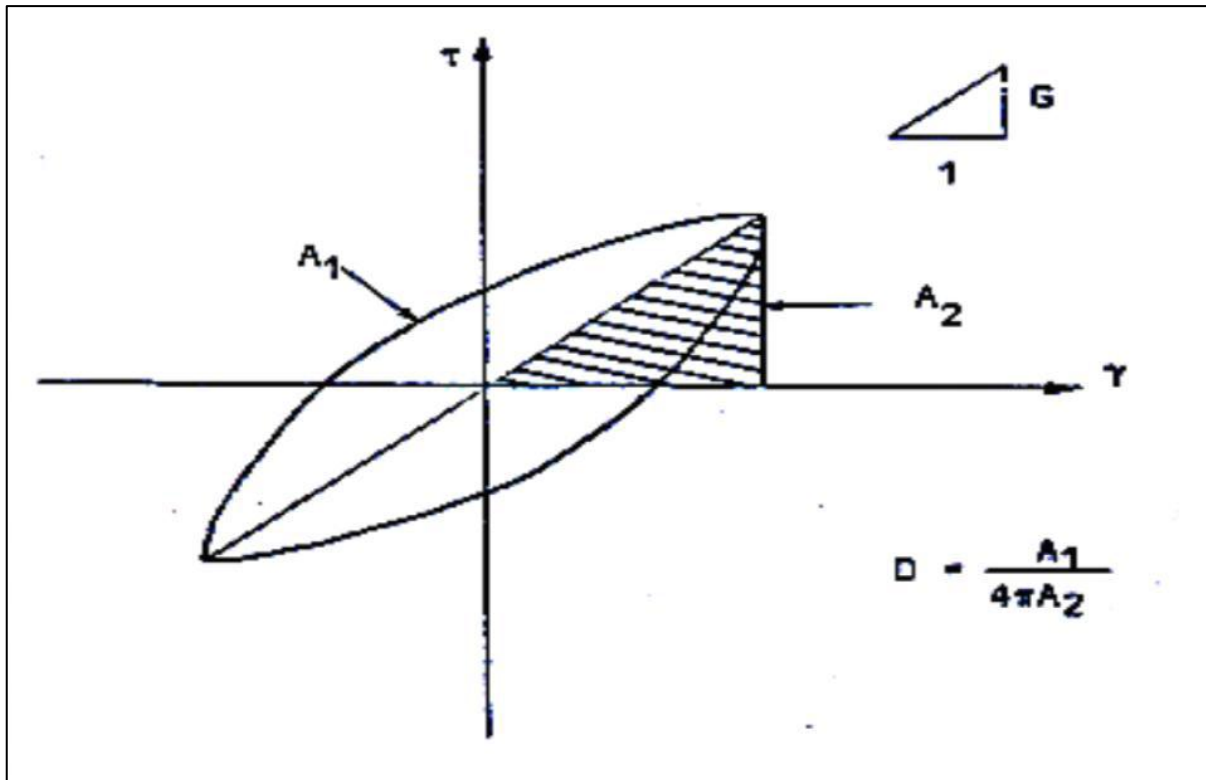


Fig. (III-2) : Définition du module, de l'amortissement et de l'amplitude de déformation.

III-2-6- Lois de comportement :

III-2-6-1- loi élastique linéaire :

La loi élastique linéaire dans le cas simplifié d'un matériau homogène isotrope est définie par les deux paramètres indépendants que sont le module de Young E , et le coefficient de Poisson ν . Dans le cas où on veut tenir compte de la viscosité des matériaux, le coefficient d'amortissement λ intervient également.

III-2-6-2- Méthode équivalente linéaire :

L'approche linéaire-équivalente développée par Seed et Idriss (1970) utilise le principe de l'analyse linéaire dans un système multicouche présenté à la section précédente en intégrant..

Les propriétés non-linéaires des sols de réduction du module de cisaillement et de l'augmentation du taux d'amortissement avec la déformation. Cette approche utilise l'hypothèse que le taux de déformation effectif tout au long du séisme est une fraction de la déformation maximale enregistrée (généralement 65%). Il s'agit d'une méthode itérative.

Une première itération est faite avec une valeur d'amortissement et de réduction du module de cisaillement initiale. Après qu'un premier calcul linéaire soit terminé, une nouvelle valeur d'amortissement et de réduction du module de cisaillement (module sécant) est déterminée selon des courbes pré-établies selon la nature des sols, puis le calcul est refait.

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

Un critère de convergence doit être posé, habituellement sur l'écart entre la déformation effective calculée (la nonne générale est de 5% entre 2 itérations successives). Si ce critère de convergence est respecté, le second calcul est considéré comme correct. Sinon, un autre calcul doit être effectué avec la seconde valeur d'amortissement et de réduction de module de cisaillement.

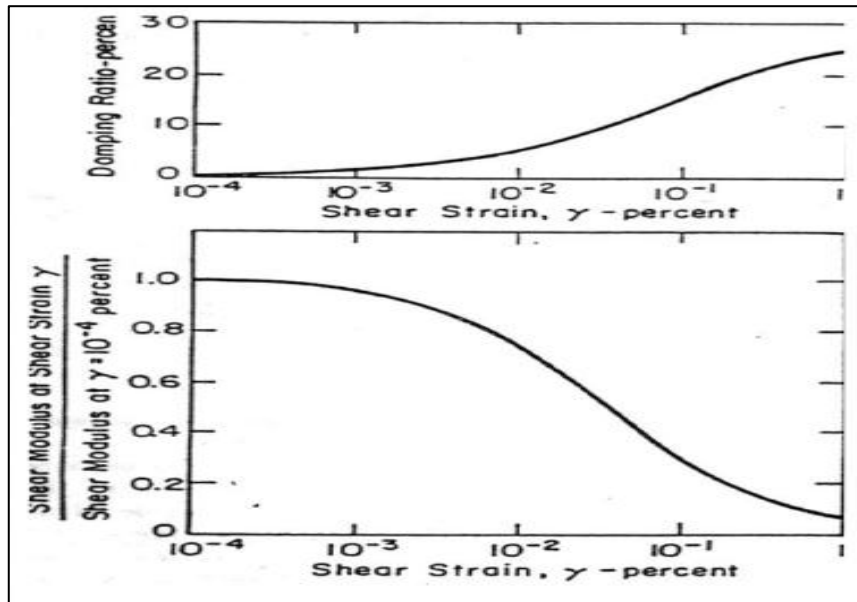


figure (III-3):courbes moyennes des modules de cisaillement et des coefficients d'amortissement des sols.

III-2-6-3-loi élastique non linéaire :

On peut diviser les lois non linéaires en deux catégories :

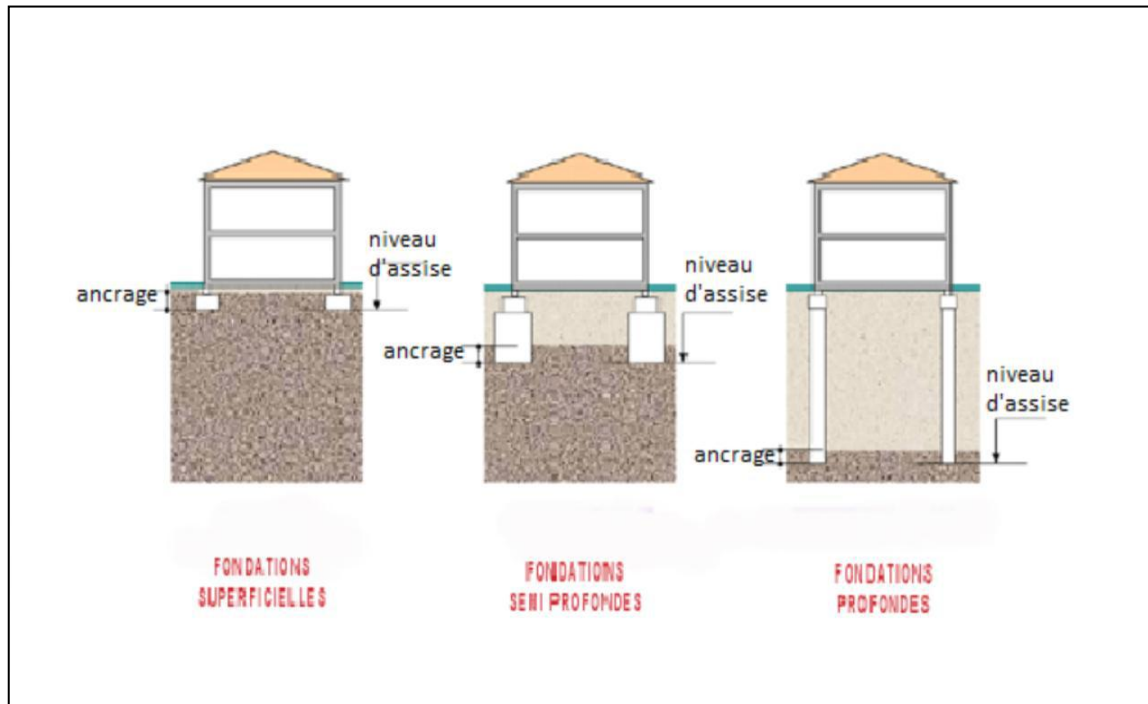
- Les lois empiriques fondées sur des essais relativement simples de laboratoire,
- Les lois fondées sur la théorie de la plasticité ou de l'élastoplasticité .Ces lois ont l'avantage d'être plus rigoureuses et de permettre un traitement plus logique des problèmes bidimensionnels et tridimensionnels, mais leurs paramètres sont souvent très difficiles à définir à l'aide des essais simples de laboratoire .Beaucoup de ces lois sont applicables pour les chargements monotones ou pour l'étude des conditions de la rupture sous un chargement rapide ,mais elles ne sont pas valables pour le chargement cyclique .

III-2-7-COMPORTEMENT SOL-STRUCTURE :

Fonder une construction est une des plus anciennes activités géotechnique du bâtiment et des travaux publics, et le problème de géotechnique le plus courant encore aujourd'hui. Selon la capacité du sol ou de la roche à supporter les structures, les fondations peuvent être superficielles ou profondes. Figure (III-4). Ce type de fondation permet de reporter les charges dues à

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

l'ouvrage qu'elles supportent. Sur des couches de sol situées à une profondeur variée de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.



Figure(III-4) : Types des fondations.

Lorsqu'une structure est sujette à l'action d'un tremblement de terre, Elle répond en se déformant la réaction exercent sur la zone de contact entre la fondation et le sol, dues à la déformation de la structure modifie à son tour la réponse du sol. Cette déformation du sol au niveau de la fondation effectue également les mouvements de la structure. On appelle ce phénomène de « l'interaction de sol-structure ».

III-3-MODALISATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

III-3-1-les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structures :

III-3-1-1- Interaction cinématique et interaction inertielle :

Interaction cinématique : modification des ondes due à la présence de la fondation (par sa raideur) elle résulte de la différence de raideur pour la partie en terre , entre le sol et la (structure bâtiment fictif sans masse).

Importante pour les structures raides enterrées dans un sol mou. négligeable pour les fondations superficielles ,avec des ondes à propagation verticale.-interaction inertielle : Elle résulte de la différence de masse entre la structure et le sol : toujours présente.

III-3-1-2-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

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

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.

III-3-1-3-La liquéfaction :

La liquéfaction du sol est un phénomène géologique généralement brutal et temporaire par lequel un sol saturé en eau perd une partie ou la totalité de sa portance, permettant ainsi l'enfoncement des objets lourds situés en surface. Ce phénomène se produit en présence d'eau souterraine remontant en surface au point de faire perdre la cohésion des particules du sol qui se comporte alors comme une roche meuble[6]. Une fois les conditions propices à la liquéfaction du sol disparues, celui-ci expulse une partie de l'eau qu'il contient et retrouve ainsi sa consistance. Certains séismes, par les vibrations qu'ils provoquent, entraînent de tels phénomènes allant parfois jusqu'à l'expulsion brutale de jets d'eau en dehors du sol et l'enfoncement de bâtiments sur plusieurs mètres d'épaisseur. Les sables mouvants sont un type particulier de liquéfaction du sol.

III-3-2-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 fondation 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 degré 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.

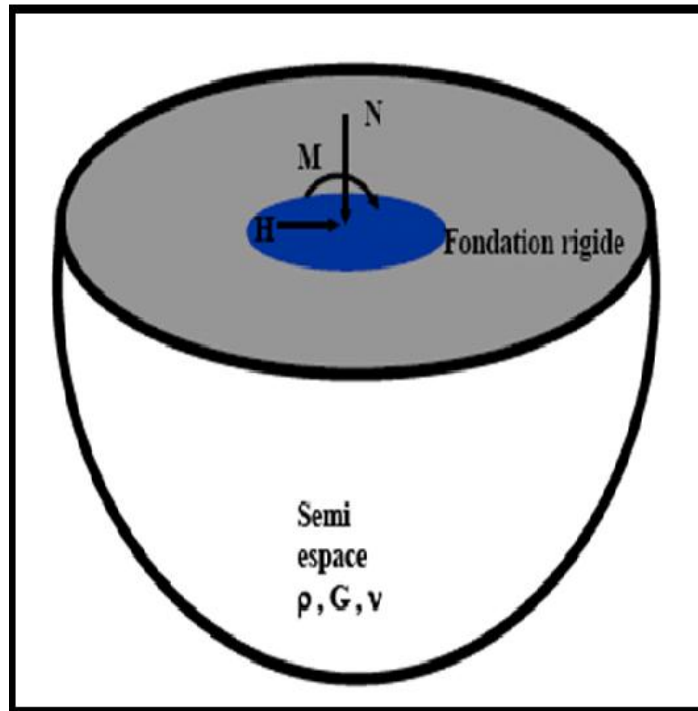


Figure (III-5) : Impédance d'une fondation superficielle circulaire

III-3-3- 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 élément fini 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(III-6a) qui schématise un ensemble sol structure.

L'équation du mouvement s'écrit

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{Q_f\} \quad (\text{III-5})$$

Avec

- ✓ M : matrice de masse ;
- ✓ C : matrice d'amortissement du système ;
- ✓ K : matrice de raideur du système;
- ✓ Q : le vecteur de charge.

Comme la source de mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge $\{Q_f\}$ n'a de valeurs non nulles que sur la frontière extérieure du modèle. Le déplacement total de la structure est défini par :

$$\{u\} = \{u_i\} + \{u_f\} \quad (III-6)$$

On décompose le problème en deux sous problèmes :

Problème de réponse du sol en champ libre figure (III-6b)

$$[M_f]\{\ddot{u}_f\} + [C_f]\{\dot{u}_f\} + [K_f]\{u_f\} = \{Q_f\} \quad (III-7)$$

Problème source figure (III-6c)

$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K]\{u_i\} = \{Q_i\} \quad (III-8)$$

Tel que $\{Q_i\}$ est donné par

$$\{Q_i\} = [[M] - [M_f]]\{\ddot{u}_f\} + [[C] - [C_f]]\{\dot{u}_f\} + [[K] - [K_f]]\{u_f\} \quad (III-9)$$

A partir de cette dernière équation, on conclue qu'il y a interaction dès qu'il y a différence de masse ou de raideur entre le sol et la structure.

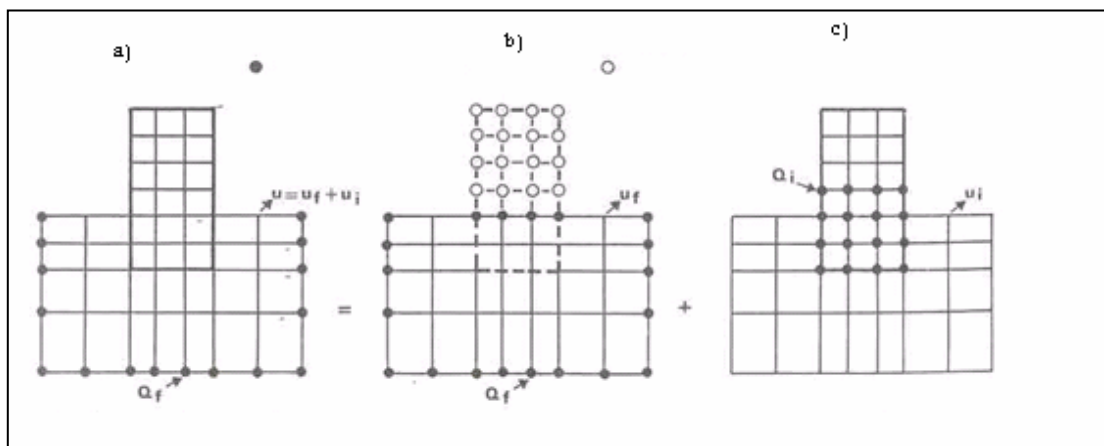


Figure (III-6): Décomposition du problème d'interaction sol structure

III-3-4-Les différentes méthode pour prendre en compte L'ISS :

Différentes méthodes existent pour prendre en compte l'ISS. Elles sont décrites et détaillées dans [7, 8,9] ou. Nous allons les présenter brièvement dans ce paragraphe.

III-3-4-1-Les méthode directes (Méthodes globales) :

La méthode consiste à résoudre en une seule étape l'équation dynamique

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -M\ddot{u}_g \quad (III-10)$$

Où:

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

* u : représente le vecteur des déplacements relatifs du système par rapport à l'assise;

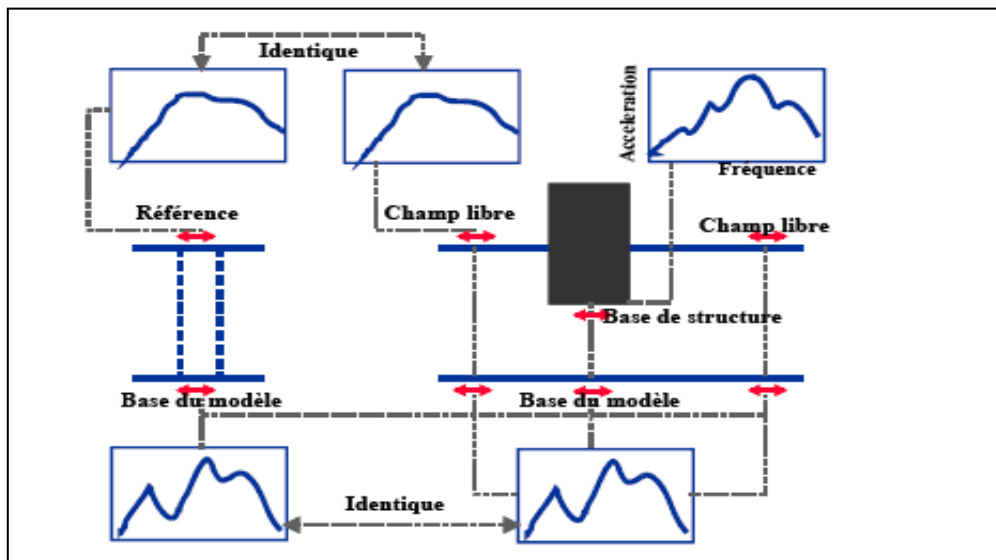
* I : un vecteur unité, donnant la direction de la sollicitation u_g ;

* M, K, C : les matrices de masse, de raideur et d'amortissement du système.

Généralement la technique de résolution est basée sur la méthode des éléments finis qui présente la plus grande flexibilité et permet en outre la prise en compte de phénomènes non linéaires, tel le comportement anélastique des matériaux, le décollement ou le glissement des fondations.

La problématique de la résolution par une méthode globale est illustrée sur la figure (III.7):

- Le mouvement sismique de dimensionnement est connu (spécifié) à la surface du sol, en champ libre;
- Le mouvement est calculé à la base inférieure du modèle, choisie à une profondeur suffisante pour que la présence d'une structure en surface n'affecte pas ce mouvement; cette étape est connue sous le nom de déconvolution du mouvement sismique;
- Le mouvement déconvolué est imposé uniformément à la base du système sol structure et la réponse est calculée par résolution de l'équation (III-10).



Figure(III-7): Représentation schématique d'un calcul interaction sol-structure méthode globale.

Les méthodes globales ne font intervenir aucune notion de superposition et sont donc théoriquement adaptées aux problèmes non linéaires. Un des avantages principaux des méthodes globales est leur capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès, soit des variations des caractéristiques de sol provenant de non linéarités. L'expérience

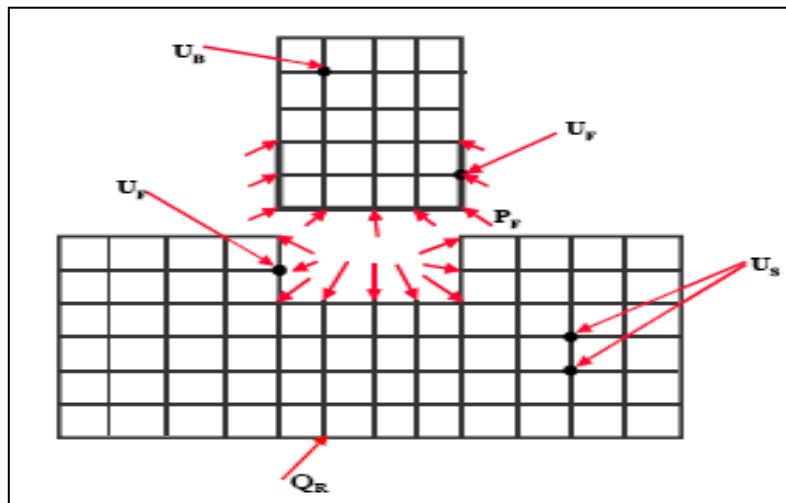
CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

montre qu'elles sont généralement mieux adaptées et plus faciles de mise en œuvre pour l'étude d'ouvrages enterrés.

III-3-4-2-La méthode des sous –structure :

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[10].

Pour des raisons évidentes, les sous structures envisagées sont constituées d'une part par le sol et d'autre part par la structure, comme indiqué sur la figure (III-8) 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.



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

Les équations des différents sous systèmes s'écrivent
structure

$$\begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_B \\ \ddot{u}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BF} \\ K_{FB} & K_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_B \\ u_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_F \end{Bmatrix} \quad (\text{III-11})$$

Sol

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_F \\ \ddot{u}_S \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_F \\ u_S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

On a désigné par l'indice B les déplacements de la structure, l'indice F ceux de l'interface sol structure, et l'indice S ceux du sol. De plus, les équations ont été

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

partitionnées de façon à isoler dans chaque sous système les équations faisant intervenir les degrés de liberté communs: ces équations sont repérées par les indices FB Lorsqu'elles appartiennent au sous système structure et par les indices FS lorsqu'elles appartiennent au sous système sol. Enfin on a tenu compte des conditions de compatibilité exprimées ci dessus.

Considérons maintenant le cas du sous système sol en l'absence de la structure; son équation d'équilibre s'écrit de façon analogue à l'équation (III-9):

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F^* \\ \ddot{\mathbf{u}}_S^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_F^* \\ \mathbf{u}_S^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

- \mathbf{u}^* : le déplacement lié à l'interaction cinématique;
- \mathbf{u}^i : le déplacement d'interaction défini par :

$$\mathbf{u}^i = \mathbf{u} - \mathbf{u}^* \quad (\text{III-14})$$

Par soustraction des équations (III-13) et (III-14) il vient :

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F^i \\ \ddot{\mathbf{u}}_S^i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_F^i \\ \mathbf{u}_S^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\mathbf{P}_F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

Passage dans le domaine fréquentiel on utilise la transformation de Fourier.

$$\{\mathbf{u}\} = \sum_n [\tilde{\mathbf{u}}(\omega_n) e^{i\omega_n t}] \quad (\text{III-16})$$

$$[-\omega^2 [M] + [K]] \cdot [\tilde{\mathbf{u}}^i(\omega)] = -\{\tilde{\mathbf{P}}(\omega)\} \quad (\text{III-17})$$

Le système d'équations (III-16) peut être utilisé pour éliminer tous les degrés de liberté qui n'appartiennent pas à l'interface sol structure. Ce processus appelé *condensation* permet de relier les déplacements de l'interface aux réactions en ces nœuds :

$$\tilde{\mathbf{S}}_F(\omega) \tilde{\mathbf{u}}_F^i(\omega) = -\tilde{\mathbf{P}}_F(\omega) \quad (\text{III-18})$$

Avec

- ✓ $\tilde{\mathbf{S}}_F$: la matrice d'impédance de la fondation ;
- ✓ $\tilde{\mathbf{P}}_F$: la réaction du sol.

On notera que les quantités intervenant dans l'équation (III-19), et en particulier \mathbf{S}_F dépendent de la fréquence.

À ce stade, la réaction du sol $\tilde{\mathbf{P}}_F(\omega)$ est inconnue; on élimine cette grandeur en reportant (III-19) dans (III-12) et en tenant compte de (III-15), l'équation d'équilibre de la structure devient:

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{FB} \\ K_{FB} & K_{FF} + \tilde{S}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{S}_F \tilde{u}_F^* \end{Bmatrix} \quad (\text{III-19})$$

Si la fondation est rigide le champ des déplacements de celle-ci peut s'exprimer en termes d'un mouvement de corps rigide défini par rapport à un point quelconque, par exemple son centre :

$$\tilde{u}_F = T \cdot \tilde{u}_0 \quad (\text{III-20})$$

- ✓ T : la matrice de transformation ;
- ✓ \tilde{u}_0 : Le vecteur des déplacements et rotations du centre de la fondation.

De même, les forces nodales $\tilde{P}_F(\omega)$ sont reliées aux forces et moments \tilde{P}_0 appliqués à la fondation en son centre:

$$\tilde{P}_0 = T^T \cdot \tilde{P}_F \quad (\text{III-21})$$

Avec ces définitions l'équation (III-14) prend la forme :

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{FB} T \\ T^T K_{FB} & T^T (K_{FF} + \tilde{S}_F) T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ T^T \tilde{S}_F \tilde{u}_F^* \end{Bmatrix} \quad (\text{III-22})$$

La matrice $K = T^T S_F T$ représente la matrice d'impédance de la fondation rigide. Notant que $T^T S_F \tilde{u}_F^* = K T^T \tilde{u}_F^*$ l'équation précédente représente le mouvement d'une structure reliée à un support par la matrice d'impédance K^* et soumise à un mouvement de ce support défini par $T^T \tilde{u}_F^*$ qui rappelle le représente le mouvement d'interaction cinématique.

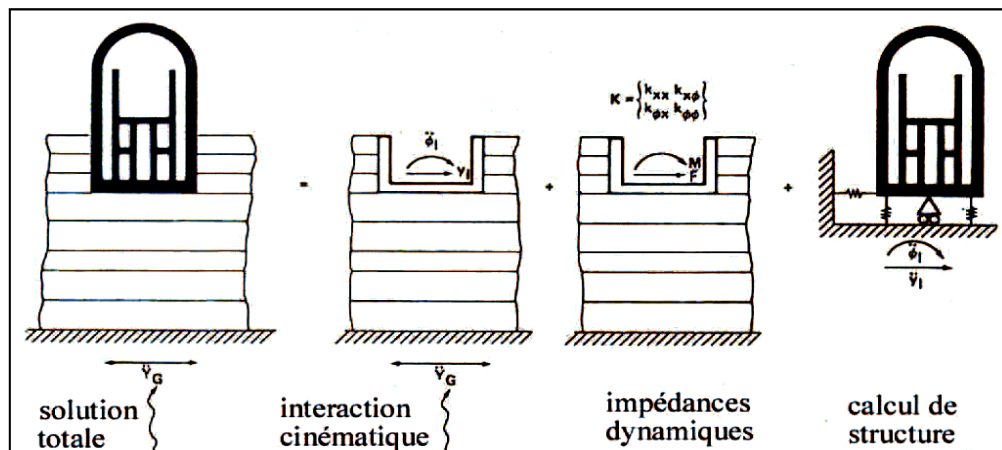


Figure (III-9) : Principe de superposition de Kausel

Ainsi, dans l'hypothèse d'une fondation rigide, il est pertinent de scinder le problème global en trois sous problèmes :

- Détermination du mouvement d'une fondation rigide sans masse soumise à la sollicitation sismique ;

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

- Détermination de la matrice d'impédance de la fondation ;
- Calcul de la réponse dynamique de la structure reliée à la matrice d'impédance et sujette à son support au mouvement d'interaction cinématique.

Dans la mesure où la fondation est parfaitement rigide, cette démarche est rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système global en une étape. Cette décomposition est connue sous le nom de théorème de superposition de Kausel et est illustrée. Son intérêt apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

Le problème de diffraction (étape a) existe toujours sauf pour une structure fondée en surface et soumise à la propagation verticale d'ondes de volume; dans ce cas, la résolution de l'étape (a) est identique à celle de la réponse d'un profil de sol en champ libre puisque l'interaction cinématique est nulle. La solution à la deuxième étape peut être évitée, pour certaines configurations, en utilisant les résultats de fonctions d'impédances publiés dans la littérature. La troisième étape est, en tout état de cause, indispensable; elle est cependant plus simple et plus familière aux ingénieurs car elle procède de l'analyse dynamique classique des structures.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

INTRODUCTION

Le code de calcul par éléments finis PLAXIS a été développé en premier lieu à l'Université Technologique de Delft (TUD) en 1987. Dans les années suivantes, ce code, initialement réalisé pour analyser les digues en sols mous (argileux), a vu un champ d'application se développer largement afin de pouvoir traiter différents types de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D.

Cette application numérique a pour but d'étudier l'interaction entre une fondation superficielle et le sol d'assise d'une couche de sol homogène. Les calculs ont été effectués à l'aide du code de plaxis. On s'est restreint au comportement du sol de type élastique linéaire de type drainé vu que les sollicitations sismiques sont très brèves, Dans cette simulation numérique, il est uestion e déterminer, les contraintes, les déformations ,et l'accélération au niveau du massif de sol-fondation, et des éléments de la structure (l'influence da la profondeur)

IV-1-LE CODE PLAXIS:

IV-1-2-L'INTERFACE GRAPHIQUE DE CODE PLAXIS :

Le code éléments finis Plaxis représente certainement un optimum actuel sur le plan scientifique et pratique. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élastoplasticité (5paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles, doté des méthodes de résolution, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique. Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure figure(IV-1). Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller au but (prévoir le comportement d'un ouvrage).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

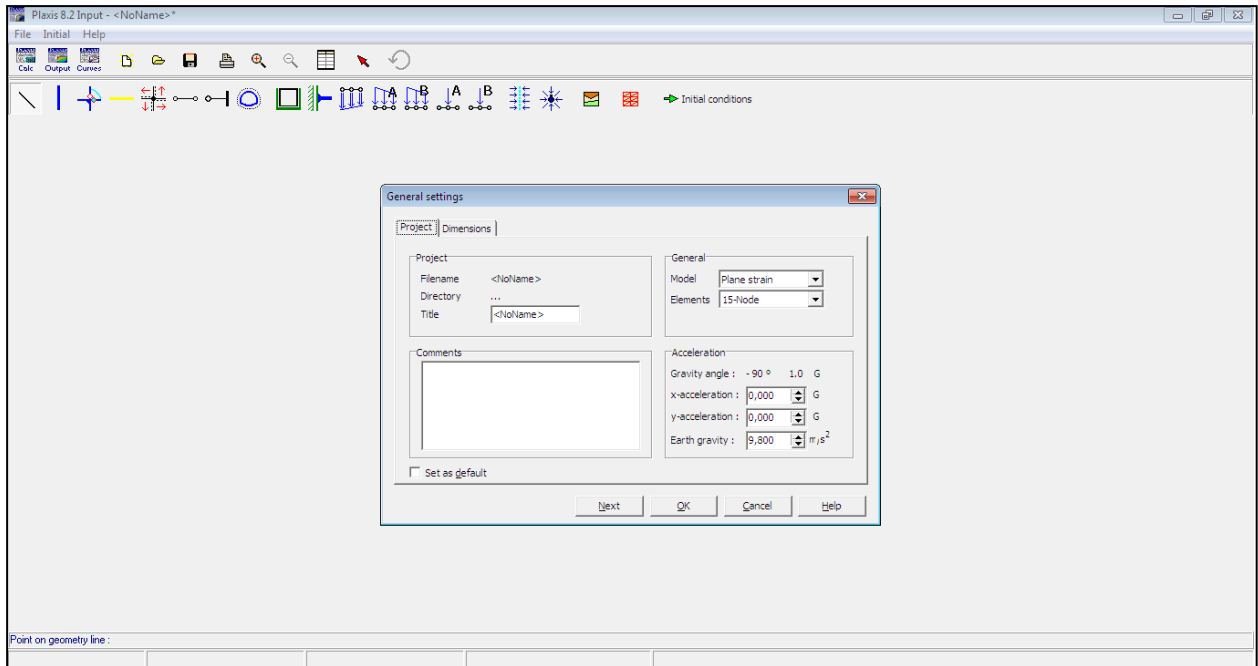
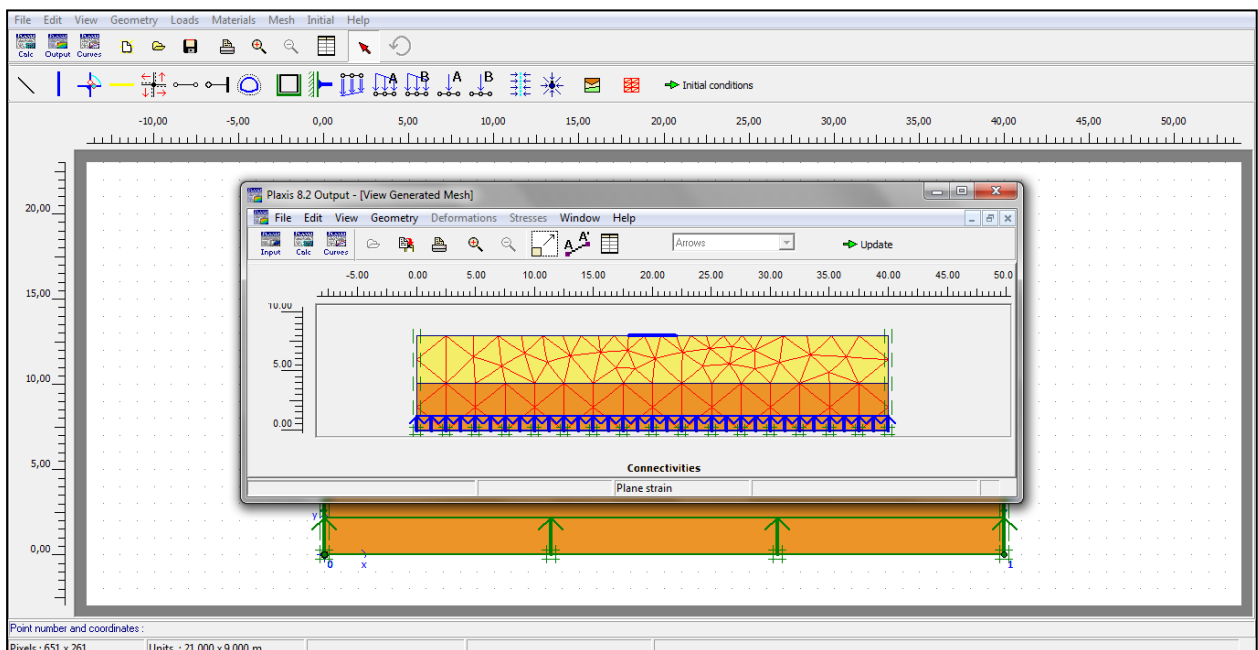


Figure (IV-1) : interface utilisateur pour l'entrée des données.

a- Le Maillage:

L'opérateur peut bien entendu de spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importe de détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds, avec un contrôle permanent à l'écran figure(IV-2).



Figure(IV-2) : Maillage

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

b-Les conditions aux limites en déplacement:

si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra spécifier les subtilités d'une manière précise (le vecteur déplacement est nul à la base du domaine étudié, et le vecteur déplacement horizontal est nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec un contrôle immédiat du résultat à l'écran.

c- Les 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 ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger des équilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option K_0 est particulièrement intéressante dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale figure(IV-3).

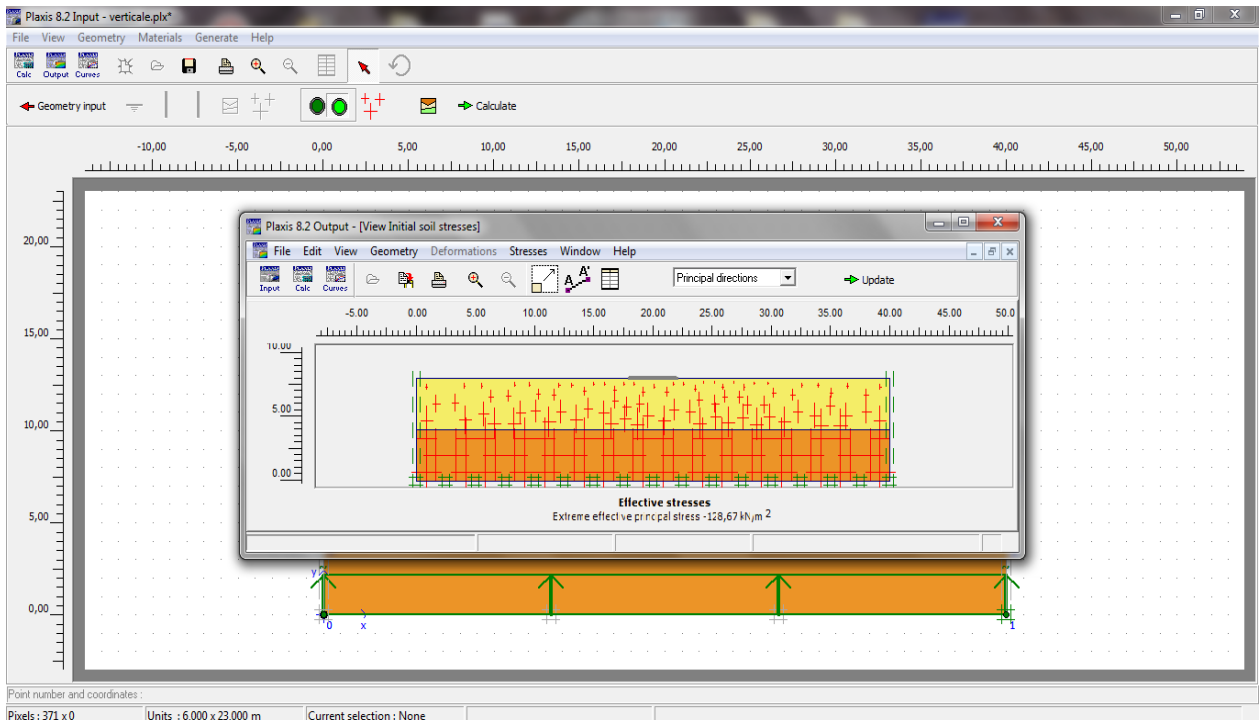


Figure (IV-3) : Contraintes initiales (condition K_0).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

d-Les pressions interstitielles:

ont été l'objet d'un soin particulier dans Plaxis pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles, Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine) figure(IV-4).

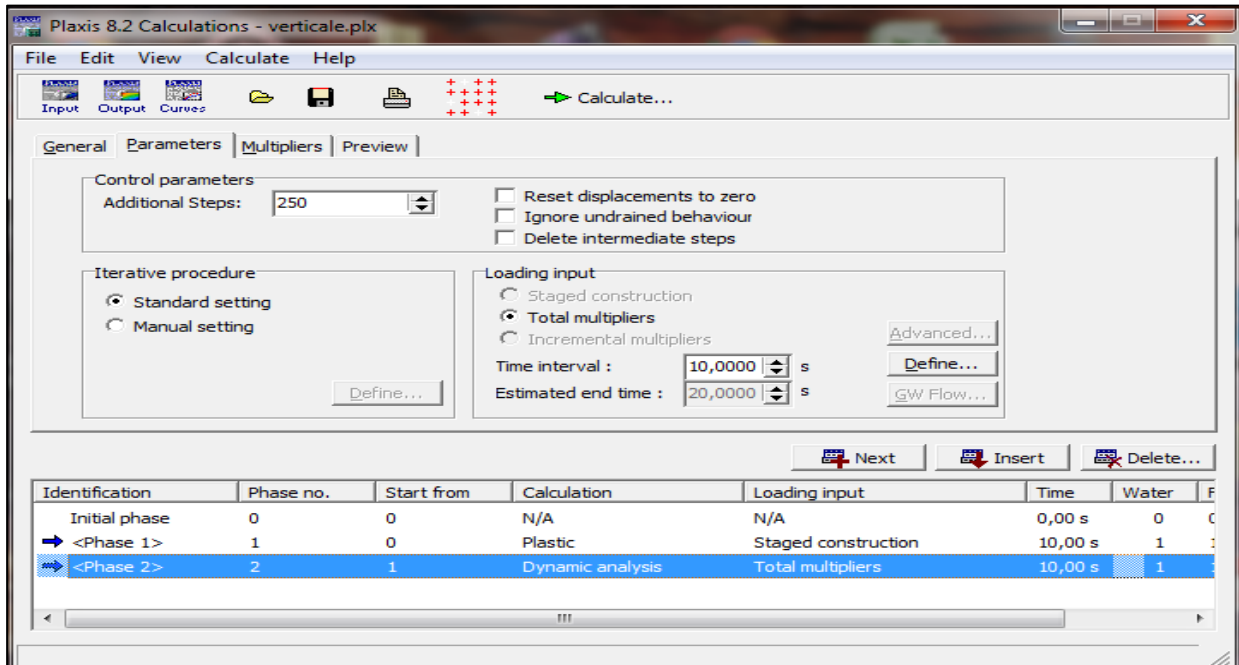


Figure (IV-4) : Option pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.

e-Le coefficient de sécurité:

c'est une notation très importante en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une qualité considérable de données, supposant une réduction proportionnelle de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue pas un état réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis. Un calcul par éléments finis fournit une masse imposante de résultats ; résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit figure(IV 5.6). L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect. c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées : Option de « Output ».

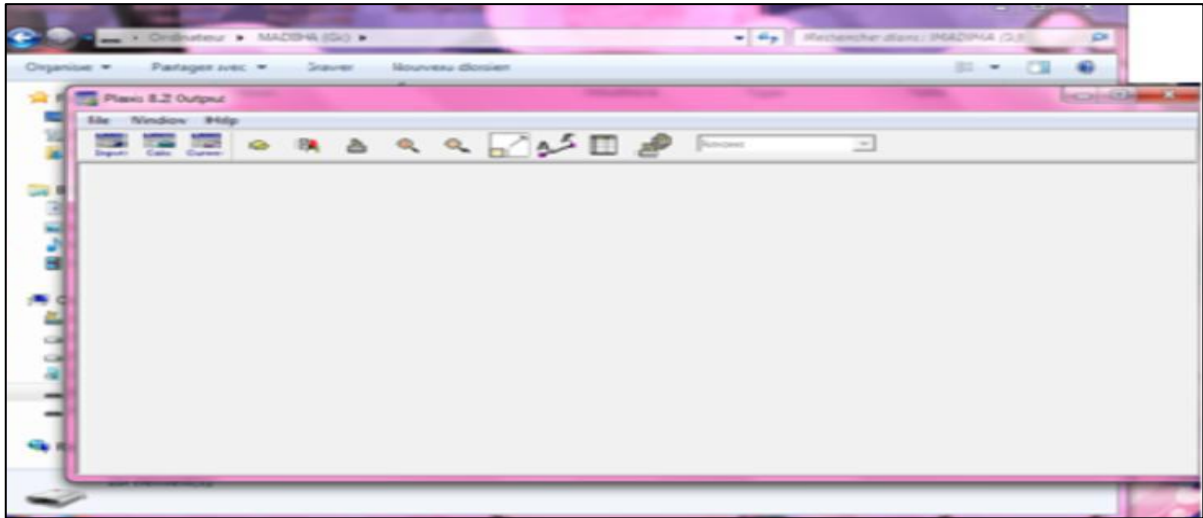


Figure (IV-5) : option de « Output ».

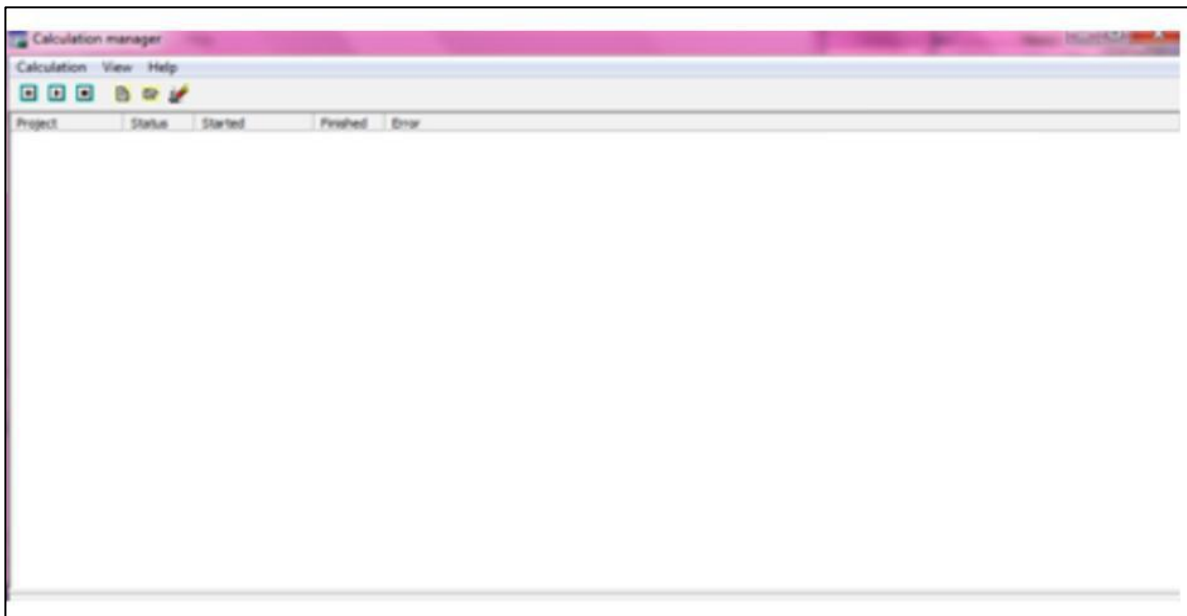


Figure (IV-6) : option de « Viewcalculation ».

IV-1-3- MODELES DE COMPORTEMENT IMPLEMENTEES DANS PLAXIS :

IV-1-3-Modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique linéaire est le modèle le plus simple. Il se base sur l'élasticité linéaire de Hooke. Selon le type d'analyse choisi, le modèle relie les contraintes totales ou effectives aux déformations. La relation contrainte-déformation s'exprime en fonction de deux paramètres : le

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

module d'Young, E et le coefficient de Poisson, ν (ou le module de compression, K et le module de cisaillement, G).

Ces quatre paramètres sont reliés entre eux par les deux expressions suivant :

$$K = \frac{E}{3(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots(IV-1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots(IV-2)$$

La courbe effort-déplacement du comportement élastique parfaitement plastique que l'on trouve est présentée sur la figure (IV-7).

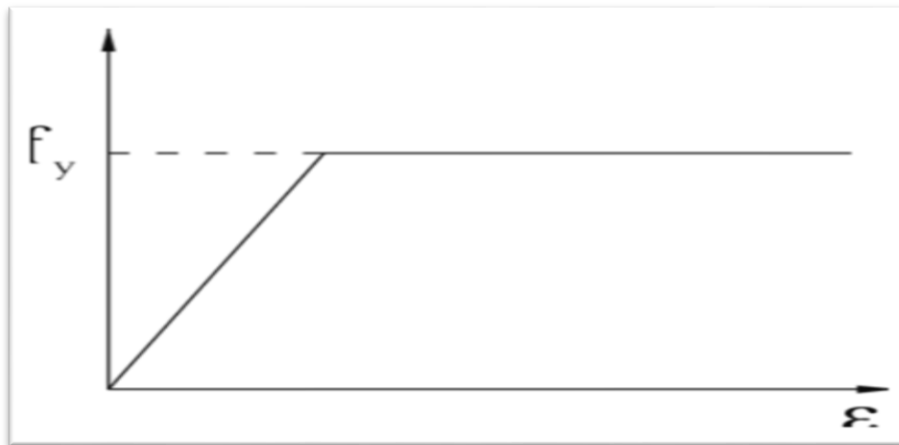
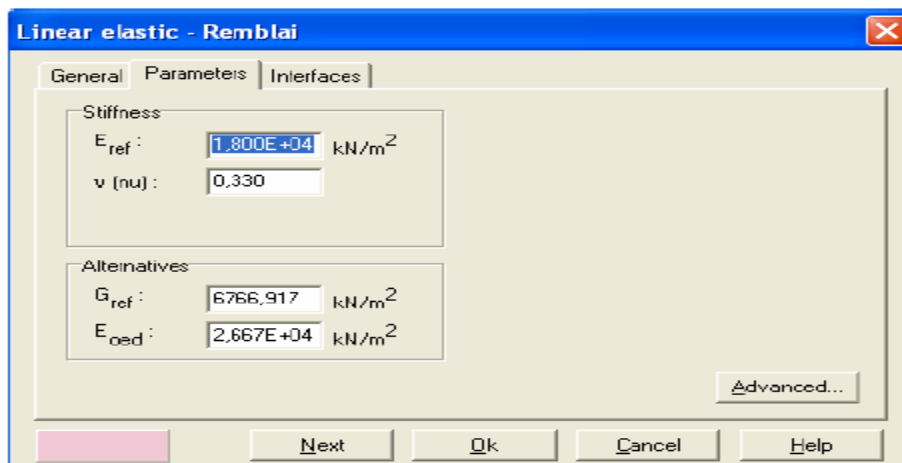


Figure (IV-7) : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.



Figure(IV-8) : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

IV-1-3-2-Modèle élastoplastique :

Le comportement élastoplastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil S_0 (Figure IV-9)

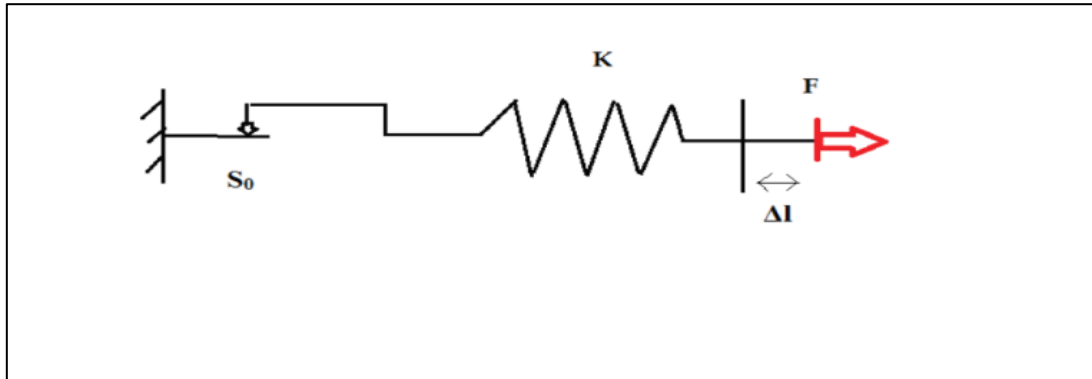
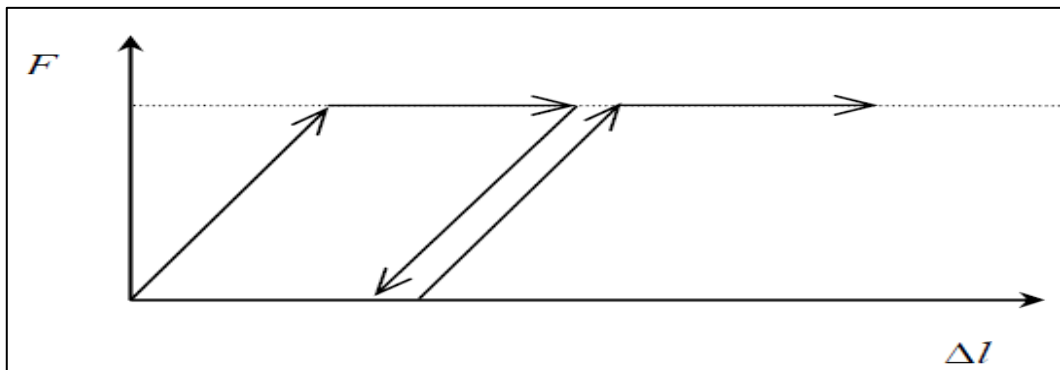


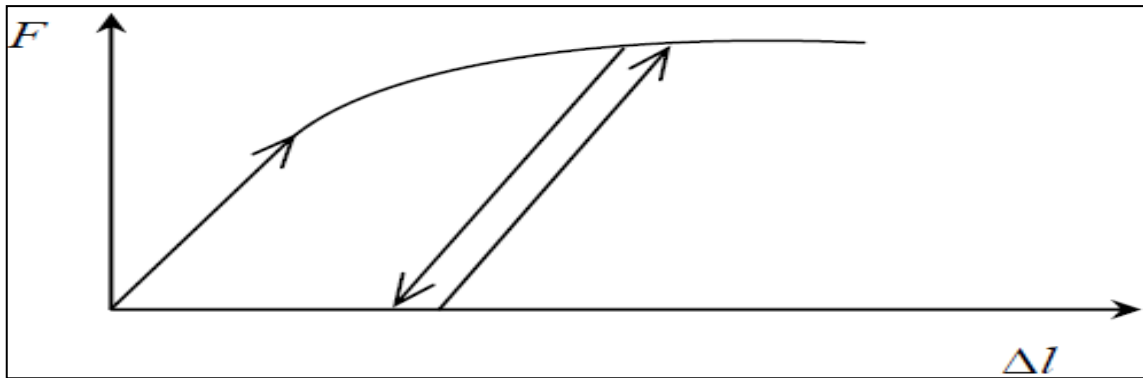
Figure (IV-9): modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure (IV-10)



Figure(IV-10) :Représentation du comportement élastique parfaitement plastique

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée. Le type de comportement représenté par les figures (IV-9 et IV-10) est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. La figure (4-11) représente un comportement élastique-plastique avec écrouissage.



Figure(IV-11) : Représentation du comportement élastoplastique avec écouissage.

Le modèle bien connu de Mohr-coulomb est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres : le module d'Young E , le coefficient de poisson ν , la cohésion c , l'angle de frottement φ , et l'angle de dilatation ψ . Figure (IV-12)

Figure (IV-12) : Fenêtre des paramètres de Mohr-coulomb.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Paramètre de Mohr-coulomb :

c : cohésion (effective). $[KN / m^2]$

φ : angle de frottement effectif. $[^\circ]$

ψ : angle de dilatance. $[^\circ]$

Paramètre de rigidité :

Eocd : Module tangent dans un essai oedométrique ; $[KN / m^2]$

IV-1-4-LE MODULE DYNAMIQUE DU CODE PLAXIS:

La plaxis V8 nous permet d'étudier un problème dynamique. La charge dynamique est généralement appliquée le long du substratum.

Cette action peut être représentée par une force vitesse, ou une accélération variable en fonction du temps. Dans le programme Input ; il spécifier quel est le système de chargement qu'on va choisir pour représenter l'action dynamique par l'option de (set dynamique load system).

Dans le programme de calcul, on peut considérer soit une sollicitation harmonique figure (IV-13), soit une sollicitation sismique figure (IV-14).

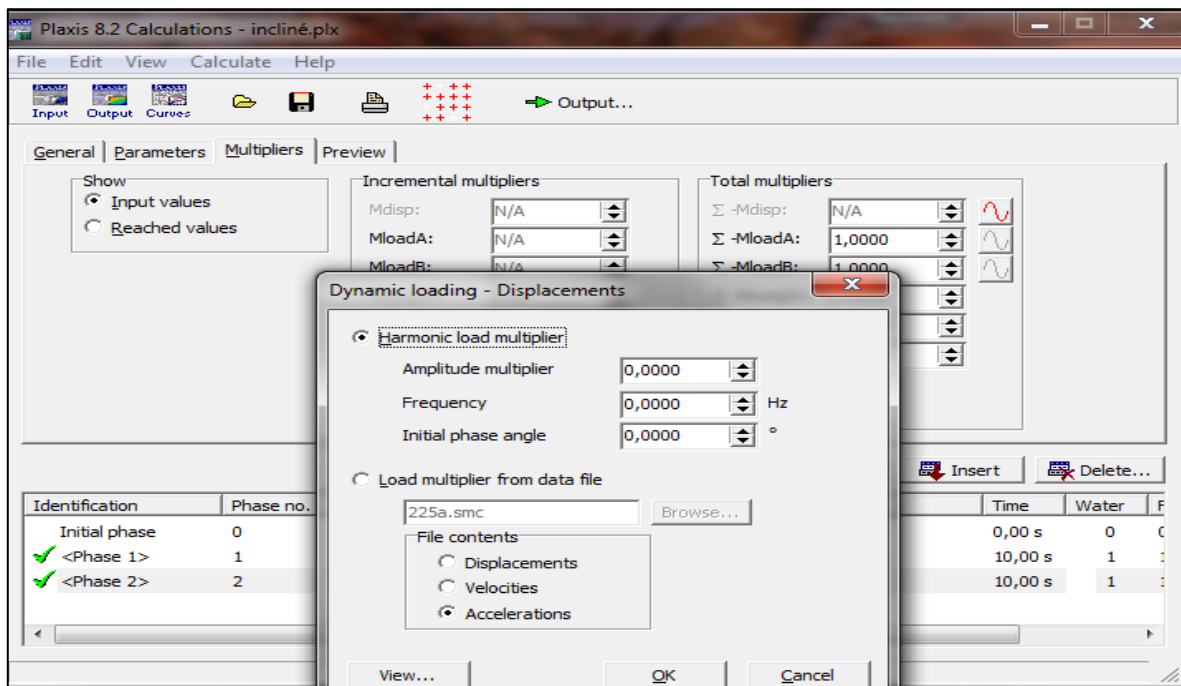


Figure (IV-13) : Fenêtre de commande d'une excitation harmonique.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

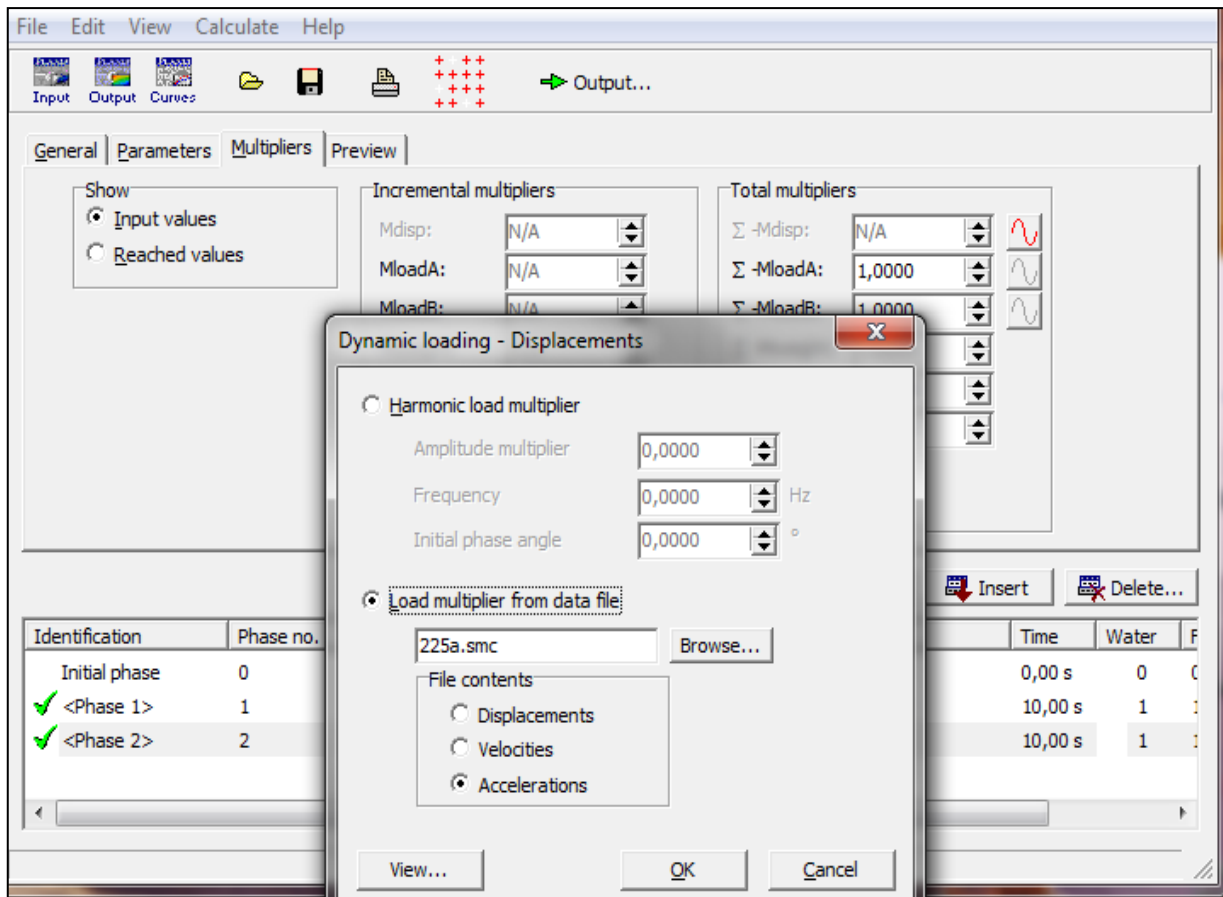


Figure (IV-14) : Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogramme.

Le logiciel nous donne la main de simuler n'importe quel séisme par l'utilisation du fichier SMC (Strong Motion CD-ROM) ce programme est utilisé par (U.S Geological Survey National Strong-motion Program) ; et il est possible de porter plus de 200 valeurs par seconde.

Pour l'action dynamique utilisée dans ce modèle, elle est une accélération variable en fonction du temps de forme sinusoïdale avec un départ faible grandissante vers le pic à temps puis descendante et amortie vers zéro à la fin la durée totale de cette action est de 10 secs.

Dans cette étude on a utilisé « l'accélérogramme 225smc » sont présentés dans le tableau suivant et figurés avec leur fichiers dans l'annexe. (Figure IV-15).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

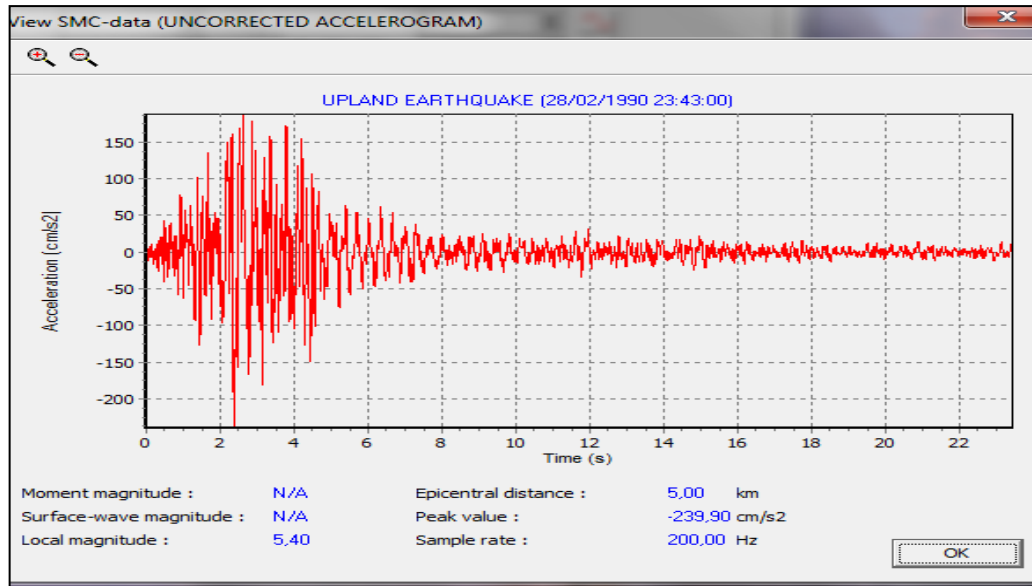
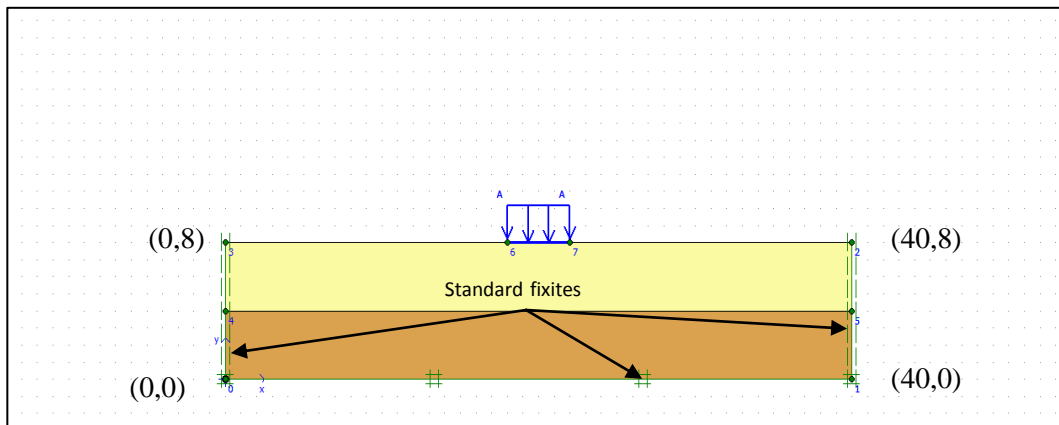


Figure (IV-15) : accélérogramme de l'U.S (Geological Survey).

IV-2- MODELLE CALCUL RETENU :

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présentée sur la figure (IV-16). Il est constitué d'une semelle de chaque $B=4\text{m}$, reposant sur deux couche de sol argile et sable sans eau, de 20 m de hauteur et 40m de longueur. Pour des raisons de système, seule les moitié du modèle est représentée ici :



Figure(IV-16) : profil géométrique retenu.

Les conditions aux limites choisies correspondent aux limites par défaut :

Déplacement horizontale nulle sur les deux faces verticales et sur a base du modèle et déplacements verticaux nuls à la base du modèle. Les faces verticales extrêmes sont modélisées sismique par des frontières absorbantes.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

IV.2.1 CARACTERISTIQUE DES MATRIAUX:

a) sol de fondation:

Le Tableau (IV-1) donne les caractéristiques géotechniques du sol constituant le massif de fondation

	Symb	Unité	Sable UC	argile
Profendeur		M	4	4
Poids volumique sec	γ_{sec}	KN/m³	17.5	16
Poids volumique humide	γ_{sat}	KN/m³	19.5	18
Perméabilité horizontale	k_x	m/s	0	0
Perméabilité verticale	ky	m/s	0	0
Module d'young	E_{re}	Mpa	148	178
Module G	G	Mpa	50	60
Coefficient de Poisson	ν	-	0.3	0.40
cohésion	C_{re}	Kpas	0.2	13
Angle de frottement	φ	°	32	28
Angle de dilatation	ψ	°	2	0
Facteur de rigidité de	R_{inter}	-	1	1

Tableau (IV-1) : Propriétés des couches de sols

γ : poids volumique

E : module d'Yong.

ν : coefficient de poisson.

α et β : constante de proportionnalité.

K_x : perméabilité horizontale.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

k_y : perméabilité verticale.

b) **semelle** : elle constituée en béton armée dont les propriétés sont de l'élément structural.

Les propriétés de l'élément structural sont résumées dans le tableau (IV-2) :

Paramètre	Nom	valeur	Unité
Type dcomportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normale	EA	38592000	KN/m
Rigidité de flexion	EI	4631040	KNm ² /m
Epaisseur équivalent	D	1.20	M
Poids	W	30	KN/m/m
Coefficient de poisson	ν	0.2	-
Rayleigh dumping	α et β	0.01	-

Tableau (IV-2) : propriétés de l'élément structural (plate).

La valeur de charge répartie uniformément :

Chargement statique applique sur l'élément $A=45 \text{ KN/m}^2$

IV-2-2- GENERATION DE MAILLAGE :

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires à 6noeds.

La figure (IV-17) présenté le maillage effectué du modèle.

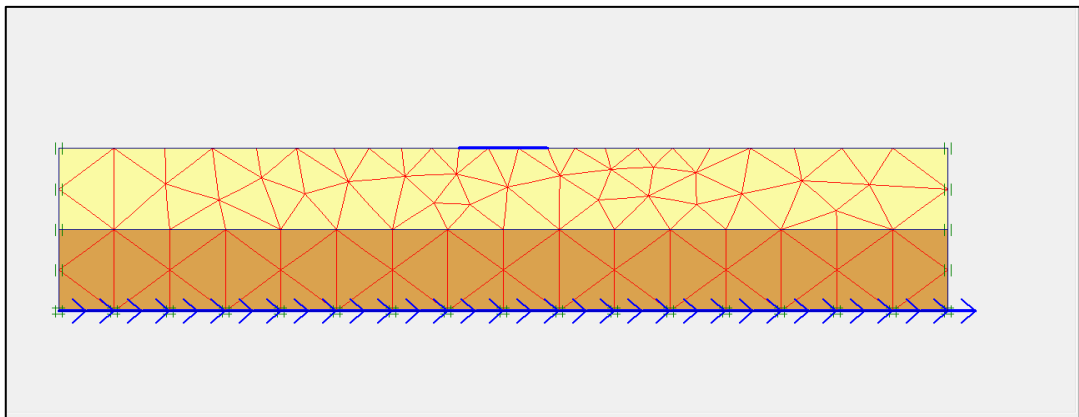


Figure (IV-17) : maillage du modèle.

IV-2-3-Condition initiale :

Elles correspondent à un état de type $K_0=1$ (contrainte de type géotechnique) figure (IV-18) ;

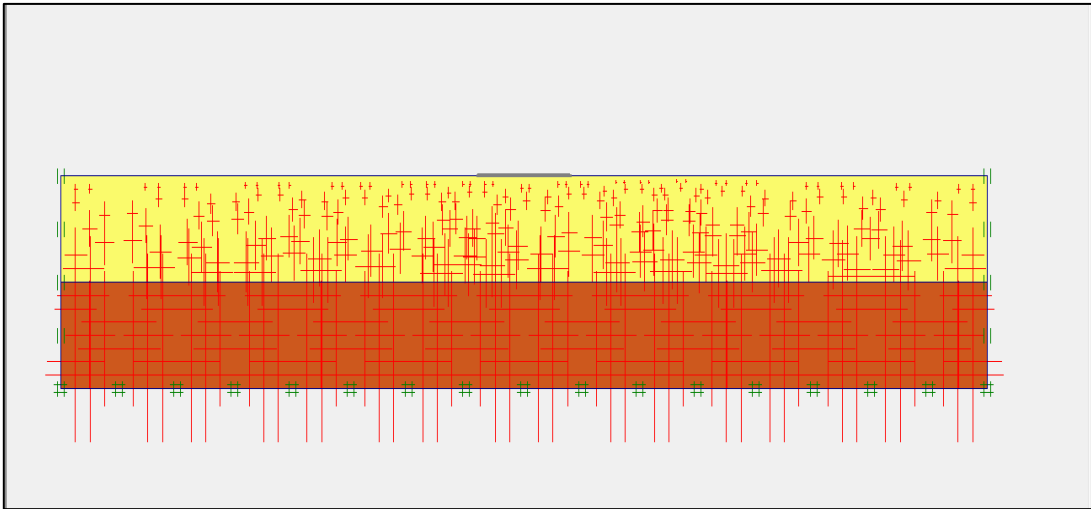


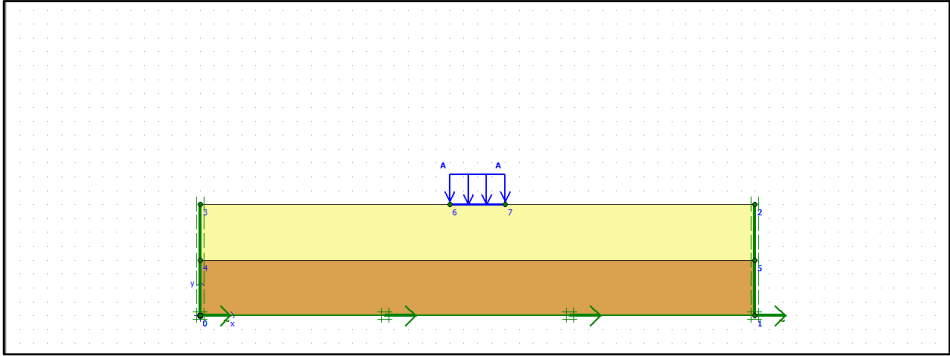
Figure (IV-18): génération des contraintes initiales.

IV-2-4- SOLLICITATION SISMIQUES :

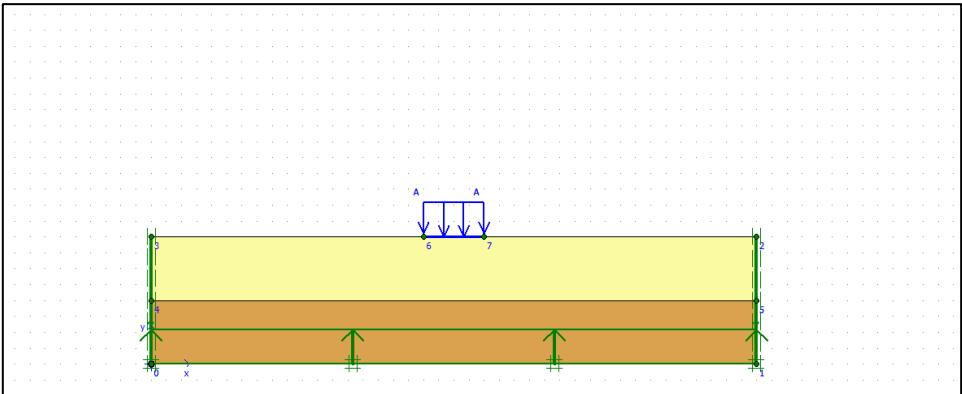
Dans cette application numérique, trois type de sollicitation sismique sous forme de déplacement imposés à la base du modèle de calcul ont été considérées ;

- * Une accélération horizontale simulant le mouvement horizontal ;
- * Une accélération verticale simulant le mouvement verticale ;
- * Une accélération inclinée simulant le mouvement la combinaison des deux mouvements précédents ;

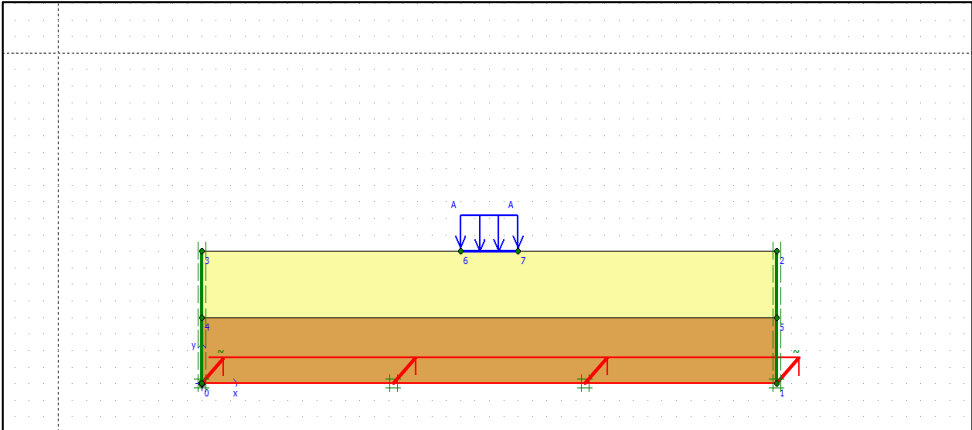
La figure (IV-19) : présente les trois sollicitations imposées à la base du modèle de calcul.



a. Cas horizontale.



b. cas verticale.



c. cas inclinée.

Figure (IV-19) : Sollicitations sismiques.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

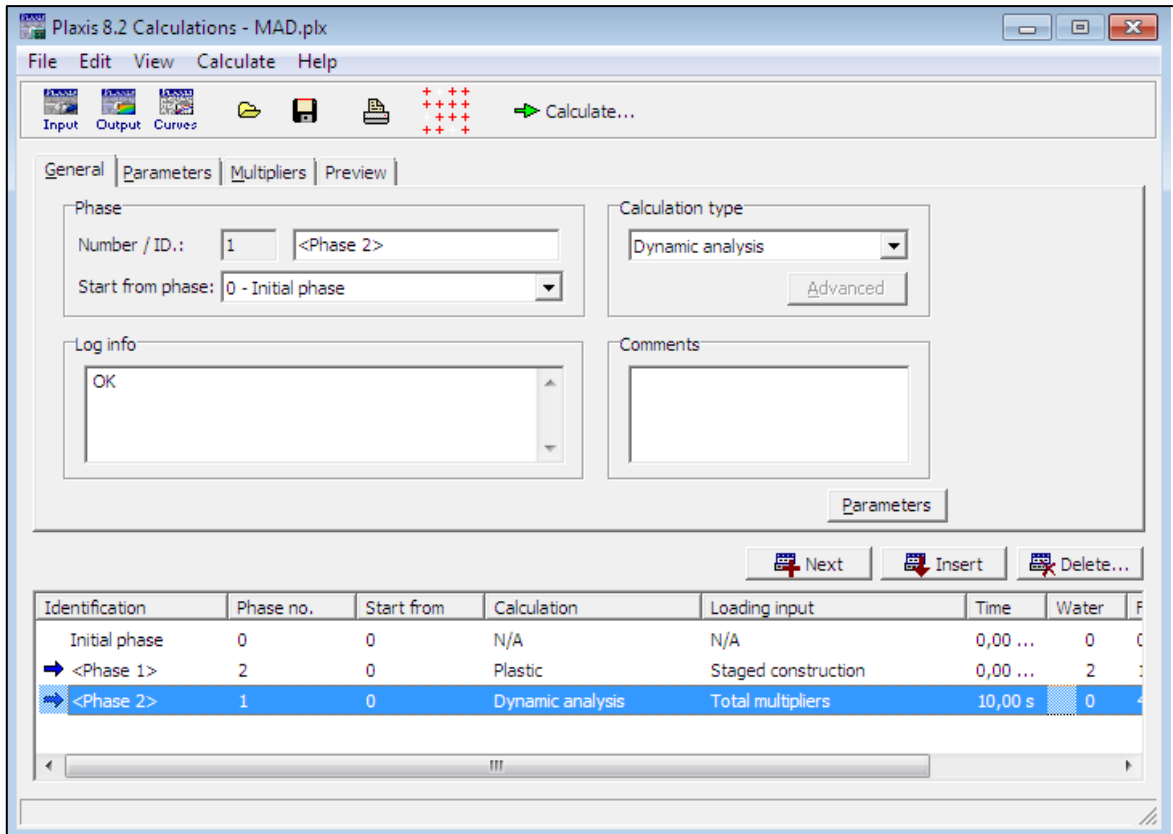


Figure (IV-20) : phases de calcul.

IV-2-5- PROCEDURE DE CACULS :

En trois phases dans l'ordre, d'excavation comme suit :

1. Phase (0) : initiation des contraintes géostatique (procédure K0), une phase initiale suivie de deux phases, phase (01) et phase (02).

2. Phase (01) : calcul plastique avec le procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system A=250 KN ».

3. Phase (02) : chargement dynamique « dynamique analyses » et « load multiplier » excitation load multiplier

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

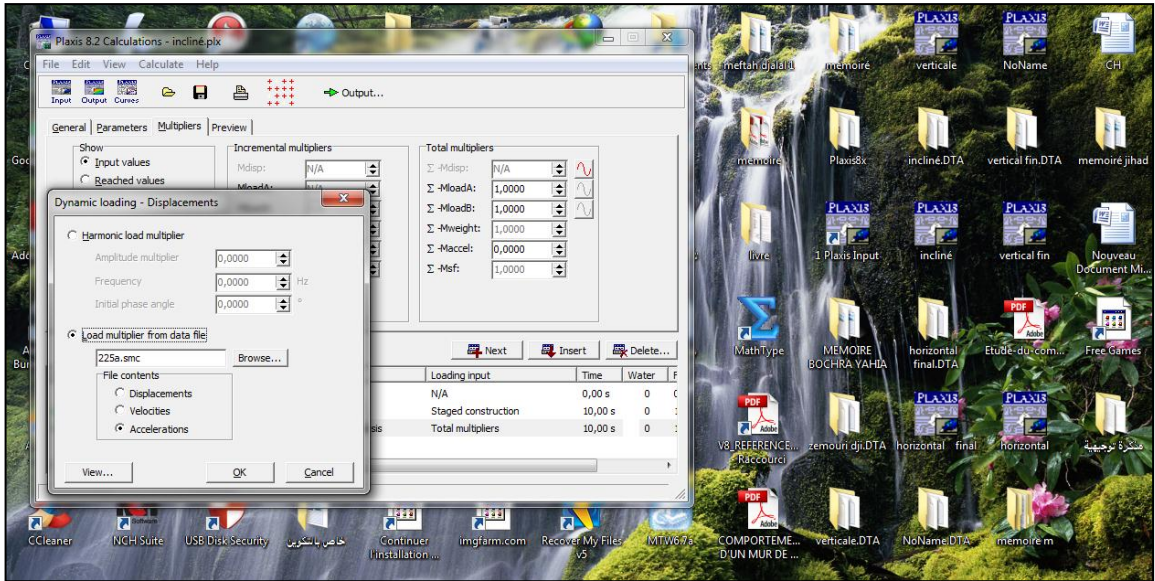


Figure (IV-21) : Activation load multiplier from data file.

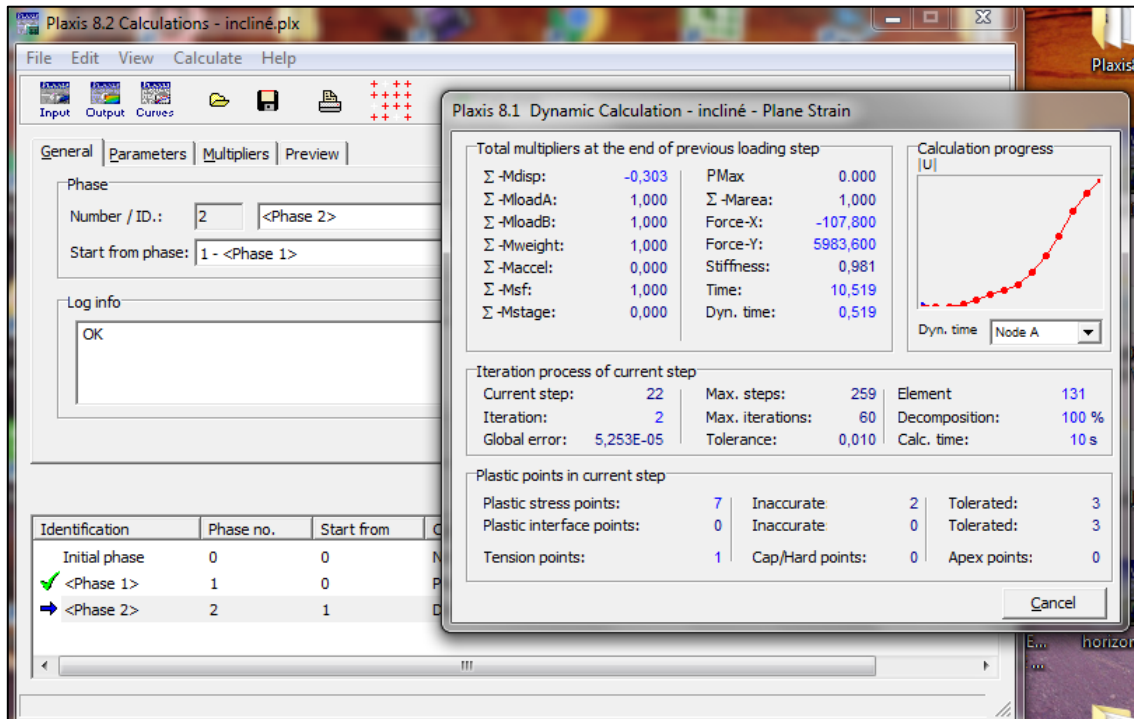


Figure (IV-22) : Fenêtre pour calcul les déférentes phases.

La figure (IV-22) présenté de calcul lancé après avoir choisi les points de la structure (point A, B, C, D, et E dans notre cas). Sur le modèle pour tracer les courbes de déplacement, vitesse et l'accélération. Figure (IV-23).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

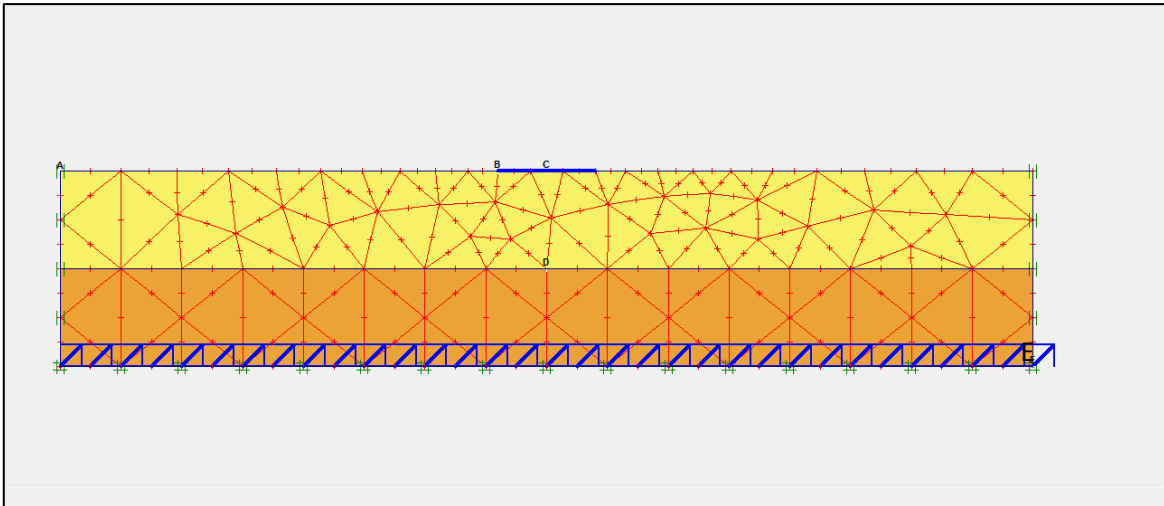


Figure (IV-23) : Trace des points sur le profil.

IV-3-RESULTATS DES CACULS ET INTERPRETATION:

IV-3-1-Coordonnées des points: voir le tableau (IV-3)

N° de poin	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E
X	0	18	20	20	40
Y	8	8	8	4	0

Tableau (IV-3) : Données des points.

On présente à-après les résultats détaillés pour chacun des trois types de calculs effectué, puis leur interprétation.

IV-3-2- RESULTATS DES CACULS :

IV-3-2-1- Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base (1^{ère} cas) :

L'onde sismique horizontale imposée à la base du modèle de calcul produit les effets ci-après.

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

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

a/Maillage déformation :

Le maillage déformé du modèle de calcul représenté sur la figure (IV-24).

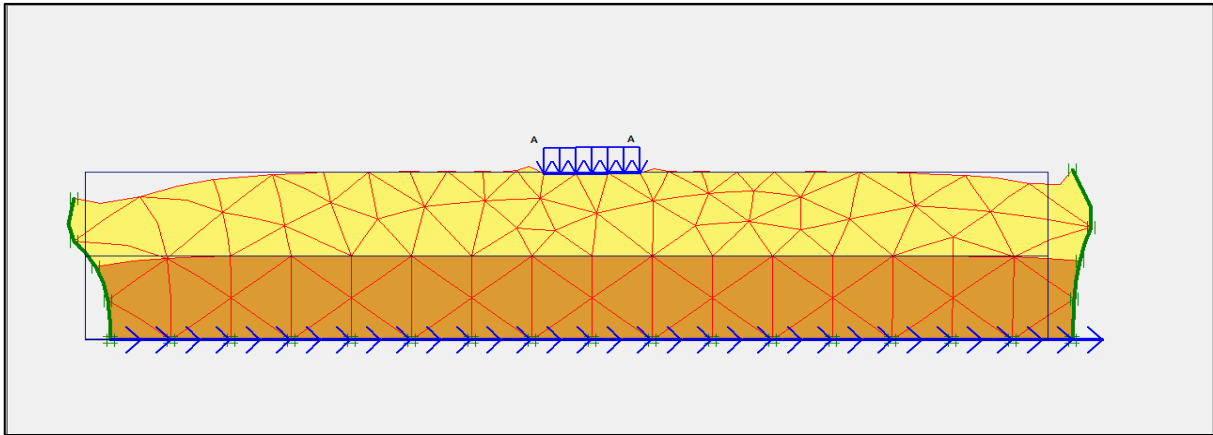
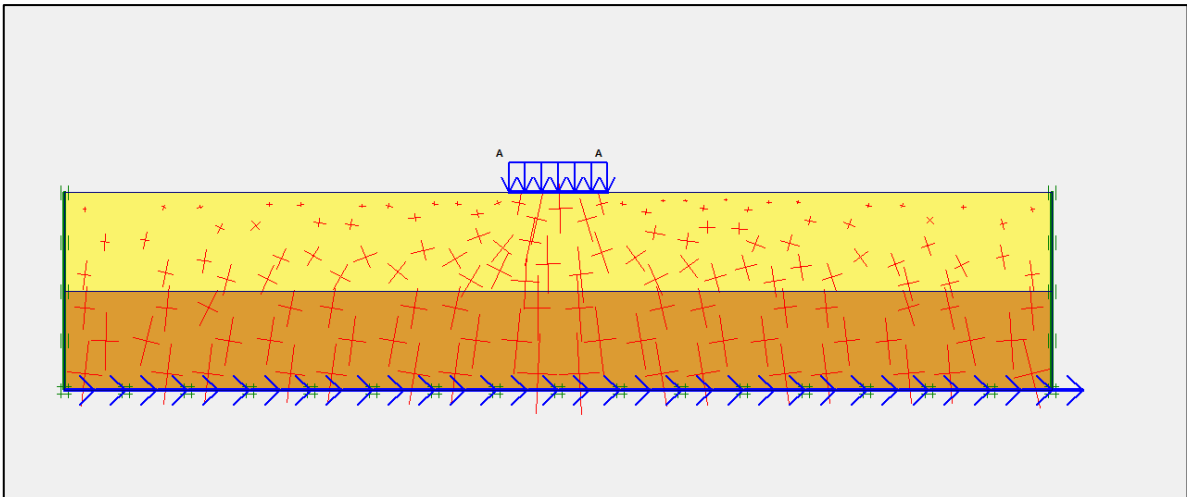


Figure (IV-24) : Maillage déformation du profil (1^{ère} cas).

b/Contraintes :

Les iso valeurs des contrainte générées dans le massif sont représentées sur a figure (IV-25).

La valeur de contrainteest :-140.68 KN/m²



Figure(IV-25): Contraintes effectives stresses

c/déplacements : Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure.

La valeur total déplacements :83.31*10⁻³ m

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

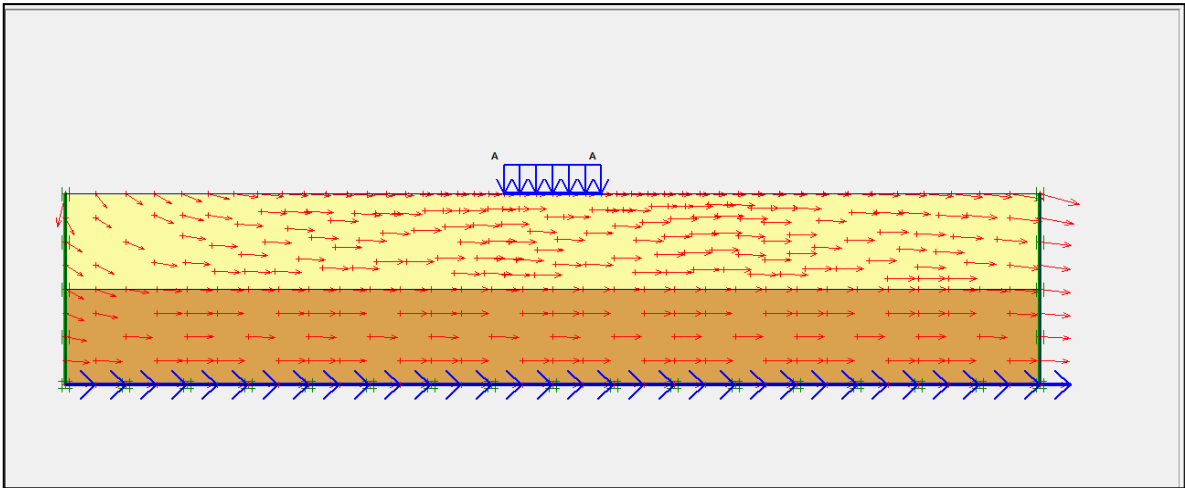


Figure (IV-26) : Total déplacements (1^{ère} cas).

d/courbes déplacement-temps :

Axe XX'

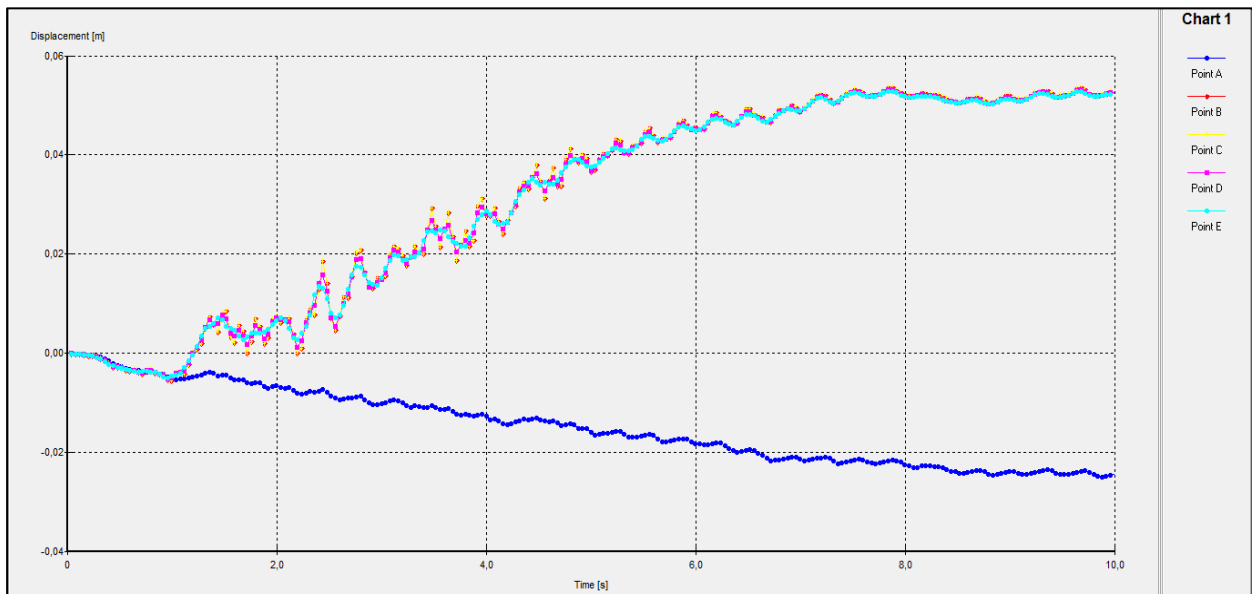


Figure (IV-27) : Déplacement-temps suivant l'axe xx' (1^{ère} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

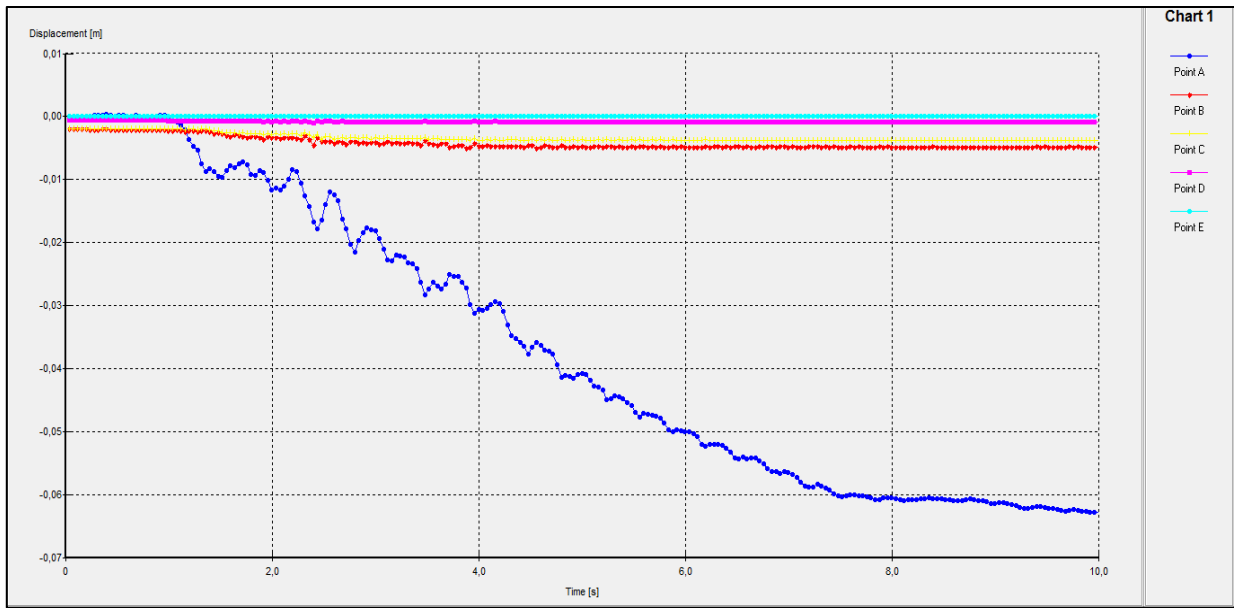


Figure (IV-28) : Déplacement-temps l'axe yy' (1^{ère} cas).

f/courbe accélération-temps :

Axe XX' :

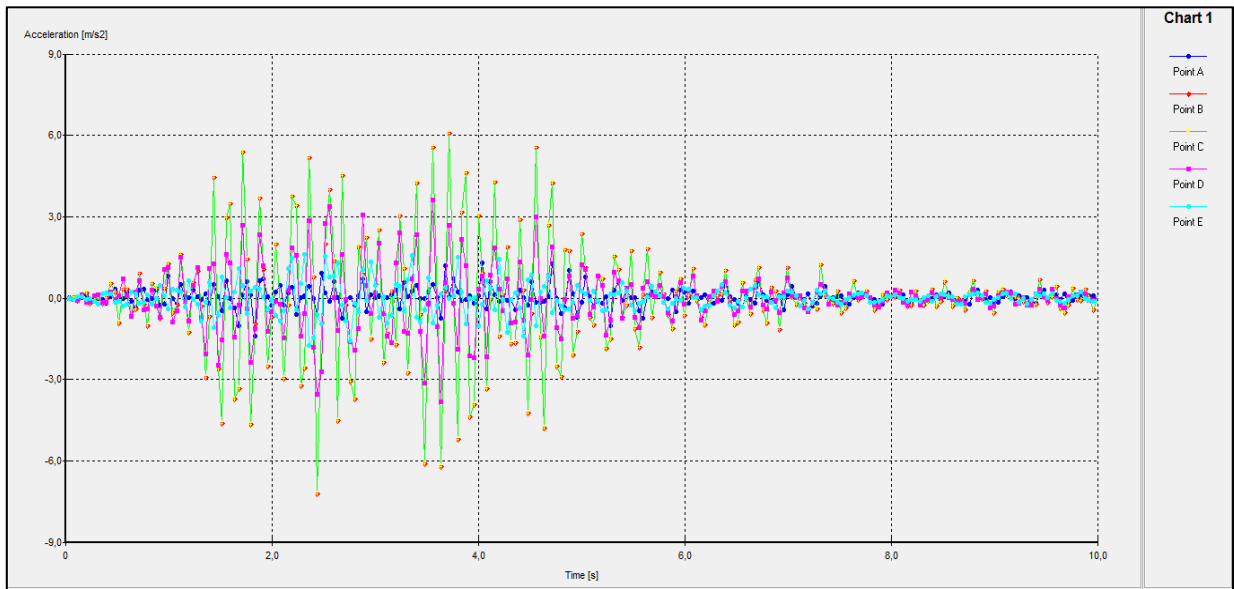


Figure (IV-29) : Accélération-temps suivant l'axe xx' (1^{ère} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

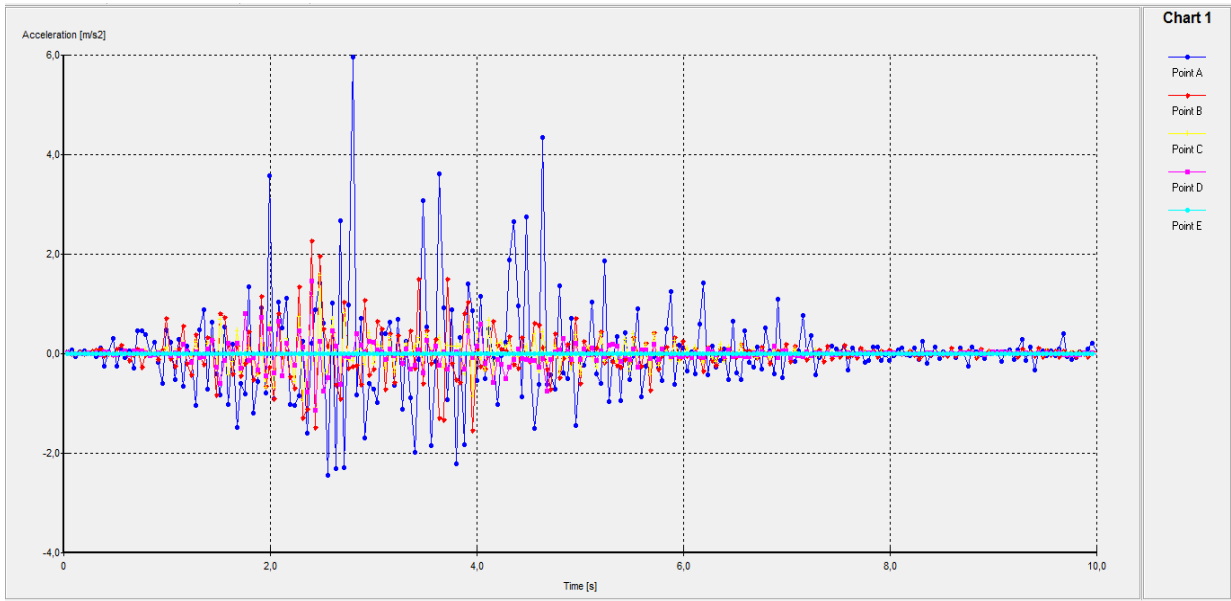


Figure (IV-30) : Accélération-temps suivant l'axe (1^{ère} cas).

e/courbe vitesse-temps :

Axe XX' :

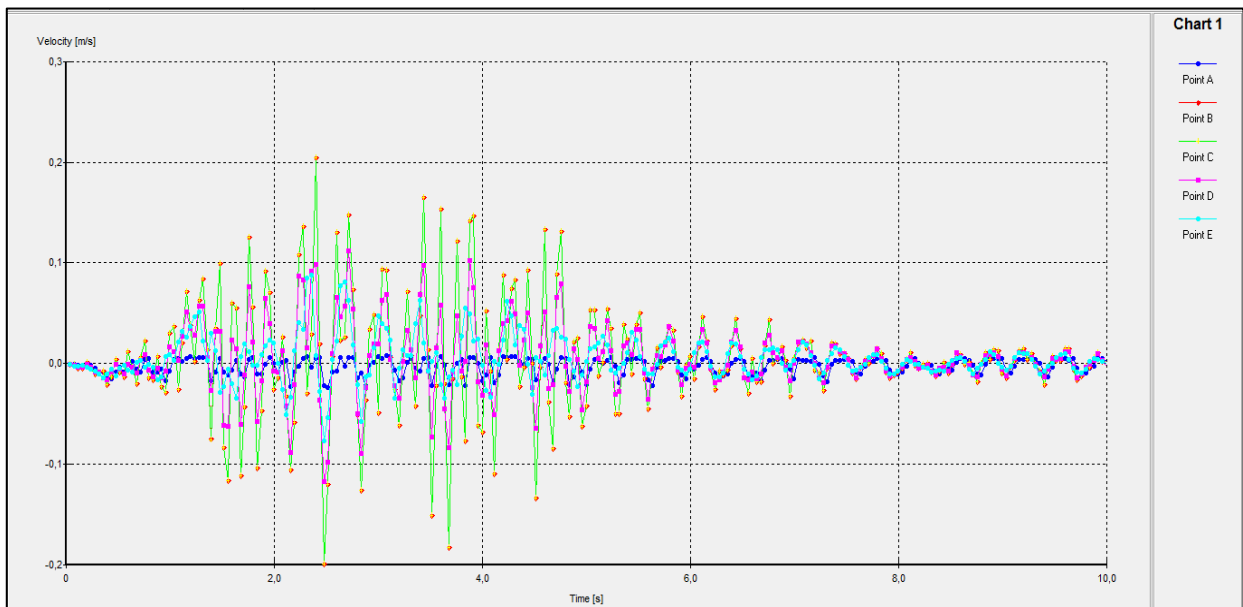


Figure (IV-31) : Vitesse-temps suivant l'axe xx' (1^{ère} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

Axe YY' :

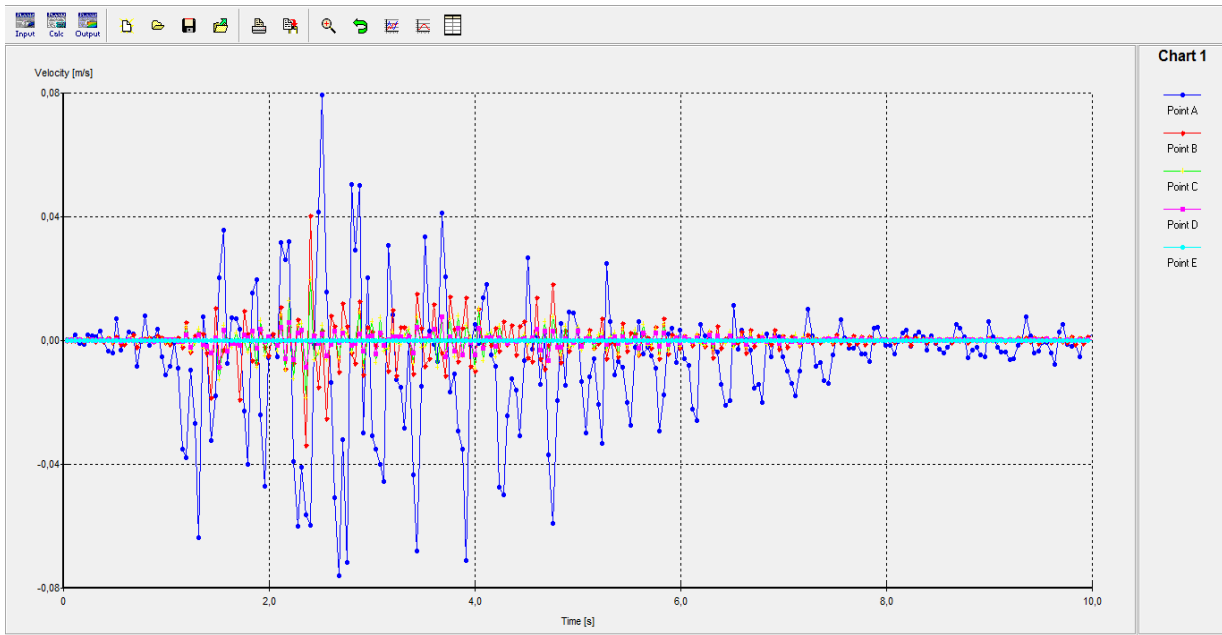


Figure (IV-32) : vitesse-temps suivant l'axe yy' (1^{ère} cas).

g/courbe force-temps :

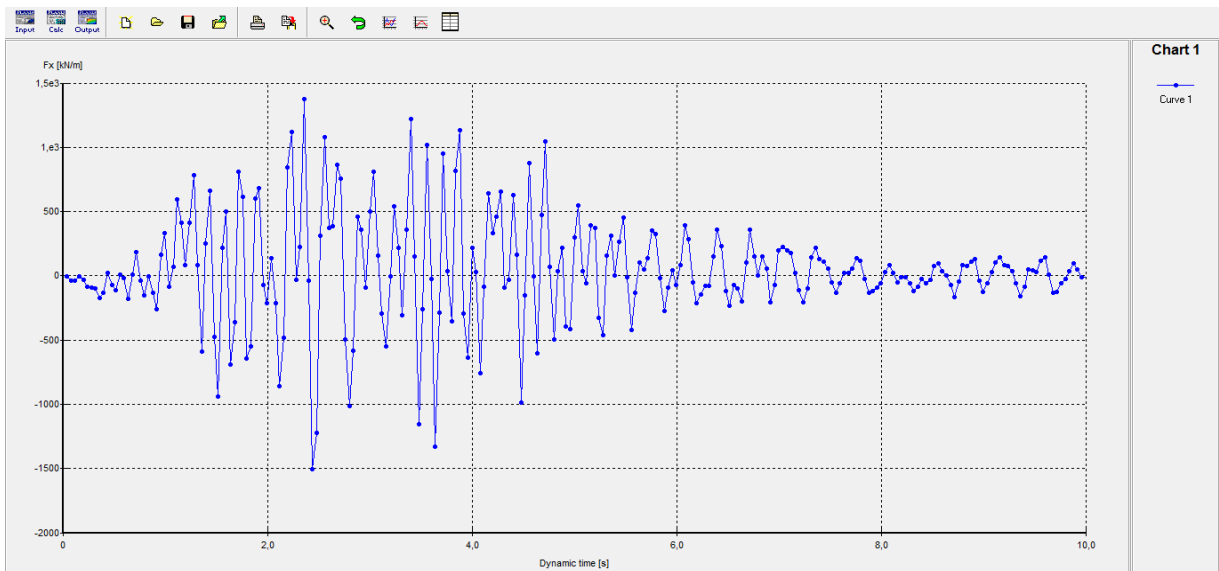


Figure (IV-33) : La force (Fx) en fonction du temps.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

h/synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points considérés sont donnée dans le tableau (IV-4).

	N°de point	A	B	C	D	E
Déplacement (m)	xx	0.025	0.054	0.054	0.053	0.053
	yy	0.063	$4.78 \cdot 10^{-3}$	$3.735 \cdot 10^{-3}$	$8.809 \cdot 10^{-4}$	0
Vitesse (m/s)	xx	0.023	0.204	0.204	0.117	0.088
	yy	0.079	0.040	0.020	$8.808 \cdot 10^{-3}$	0
Accélération (m/s ²)	xx	1.406	7.216	7.216	3.625	1.761
	yy	5.953	2.262	1.588	1.446	0

Tableau (IV-4) : Valeurs maximal aux points considérés.

IV-3-2-2- Cas d'un déplacement vertical imposé à la base (2^{ème} cas) :

L'onde sismique verticale imposée à la base du modèle de calcul produit les effets ci-après.

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

a/Maillage déformation :

Le maillage déformé du modèle de calcul représenté sur la figure (IV-34)

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

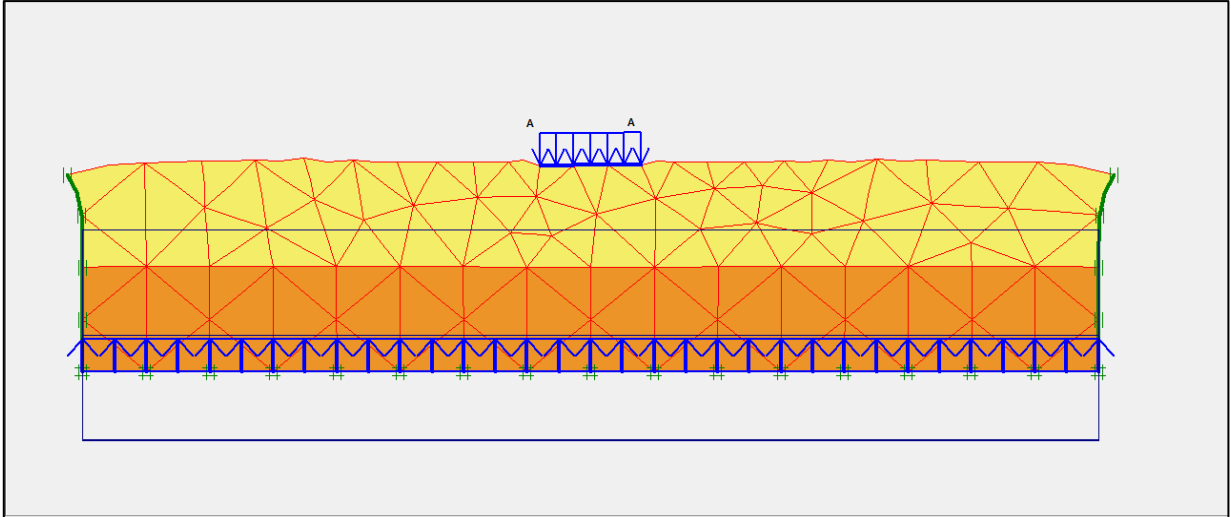


Figure (4-34) : Maillage déformé du profil (2^{ème} cas).

b/Contraintes : Les iso valeurs des contrainte générées dans le massif sont représentées sur a figure (IV-35).

La valeur de contraintes est :-153.36 KN/m²

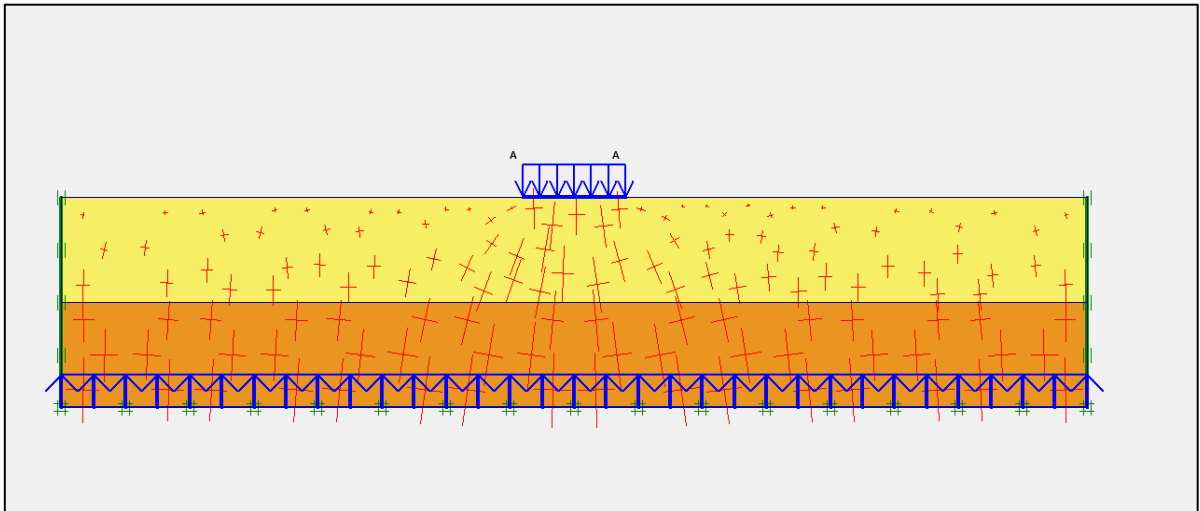


Figure (IV-35) : Total stresses (2^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

c/déplacements : Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure.

La valeur de déplacement est : $55.06 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

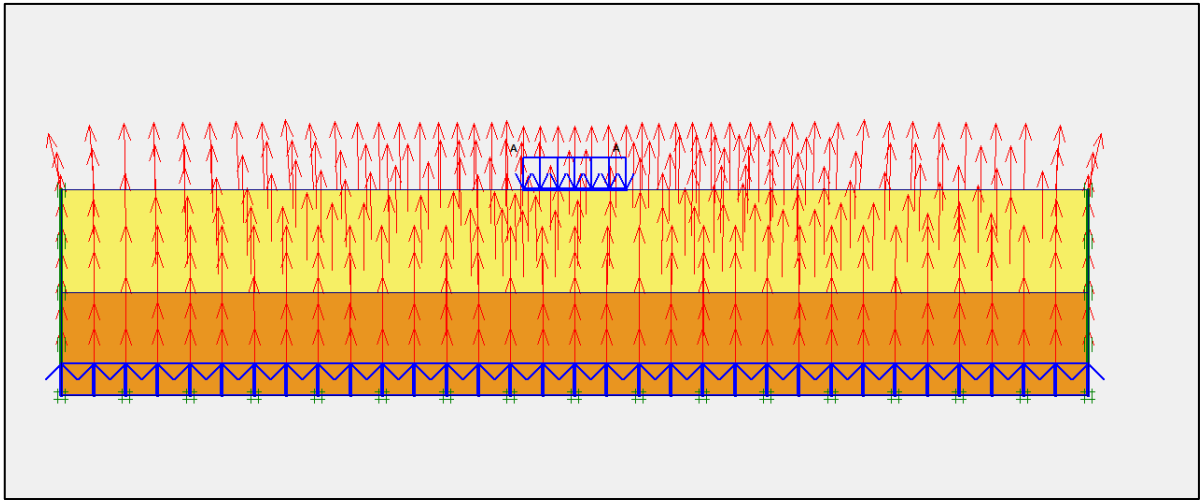


Figure (IV-36) : Total displacements (2^{ème} cas).

d/courbes déplacement-temps :

Axe XX'

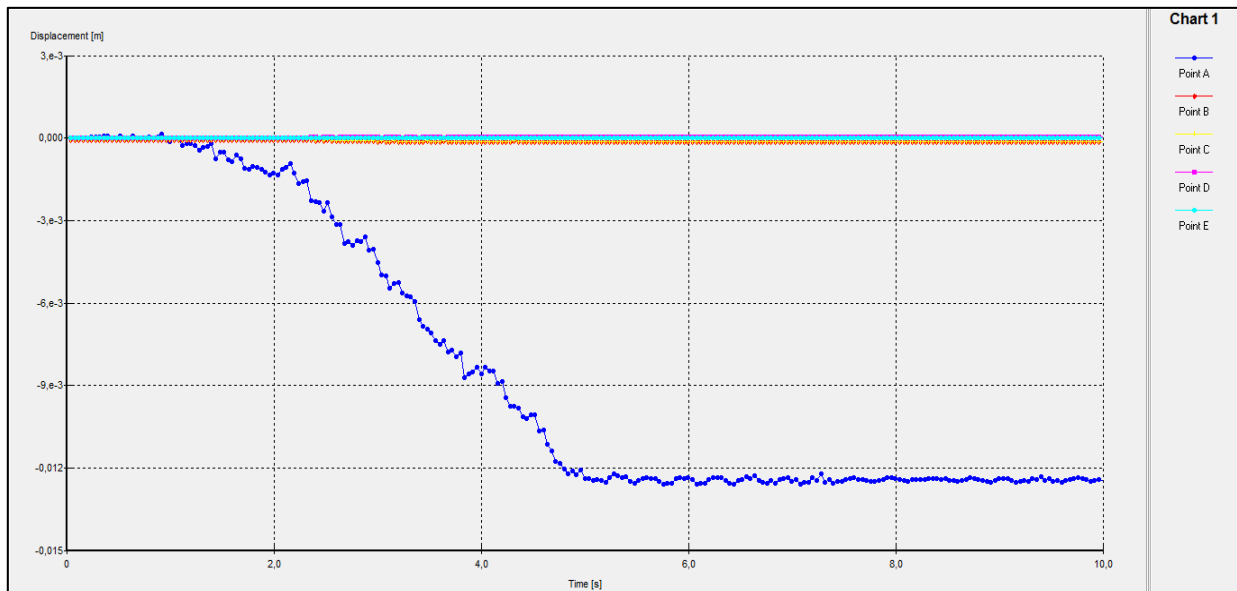


Figure (IV-37) : Déplacement-temps suivant l'axe xx' (2^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

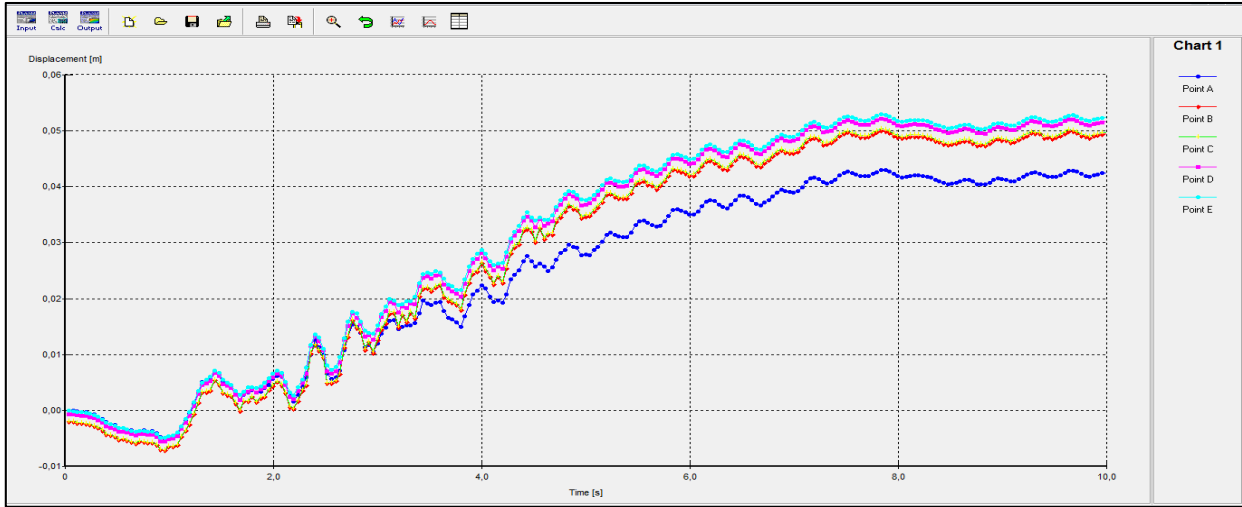


Figure (IV-38) : Déplacement-temps l'axe yy' (2^{ème} cas).

e/courbe vitesse-temps :

Axe XX' :

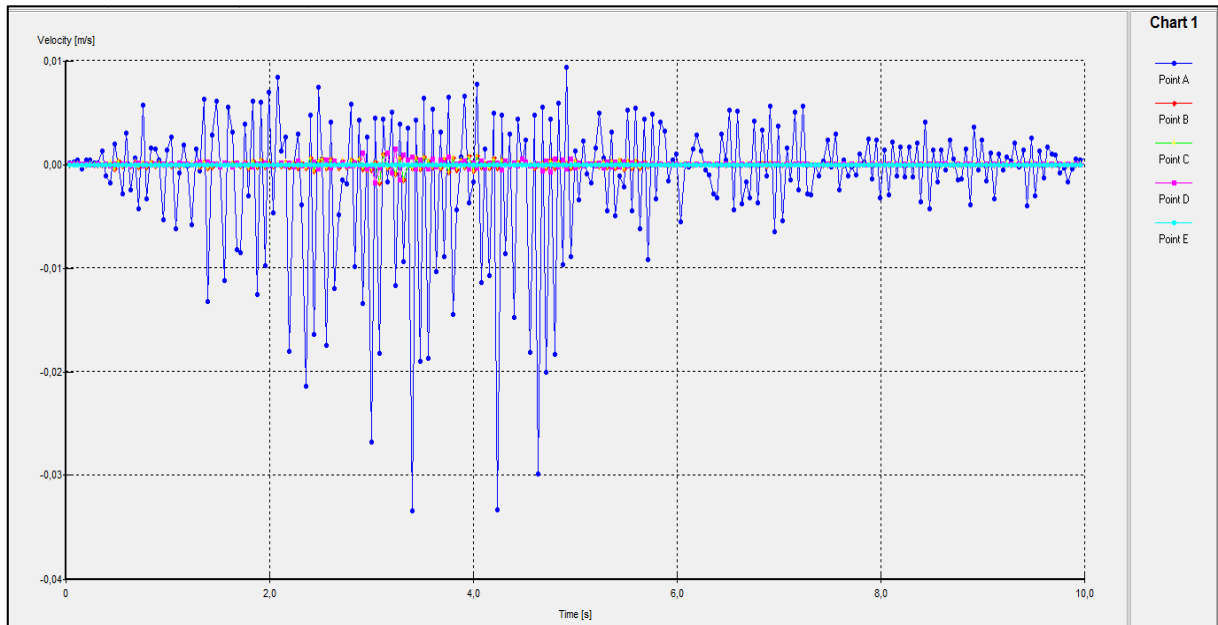


Figure (IV-39) : Vitesse-temps suivant l'axe xx' (2^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

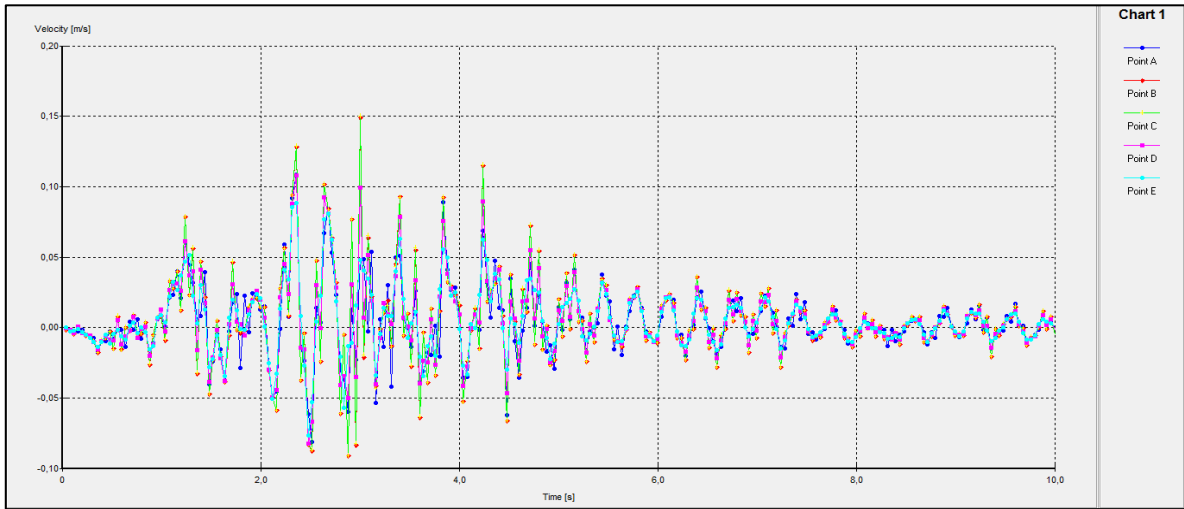


Figure (IV-40) : vitesse-temps suivant l'axe yy' (2^{ème} cas).

f/courbe accélération-temps :

Axe XX' :

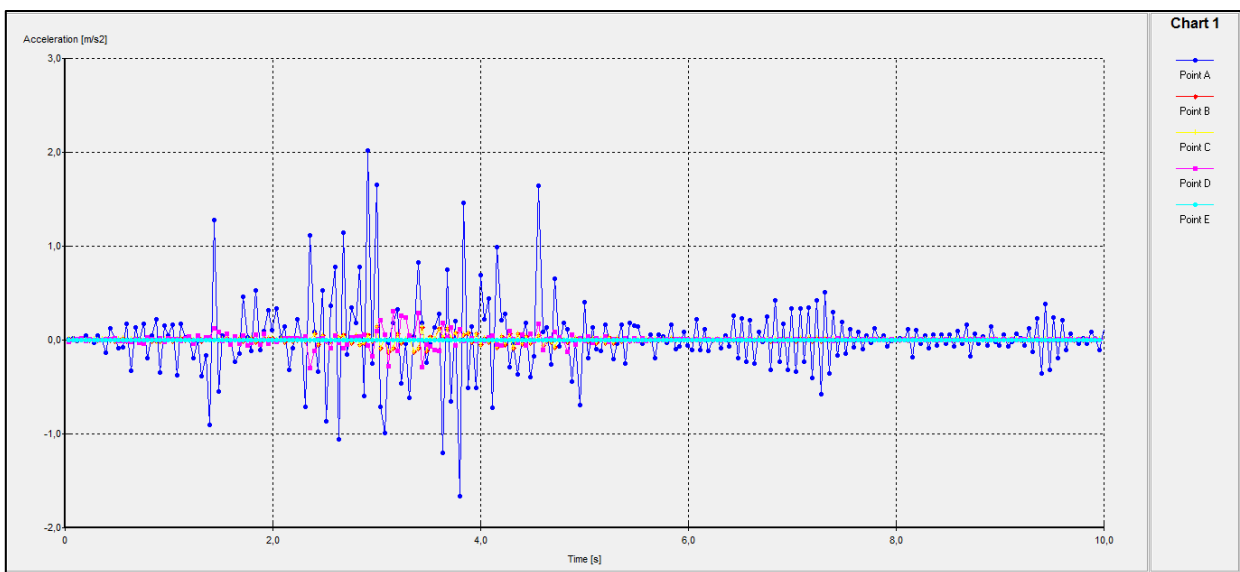


Figure (IV-41) : Accélération-temps suivant l'axe xx' (2^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY'

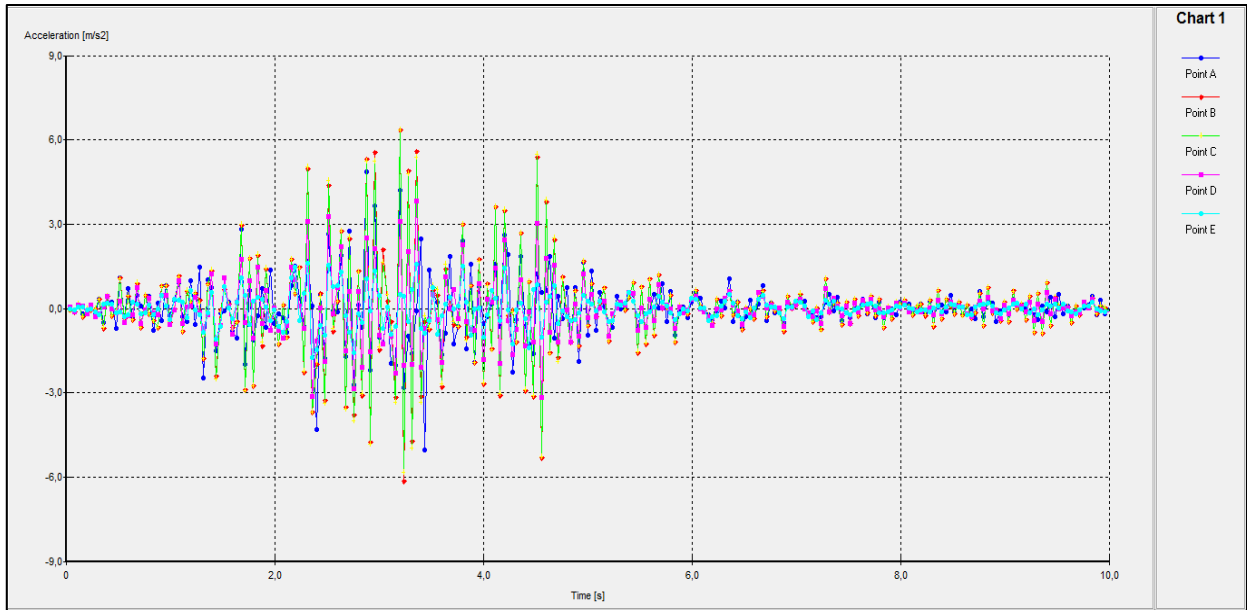


Figure (IV-42) : Accélération-temps suivant l'axe yy' (2^{ème} cas).

g/courbe force-temps :

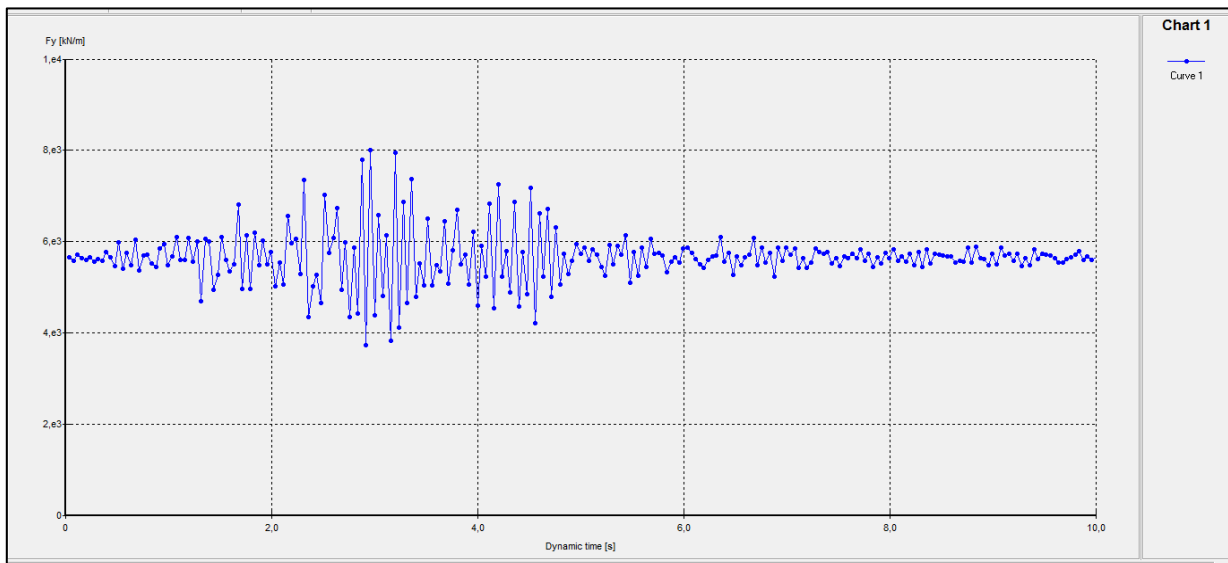


Figure (IV-43) : La force (F_x) en fonction du temps.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

h/synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points considérés sont donnée dans le tableau (IV-5).

	N°de point	A	B	C	D	E
Déplacement (m)	XX	0.013	$1.335 \cdot 10^{-4}$	$1.291 \cdot 10^{-4}$	$3.27 \cdot 10^{-5}$	0
	YY	0.043	0.050	0.050	0.053	0.053
Vitesse (m/s)	XX	0.033	$1.739 \cdot 10^{-3}$	$1.697 \cdot 10^{-3}$	$1.824 \cdot 10^{-3}$	0
	YY	0.092	0.149	0.150	0.108	0.085
Accélération (m/s ²)	XX	2.016	0.136	0.136	0.306	0.033
	YY	4.880	6.346	6.336	3.830	1.761

Tableau (IV-5) : Valeurs maximal aux points considérés.

IV-3-2-3- Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (3^{ème} cas) :

L'onde sismique inclinée imposée à la base du modèle de calcul produit les effets ci-après.

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

a/Maillage déformation :

Le maillage déformé du modèle de calcul représenté sur la figure (IV-44).

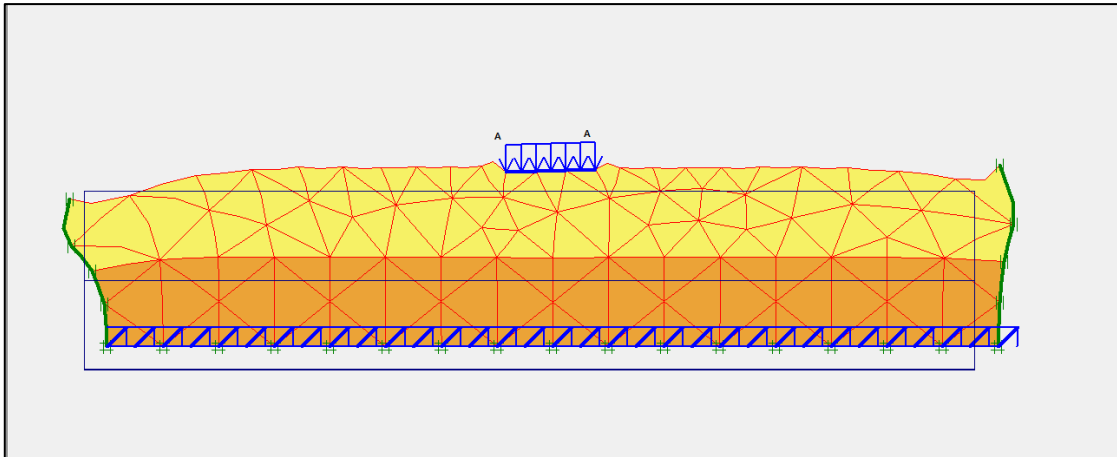


Figure (IV-44) : Maillage déformé du profil (3^{ème} cas).

b/Contraintes :

Les iso valeurs des contrainte générées dans le massif sont représentées sur a figure (IV-45).

La valeur de contrainte est : -205.92 KN/m^2

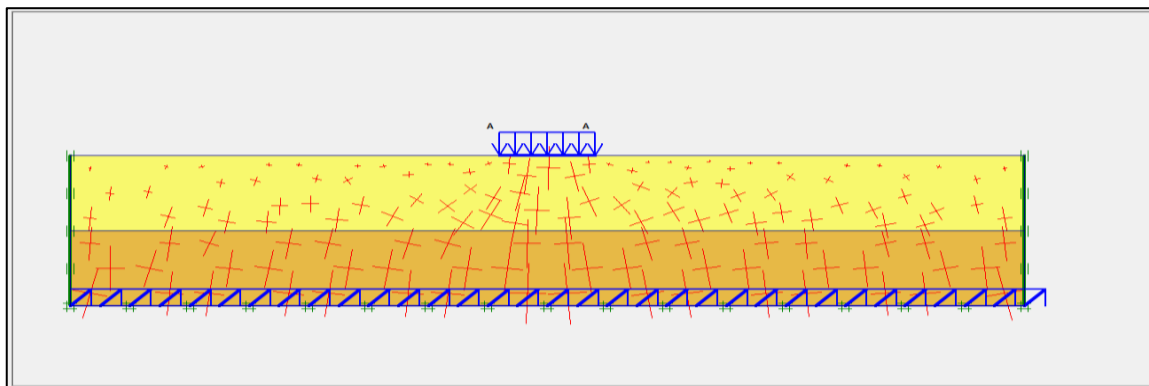


Figure (IV-45) : Total stresses (3^{ème} cas).

c/déplacements : Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure.

La valeur de déplacement est : $90.03 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

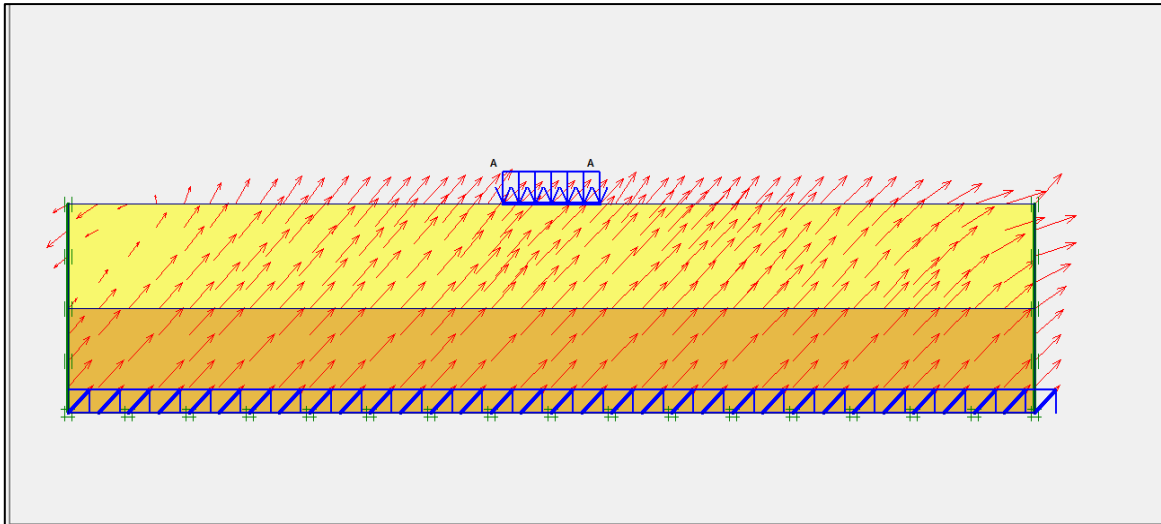


Figure (IV-46) : Total déplacements (3^{ème} cas).

d/courbes déplacement-temps :

Axe XX' :

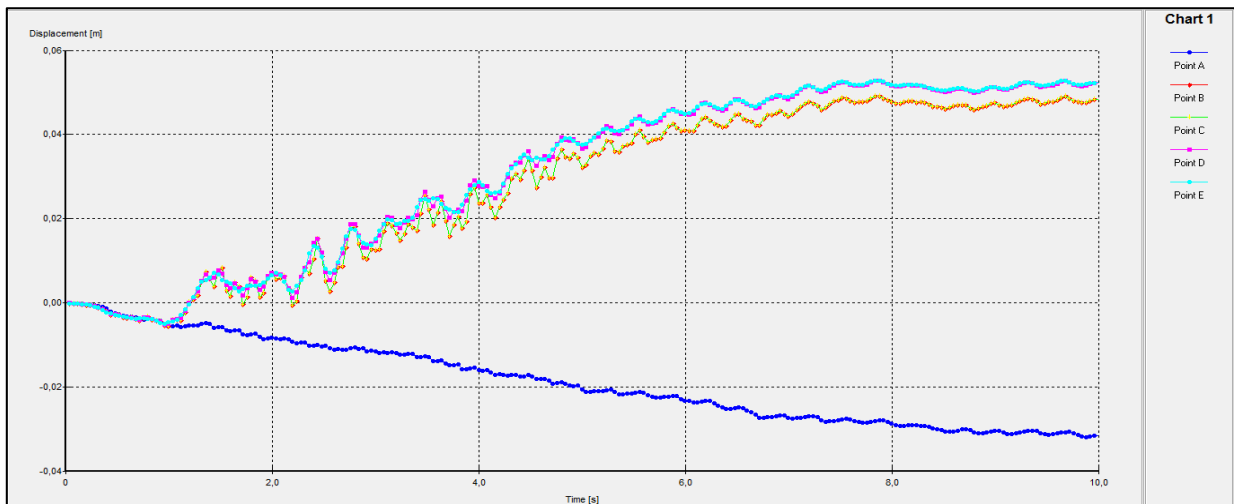


Figure (IV-47) : Déplacement-temps suivant l'axe xx' (3^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

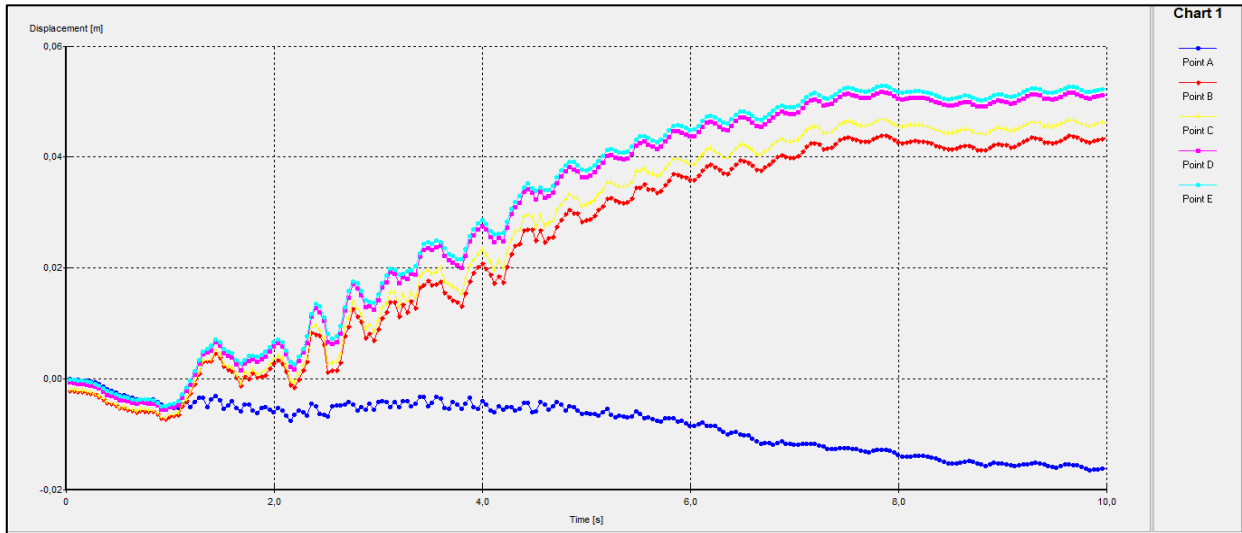


Figure (IV-48) : Déplacement-temps suivant l'axe yy' (3^{ème} cas).

e/courbe vitesse-temps :

Axe XX' :

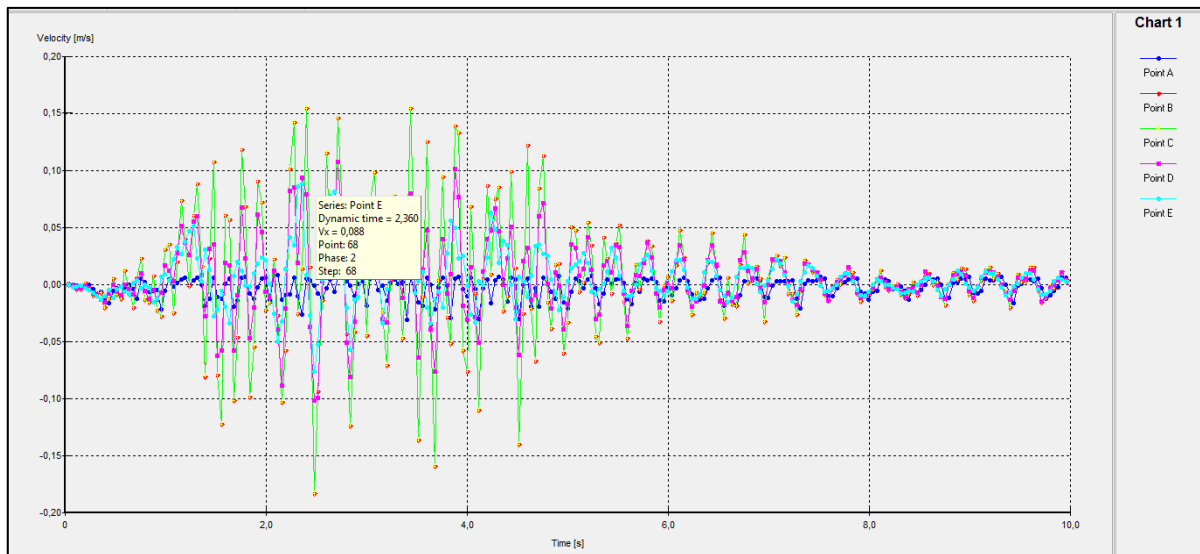


Figure (IV-49) : Vitesse-temps suivant l'axe xx' (3^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

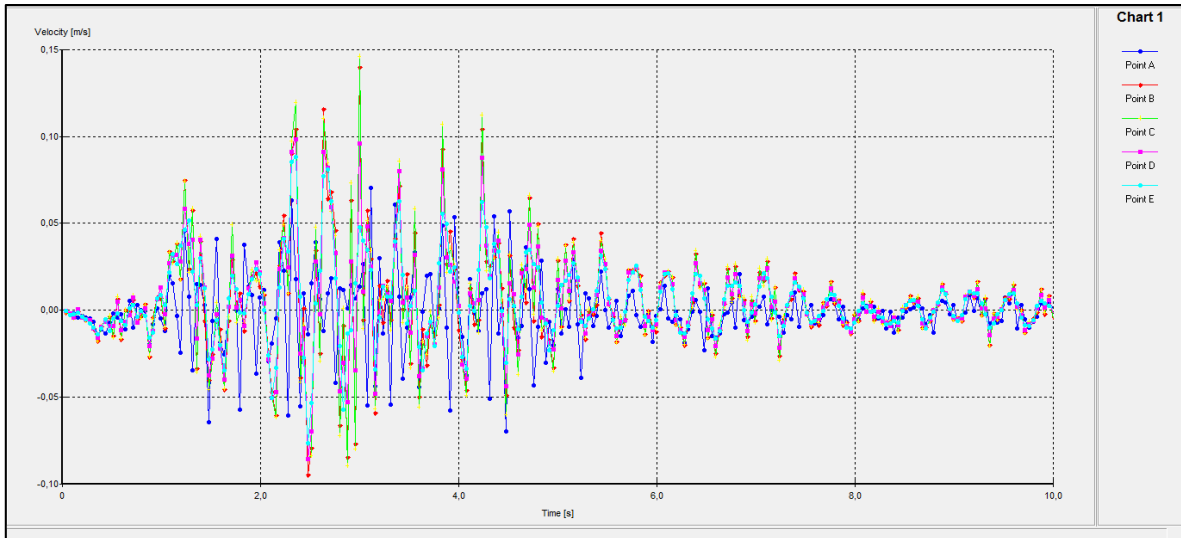


Figure (IV-50) : Vitesse-temps suivant l'axe yy' (3^{ème} cas).

f/courbe accélération-temps :

Axe XX' :

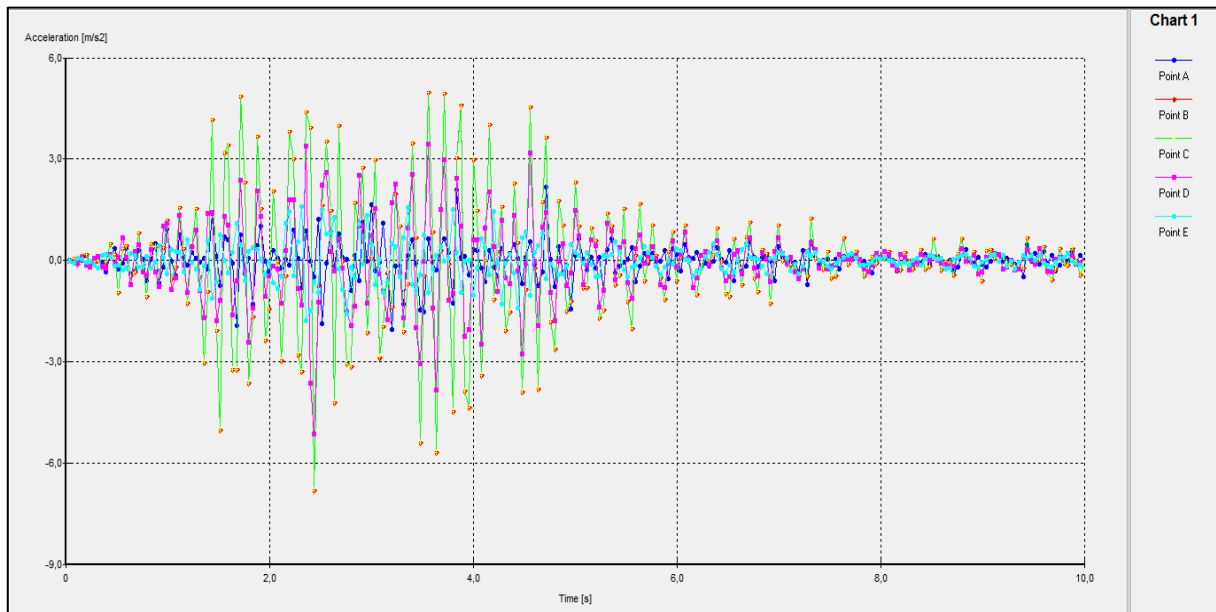


Figure (IV-51) : Accélération-temps suivant l'axe xx' (3^{ème} cas).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Axe YY' :

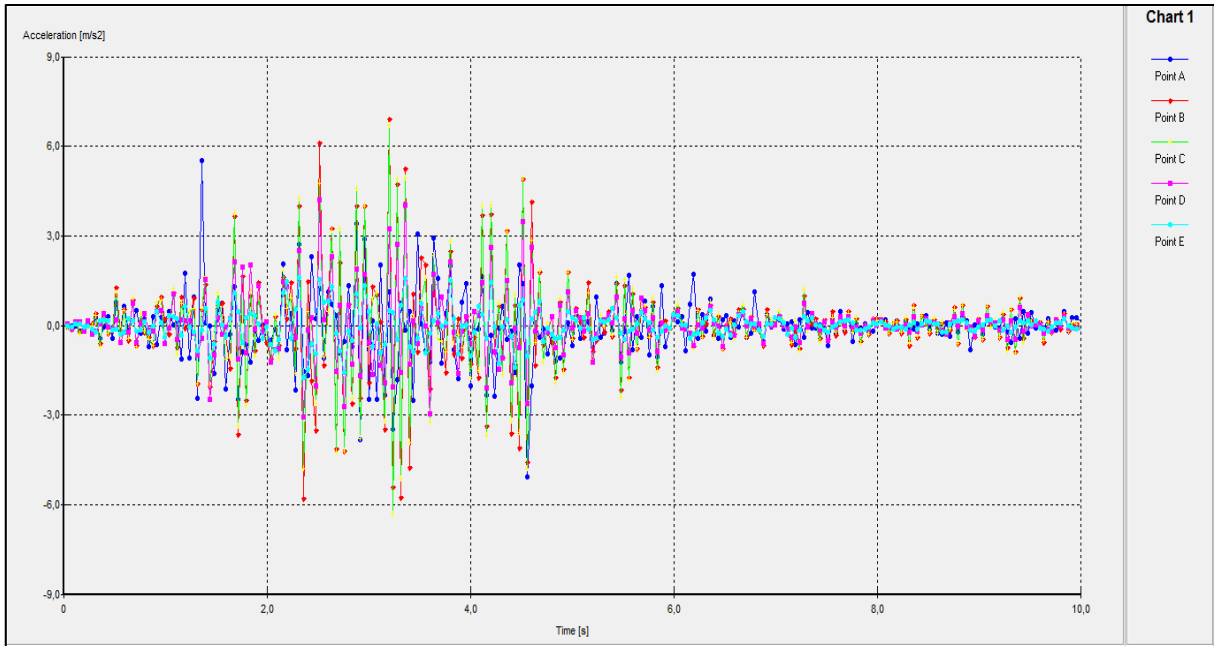


Figure (IV-52) : Accélération-temps suivant l'axe yy' (3^{ème} cas).

g/courbe force-temps :

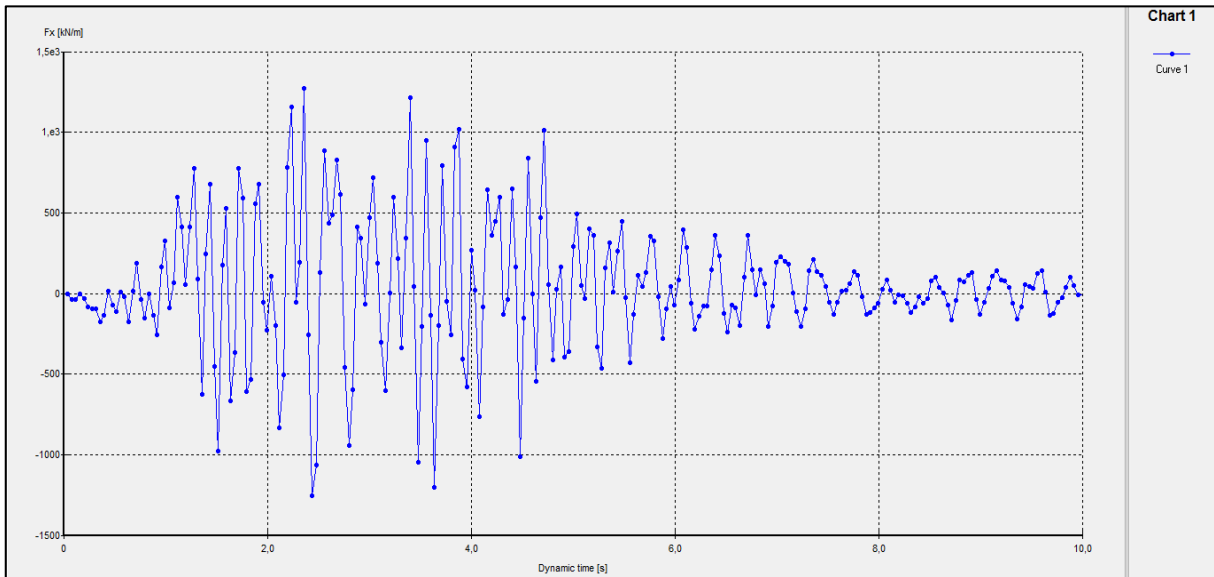


Figure (4-53) : La force (Fx) en fonction du temps.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

h/synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points considérés sont donnée dans le tableau (IV-6).

	N°	A	B	C	D	E
Déplacement (m)	XX	0.031	0.049	0.049	0.053	0.053
	YY	0.016	0.044	0.047	0.052	0.053
Vitesse (m/s)	XX	0.031	0.184	0.184	0.107	0.088
	YY	0.070	0.139	0.149	0.096	0.088
Accélération (m/s ²)	XX	2.036	4.977	4.974	5.119	1.761
	YY	5.506	6.917	6.683	4.205	1.761

Tableau (IV-6) : Valeurs maximal aux points considérés.

IV-3-3-INTERPRETATION DES RUSULTATES :

IV-3-3-1-Comparaison des calculs :

La comparaison des calculs pour les trois cas est résumée dan le tableau (IV-7).

	1 ^{ere} cas	2 ^{eme}	3 ^{eme}
Déplacement (m)	0.063	0.053	0.053
Vitesse (m/s)	0.204	0.150	0.184
Accélération (m/s ²)	7.216	6.346	6.917

Tableau (IV-7) : Comparaison entre les trois cas.

On observe la valeur de (déplacement, vitesse et l'accélération) dans le 1^{ere} cas supérieur aux deux autres cas.

Les résultats montrent que :

L'influence des ondes qui se trouvent dans le sens horizontal sur le profil du sol-structure est supérieure à celle des ondes dans les sens verticale et incliné

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

IV-3-4- Effet des ondes horizontale :

Influence de distance sur les paramètres des points (déplacement, vitesse et l'accélération), à lors des ondes sismiques de sens horizontal.

Influence de distance sur les déplacements des points selon les deux axes (xx' , yy'). On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau (IV-8).

	N° de point	A	B	C	D
	X(m)	0	13.13	26.88	40
Déplacement(m)	XX	0.021	0.068	0.067	0.053
	YY	0.034	$9.036 \cdot 10^{-5}$	$1.04 \cdot 10^{-4}$	0.012

Tableau (IV-8) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal.

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la figure (IV-54) :

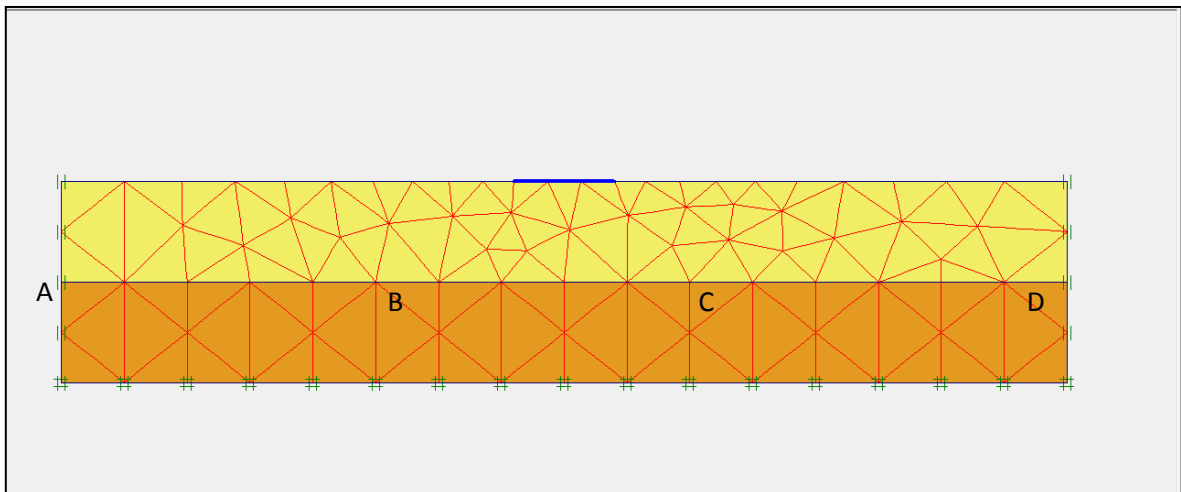


Figure (IV-54) : Schématisation des points de l'axe xx' .

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivantes figure (IV-55) et (IV-56).

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

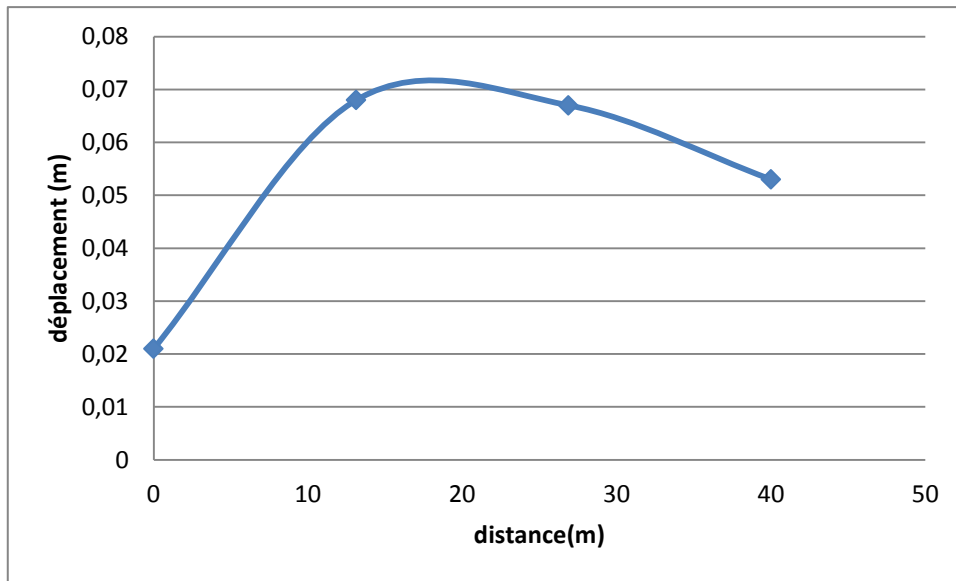


Figure (IV-55) : Déplacement-distance xx' .

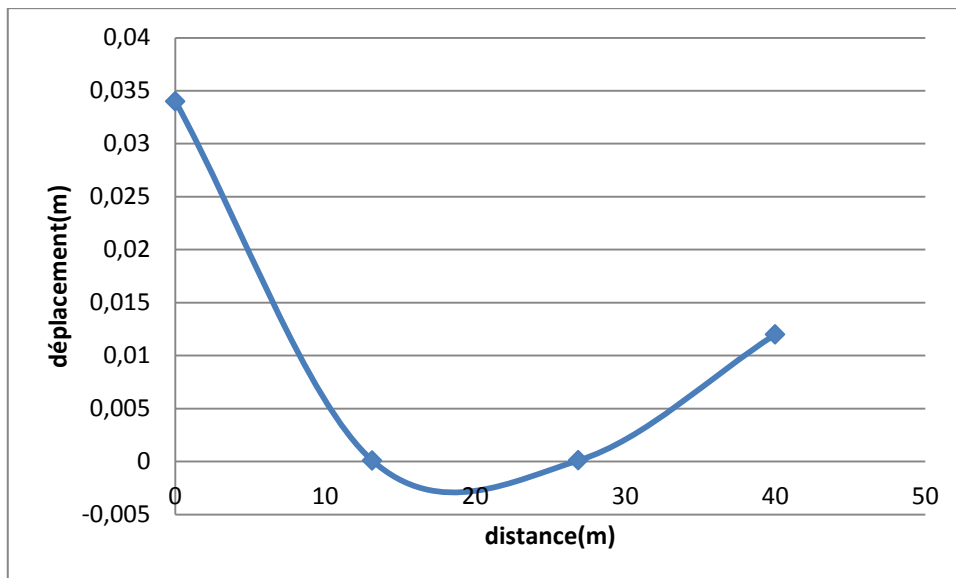


Figure (IV-56) : Déplacement-distance yy' .

commentaire de cas horizontale :

Nous pouvons constater ce qui suit :

Pour le déplacement selon xx' il est faible au voisinage au plan de contact, il augmente en de la structure et prend des valeurs max presque au milieu.

Par contre, selon yy' les valeurs max sont observées proche du contact sol-structure, même comportement est observé pour la vitesse et l'accélération.

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

Pour la vitesse de déplacement, les valeurs max sont enregistrées après de zone de source et de même pour l'accélération.

IV-3-5- Effet des ondes verticale :

On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau (IV-9).

	N° de point	A	B	C	D	E
	X(m)	8	6	4	2	0
Déplacement (m)	xx	$1.462 \cdot 10^{-4}$	$1.169 \cdot 10^{-4}$	$3.76 \cdot 10^{-5}$	$2.074 \cdot 10^{-5}$	0
	yy	0.050	0.051	0.052	0.053	0.053

tableau(IV-9) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas vertical.

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la figure (IV-57) :

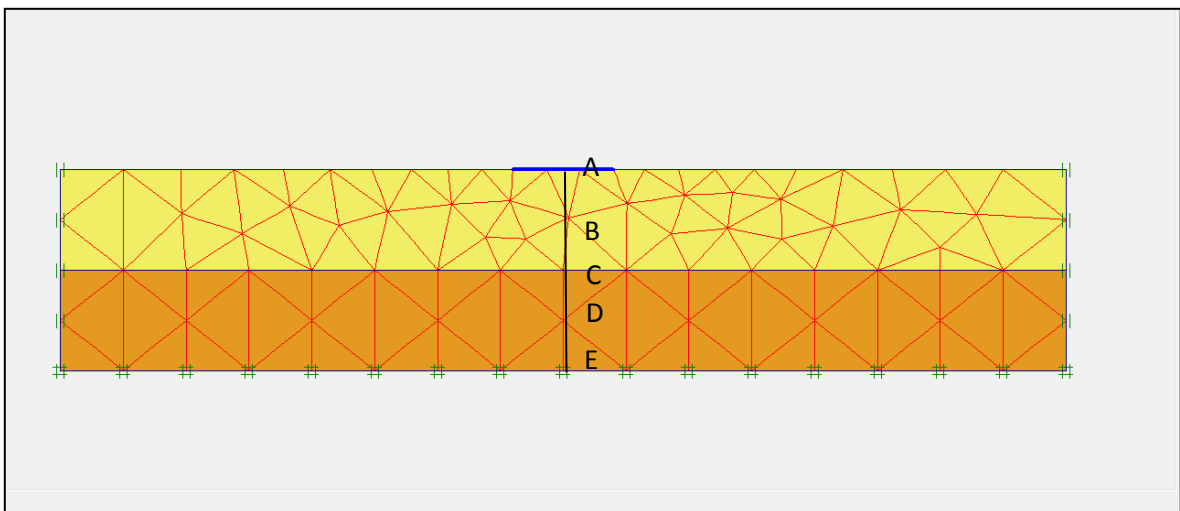


Figure (4-57) : Schématisation des points de l'axe yy'

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivantes figure (IV-58) et (IV-59).

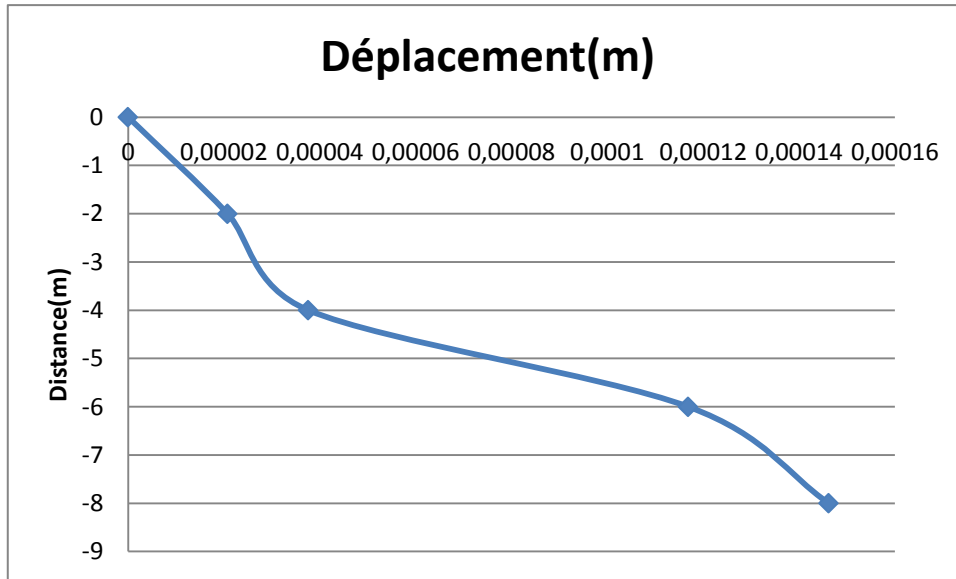


Figure (IV-58) : Déplacement-distance xx'

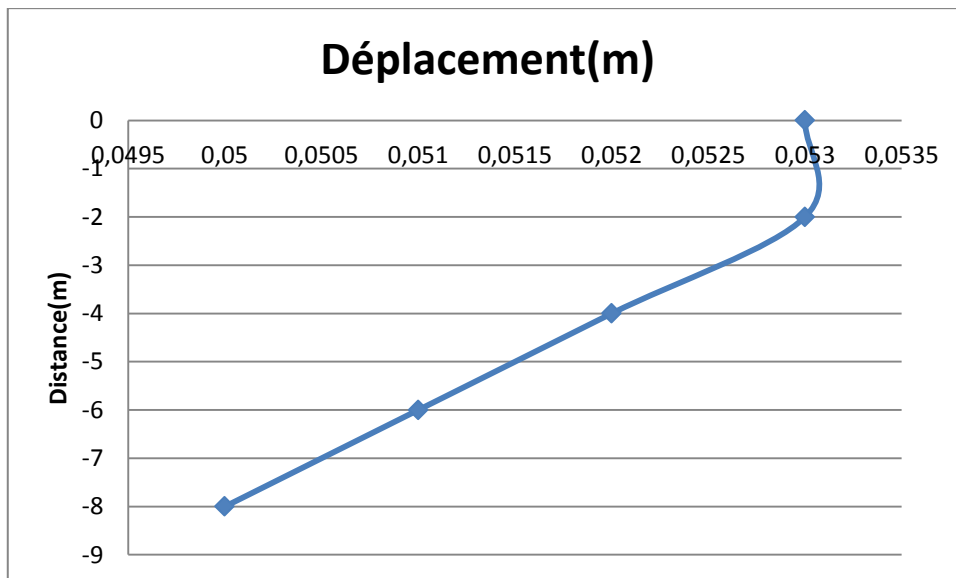


Figure (IV-59) : Déplacement-distance yy' .

***Commentaire de cas verticale:**

Selon xx' :

on observe à partir de la courbe de déplacement selon xx' la valeur de déplacement est nulle à la plan source , alors que plus se rapproche de la structure le déplacement augmenté jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur maximale

CHAPITRE IV : CALCUL NEMIRIQUE

selon $y y'$:

On observe à partir de la courbe de déplacement selon $y y'$ la valeur de déplacement il augmente en s'éloignant de la plan source et prend des valeurs max alors que plus on se rapproche de la diminue jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur la plus faible.

*On remarque les ondes verticale le plus proche de le plan source influent beaucoup par apport la structure

IV-3-6- synthèses :

D'après les résultats des calculs 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.
- La surface, dont on trouve la valeur maximum de déplacement au niveau de la surface de contact (sol-structure).
- Les ondes ce propageant dans le sens horizontal influent beaucoup plus que celle qui ce propageant dans se sens verticale et incliné.
- L'influence des paramètres de mouvement est plus marquée lors de l'observation de l'accélération car ce dernier paramètre est beaucoup plus lié à l'énergie.

CONCLUSION GENERAL

L'interaction entre la structure et le sol de fondation est généralement un phénomène important en chargement sismique. La charge sismique sur une structure est appliquée à travers son sol de fondation sous forme d'onde sismique. Pour déterminer cette charge pour laquelle la structure doit être conçue, la modalisation du système sol-structure nécessite la prise en compte des caractéristiques géométriques et dynamiques de la structure, du solde fondation et de l'interface entre ces deux dernières.

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 oeuvre ne se justifie que pour des structure exceptionnelles.

Les remarques importantes à signaler de cette étude sont les suivantes :

Après les observations obtenus par cette modélisation on a conclu que :

- La vérification de la stabilité de système « sol-fondation » par le calcul du module dynamique est utile en utilisant le code Plaxis.
- L'amplitude du séisme n'est pas le seul paramètre qui influe sur la réponse de la structure. La fréquence peut aussi influe très largement sur cette réponse.
- Examiner l'applicabilité d'un modèle simple permettant de capter l'effet prépondérant du phénomène de l'interaction sol-structure.
- L'utilisation de la méthode arbitraire est suffisante pour décomposer le problème car elle est basée sur plusieurs paramètres.
- Examiner l'effet des paramètres sismique de l'interaction sol-structure, sur les propriétés vibratoires ou comportement dynamique des sols.

BILIOGRAPHIE

[1] Ambraseys, N. (1973) - "Dynamics and response of foundation materials in epicentral region of strong earthquakes" Proc.5th world conference on earthquake engineering, Rome, vol 1, CXLVIII - CXXVI 1973.

[2] Housner, G.W. (1970) "Strong ground Motion and Design Spectrum". Ch 4 et 5 -Earthquake Engineering -Wiegel, Prentice Hall 1970.

[3] Idriss, I.M. (1978) - "Characteristics of Earthquake Ground Motion".Proc. Specialty Conf.Earth.Engng and soil Dynamics, ASCE, Pasadena, Calif.Vol. III, pp. 1151 - 1265.

[4] Trifunac, M.D. et Brady, A.G. (1975) On The Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peak of Recorded Strong Ground Motion". Bull. Seism. Soc. Amer. Vol. 65, N° 1, February, PP. 138 – 162.

[5] Mindlin, R.D., (1949) - Il Compliance of Electric Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, Transaction, ASME, vol. 71, pp. A-259-268.

[6] Bühler, M. et Cudmani, R. (2005). Numerical investigation of the seismic behaviour of structures on soft and liquefiable soils considering the non-linear soil-foundation-structure interaction. 250th anniversary of the 1755 Lisbon earthquake.

[7] Pecker, A. (1984). Dynamique des sols. Presse, ENPC, Paris, France.

[8] Wolf, J. (1988). Soil-Structure-Interaction Analysis in time domain. Prentice Hall International .Series, Englewood Cliffs, New Jersey.

[9] Crémer, C. (2001). Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes. Thèse de doctorat, LMT Cachan - ENS, Cachan, France.

[10] Kausel, E., Whitman, A., Murray, J. et Elsabee, F. (1978). The spring method for embedded foundations. Nuclear Engng. and Design, 48.

PLAXIS (2002). Finite Element Code for soil and rock analyses, professional version Balkema/ Rotterdam/Brookfield.

PLAXIS 2D (2002). Edite by R.B.J Brinkgereve, Delft University of technology & PLAXIS b.v the Netherlands.

Site Internet:

<http://www.afps-séisme.org>

<http://www.plaxis.nl>

<http://www.geologe.algerien>.

DEDICACES

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenus durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.

*Mon frère moussa et mes sœurs et nadia et tawes
et katakita maria, nourehanne, arije, jawad
nesrin, sirin*

Et deux grand-mère et tout les familles et mon fiancé et sa famille

tous mes amis Amel, khawla, abir, seuhila, hafsa, sara, sawssen, zehra

Tous les enseignants de faculté de technologie .

Toute la promotion 2016.

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

