



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

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



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

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Structures

THEME

**INTERACTION SOL-STRUCTURE
INFLUENCE DE LA PROFONDEUR
ET DES TYPES DES PONT
(CAS D'UN PILE DE PONT)**

Dirigé par :

Mr. MENASRI ABDERRAZAK

Présenté par :

DJONIT ASMA

Promotion : 2015/2016.

REMARCSMENTS

Tout d'abord, je remercie Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude à m'encadreur M. MENASRI Abderrazak, Je remercié aussi les membres du jury d'avoir bien voulu examiner ce travail ainsi que tout les enseignant du département de Génie Civil (Structure, Matériaux).

Je n'oublie pas ma mère dieu ait son âme et mon père qui m'a donné plein soutien.

A mon fiancé, et à toute ma famille.

À tous mes amis ahlem, soumia et zainab.etc...

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A ma très chère mère dieu ait son âme qui a donné toute sa vie pour mon bonheur

A mon cher père qui ma soutenu durant toute ma vie

A ma très chère grand-mère

A mes frères Abdelkader, adelet sœurs ismahan, Amel,

Nabila, Leila, Amina, soumia et leurs conjoints

A la femme de mon frère

A toute ma famille

A mon fiancé moussa qui me l'aide mois physiquement et moralement

A ma belle famille

A tous mes amis surtout ahlem, soumia, zainab

A tous les étudiants de génie civil

ABSTARCT

The complexity of soil structure interaction problem lies in the integration and coupling of two elements, the soil and the structure. This may describe the effects that occur in the plane of the contact soil / structure, so that, in the analysis of the dynamic response not only the structural properties are included but also the underlying soil properties. The interaction soil structure can magnify or reduce the dynamic response of the structure.

Using the finite element method with the code "Plaxis" in the geotechnical field is very common for the study of large projects. It allows for finite element analysis to check the stability of structures, determine its velocity and acceleration, taking into account the soil-bridge pile interaction and we proceed to the design of bridges.

The main objective of this study was:

Examine the factors that effectively summarize the characteristics of the seismic movement with particular attention to the effects of real and simulated earthquakes. In this evaluation the responses of a bridge floor-battery system were adopted .This study suggested the possibility of characterizing the earthquake by a minimum number of parameters

To study the effect of soil-structure interaction on seismic motion Keywords :

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

RESUME

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

L'utilisation de la méthode des éléments finis par le code « 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-pile de pont et de nous de procéder au dimensionnement des ponts.

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 d'un système sol-pile de pont 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.

ملخص

تعقيد بنية التربة مشكلة التفاعل يكمن في التكامل واقتران في عنصرين، والتربة والهيكل. هذا قد وصف الآثار التي تحدث في الطائرة من تربة الاتصال /هيكل، بحيث في تحليل الاستجابة الديناميكية مدرجة ليس فقط الخصائص الهيكلية ولكن أيضا وراء الخواص التربة. بنية تربة التفاعل يمكن التكبير أو تقلل من الاستجابة الديناميكية للهيكل.

باستخدام طريقة العناصر المحددة برمز بلاكسيس في مجال جيوتقنية أمر شائع جدا لدراسة المشاريع الكبيرة. أنها تسمح لتحليل العناصر المحدودة للتحقق من استقرار الهياكل، وتحديد السرعة والتسارع، مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل كومة تربة الجسر ونشرع في تصميم الجسور.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو

دراسة العوامل التي تلخص على نحو فعال خصائص الحركة الزلزالية مع الاهتمام الخاص لآثار الزلازل الحقيقية والمحاكاة. في هذا التقييم اعتمدت ردود نظام الطابق بطارية جسر اقترحت الدراسة. هذا إمكانية تميز الزلزال من الحد الأدنى لعدد المعلمات.

لدراسة تأثير تفاعل التربة هيكل على الحركة الزلزالية

كلمات مفتاحية

زلزال و التفاعل التربة البنية والسلوك للتفاعل البنية التربة بلاكسيس.

SOMMAIR

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTS DES NOTIONS

INTRODUCTION GENERAL

Chapitre I : LES CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

I-1-Introduction.....	4
I-2-Sismogénèse :	4
I-3- les risques sismiques :	5
I-4- Failles :	6
I-5- Nature et mode de propagation des ondes sismiques :	7
I-6- Foyer et épicentre :	12
I-7- Paramètres caractéristiques du mouvement sismique :	13
I-8- Mouvement du sol :	16
I-9- L'accélérogramme du séisme :	16
I-10- Accélération maximale :	16
I-11- Durée du séisme :	17
I-12- Le spectre de réponse :	18
I-13- Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique :	19
I-14- Mouvements sismiques du champ libre et interaction sol-structure :	20
I-15- Conclusion.....	21

Chapitre II : CARACTERISATION DES PONTS

II-1- Introduction	24
II-2-Définition de pont :	24
II-3- Composition d'un pont :	24
II-4-Le rôle des pont :	25
II-5- Les types des ponts.....	26

II-5-1-pont poutre.....	26
II-5-2-pont dalle.....	27
II-5-3-pont mixte.....	27
II-6-Les différents éléments antisismiques d'un pont	28
II-7-la pile d'un pont	28
II-8- Conclusion.....	29

Chapitre III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

III-1- Introduction :	31
III-2- Notion d'Interaction Sol-Structure (ISS) :	32
III-3- Comportement Des Sols Sous Sollicitations Sismiques :	33
III-3-1- Comportement élastique du sol :	33
III-3-2- Comportement élasto-plastique du sol :	34
III-3-3- Description expérimentale :	35
III-3-4- Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique :	36
III-3-5- Caractéristiques dynamique des sols :	37
III-3-5-1- Détermination de τ_{max}	37
III-3-5-2- Module de cisaillement maximum :	37
III-3-5-3- Amortissement hystérétique dans le sol :	38
III-3-6- Lois de comportement.	38
III-3-6-1- Loi élastique linéaire :	39
III-3-6-2- Méthode équivalente linéaire :	39
III-3-6-3- Les lois non linéaires.	40
III-3-7- Comportement Sol-Structure	41
III-4- Modalisation De L'interaction Sol-Structure :	41
III-4-1- Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structures :	41
III-4-1-1- Interaction cinématique et interaction inertielle :	41
III-4-1-2- L'amortissement radiatif :	41
III-4-1-3- La liquéfaction :	42
III-4-2- Fonctions d'impédance :	43
III-4-3- Formulation d'un problème d'interaction sol-structure :	44
III-4-4- Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS :	45
III-4-4-1- Les méthodes directes (Méthodes globales) :.....	45
III-4-4-2- La méthode des sous-structures :.....	47
III-5-Conclusion :	51

Chapitre IV : OUTILE NUMERIQUE DE CALCUL

« LE CODE PLAXIS »

IV-1- Introduction :	53
IV-2- Le Code Plaxis :	53
IV-2-1- L'interface Graphique De Code Plaxis :	53
IV-2-3- Modèle De Comportement Implémentées Dans Plaxis.....	57
IV-2-3-1- Modèle élastique	57
IV-2-3-2- Modèles élastoplastique.....	58
IV-2-4- Le Module Dynamique Du Code Plaxis	59
IV-3-Modèle De Calcul Retenu :	61
IV.3.1 Caractéristiques Des Matériaux :	62
IV-3-2- Génération De Maillage :	63
IV-3-3-Condition Initiales :	64
IV-3-4- Sollicitation Sismiques	65
IV-3-5- Procédure De Calculs :	66
IV-4- Résultats Des Calculs	68
IV-4-1- Cas d'un déplacement horizontale imposé à la base (1 ^{er} cas) :	68
IV-4-2 : Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (2 ^{ème} cas) :	74
IV-4-3-Interprétations des résultantes :	80
IV-4-3-1-Comparaison des calculs :.....	80
IV-4-4- Effet des ondes horizontal :	80
IV-4-5- synthèses	82
IV-5-Conclusion :	83
Conclusion General	85
Bibliographie.....	87

Liste Des Figures

Chapitre : I

Figure(I -1) : sismicité de la terre.	6
Figure(I -2) :zonages du territoire national selon les RPA.	7
figure(I -3) :les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.....	8
Figure(I -4) : Représentation schématique d'un séisme.	9
Figure (I-5) :Les quatre mode de propagation des ondes sismique	11
Figure(I-6) : Les différentes phases d'un accélérogramme.	17
Figure(I-7) : Graphique de Hussite	18
Figure(I-8) : accélération en champ libre.....	19

Chapitre : II

Figure(II-1) : schéma pour le composition d'un pont.....	24
Figure(II-2) : Configuration classique de franchissement autoroutier :.....	29

Chapitre : III

Figure (III-1): Comportement élastique a- idéal, b- réel.....	34
Figure(III-2): Modèle unidimensionnel du comportement élastoplastique.	34
Figure(III-3): Représentation du comportement élastique-parfaitement plastique.....	34
Figure(III-4): Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.	35
Figure(III-5) : courbes effort-déformation.....	36
Figure(III-6) : Décomposition du problème d'interaction sol structure.	45
Figure(III-7): Schématisation d'un problème d'interaction sol structure en éléments fin.....	46
Figure (III-8) : Schématisation d'une méthode de sous structure.	47
Figure(III-9) :Principe de superposition de Kausel.	50

Chapitre : IV

Figure (IV-1) : interface utilisé pour l'entrée des données.....	54
Figure (IV-2) : condition aux limites.....	54
Figure(IV-3) : Maillage.....	55
Figure (IV-4) : Contraintes initiales (condition k_0).....	56
Figure (IV-5) : Option pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calcul.....	56
Figure (IV-6) : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.....	58
Figure1 (IV-7) : Paramètres de modèle Mohr-Coulomb.	59
Figure (IV-8) : Fenêtre de command d'une excitation harmonique.	60
Figure (IV-9) : Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogramme.	60
Figure (IV-10) : accélérogramme de l'U.S (Geological Survey).	61
Figure (IV-11) : profil géométrique retenu.....	62
Figure (IV-12) : maillage du modèle.	64
Figure (IV-13) : génération des contraintes initiales.	64
Figure(IV-14) : présente les trois sollicitations imposées à la base du modèle de calcul.....	65
Figure (IV-15) : Sollicitations sismiques.....	65
Figure(IV-16) : phases de calcul.....	66
Figure (IV-17) : Fenêtre pour le calcul les déférentes phases.	67
Figure (IV-18) : Trace des points sur le profil.....	67
Figure (IV-19) : Maillage déformation du profil (1ere cas).	68
Figure(IV-20) : Total stresses (1ere cas).	69
Figure (IV-21) : Total déplacements (1ere cas).....	69
Figure (IV-22) : Déplacement-temps suivant l'axe XX' (1ere cas).	70
Figure (IV-23) : Déplacement-temps l'axe YY' (1ere cas).....	70

Figure (IV-24) : Vitesse-temps suivant l'axe XX' (1ere cas).....	71
Figure (IV-25) : vitesse-temps suivant l'axe YY' (1ere cas).....	71
Figure (IV-26) : Accélération-temps suivant l'axe XX' (1ere cas).....	72
Figure (IV-27) : Accélération-temps suivant l'axe YY'(1ere cas).....	72
Figure (IV-28) : La force (Fx) en fonction du temps.....	73
Figure (IV-29) : Maillage déformé du profil (2emec cas).....	74
Figure (IV-30) : Total stresses (2eme cas).....	75
Figure (IV-31) : Total déplacements (2eme cas).....	75
Figure (IV-32) : Déplacement-temps suivant l'axe XX' (2emec cas).....	76
Figure (IV-33) : Déplacement-temps suivant l'axe YY'(2eme cas).....	76
Figure (IV-34) : vitesse-temps suivant l'axe XX' (2eme cas).....	77
Figure (IV-35) : Vitesse-temps suivant l'axe YY' (2eme cas).....	77
Figure (IV-36) : Accélération-temps suivant l'axe XX'(2eme cas).	78
Figure (IV-37) : Accélération-temps suivant l'axe YY' (2eme cas).	78
Figure (IV-38) : La force (Fx) en fonction du temps.....	79
Figure (IV -39) : Schématisation des points de l'axe xx.	81
Figure (IV-40) : Déplacement-distance xx.	81
Figure (IV-41) : Déplacement-distance yy.	82

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau (I -1) :séismes et dégats en algérie	7
Tableau(I-2) : échelle de Richter.....	15

Chapitre IV

Tableau (IV-1) :propriétés des couches de sols	62
Tableau (IV-2) : propriétés de l'élément structural (plate)	63
Tableau (4-3) : Données des points.....	68
Tableau (IV-4) : Valeurs maximal aux points considérés.....	73
Tableau (IV-6) : Valeurs maximal aux points considérés.....	79
Tableau (IV-7) : Comparaison entre les deux cas	80
Tableau (IV -8) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal.....	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.

EL : Rigidité e flexion.

E_{ocd} : Module tangent dans un essai oedométrique.

f_i : force de volume.

F : force

G : le module de cisaillement.

G' : le module de cisaillement effectif.

K : Le module de compressibilité volumique.

K_X : perméabilité horizontale.

K_Y : perméabilité verticale.

k : Coefficient de réaction.

[K] : Matrice de rigidité.

K_0 : Coefficient des terres au repos.

L :Longueur.

m :puissance.

P : pression.

U : déplacement.

w : poids.

u_f : déplacement amortissement.

u_i : déplacement d'interaction.

v_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 :

MEF : Méthode des éléments finis.

ISS : Interaction sol-structure.

INTRODUCTION GENERALE

En raison de la vulnérabilité sismique de notre pays, le développement des concepts technologiques innovateurs pour une protection accrue des structures et des personnes Constitue un véritable challenge pour le chercheur de génie civil vis-à-vis des effets Préjudiciables générés lors de mouvements sismiques.

Les ingénieurs de structure ne peuvent pas être inconscients des dégâts provoqués par les séismes sur les plans humains et matériels dont a souffert notre pays, ce qui explique la Nécessité de considérer le défi de l'intégration de nouvelles technologies comme systèmes de Protection parasismique.

Les risques sismiques sur les ponts peuvent avoir des conséquences catastrophiques. Certainement, l'effondrement d'un pont dans une ville ou dans une route peut engendrer des pertes humaines et économiques, ce qui oblige leur remplacement rapide après un séisme à moins que d'autres voies de communication soient utilisées. La fermeture d'un pont, même temporaire, peut avoir d'énormes conséquences, car les ponts constituent souvent des liens vitaux dans un système de communication. Après un séisme, interdire l'accès d'un pont peut compromettre des opérations d'intervention d'urgence, et plus tard, l'impact économique dû à la fermeture du pont augmente avec le temps. L'ampleur économique de la circulation sur la route conduite au ralentissement du trafic et par la suite les itinéraires de remplacement et le coût de remplacement sont colossaux. Les techniques de conception et de construction varient considérablement à travers le monde et même aux États-Unis.

L'introduction du phénomène d'interaction sol – structure dans le cas des ponts est complexe, il correspond à une perturbation du mouvement incident sous l'effet du mouvement propre de la structure, d'où il résulte que le mouvement de l'interface de contact sol – structure du pont n'est pas le mouvement dit de champ libre.

L'interaction sol structure est un concept qui cherche à montrer que pour une structure de pont reposant sur un sol de fondation il existe une influence réciproque dans le comportement du sol et de la structure du pont. Selon les caractéristiques de la structure et le mouvement du sol, l'interaction sol structure peut avoir un effet sur la magnitude des forces induites à la structure en question. La réponse sismique d'une pile du pont se trouve toujours liée à la Forme avec laquelle

INTRODUCTION GENERALE

les mouvements sismiques du sol sont transmis à travers ses Fondations au système fondation-structure. La complexité du problème d'interaction sol Structure réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments, le sol et la structure.

Ce phénomène peut décrire les effets qui se produisent dans le plan du contact entre la masse de sol et la structure, de sorte que, dans l'analyse de la réponse dynamique, non seulement les propriétés structurelles soient incluses mais également les propriétés du sol sous-jacent. L'interaction sol structure pont, plutôt effective pour les basses fréquences, peut contribuer à amplifier ou à diminuer la réponse dynamique de la structure

Au cours des cinquante dernières années des méthodes numériques sophistiquées, telle la méthode des éléments finis, ont été mises en œuvre pour résoudre un certain nombre de problèmes dont les problèmes sismiques. Dans ce domaine, la méthode des éléments finis permet d'étudier la réponse du sol, de quantifier les phénomènes d'interaction sol-structure et d'évaluer les risques de liquéfaction. Cette technique évolue rapidement avec les progrès apportés par les ordinateurs à grande capacité et grande vitesse de calcul et par les techniques d'analyse numérique.

- Le premier chapitre, présente quelques notions les paramètres sismique et notions indispensables pour mieux comprendre les phénomènes des séismes. 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.
- le chapitre deuxième traite des généralités sur les ponts et les piles dans les ouvrages de génie civil, et les différents types des ponts.
- L'interaction sol-structure fait l'objet du troisième chapitre ; dans ce chapitre L'étude du comportement mécanique d'un sol sous sollicitation sismique, en présence d'une pile de pont, la formulation et la modélisation d'un problème d'interaction et les méthodes de prise en compte de ce problème.

INTRODUCTION GENERALE

- Le quatrième chapitre résume les applications réalisées à l'aide de logiciel plaxis, ainsi que l'interprétation de ces résultats obtenus. Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale.



Chapitre I :
Caractérisation Du
Mouvement Sismique

CHAPITRE I :

Caractérisation du mouvement sismique

I-1- Introduction :

La sismologie est l'étude de la naissance, de la propagation et de l'enregistrement des ondes sismiques dans la terre.

La sismologie permet la connaissance de la structure profonde de la terre. L'importance de la sismologie ne se réduit pas à l'étude des profondeurs terrestre. elle permet également de mieux cerner les phénomènes à l'origine de catastrophes.

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier et qui cause le plus de dégâts, si la mécanique du séisme est aujourd'hui mieux connue. tant du point de vue de son origine que de sa propagation, il reste encore un phénomène imprévisible. Faute de prévisibilité, c'est donc par une approche statistique probabiliste que le problème est appréhendé.

Cela ne signifie pas que les pays industrialisés sont à l'abri pour autant (séisme de Kobe de 1995, Japon). le propre de la construction parasismique n'est pas de protéger à tout prix, nulle ville dans le monde n'est réellement à l'abri d'un séisme majeur dépassant en intensité les prévisions initiales.

Au cours de ce chapitre, nous discuterons et de savoir sur certains des termes et concepts utilisés et les définitions prenez-nous pour connaître les raisons des mouvements sismiques.

I-2- Sismogénèse :

Un tremblement de terre est un phénomène naturel des vibrations subites de la terre causée par le mouvement de la plaque rocheuse en raison de l'accumulation des pressions internes.

Une faille est une zone de rupture en profondeur dans la roche qui se prolonge parfois jusqu'à la surface du sol, et le long de laquelle les deux bords se déplacent l'un par rapport à l'autre.

Suivi par le séisme rebonds appelées ondes sismiques à la suite géologiques mouvement plaquettes de terre résultant, ainsi que les effets de sabotage dans les bâtiments, les transports et des installations.

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

Vibrations pendant le fonctionnement qui affectent la croûte de la terre donner naissance à six types d'ondes de choc, deux d'entre eux se rapportent au corps de la terre où effet sur la partie intérieure de la terre tandis que les quatre ondes sont des ondes de surface, il peut faire la distinction entre ces ondes à travers les types de mouvements qui affectent les particules de roche où envoyer les première vagues et des ondes de pression particules oscillent d'avant en arrières dans la même direction des vagues.

Habituellement, les premières ondes transmises sont plus grandes que les ondes secondaires rapidement. Lors du séisme, les première vagues de et connecté stations de recherche géophysiques partout dans le monde sont les premières vagues.

les premier type de zone sismique(les séisme superficiels) qui sont le siège de tremblements de terre superficiels (moins de 70km de profondeur).se produisent en faible profondeur, partout au niveau intersections entre les plaques (dorsales médio-océanique et fosses océaniques). ces séismes sont liés à une importante activité volcanique, il sont deux premier type est faults normal consistant à proximité des parois des fosses océaniques le résultat des forces de traction qui se produisent à partir de la courbure de la cuvette se trouve sur cette région .le second type représente des faults ou inverse reptiles formés à partir des forces de pression qui en résulte l'allègement de la friction entouren le plat avec un non-relief supérieure plat.

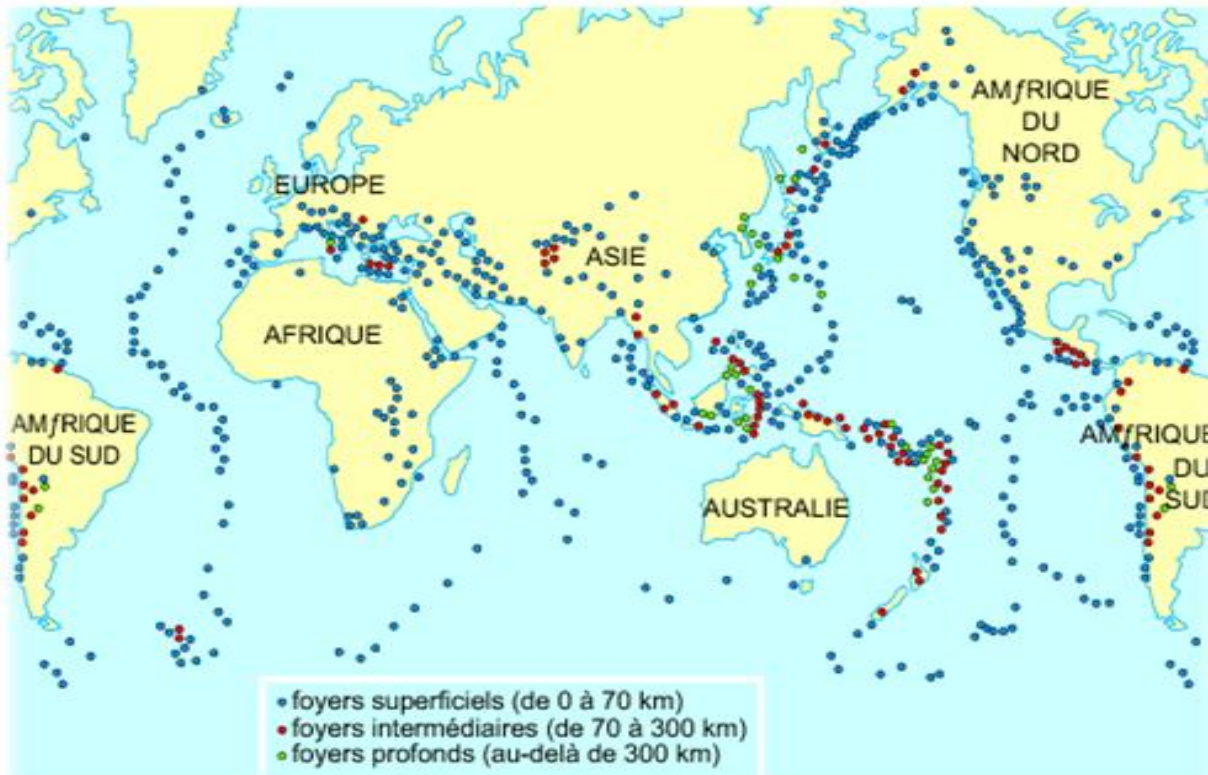
Selon l'en-le deuxième type de zone sismique(le séisme intermédiaires) se produisent se concentrent uniquement au voisinage des limites convergentes. foyer de tremblement moyen de failles sismiques qui est failles normales consistent à la suite de la partie superficiel relief à l'intérieur robe sol, et il est donc soumis à la résistance à la traction résultant de l'effet de deux force dans une direction différente se pose à une profondeur intermédiaire (70 à 300km) et profonds (plus de 300) droit.

-le troisième type de zone sismique(les séismes profonds) est mise au point sismique profonde (300 à 700 km), elle reproche à rampante ou inverse consistent en raison de la force résultant de la pression résistance de l'avant pour précipiter relief où la partie périphérique.

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

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

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.



Figure(I -1) :sismicité de la terre

I-3- Les risque sismique :

Pour mettre en œuvre un projet, tels que les pont , les grands bâtiments ,et les installations nucléaires et forage pétrolier en mer, il est nécessaire de prendre en compte toutes les conditions appropriées pour la stabilité de ces bâtiments et l'étude approfondie les risques sismiques.

Histoire géologique montre également que l'Algérie est pas à l'abri des catastrophes sismiques, cela ne signifie pas que nous nous arrêtons les études, mais des études restent à éviter les risques sismiques restent peu développées, afin de protéger l'humanité et la propriété et les immeubles de grand hauteur.

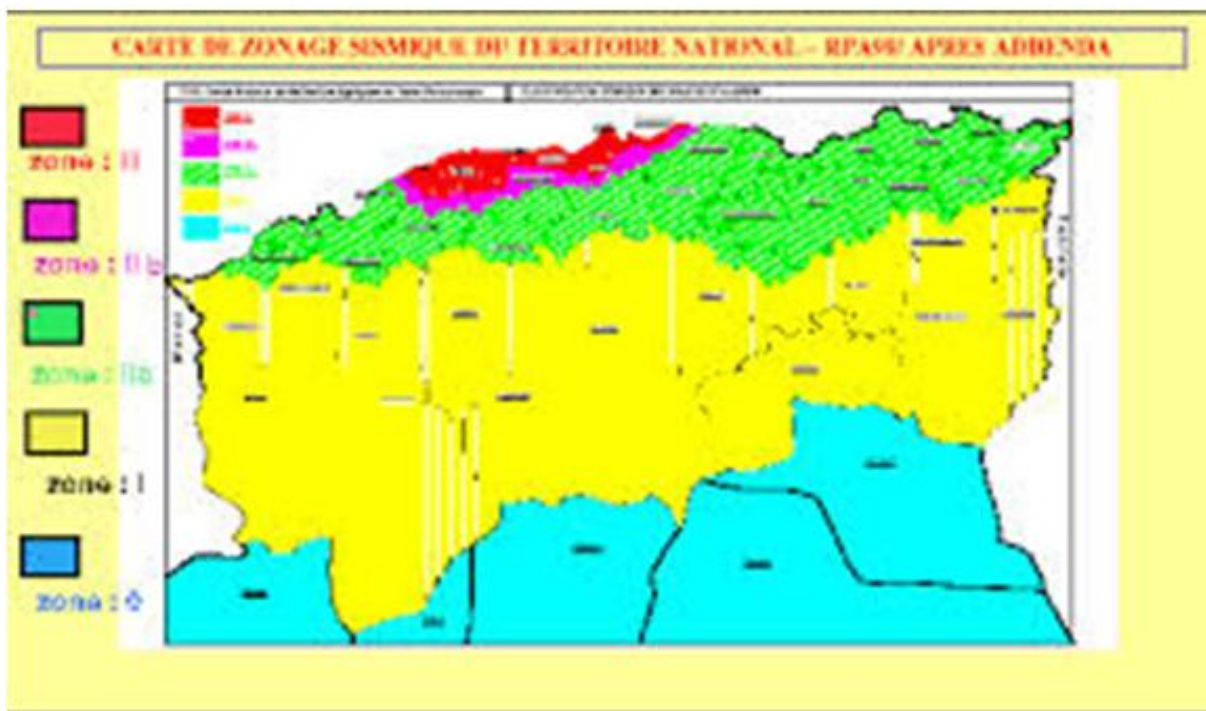
Une grand partie du nord de l'Algérie est susceptible d'être soumise à d'importantes secousses sismique dont les effets catastrophiques, (ce séisme font peser de graves menaces sur les populations, peuvent semer la mort en détruisant les habitations, les édifices publics, les ponts, les barrages et glissement de terrains,.....)

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

Le désastre de chlif en 1980 a réveillé les consciences, c'est ainsi le centre national de recherche appliquée en génie sismique CGS est crée en 1985.

Lieu	Année	Magnitude	Morts
Boumerdas	2003	6.8	2200
Ain temouchetnt	1999	5.5	25
Mscara	1994	5.6	171
Tipaza	1989	6.1	35
Chlef	1980	7.3	2633
Chlef	1954	6.7	1243

Tableau (I -1) :séismes et dégats en algérie.



Figure(I -2) :zonages du territoire national selon les RPA.

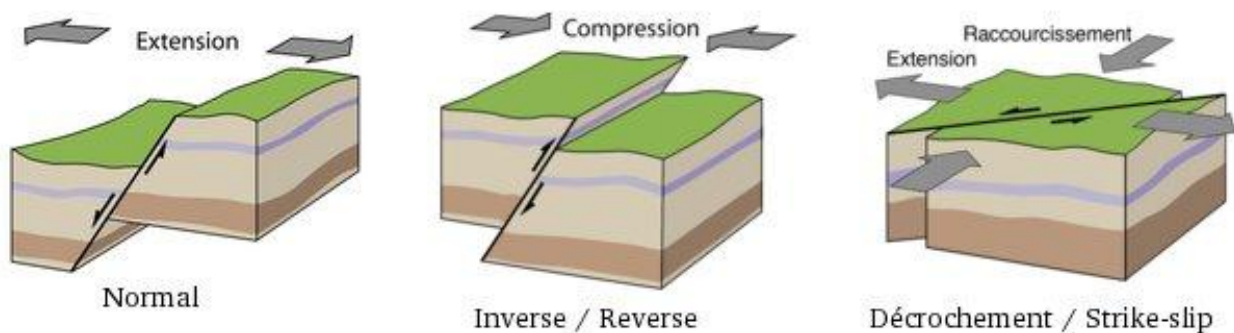
I-4- Failles :

Lors d'un séisme, la rupture s'accompagne d'un déplacement relatif de deux blocs rocheux (le rejet de faille) le long d'une surface plus ou moins plane de l'écorce terrestre appelé le plan ou le miroir de faille. Une faille est donc une cassure avec déplacement de blocs rocheux suite au

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

déchargement des contraintes accumulées au cours du temps ou est un ensemble de surface discontinue qui présente de milliers de ramifications dans des directions multiples, il peut générer un grave séisme et même fissure de la surface de la terre créant une forme de relief nommé escarpement de faille[1].

Les plaques subissent des forces d'étirement, de compression ou de décrochement et les mouvements relatifs engendrent différents types de failles. Observer des failles sur le terrain et identifier le mouvement relatif des blocs qu'elles séparent permet à un géologue d'identifier les forces tectoniques ayant conduit aux déformations qu'il étudie [2].



figure(I -3) :les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.

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 :

a-faille normale ou d'extension:

dans le cas d'une faille normale, le bloc au dessus de la faille bouge vers le bas par rapport au bloc en dessous. Ces mouvements sont créés par des forces en extension et provoquent un allongement (glissement). C'est le cas du séisme de 1954 de Peak-Dixie Valley au NEVADA.

b-faille inverse(compressive) :

dans le cas d'une faille inverse, le bloc au dessus de la faille bouge vers le haut par rapport au bloc en dessous. Ce mouvement est créé par des forces en compression et provoque un raccourcissement, séisme de San Fernando en 1971.

c-faille décrochante :

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

dans le cas d'une faille décrochante, le mouvement entre les blocs de par et d'autre de la faille est horizontal. Si comme dans l'animation le bloc de droite part vers la gauche (par rapport à l'autre bloc), la faille est dite senestre (et dextre dans le cas inverse). Ce mouvement est créé par des forces de cisaillement, c'est le cas de la faille San Andreas en californie.

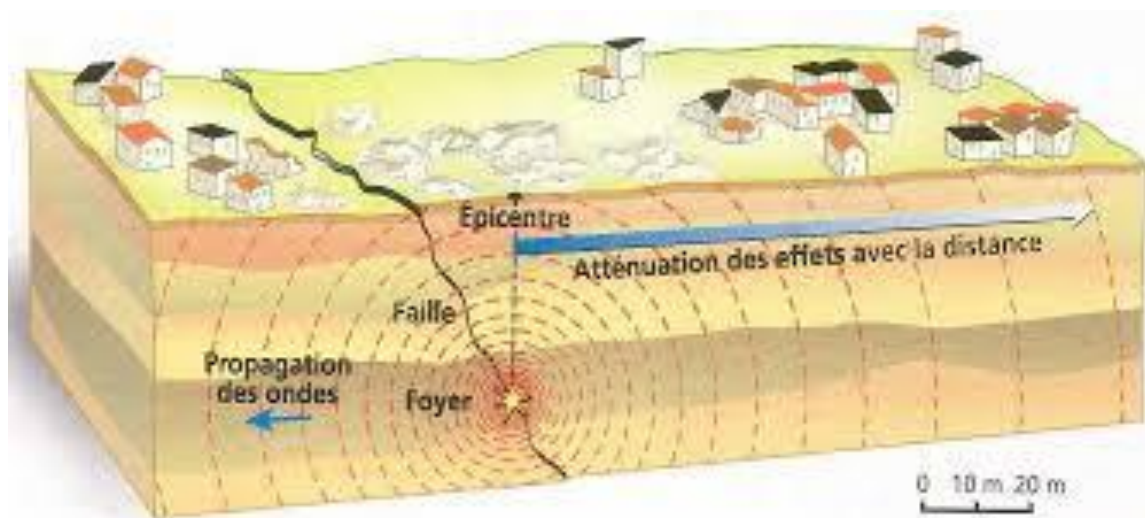
d-faille oblique :

dans le cas d'une faille oblique, le mouvement combine une ouverture (ou fermeture) et décrochement. Ces types de mouvement est créé par une combinaison de forces cisailantes et de force extensives (ou compressive), c'est le cas de la cote du japon.

I-5- Nature et mode de propagation des ondes sismiques :

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. l'onde peut traverser un milieu sans modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va pousser des particules élémentaires, qui vont pousser à leur tour d'autres particules et reprendre leur place, ect. On distingue les ondes de volumes qui traversent la terre et les ondes de surfaces qui se propagent parallèlement à sa surface.

Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrement des sismomètres. On distingue deux grands types d'ondes émises par un séisme par un tremblement de terre, de ces deux sortes d'ondes, deux seulement peuvent se propager dans la masse du milieu rocheux : ce sont les ondes de volume qui comprennent les ondes primaires ou ondes P, les plus rapides et les ondes secondaires ou ondes S. le deuxième type d'ondes est représenté par les ondes de surface qui sont une combinaison des ondes P et S, occasionnées par les conditions aux limites spéciales de la surface. ce type d'ondes est représenté principalement par les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.



Figure(I -4) : Représentation schématique d'un séisme.

1) Les ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale augmente avec la profondeur, il existe deux types d'ondes dites de volume :

a- Les ondes P :

les ondes P ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Elles se matérialisent par un mouvement préférentiel d'une particule parallèlement à la direction de propagation. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde ou elles agissent en comprimant et en dilatant alternativement les roches.

b- les ondes S :

les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales, ne peuvent se propager que dans les solides. Les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau de la terre. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P, elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

2) les ondes de surface :

Si le milieu matériel possède des propriétés électriques homogènes et isotropes, on observe deux types d'ondes de surface : l'onde de Rayleigh et l'onde de Love. Moins de Rayleigh, si le milieu est hétérogène ou anisotrope, d'autres ondes de surface telles que les ondes de Love peuvent être présentes; ces ondes sont

Confinées aux interfaces entre les milieux matériels caractérisés par des impédances acoustiques différentes. L'amplitude des ondes de surface décroît rapidement avec la profondeur

a- les ondes de Love (L)

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

Elle a été découverte son existence en 1911. résultant d'interférence constructives entre les ondes PH et SH horizontales, les ondes de love ont un déplacement similaire à celui des ondes S sans mouvement vertical. Les particules du sol sont déplacées d'un coté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation engendrant ainsi un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices. La vitesse moyenne de propagation des ondes de love $V_L=4\text{km/s}$.

b-les ondes de Rayleigh(LR) :

elle est découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Résultant d'interférences constructives entre les ondes PV et SV verticales, les ondes de Rayleigh ont un déplacement complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement elliptique à la fois horizontal et vertical,rétrograde à faible profondeur R et prograde pour une profondeur supérieure au cinquième de la longueur d'onde(LANDA). Les vibrations engendrées par cette onde durent plusieurs minutes.

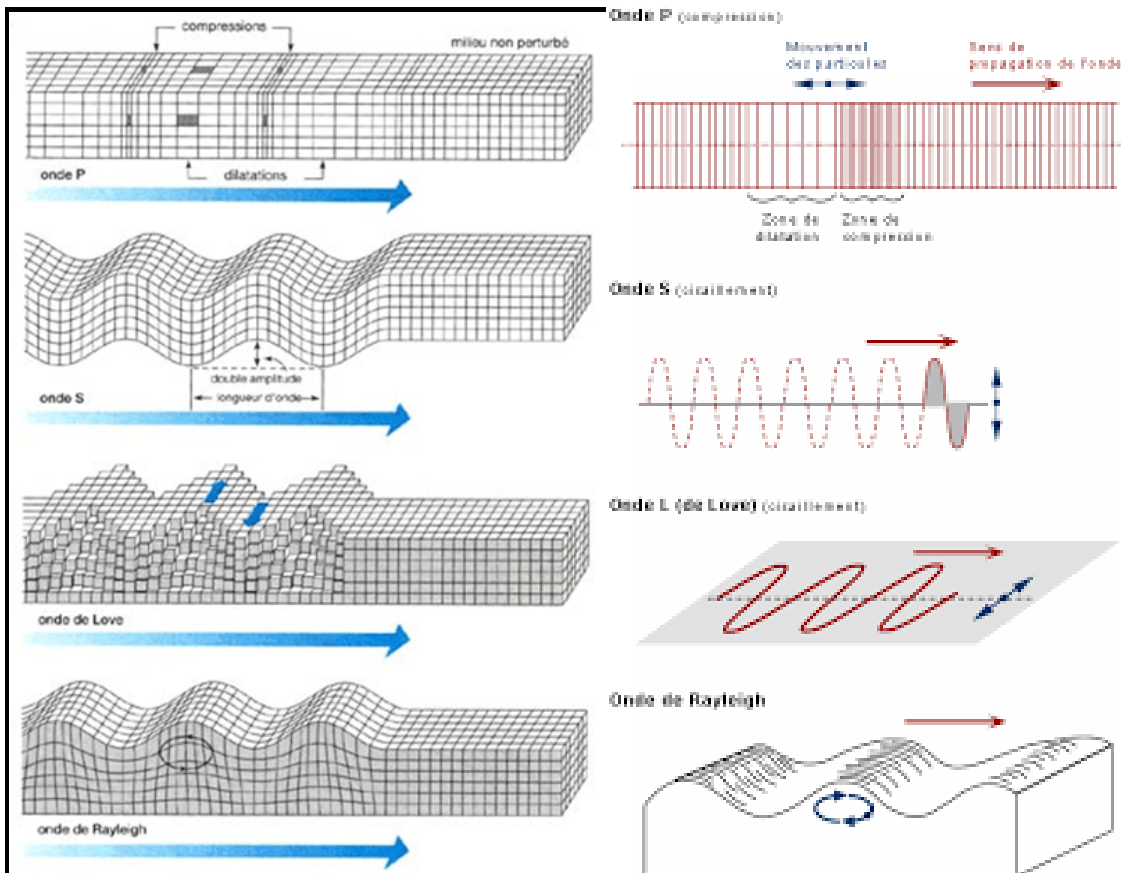


Figure (I-5) : Les quatre modes de propagation des ondes sismique.

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

Les vitesses de propagation des ondes sont données par les formules suivants :

Pour les ondes P (en m/s).

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

Pour les ondes S (en m/s)

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \dots\dots\dots (1-3)$$

Désigne la constante de lamé et :

ρ : Densité du milieu ;

E : module d'élasticité dynamique ;

G : module de cisaillement dynamique ;

ν : coefficient de poisson.

I-6- Foyer et épipcentre :

L'endroit où, sur une faille démarre la rupture est appelé foyer du tremblement de terre ou hypocentre. L'épicentre est la projection de ce point à la surface de la terre ou est le point à la pression interne de la massive énergie potentielle libéré de la terre à la suite de mouvement de la lave brûlante dans le sol.

L'épicentre macrosismique est le lieu de plus forte intensité ressentie, il peut être différent de l'épicentre réel. Autrefois, la détermination de l'épicentre se faussant à partir des appréciations des personnes ayant ressenti le également les dégâts.

Actuellement, grâce à plusieurs milliers de station disposée sur l'ensemble de la planète, il est possible de déterminer l'épicentre et l'hypocentre de tous les séismes de magnitude supérieure à 4 et voire même 2 dans certaines zones bien surveillées. utilisez de vote spéciaux pour surveiller les tremblement de terre l'appareils particulièrement sensibles des vagues de tremblements de terre par lequel vous pouvez déterminer l'épicentre du séisme conformément à la loi de la distance et de la vitesse de l'onde est le temps qu'il faut pour se rendre à la station.

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

I-7- Paramètre caractéristiques du mouvement sismique :

Les autres paramètres utilisés pour classer un séisme sont la magnitude et l'intensité :

a) La magnitude :

C'est une évaluation de la quantité d'énergie libérée au niveau du foyer du tremblement de terre. Cette échelle, elle a été définie en 1935 par Richter pour les séismes locaux de Californie, est basée sur le principe d'enregistrement des mouvements du sol effectué en un certain nombre de points d'observations situés à des distances quelconques de l'épicentre. A partir d'une étude statistique, on a pu établir une corrélation entre l'énergie libérée par un séisme et la magnitude.

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

$$M_l = \frac{\log A}{A_0} \dots \dots \dots (1-4)$$

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.

Les logarithmes de base 10 sont utilisés.

En pratique, la magnitude d'une secousse sismique est déterminée d'après les enregistrements des mouvements du sol effectués en un certain nombre de points d'observation situés à des distances quelconques de l'épicentre.

La notion de magnitude est incomparablement supérieure à celle d'intensité : pour un même tremblement de terre, il y a de très nombreuses intensités, mais il n'existe qu'une seule magnitude.

b) 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, pour un séisme donné, l'intensité

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

dépend de la distance à l'épicentre ,elle décroît quand cette distance augmente, mais des anomalies peuvent apparaître, dues à des conditions géologiques particulières et topographiques.

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

ÉCHELLE D'INTENSITÉ DE MERCALLI	MAGNITUDE À L'ÉCHELLE RICHTER
I Séisme perçu uniquement par quelques personnes dans des circonstances particulières; détecté seulement par des instruments très sensibles.	2
II Perçu par quelques personnes au repos et se trouvant aux étages supérieurs; balancement d'objets suspendus.	3
III Perçu principalement par des personnes à l'intérieur des édifices. Les automobiles stationnées peuvent bouger.	
IV Perçu par la plupart des gens à l'intérieur des édifices et par certains à l'extérieur; suffisant pour réveiller certaines personnes. Bruits de vaisselle, fenêtres et portes.	4
V Perçu par presque tout le monde; plusieurs personnes sont réveillées. Bris de vaisselle et de fenêtres; les objets instables sont renversés.	5
VI Perçu par tout le monde; plusieurs personnes sont effrayées et courent à l'extérieur; quelques meubles sont déplacés; quelques morceaux de plâtre tombent et quelques dommages aux cheminées. Dommages légers.	
VII La plupart des gens paniquent et courent à l'extérieur; dommages minimes aux constructions conçues pour les zones sismiques, de minimes à moyens chez les bonnes constructions ordinaires, importants chez les mauvaises constructions. Meubles renversés.	6
VIII Dommages légers aux constructions conçues pour les zones sismiques, importants chez les bonnes constructions ordinaires avec des effondrements possibles, catastrophiques chez les mauvaises constructions.	7
IX Dommages considérables aux constructions conçues pour les zones sismiques. Edifices déplacés sur leurs fondations. Fissuration du sol. Bris des canalisations souterraines.	
X Quelques bonnes constructions en bois et la plupart des constructions en maçonnerie sont détruites. Sol fortement fissuré. Plusieurs glissements de terrain se produisent.	8
XI Très peu de constructions en maçonnerie restent debout; rails tordus; ponts détruits. Grandes fissures dans le sol.	
XII Destruction quasi totale. Ondulations visibles à la surface du sol. Objets projetés dans les airs.	9

Tableau (I-2) : échelle de Richter.

I-8-Mouvement du sol :

La donnée la plus immédiate permettant de définir le mouvement du sol pendant le séisme est constituée par les accélérogramme de ses trois composantes, c'est-à-dire d'enregistrements donnant pour chacune d'elles l'accélération en fonction du temps.

La connaissance de la nature des sources sismiques ainsi que les lois de propagation des ondes sismiques peut être donnée par des enregistrements sismographiques de l'accélération du sol, car la seule information instrumentale définissant le déplacement du sol est l'accélérogramme.

Cette connaissance n'est qu'une étape vers la détermination du risque sismique, le problème principale étant celui de l'identification des mouvements au niveau du sol.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent principalement sous la forme d'une accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps : on peut de même enregistrer la vitesse ou le déplacement.

I-9- L'accélérogramme du séisme :

Notre compréhension des forces ou déformation induites par les séismes s'est développée de manière considérable conséquemment à des mouvements de sol dus aux séismes, ou à la réponse des structures enregistrée sous forme d'accélérogrammes.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme s'écrivent principalement sous la forme d'accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps ; nous pouvons de même enregistrer la vitesse ou le déplacement des particules du sol.

I-10- Accélération maximale :

Est un paramètre caractérisant la mouvement de sols soumis à des ondes sismiques, il est dite à la vitesse du sol se déplaçant lors d'un séisme. Ces deux paramètres dépendent de l'intensité de la secousse, mais aussi de la nature géologique du sous-sol. 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.

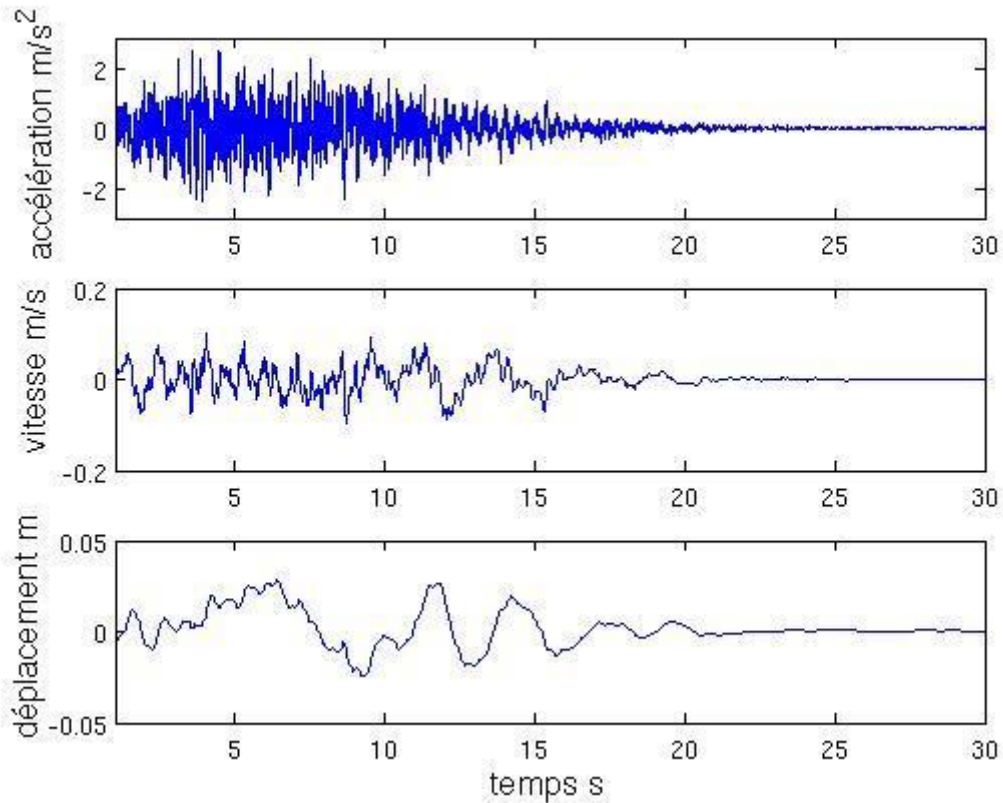


Figure (I-6) : Les différentes phases d'un accélérogramme.

I-11-Durée du séisme :

c'est le temps qui s'écoule entre le premier et le dernier pic au-dessus d'un certain niveau où l'amplitude des accélérations est notablement plus élevée .

L'expérience a montré que la majorité des bâtiments ne peut pas supporter le un dixième (1/10) de l'accélération de la pesanteur lors d'un mouvement de direction horizontale.

De ce fait, l'accélération maximale atteinte en un point du sol constituerait un paramètre important lors du dimensionnement d'une structure. Cette durée dépend de la taille de la faille et la durée de la rupture. C'est le graphique de (Hussit Plot) qui est le plus utilisé pour définir la durée effective.

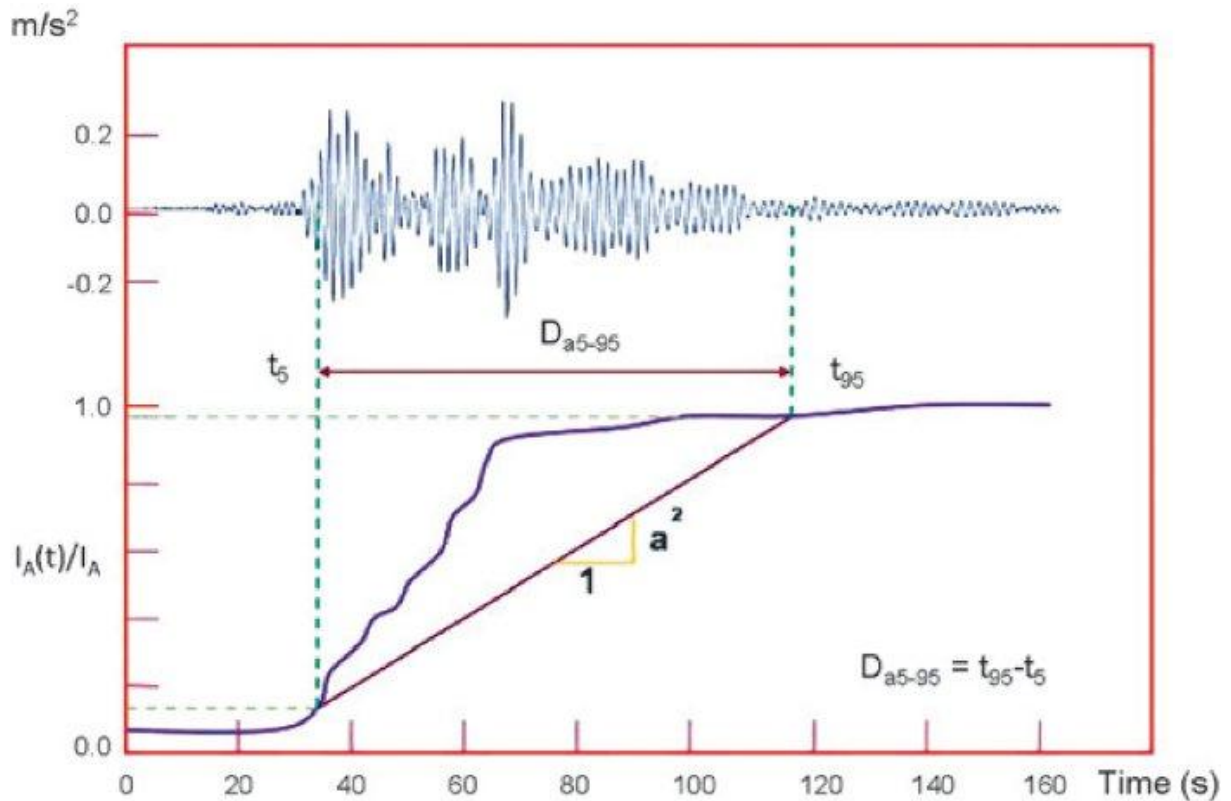


Figure (I-7) : Graphique de Hussit.

I-12- Le spectre de réponse :

Le spectre de réponse permet de caractériser une excitation. Il consiste en la détermination de la réponse maximale (déplacement, vitesse ou accélération) d'une série d'oscillateurs de différentes fréquences propres, soumis à cette même excitation. Le spectre de réponse résultant permet alors l'évaluation de la réponse de n'importe quel système linéaire, à partir de sa fréquence propre. L'utilisation principale est donc l'évaluation de la réponse maximale des bâtiments lors de tremblements de terre, en supposant que la réponse est dominée par un mode unique, ce qui est vrai dans la majorité des cas où le mode fondamental de la structure est prédominant.

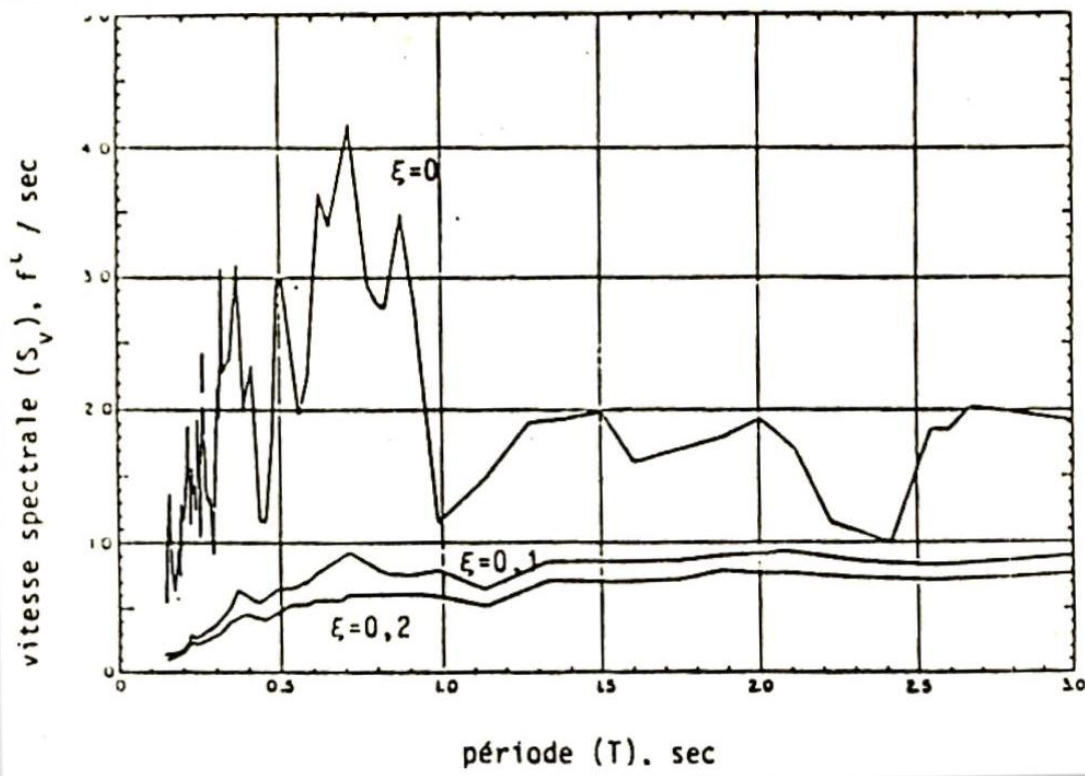


Figure (I-8) : spectre de réponse en pseudo vitesse (Elcentro, californie mai 1944, composante NS).

I-13- Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique :

Le mouvement sismique enregistré à un site est le résultat de la combinaison de différents Effets depuis la zone de rupture jusqu'à la sortie au niveau du capteur sismique :

-effet de la source sismique : magnitude du séisme, mécanisme au foyer, effet de directivité, Position sur le bloc chevauchant ou chevauché [3, 4].

-effet de la propagation entre la source et le site : mécanismes d'atténuation géométrique et anélastique.

-effets locaux du site : effets de site (lithologique et topographique) et mécanismes d'atténuation. Ces effets de site sont classiquement considérés comme faibles dans le cas des sites au rocher. Nous verrons cependant qu'ils ne sont pas négligeables.

- effets instrumentaux : bande de coupure des instruments, bruits instrumentaux.

Pour les deux premiers effets (effet de source et de propagation), seuls les éléments essentiels nécessaires à la compréhension des notions abordées dans le cadre de la thèse seront présentés.

Pour une revue plus détaillée, les ouvrages généraux suivant peuvent être consultés : Aki et

Richards (1980), Kramer (1996), Lay et Wallace (1995) et Stein et Wyssession (2009). Nous nous

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

attarderons davantage sur les effets locaux du site affectant le mouvement sismique à un site rocheux de surface.

I-14- 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 mouvement sismique est défini par un accélérogramme ou par un spectre de réponse. Ce mouvement est très influencé par les conditions géotechniques locales.

La réponse d'un ouvrage à un mouvement sismique est gouvernée par la nature de ce mouvement d'une part et par les caractéristiques géométriques de la structure et du sol d'autre part. Lorsque la structure est soumise à un mouvement sismique du sol, elle se déforme et la réaction qu'elle transmet au sol modifie localement ce mouvement.

En général, l'interaction « sol-structure » est négligeable et n'est donc pas à prendre en compte dans la modélisation des ouvrages courants. Autrement dit, l'analyse spectrale s'effectue en supposant un encastrement parfait à la base des appuis.

Le phénomène d'interaction sol structure correspond à une perturbation du mouvement incident sous l'effet du mouvement propre de la structure, L'évaluation de l'interaction sol structure et l'influence de celle-ci sur les enregistrements sismiques mérite ainsi plus de considération grâce à l'étude :

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

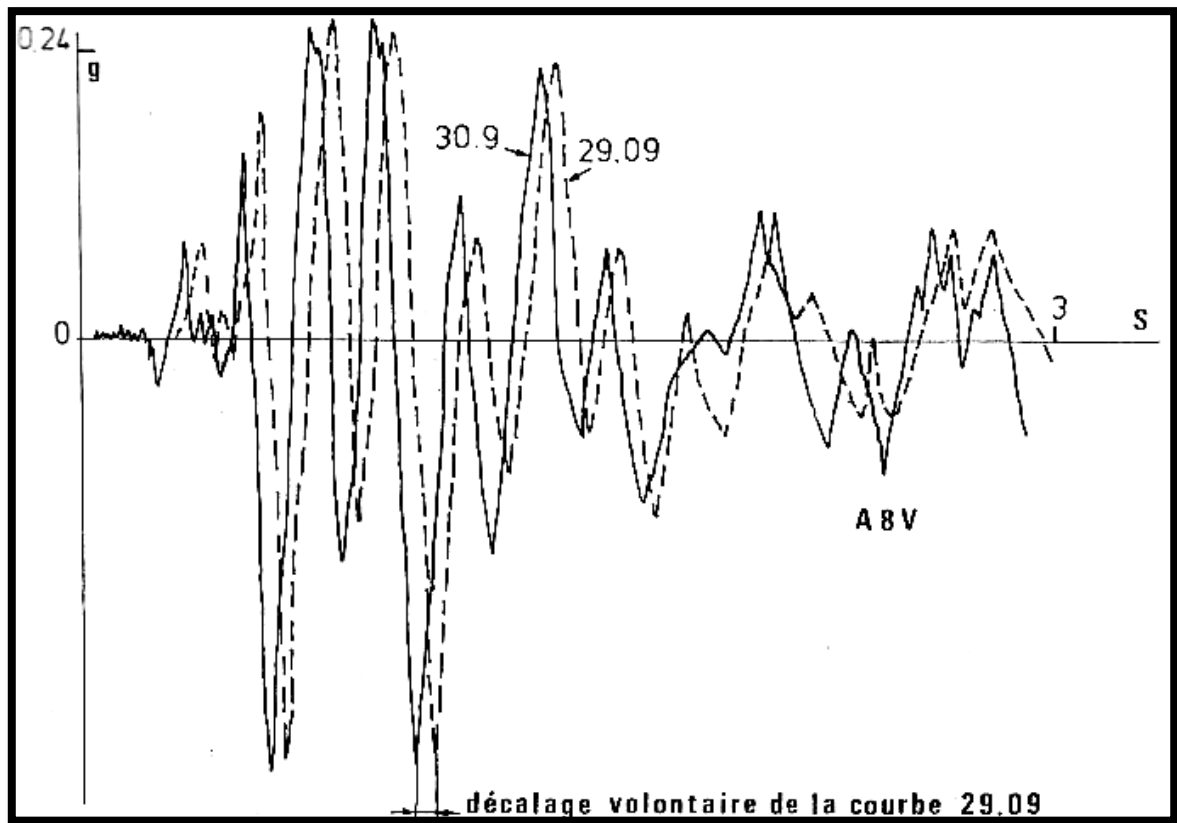


Figure (I-9) : accélération en champ libre.

I-15- Conclusion :

Un tremblement de terre est un ébranlement transitoire et passage, causé par la libération brutale des contraintes. Cet ébranlement s'effectue le long d'une faille, qui de temps à autre joue pendant des années, des dizaines, voire des centaines d'années.

Cette faille rayonne de l'énergie sous forme d'ondes sismiques qui se propagent dans la terre et qui font secouer le sol pour le déséquilibre.

La majorité des séismes sont dus à des causes tectoniques. C'est aux frontières des plaques tectoniques qu'il survient les séismes, là où d'énormes contraintes s'accumulent et se libèrent sous forme d'onde de choc.

En conclusion, on peut dire que le tremblement de terre est un phénomène naturel indépendant dans très peu de cas présente une menace à l'homme, il devient un phénomène dangereux principalement quand il est considéré en relation avec les structures. Par conséquent, les tremblements de terre sont d'intérêt spécial pour l'ingénieur de structure travaillant dans des secteurs sismiques.

CHAPITRE I : Caractérisation du mouvement sismique

C'est ainsi qu'une meilleure connaissance du phénomène sismique et de ses effets a permis de développer et de perfectionner les règles humaines, que pour la sauvegarde des collectivités.

Il s'est avéré alors que si les techniques modernes permettent de réaliser des ouvrages capables de bien résister aux séismes, il n'en demeure pas moins que la connaissance de la sismicité passée, garde toujours sa valeur et, est même indispensable et nécessaire pour une évaluation fiable de l'aléa sismique ainsi que pour le perfectionnement des règles parasismiques.

A decorative red scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

***Chapitre II :Caractérisations
Les Ponts***

Chapitre II

Caractérisation des ponts

II-1-Introduction :

Les ponts passent par-dessus d'un obstacle (vallée, fleuve, lac, etc.). On distingue les ponts selon leur fonction:

passerelles, viaducs, aqueducs, ponts et passerelles de barrage, ponts- canal usiniers ou encore ponts multifonction. Les matériaux de construction qui ont été utilisés pour les ponts sont le bois, la pierre, la brique, l'acier et le béton.

La construction d'ouvrages d'art connaît une activité significative à la faveur des programmes initiés pour répondre à des exigences socio-économique du pays. Ces réalisations témoignent du génie national qui se consacre d'avantage dans l'art de concevoir et de construire. Ce capital va certainement servir de source de référence au lancement des futurs grands projets.

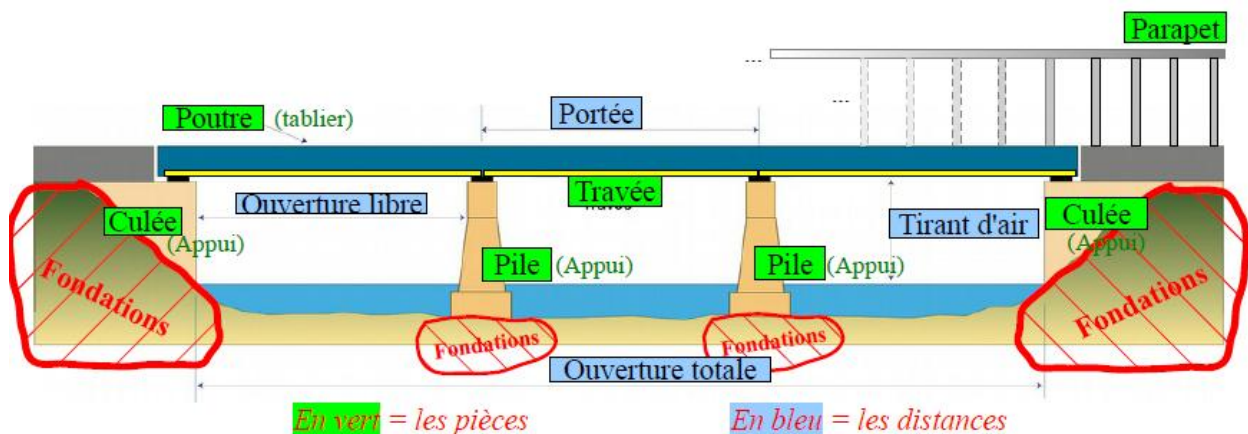
II-2-Définition de pont :

un pont est une construction qui permet de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voie de communication) .

D'une façon général on appelle un pont tout ouvrage permettant a une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Selon le cas on distingue : pont route, pont rail, pont canal[7].

II-3-composition d'un pont :

Les différentes parties d'un pont (ici schéma d'un « pont poutre droite continue sur appui »)



Figure(II-1) : schéma pour le composition d'un pont.

Chapitre II : Caractérisations des ponts

Un pont comprend trois parties distinctes :

- le tablier, structure sur laquelle se fait le déplacement à niveau ou avec une pente suffisamment faible pour être admissible par des piétons, des animaux ou des véhicules (automobiles, trains, avions, etc.) entre ses deux extrémités ;
- les appuis qui supportent le tablier : les culées aux deux extrémités et les piles intermédiaires ou piles -culées si le tablier n'est pas continu ;
- les fondations qui permettent la transmission des efforts de l'ouvrage au terrain. (sur lesquelles reposent les culées et les piles)

Le tablier comprend une ou des travées qui sont des parties du pont comprises entre les piles ou entre une pile et une culée. Dans le cas des ponts suspendus et des ponts à haubans, le tablier est soutenu par des suspentes ou des haubans accrochés à des pylônes.

Les définitions complémentaires suivantes peuvent être données :

- l'ouverture libre est l'espace libre entre les piles ou entre une pile et une culée
- l'ouverture totale est la distance entre les murs droits (piédroits) des culées ;
- le tirant d'air est la hauteur libre sous l'ouvrage ;
- le gabarit de navigation est l'espace libre nécessaire au passage sous ou sur l'ouvrage.

(non représenté sur le schéma : le gabarit = tirant d'air X ouverture libre)

- Le parapet est une rambarde destinée à empêcher la chute des piétons ou des véhicules
- La portée d'un pont désigne la longueur d'une partie d'un pont comprise entre deux piles ou entre une pile et une culée.(entre le 2 milieux des piles) [8].

II-4- Le rôle des ponts :

Les ponts ont toujours eu pour rôle de faire transiter des personnes, des véhicules, ou des marchandises. Leur positionnement a toujours été choisi avec parcimonie. Les critères de ce choix étaient la complexité de l'obstacle à franchir en ce lieu la, la présence de pôles importants à portée de ce pont, l'emplacement situé sur une voie de passage très utilisée. Mais au delà de cet aspect usuel, ils ont aussi une fonction représentative auprès du public, notamment les riverains et les habitants de la ville, quand le pont est urbain.

Ce rôle sémiotique véhicule des idées de liens et de connections, de prouesses techniques (dans certains cas), d'un édifice reflétant la puissance d'une cité ou autre entité commanditant ce pont, etc. Le franchissement de fleuves a depuis l'origine toujours été un dilemme du

Chapitre II : Caractérisations des ponts

pouvoir:

Fallait-il privilégier le confort que procure un rempart, ou bien fallait-il favoriser l'ouverture vers le monde, et développer les relations commerciales, industrielles et culturelles.

Dans un monde hostile, la frontière que représentait le fleuve devait impérativement rester sous le contrôle de l'autorité locale. Il était vital, dans un environnement politique incertain, de pouvoir couper les liens avec l'autre rive et donc d'éviter des invasions néfastes.

Le bac s'imposa rapidement comme le dispositif offrant le meilleur compromis, notamment sur cet aspect stratégique[4].

Cette peur subsiste même en 1845 (voir document page 62) : Mais les ponts suspendus, comme les bacs, répondent au critère car permettent très facilement de suspendre le service. Il s'avère par ailleurs, comme lors de la guerre de 1870, que si les destructions dues la guerre sont effectivement nombreuses, la reprise de service est en général rapide, car les piles demeurent intactes.

Pour les philosophes et scientifiques, on pense que l'on construit encore trop les ponts (et surtout des remparts) comme des dispositifs de protection et non de liens.

La citation suivante illustre ces propos :

« Les hommes construisent trop de murs et pas assez de ponts. » Isaac Newton

Si on extrapole l'avis de Newton, on arrive à penser que les ponts transmettent une image forte de liens entre deux éléments distincts qui pour autant sont en relation entre eux, et auquel un obstacle naturel vient contredire ce contact[1].

II-5- les types de ponts :

II -5-1- pont poutre :

Ponts composés d'un tablier très rigide qui transmet les charges sur les culées et des piliers (piles) si la portée est trop importante pour être tenue par une simple poutre.

Les ponts à poutres désignent tous les ponts dont l'organe porteur est une ou plusieurs poutres. Les efforts engendrés dans la structure sont principalement des efforts de flexion[5].

Un cas particulier de ce type de pont : les ponts à voussoirs. Des tronçons de tablier sont préfabriqués puis assemblés à la structure porteuse, la pile, au fur et à mesure de l'avancement du chantier, de manière alternée, afin d'équilibrer les charges de part et d'autre de la pile[6].

Ce procédé permet de franchir de grandes portées, allant jusqu'à 300 mètres en utilisant le béton armé, sans besoin d'étalement.

On trouve donc des ponts à poutre en béton, en acier, mais aussi en bois (la portée étant

Chapitre II : Caractérisations des ponts

nettement plus courte).

II -5-2- pont dalle :

Les ponts-dalles constituent le type d'ouvrage le plus répandu, puisqu'ils représentent près de la moitié de la surface totale des ponts construits ces dernières années[7].

Cette population d'ouvrages comprend dans une large proportion des passages supérieurs ou inférieurs routiers ou autoroutiers et, dans une moindre mesure, des ponts-rails, des tranchées couvertes et des passerelles pour piétons. Leur longueur varie d'une quinzaine à une soixantaine de mètres et, parfois, dépasse une centaine de mètres. Leurs travées déterminantes se situent entre une douzaine et une trentaine de mètres.

Ces ouvrages sont d'aspect élancé et restent cependant robustes, grâce à leur monolithisme. La simplicité de leur forme et leur grande réserve de sécurité constituent par ailleurs des atouts importants, ainsi que leur souplesse dans l'adaptation à toute difficulté d'implantation grâce à leur construction par coulage en place (dans le cas de tracé biais ou courbe en plan ou en élévation). Ces avantages s'avèrent d'autant plus intéressants que ce type d'ouvrage demeure parmi les solutions de franchissement les plus économiques, sur le double plan de l'investissement et de l'entretien.

II -5-3- pont mixte :

Un pont mixte acier/béton comporte des éléments structurels en acier et en béton armé ou précontraint, dont la particularité réside dans le fait de faire fonctionner ces matériaux selon leurs aptitudes optimales, notamment en compression pour le béton et en traction pour l'acier. Ses éléments présentent une solidarisation entre eux, sous forme de liaisons mécaniques, de façon à créer un ensemble monolithique.

Leurs dénomination est souvent ramenée à l'expression ponts mixtes bien que la mixité peut concerner d'autres matériaux comme le bois et la pierre et de la même façon, on peut parler uniquement de ponts à tabliers mixtes acier/béton alors que des ponts avec des piles et des tabliers composés alternativement des deux matériaux sont considérés comme des ponts mixtes. Les ouvrages composés uniquement de béton armé ou précontraint, malgré l'acier qu'ils possèdent, ne sont pas considérés comme des ponts mixtes.

Chapitre II : Caractérisations des ponts

II-6- Les différents éléments antisismiques d'un pont :

La protection parasismique des ponts peut être obtenue soit par la combinaison soit par l'adoption d'une des deux approches suivantes :

-La première approche est basée sur la capacité à résister des éléments des structures, notamment des appuis et des fondations, en mesure de supporter, sous l'effet d'un séisme, des déformations inélastiques sans atteindre la rupture; il est évident que ceci nécessite des interventions de réparation pour des dommages éventuels.

-la seconde approche se base sur l'équipement de dispositifs spéciaux, tels que des amortisseurs ou des dissipateurs d'énergie, disposés entre la structure portée et la structure porteuse; cette méthode est plus coûteuse à la conception et à l'entretien, mais permet de supporter des efforts importants sans que la structure ne soit endommagée.

On pourra donc utiliser des butées sismiques et différentes sortes d'amortisseurs :

- amortisseurs élastoplastiques,
- amortisseurs par frottement,
- amortisseurs visqueux.

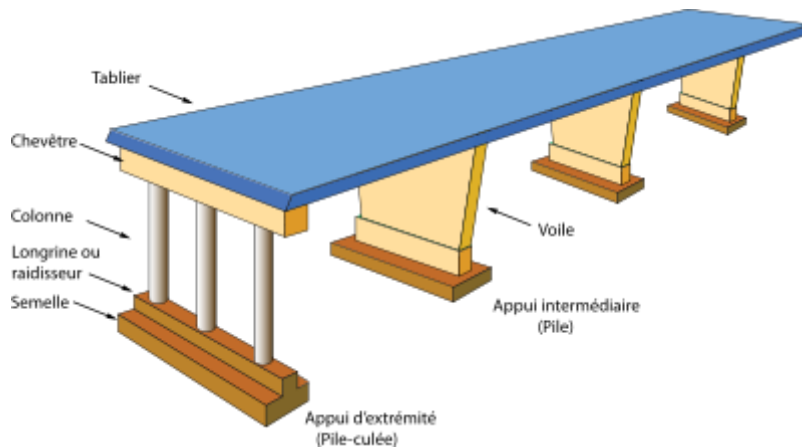
En outre, ces dispositifs spéciaux permettent :

-d'augmenter la période fondamentale de vibration (éventuellement l'amortissement) et de réduire, en conséquence, les efforts sismiques, en introduisant, entre la structure et ses appuis, des appuis élastiques flexibles. Cependant, cette réduction, en terme de sollicitation est accompagnée par une augmentation en déplacement,

-de dissiper de grandes quantités d'énergie en les introduisant dans la structure ou à la base de la structure. Dans ce cas, le problème de déplacement peut être résolu par l'augmentation substantielle de l'amortissement.

II-7- La pile d'un pont :

La pile d'un pont est un appui intermédiaire supportant le tablier de l'ouvrage. Il s'agit d'un appui massif et permanent, par opposition aux palées qui sont des appuis plus temporaires.



Figure(II-2) : Configuration classique de franchissement autoroutier : voiles en axes, colonnes en rives.

II-8- Conclusion :

Les nombreuses découvertes au cours du temps (les nouvelles énergies comme le pétrole ou l'électricité, les nouveaux matériaux comme le béton, ou encore la découverte de nouvelles techniques de constructions) ont permis de créer des ponts de en plus en plus moderne, de plus en plus pratique et moins coûteux. Les nouvelles techniques de construction ont également permis aux ponts de se développer. Ces nouvelles techniques de construction ainsi que ces nouvelles découvertes font que l'homme a pu s'affranchir des contraintes naturelles liés au pont (ex : système de drainage de la pluie mis en place sur les ponts). Grâce aux avancées techniques et technologiques, les ponts sont également beaucoup plus résistants aux différentes forces qui s'appliquent sur eux.

A decorative red scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

Chapitre III :
Interaction Sol-Structure

CHAPITRE III

INTERACTION SOL-STRUCTURE

III-1- Introduction

Dans le domaine du génie civil, l'objectif fondamental des analyses d'interaction sol-structure, est de déterminer l'influence réciproque du sol et de la structure sur leur comportement mécanique lors d'un séisme. En effet, le comportement du sol en champ libre peut différer significativement de celui en présence de la structure.

Pour une structure reposant sur un massif de sol plus souple, nous distinguons la notion d'interaction cinématique de celle d'interaction inertielle.

Ainsi, l'influence de la structure sur le sol et celle du sol sur la structure existent de manière concomitante. Plus généralement, l'interaction sol-structure résulte de l'interaction cinématique et de l'interaction inertielle. En effet, l'étude de la réponse dynamique du système sol-fondation sous l'effet de l'interaction inertielle nécessite une analyse cinématique préalable en vue d'obtenir le mouvement à la base de la structure pour déduire les efforts d'inertie induits par la superstructure.

Le comportement des fondations profondes est essentiellement un problème d'interaction sol-structure. C'est pourquoi une attention particulière est consacrée, dans cette partie du chapitre, à la modélisation de l'interaction sol-structure et à la définition d'éléments capables de reproduire le comportement d'interface.

En revanche, ce phénomène noté généralement (ISS), est souvent négligé par les ingénieurs malgré son influence sur l'analyse du comportement et le dimensionnement des bâtiments. En effet, la répartition des efforts dans les membrures peut être différente suite à une analyse qui tient compte de l'interaction sol-structure, ce qui influe sur la sécurité du bâtiment. De plus, l'utilisation normale « sans ISS » peut être affectée par des problèmes de fissurations causées par les tassements différentiels.

Finalement les coûts de construction sont influencés par les sections et les fondations choisies, qui elles-mêmes, sont influencées par la répartition des efforts découlant de l'interaction sol-structure.

Ce chapitre s'articule en deux étapes, tout d'abord nous allons présenter le phénomène d'interaction sol-structure, ainsi que ses principaux concepts : interaction cinématique, interaction inertielle et les types d'amortissement. Ensuite les différentes méthodes existantes pour prendre en compte l'ISS seront décrites et détaillées, et enfin les différents types de linéaire et

non linéaire et le comportement des sols sous sollicitations sismiques et traite de l'interaction, ainsi que les méthodes de résolution des équations de la discrétisation par élément finis.

III-2- Notion d'interaction sol-structure (ISS) :

nous avons évoqué au paragraphe précédent que le comportement de la structure sur sol rigide n'est pas le même que si le sol était souple. En réalité, le sol n'est pas parfaitement rigide ; lors d'un séisme, le sol et la superstructure se mettent à vibrer simultanément et interagissent l'une avec l'autre ; la vibration de la superstructure entraîne des forces sur la fondation qui sont transmises au sol et modifient sa réponse... etc. Le phénomène de la modification de la réponse du sol (de la structure) par la présence de la structure (du sol) s'appelle interaction sol-structure.

La résolution de tout problème de mécanique nécessite une bonne connaissance de ses conditions aux limites. Pour bien comprendre, il est facile d'imaginer, qu'une structure élancée de type poutre encastrée à une extrémité, se comporte de manière totalement différente qu'une poutre dont l'encastrement est remplacé par une rotule avec ressort. Sa rigidité et ses fréquences propres s'en trouvent réduites alors que ses déplacements peuvent être amplifiés.

Le même raisonnement peut être effectué pour un immeuble reposant sur une fondation. La connaissance de la fondation et du sol sous-jacent est essentielle pour bien déterminer le comportement réel de la structure.

Parallèlement nous pouvons montrer que la présence de la structure influence elle aussi le comportement du sol, c'est à dire le comportement qu'il aurait en champ libre. En effet, prenons par exemple deux structures, l'une encastrée dans un solide rocher, l'autre reposant sur un sol plus souple. La structure encastrée dans le rocher ne va pas influencer le champ libre.

Le sol étant très rigide, le fait d'y ajouter une structure ne change rien à son comportement. La masse de la structure ne change rien non plus puisque les efforts d'inerties engendrés par la structure sur la roche rigide n'ont pas d'effet sur celui-ci. Par contre, pour la structure reposant sur le sol souple, trois phénomènes vont intervenir:

– le fait d'excaver et d'inclure une fondation rigide va modifier le champ libre. En effet par cette inclusion le champ de déplacement du sol va s'en trouver changé. C'est ce que nous appelons *l'interaction cinématique*.

– le fait d'inclure la masse de la structure va induire des efforts d'inerties supplémentaires à la base de la structure et donc dans le sol, ce qui aura pour conséquence de modifier encore une fois le champ de déplacement. C'est ce que nous appelons *l'interaction inertielle*.

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

Par contre, pour les structures énumérées ci-dessus, les effets de l'interaction sol-structure peuvent être nuisibles.

En conséquence de l'interaction dynamique sol-structure, la réponse sismique d'une structure sur appuis flexibles (terrain déformable), diffère de celle de la même structure fondée sur un terrain rigide (base fixe), soumise à une sollicitation identique en champ libre :

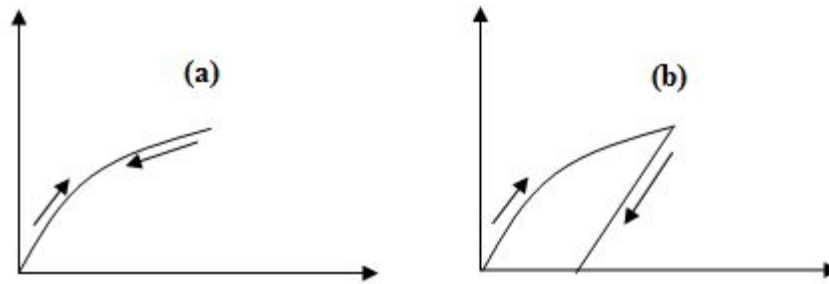
- a) le mouvement des fondations de la structure sur support flexible est différent du mouvement en champ libre et peut comprendre un balancement de la structure à base fixe autour d'un axe horizontal ;
- b) la période fondamentale de vibration de la structure sur support flexible est plus longue que celle de la structure à base fixe ;
- c) les périodes naturelles, les modes propres, et les facteurs de participation modale de la structure sur support flexible sont différents de ceux de la structure à base fixe ;
- d) l'amortissement global de la structure sur support flexible inclut d'une part l'amortissement radiatif, d'autre part l'amortissement interne engendré à l'interface sol-fondation, en plus de l'amortissement associé à la superstructure.

III-3- comportement des sols sous sollicitations sismiques

III-3-1- Comportement élastique du sol :

C'est celui d'un ressort lorsqu'on supprime la force Q la déformation revient en arrière, on dit qu'il y a élasticité. Si la courbe de décharge coïncide avec la courbe de charge figure(3-1)a et ceci quelle que soit la vitesse de déformation, l'élasticité est dite parfaite.

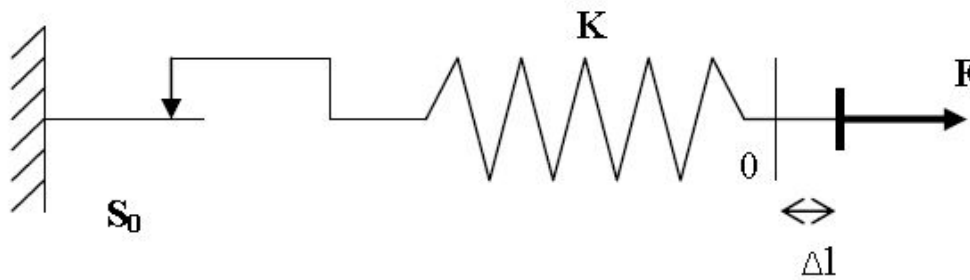
Cependant, rigoureusement le comportement idéal ne se rencontre jamais. La figure(3-1)b, montre un comportement réel : il y a élasticité mais imparfaite[17].



Figure(III-1): Comportement élastique a- idéal, b- réel

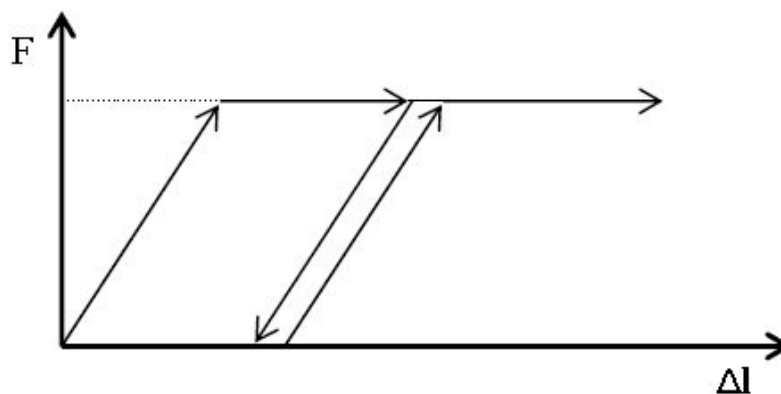
III-3-2- Comportement élasto-plastique du sol :

Le comportement élasto-plastique peut être représenté par un modèle unidimensionnel associant en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil S_0 (figure III-2).



Figure(III-2): Modèle unidimensionnel du comportement élastoplastique.

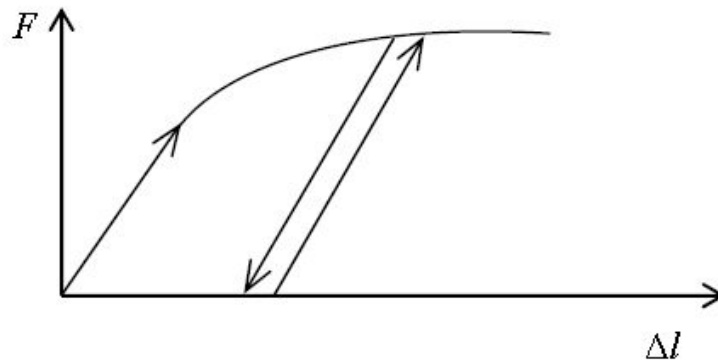
Le courbe effort- déplacement où contrainte-déformation que l'on trouve présentée sur la figure (III-3).



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

Lors d'une décharge élastique, le comportement est élastique et réversible, la longueur de la déformation plastique a priori indéterminée. Le comportement présenté par les figures (III-2) et (III-3) est un comportement élasto-plastique sans écrouissage.

La figure (III-4) représente un comportement élasto-plastique avec écrouissage, qui définit comme un chargement d'un milieu jusqu'à sa limite de plasticité, puis décharger, après rechargement, il se produit une augmentation de sa limite d'élasticité.



Figure(III-4): Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

Les schémas présentés en figures (III-2) et (III-3) sont une analogie mécanique unidimensionnelle. La généralisation à trois dimensions se fait d'une part, en introduisant une élasticité linéaire isotrope caractérisée par le module d'Young E , et le coefficient de Poisson ν , pour la partie élastique, tandis que le seuil s_0 se généralise en un critère de plasticité (ou surface limite) [9].

III-3-3- Description expérimentale

Elle consiste à anticiper le mode de chargement auquel va être soumis, en place, un élément de sol lors de la sollicitation sismique. Le comportement du sol sous ce type de chargement est caractérisé par une courbe « effort – déformation » qui est directement utilisée, pour rendre compte du comportement du sol en place.

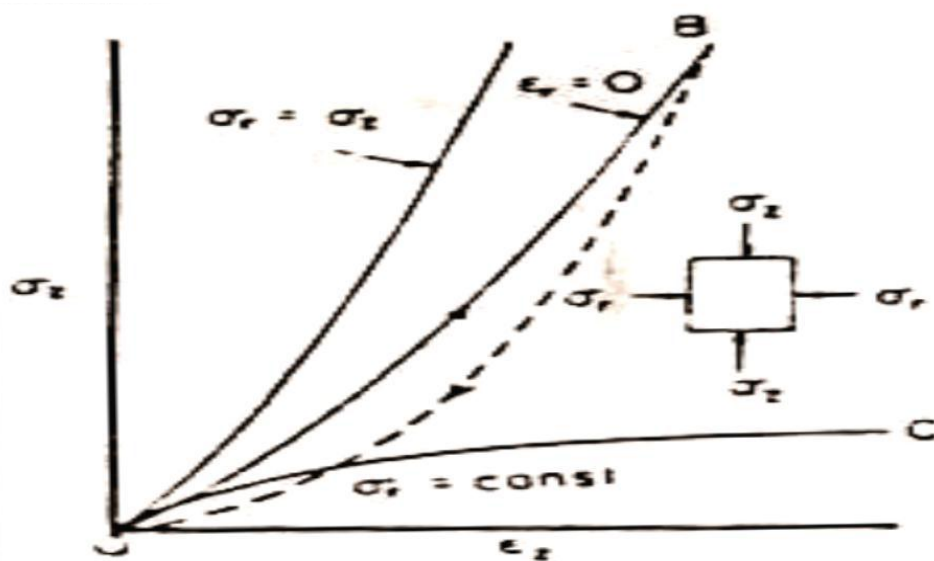
Par rapport à la vitesse d'application des charge, la perméabilité du sol n'est donc pas suffisante pour permettre un drainage de celui-ci. Dans ce type d'approche les contraintes sont exprimées en terme de contraintes totales – en effet le comportement des sols est régi par les contraintes effectives la compréhension du comportement non drainé du sol réside dans la loi de comportement . cette loi détermine la tendance à la variation du volume du sol qui se traduit, en comportement non drainé ou partiellement drainé, par une variation de la pression interstitielle, donc de la contrainte effective.

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

La limitation à la vitesse d'application de cette deuxième approche en contraintes totales apparaît clairement dès que les conditions de drainage deviennent complexes.

On distingue dans le comportement du sol deux stades distincts :

- le stade des déformations limitées où un état de rupture du sol n'est pas atteint : la caractérisation du sol dans ce stade permettra de procéder au dimensionnement des ouvrages lors des séismes : calcul d'interaction sol – structure par exemple.
- le stade de la rupture, associé à la grande déformation, ce stade permet de s'assurer du non-rupture des sols de fondations : liquéfaction des sables.



Figure(III-5) : courbes effort-déformation.

III-3-4- Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique :

Une déformation élastique est définie comme une déformation

- qui est sensiblement proportionnelle à la force qui la provoque (notion de linéarité)
- et qui disparaît après la suppression des charges qui l'ont provoquée (déformation réversible).
- Pour chaque sollicitation et chaque corps, il existe une force limite au delà de laquelle les déformations cessent d'être élastiques, c'est la limite d'élasticité.
- Au delà de cette limite, une partie de la déformation subsiste lorsque l'action extérieure cesse, on dit que le corps a subi une déformation permanente ou plastique ou post-élastique.

III-3-5 Caractéristiques dynamiques des sols:

III-3-5-1 Détermination de τ_{max} :

On a vu que le module de cisaillement pour les petites déformations (ε_0) et la résistance ultime de cisaillement (τ_{max}) sont nécessaires pour évaluer la courbe de contrainte-déformation de cisaillement.

$$\tau_{max} = \left(\left| \left(\frac{1+K_2}{2} \right) \bar{\sigma}_v \sin \phi' + C' \cos \phi' \right|^2 - \left| \left(\frac{1-K_2}{2} \right) \bar{\sigma}_v \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-1)$$

Où $\bar{\sigma}_v$ 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 (3-3) est basée sur la théorie de la rupture de Mohr-Coulomb. Il faut modifier la valeur obtenue par (3-3) afin de tenir compte de l'effet de la vitesse de chargement. Les résultats des expériences faites l'aide des différents appareils (Triaxial, cisaillement simple, etc...) nous donnent :

$$(\tau_{max}) \text{ dynamique} = (\tau_{max}) \text{ statique} \times (\text{facteur de taux de déformation}) \quad (3-2)$$

III-3-5-2 Module de cisaillement maximal:

Est une valeur physique intrinsèque à chaque matériau et qui intervient dans la caractérisation des déformations causées par des efforts de cisaillement.

On a:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (3-3)$$

Donc le module de cisaillement maximal est défini:

$$G_{max} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} = \frac{F/A}{\Delta_x/l} = \frac{F \cdot l}{\Delta_x \cdot A} \quad (3-4)$$

τ : contrainte de cisaillement,

γ_{max} : l'angle de déformation relative,

F : la force appliquée,

A : l'aire sur laquelle la force agit,

Δ_x : le déplacement latéral,

l : l'épaisseur.

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

L'énergie dans un système est équivalente au produit de la contrainte et de la déformation ou à l'aire sous la courbe suivie lors d'un chargement dans un système non-linéaire élastique, puisque le déchargement suit le même chemin que le chargement, l'énergie dans le système est conservée. Il n'y a pas de dissipation d'énergie et donc pas d'amortissement. C'est pourquoi un terme d'amortissement visqueux est ajouté et que le sol est considéré comme un matériau visco-élastique.

Le chemin du déchargement d'un comportement hystérétique passe sous la courbe du chargement, c'est-à-dire que le déchargement se fait avec une énergie moindre que le chargement. La balance de l'énergie du chargement est donc dissipée par le comportement hystérétique. L'expression de cette énergie dissipée au courant d'un cycle se fait de la manière suivante.

$$W = \oint \tau(\gamma) d\gamma$$

L'avantage de ce type de comportement lors de la modélisation d'un système en chargement dynamique réside dans le fait qu'en théorie, aucun amortissement visqueux nécessaire au système l'amortissement est calculé selon le chemin contrainte-déformation initiale. Toutefois, lorsque le système est soumis à des oscillations de faible intensité et de grande fréquence, le comportement en chargement et en déchargement devient quasi-linéaire en raison de la faible réduction du module avec de faibles déformations. Dans les cas de simulations numériques, un amortissement secondaire (Rayleigh ou constant) devrait être spécifié pour palier à cette lacune du modèle hystérétique.

III-3-6- Lois de comportement :

Nous allons expliquer sommairement les trois principales lois de comportement :

-loi linéaire.

-méthode équivalente linéaire.

-loi non linéaire.

Le choix de la loi de comportement du sol :

Avant d'entreprendre la discussion sur les limites des diverses lois de comportement utilisées dans les calculs dynamiques du sol nous jugeons utile de rappeler quelques considérations générales.

Le sol est un assemblage de particules discontinues avec des espaces vides qui peuvent être remplis par l'air et l'eau, Il s'agit donc d'un milieu bi ou tri phasique l'état de contraintes au sein du sol devrait donc être déterminé en envisageant l'état de contraintes qui règne dans chacun de

ces composants. C'est une réalité qu'il ne faut pas oublier, même si, pour des raisons pratiques, on n'envisage que des sols secs ou saturés.

Au cours d'un séisme des sollicitations élevées s'appliquent au sol pendant une courte durée; le niveau de déformation est suffisamment élevé et vu la perméabilité des sols courants le déplacement de l'eau dans le terrain sera négligeable. Donc, la plupart des sols saturés ou partiellement saturés se déforme presque dans des conditions non drainées. Dans le cas des sols non saturés, cela veut dire qu'ils se déforment à volume constant. En revanche, la grande perméabilité du sol à l'air et la grande compressibilité de celui-ci font que la plus part des sols grenus secs se déforment dans des conditions de drainage libre. Des cas intermédiaires existent aussi; c'est Par exemple, le cas du sable fin sec (des grains de l'ordre de 0,1 mm) ou le cas des sols saturés pour lesquels la perméabilité est de l'ordre de 0.1 cm/s.

Les lois de comportement fondées sur l'expression de la contrainte totale négligent, en quelque sorte ces différents aspects du comportement du sol.

Toute loi de comportement ne peut être qu'une idéalisation approximative de la réalité retraçant avec fidélité relative une partie des aspects complexes du comportement de sols dans le cadre des limites de chargement plus ou moins restreintes.

III-3-6-1- 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-3-6-2- Méthode linéaire-équivalente :

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. 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.

III-3-6-3- Les lois non linéaires :

On peut diviser les lois non linéaires en deux catégories :

- a)- Les lois empiriques fondées sur des essais relativement simples de laboratoire,
- b)- 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-3-7 Comportement sol-structure:

L'interaction dynamique sol-structure a été largement explorée en supposant le comportement linéaire du sol. Néanmoins, pour des séismes d'intensité modérée à forte, la contrainte de cisaillement maximale peut facilement atteindre la limite élastique du sol. Du point de vue de l'interaction sol-structure, les effets non linéaires peuvent modifier la rigidité du sol à la base de la structure ainsi que la quantité d'énergie dissipée dans le sol. En conséquence, ignorer les caractéristiques non linéaires du sol dans l'interaction dynamique sol-structure (IDSS) peut conduire à des prédictions erronées de la réponse de la structure.

Le but de ce travail est d'implémenter dans un code numérique une loi de comportement non linéaire pour le sol afin d'examiner l'effet de la non linéarité du sol sur l'interaction dynamique sol-structure. De plus, différents aspects sont pris en compte tels que l'effet de la contrainte de confinement sur le module de cisaillement du sol, les conditions statiques initiales, les conditions d'interface entre le sol et la structure, etc. Durant ce travail, une méthode simple de couche absorbante basée sur une formulation de Rayleigh/Caughey pour l'amortissement, qui est généralement disponible dans les logiciels existants d'éléments finis, a également été développée.

Ce travail montre également que la proximité des fréquences fondamentales de la structure et du sol influence fortement l'interaction sol-structure. Enfin, l'effet du poids de la structure et du balancement de la superstructure peut être significatif.

III-4- modalisation de l'interaction sol-structure

III-4-1- Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structures

III-4-1-1- Interaction cinématique et interaction inertielle:

Le fait d'excaver et d'inclure une fondation rigide va modifier le champ libre. En effet par cette inclusion le champ de déplacement du sol va s'en trouver changé. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique.

Le fait d'inclure la masse de la structure va induire des efforts d'inerties supplémentaires à la base de la structure et donc dans le sol, ce qui aura pour conséquence de modifier le champ de déplacement. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle.

III-4-1-2- L'amortissement radiatif (ou géométrique):

Une autre source d'amortissement prend naissance par la transmission des vibrations à des distance plus ou moins grandes dans le sol. En effet une partie importante de l'énergie de mouvement se fait évacuer à l'extérieur du système (structure et sol entourant) à travers les

ondes en propagation vers l'infini. Ce type d'amortissement est connu par l'amortissement radiatif (ou géométrique). Sa prise en compte d'une manière rigoureuse en interaction dynamique sol-structure, nécessite une analyse rationnelle de la propagation d'onde dans le sol. Il est à noter enfin que l'amortissement radiatif est en fonction de la fréquence de vibration. L'amortissement géométrique est directement associable à l'effet de dissipation d'énergie par rayonnement lors de la propagation des ondes dans le sol.

III-4-1-3- La liquéfaction :

Lorsque des sols ou des rejets lâches et saturés sont soumis à des sollicitations mécaniques, le drainage peut être trop lent pour accommoder une contraction rapide du volume (densification).

Il en résulte une augmentation de la pression interstitielle qui réduit les contraintes effectives et, par conséquent, la résistance au cisaillement du matériau. Ce phénomène, appelé liquéfaction lorsque la résistance devient nulle, est rencontré surtout avec les matériaux pulvérulents ayant un comportement contractant et contenant une assez forte proportion de particules fines (Seed, 1987; Guo et Prakash, 1999). Un matériau meuble se comporte alors comme un fluide ayant la densité du matériau saturé[10]. Il peut en découler des conséquences importantes, notamment en ce qui a trait aux pressions des terres sur les ouvrages de retenue (qui peuvent pratiquement doubler en quelques secondes) et à la stabilité des pentes.

La réponse des matériaux meubles aux chargements dynamiques (ou cycliques) a fait l'objet de nombreuses études de laboratoire, principalement à partir d'essais conventionnels comme l'essai de compression triaxiale cyclique (e.g. Gomes *et al.*, 2002). Ces études ont montré que le comportement du matériau dépend de l'accélération, de la fréquence et de la durée de chargement, du degré de saturation, de la granulométrie, de l'indice de densité, de l'historique de déformation, de la structure, de la conductivité hydraulique et de l'incrément de la contrainte appliquée. On peut aussi apprendre beaucoup à partir d'essais sur des modèles physiques de plus grande dimension (e.g. Ueng *et al.*, 2002). Un tel modèle pour des essais de liquéfaction sur table vibrante a récemment été développé à l'École Polytechnique (Jolette, 2002), et il est utilisé par l'équipe des auteurs de cet article pour étudier diverses conditions de mise en place des rejets.

Le facteur de sécurité face à la liquéfaction est généralement défini de manière déterministe en comparant la résistance cyclique mobilisable par le matériau à la contrainte de cisaillement anticipé suite aux sollicitations dynamiques (e.g. Vick, 1983). Le danger de liquéfaction peut aussi être évalué par des solutions analytiques en contraintes totales (selon la contrainte

appliquée et le nombre de cycles), ou par des analyses numériques en contraintes effectives avec solutions couplées ou découplées. Par exemple, une analyse dynamique non linéaire par éléments finis, en contraintes effectives, a été utilisée par Popescu (2002) pour étudier la réponse d'un sol à une excitation dynamique.

Le potentiel de liquéfaction peut aussi être estimé par des essais en place, tel l'essai de pénétration standard (SPT), l'essai au cône (CPT) et l'essai au piézocône (Juang *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2001).

Une particularité des résidus miniers qui ne doit pas être négligée (mais qui a rarement été considérée) est la stratification souvent observée dans les dépôts de rejets (e.g. L'Écuyer *et al.* 1993). On sait maintenant qu'une telle stratification peut affecter sérieusement la résistance à la liquéfaction des matériaux (e.g. Amin et Qi, 2000).

Enfin, bien que la liquéfaction cyclique soit la plus étudiée, il peut aussi y avoir une liquéfaction statique lorsque l'augmentation de la pression interstitielle et la perte de résistance au cisaillement se produit sous l'action de charges mortes (Hicks et Wong, 1988; Davies, 2002). Ce type de liquéfaction serait à l'origine de la rupture, en 1994, de la digue de retenue des résidus à Merriespruit en Afrique du Sud, qui causa 17 morts ainsi que de graves dégâts matériels et environnementaux (Fourie et Papageorgiou, 2001; Fourie *et al.*, 2001)

III-4-2- Fonctions d'impédance :

Les fonctions d'impédance ont été calculées, analytiquement ou numériquement dans des cas de fondations superficielles aux configurations simples (radiers rigides de forme circulaire ou rectangulaire sur un demi-espace homogène ou sur une couche surmontant un demi-espace homogène). Ces fonctions représentent les caractéristiques dynamiques de rigidité et d'amortissement de l'interaction sol fondation.

Une fonction d'impédance est une matrice de rigidité dynamique qui relie les efforts généralisés (par exemple l'effort tranchant et le moment) à la base de la structure aux déplacements et rotations de la fondation par rapport au champ libre. Les termes utilisés dans la fonction d'impédance sont des valeurs complexes comportant une partie réelle caractérisant la rigidité et une partie imaginaire caractérisant l'amortissement du sol.

La fonction d'impédance peut être utilisée dans une analyse dans le domaine fréquentiel. Cependant, l'analyse d'un système compliqué, nécessitant la mise en œuvre d'un grand nombre de degrés de liberté, ne peut être simplifiée que si les fonctions d'impédance sont supposées 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 (comportement non linéaire du sol, plasticité ou endommagement de la structure).

Dans le cas le plus général, six degrés de liberté sont nécessaires pour chaque nœud de la fondation. Toutefois, en pratique, la fondation est souvent supposée rigide représenté par un nœud unique, ce qui réduit les degrés de liberté au total à six. Lorsque l'on considère la réponse latérale d'une structure sur une base rigide dans une direction particulière.

III-4-3- 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-6) qui schématise un ensemble sol structure.

L'équation du mouvement s'écrit :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = Q_f \quad (3-5)$$

M : matrice de masse ;

C : matrice d'amortissement du système ;

K : matrice de raideur du système.

Q_f : le vecteur de charge.

En l'absence de structure, l'équation du mouvement du champ libre est analogue de par sa forme à l'équation (4.14). Les indices f désignant les matrices masses, amortissement et raideur relative au seul champ libre, cette équation s'écrit :

$$M_f \ddot{U}_f + C_f \dot{U}_f + K_f U_f = Q_f \quad (3-6)$$

Posant: Le déplacement total pour le problème d'interaction est alors donné par l'équation (4.16).

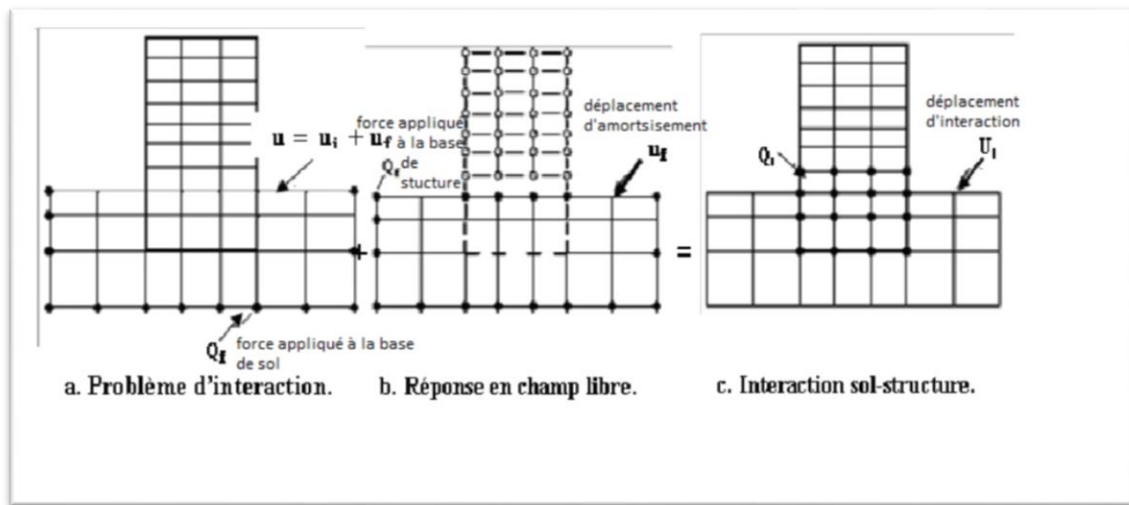
$$U = U_i + U_f \quad (3-7)$$

L'équation (4.17) définit le déplacement d'interaction U_i qui satisfait l'équation :

$$M_i \ddot{U}_i + C_i \dot{U}_i + K_i U_i = Q_i \quad (3-8)$$

avec :

$$Q_i = [M - M_f] \ddot{U}_f + [C - C_f] \dot{U}_f + [K - K_f] U_f \quad (3-9)$$



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

Le vecteur de charge Q_i est déterminé à partir des déplacements en champ libre. Pour les systèmes linéaires on a alors le théorème de superposition illustré sur la figure III-6 : Le problème d'interaction est décomposé en la somme d'un problème de réponse du sol en champ libre et d'un problème source où les forces appliquées Q_i n'ont des composantes non nulles qu'aux nœuds communs à la structure et sol.

III-4-4- Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS :

Parmi les méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure on peut distinguer les méthodes globales, qui résolvent, comme leur nom l'indique, le problème global et celles qui s'appuient sur une décomposition du système en sous systèmes, dans l'esprit ,ces méthodes sont désignées sous le nom générique de méthodes de sous structure.

III-4-4-1- Les méthodes directes (Méthodes globales) :

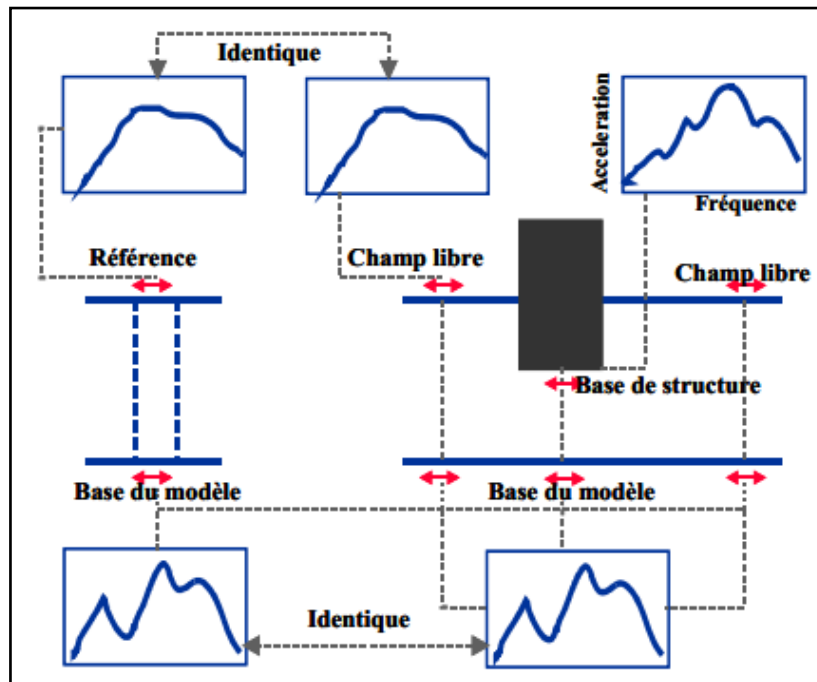
Les méthodes directes, appelées aussi méthodes globales, traitent le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité de façon à obtenir les réponses du sol et de la structure simultanément. Elles consistent à résoudre directement l'équation du mouvement dans l'ensemble du système sol-structure :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [Q_f] \quad (3-10)$$

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

où M , C et K désignent respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de raideur du système, u représente le vecteur de déplacement du système, \dot{u} sa dérivée par rapport au temps dynamique, et F est le vecteur de charge appliquée à la frontière extérieure du système.

La résolution directe de ce système d'équation est tellement complexe que le recours aux méthodes numériques, comme les méthodes des éléments finis et des différences finies, est pratiquement inéluctable.



Figure(III-7): Schématisation d'un problème d'interaction sol structure en éléments finis.

L'un des avantages principaux des méthodes directes est leur capacité d'intégrer dans le modèle numérique les hétérogénéités matérielles du sol et de la structure, les singularités géométriques du problème, et les lois de comportement bien adaptées pour la prise en compte des non linéarités dans le sol ou à l'interface sol-fondation du système. Ces méthodes requièrent une discrétisation plus étendue du massif de sol supportant la fondation afin de minimiser la réflexion numérique sur la frontière qui sollicite une nouvelle fois la structure. A ce propos, des frontières absorbantes peuvent être introduites aux limites du massif de sol pour modéliser l'amortissement radiatif qui, hormis le frottement interne des matériaux, dissipe une partie d'énergie de la structure et du sol, lors de la propagation d'ondes vers l'infini dans la réalité. De plus, la taille maximale des éléments est limitée de manière à modéliser correctement la propagation d'ondes de hautes fréquences. En conséquence, la mise en œuvre de ces méthodes

reste une opération généralement coûteuse du point de vue numérique, surtout pour les problèmes tridimensionnels.

Dans le cadre de notre travail, la méthode directe des différences finies est employée pour la modélisation numérique de l'interaction sol-fondation. Le code de calcul commercial FLAC3D utilisé travaille dans le domaine temporel, et dispose des frontières absorbantes et des frontières de type " champ libre " qui permettent de tenir compte du mouvement en champ libre en l'absence de structures.

III-4-4-2- La méthode des sous-structures :

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

Pour des raisons évidentes, les sous structures envisagées sont constituées d'une part par le sol et d'autre part par la structure, comme indiqué sur la figure 3.10 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[14].

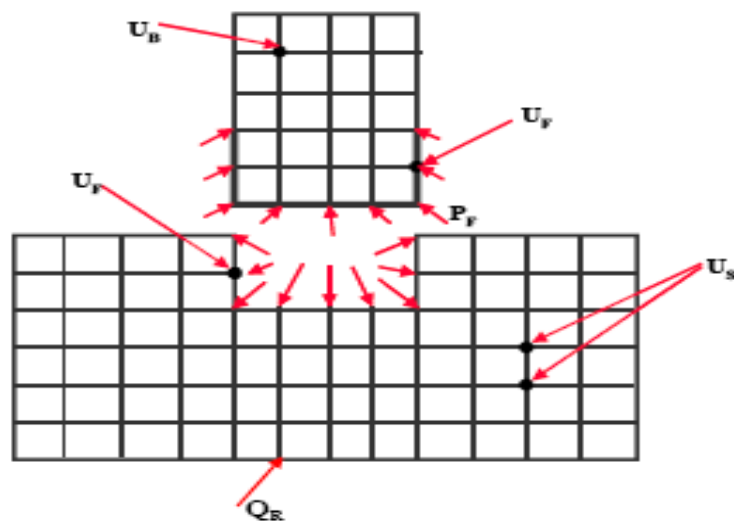


Figure (III-8) : Schématisation d'une méthode de sous structure.

Les équations des différents sous systèmes s'écrivent :

Structure

$$\begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_B \\ \ddot{\mathbf{u}}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BF} \\ K_{FB} & K_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \mathbf{u}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ P_F \end{Bmatrix} \quad (3-11)$$

Sol

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F \\ \ddot{\mathbf{u}}_S \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_F \\ \mathbf{u}_S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_F \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (3-12)$$

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 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 (3-13):

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F^* \\ \ddot{\mathbf{u}}_S^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_F^* \\ \mathbf{u}_S^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (3-13)$$

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

$$\mathbf{u}^i = \mathbf{u} - \mathbf{u}^* \quad (3-14)$$

Par soustraction des équations (3-13) et (3-14) il vient :

$$\begin{bmatrix} m_{FS} & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F^i \\ \ddot{\mathbf{u}}_S^i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FS} \\ K_{SF} & K_{SS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_F^i \\ \mathbf{u}_S^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_F \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (3-15)$$

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

$$\{\mathbf{u}\} = \sum_n [\tilde{\mathbf{u}}(\omega_n) e^{i\omega_n t}] \quad (3-16)$$

$$[-\omega^2 [M] + [K]] \cdot [\tilde{\mathbf{u}}^i(\omega)] = -\{\tilde{P}(\omega)\} \quad (3-17)$$

Le système d'équations (3-18) 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 :

$$\tilde{S}_F \cdot (\omega) \tilde{u}_F^i(\omega) = -\tilde{P}_F(\omega) \quad (3-18)$$

Avec

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

On notera que les quantités intervenant dans l'équation (3-19), et en particulier S_F dépendent de la fréquence.

À ce stade, la réaction du sol $\tilde{P}_F(\omega)$ est inconnue; on élimine cette grandeur en reportant (3-20) dans (3-21) et en tenant compte de (3-22), l'équation d'équilibre de la structure devient:

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{FB} \\ K_{FB} & K_{FF} + \tilde{S}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{S}_F \tilde{u}_F^* \end{Bmatrix} \quad (3-19)$$

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[15], par exemple son centre :

$$\tilde{u}_F = T \cdot \tilde{u}_0 \quad (3-20)$$

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

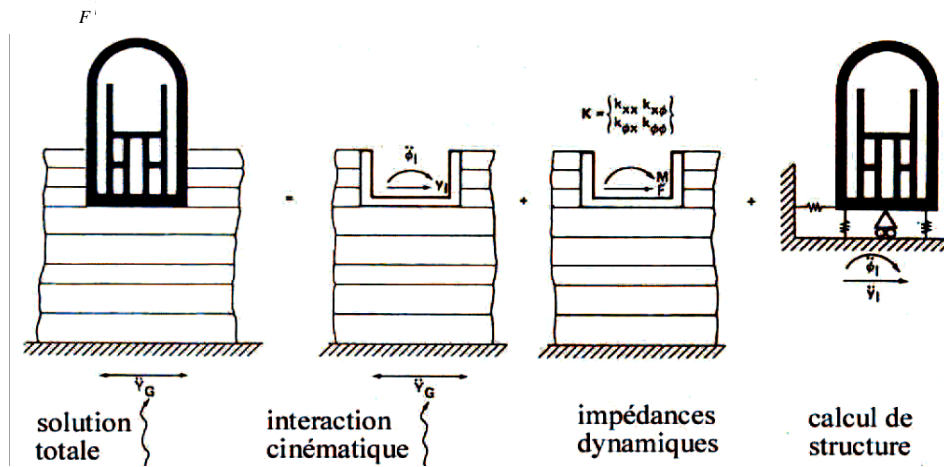
De même, les forces nodales $\tilde{P}_F(\omega)$ sont reliées aux forces et moments \tilde{P}_0 appliqués à la fondation en son centre:

$$\tilde{P}_0 = T^T \cdot \tilde{P}_F \quad (3-21)$$

Avec ces définitions l'équation (3-22) prend la forme :

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_{FB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{FB}T \\ T^T K_{FB} & T^T (K_{FF} + \tilde{S}_F)T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_B \\ \tilde{u}_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ T^T \tilde{S}_F \tilde{u}_F^* \end{Bmatrix} \quad (3-22)$$

La matrice $\mathcal{K} = T^T S_F T$ représente la matrice d'impédance de la fondation rigide. Notant que $T^T S_F \tilde{u}_F^* = \mathcal{K} T^T \tilde{u}_F^*$ l'équation précédente représente le mouvement d'une structure reliée à un support par la matrice d'impédance \mathcal{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 ;
- 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.

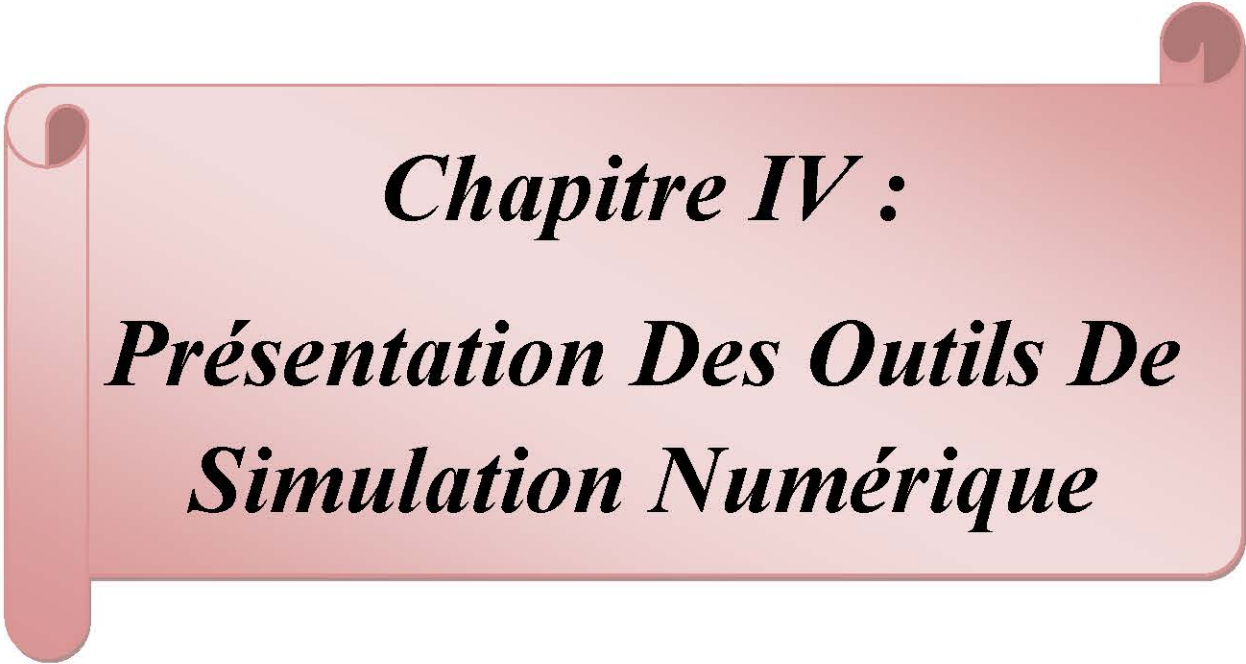
Dans la mesure où la fondation est *parfaitement rigide*, cette démarche est rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système global en une étape Cette décomposition est connue sous le nom de théorème de superposition de Kausel est illustrée sur la figure III-9 Son intérêt apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

CHAPITRE III : INTERACTION SOL-STRUCTURE

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.

III-5-Conclusion :

Dans cette partie nous avons tenté de présenter l'essentiel du comportement des sols différents types chargement, par la suite les modèles de comportement usuels ; enfin, certaines relations existantes dans la littérature qui permettent la détermination du module de cisaillement maximale.

A decorative red scroll graphic with rounded corners and a slight shadow, containing the chapter title text.

Chapitre IV :
Présentation Des Outils De
Simulation Numérique

Chapitre IV

présentation des outils de simulation numérique.

IV-1- Introduction :

La méthode des éléments finis (MEF) consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité du déplacement réel de la structure en tant qu'objet continu. La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui cause de leur nature répétitive qui s'adaptent parfaitement à la programmation numérique. Dans sa version originale, le code de calcul par éléments finis PLAXIS fournit une masse imposante de résultats, traite la stabilité des digues en terre. Dans sa version actuelle, il permet de traiter différents types de problèmes géotechniques (fondations, tunnels, ouvrages de soutènement, etc.), les calculs s'effectuant en déformations planes (Analyse bidimensionnelle ou Analyse 2D) ou en déformations axisymétriques (Analyse tridimensionnelle ou Analyse 3D).

L'algorithme général de résolution des équations non linéaires du code PLAXIS s'effectue selon un processus itératif permettant de déterminer à chaque pas de temps de calcul les champs de déplacements, de vitesses et d'accélération correspondantes aux chargements appliqués ; l'équilibre résultant rapidement.

Les modèles de calcul implémentés dans le code PLAXIS couvrent pratiquement l'ensemble des aspects théoriques et expérimentaux du comportement des sols courants.

IV-2- le code plaxis :

IV-2-1- l'interface graphique de code plaxis :

Le système d'option par défaut et de solutions approchées spécifique est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent (figure IV-1). Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

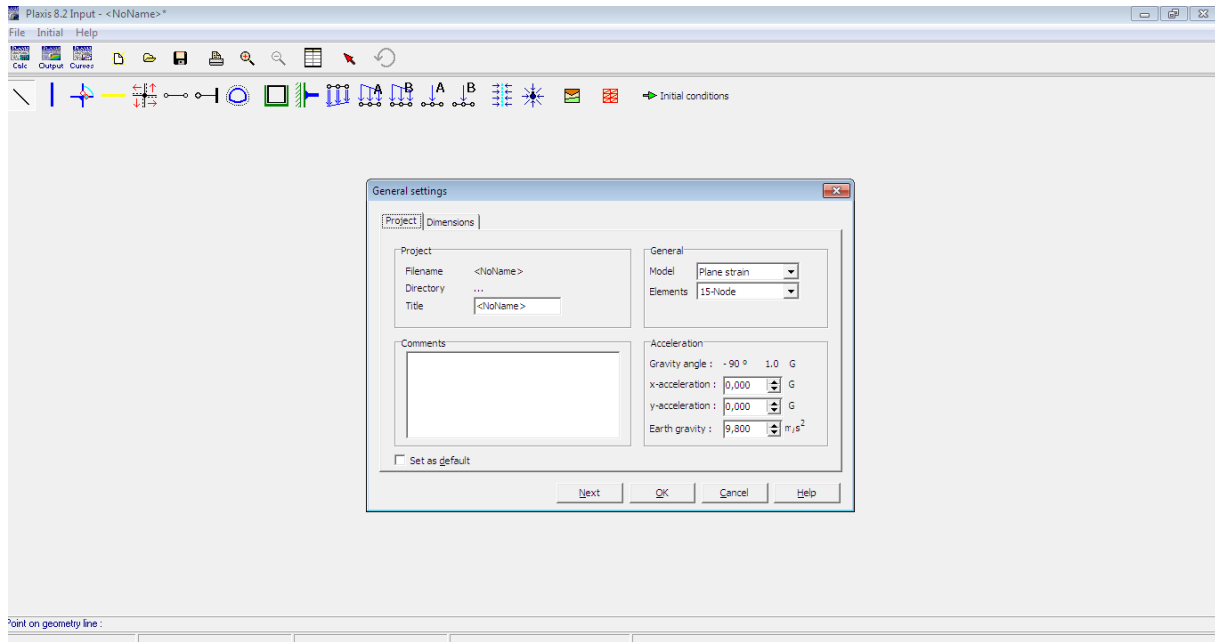


Figure (IV-1) : interface utilisé pour l'entrée des données.

En ce qui concerne les conditions aux limites en déplacement : Si celles-ci sont complexes (figure IV-2). L'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

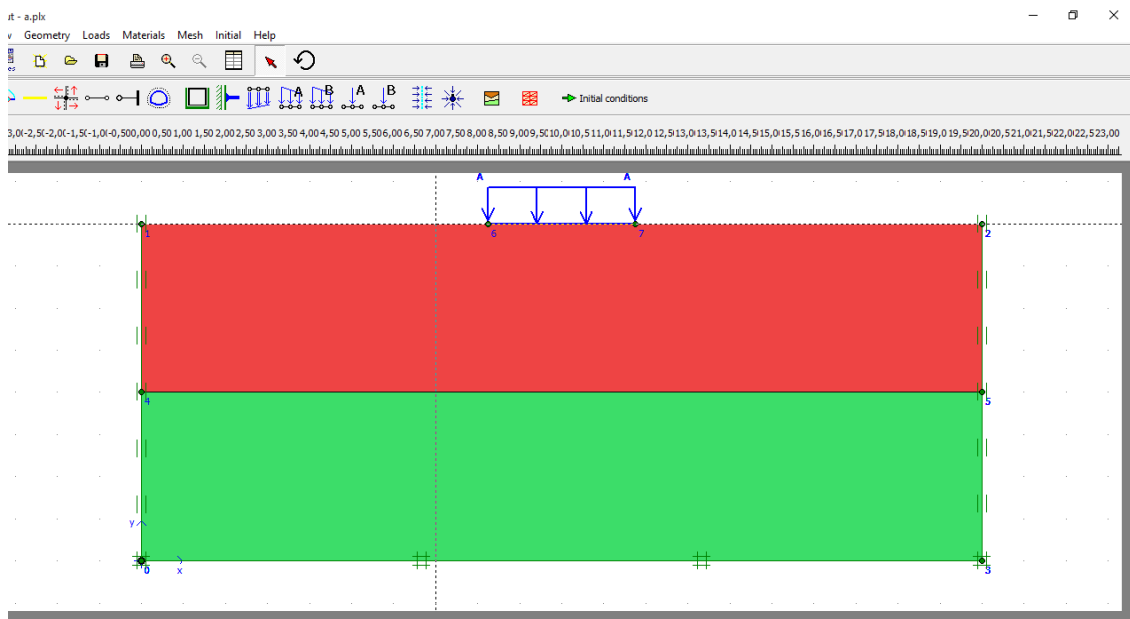
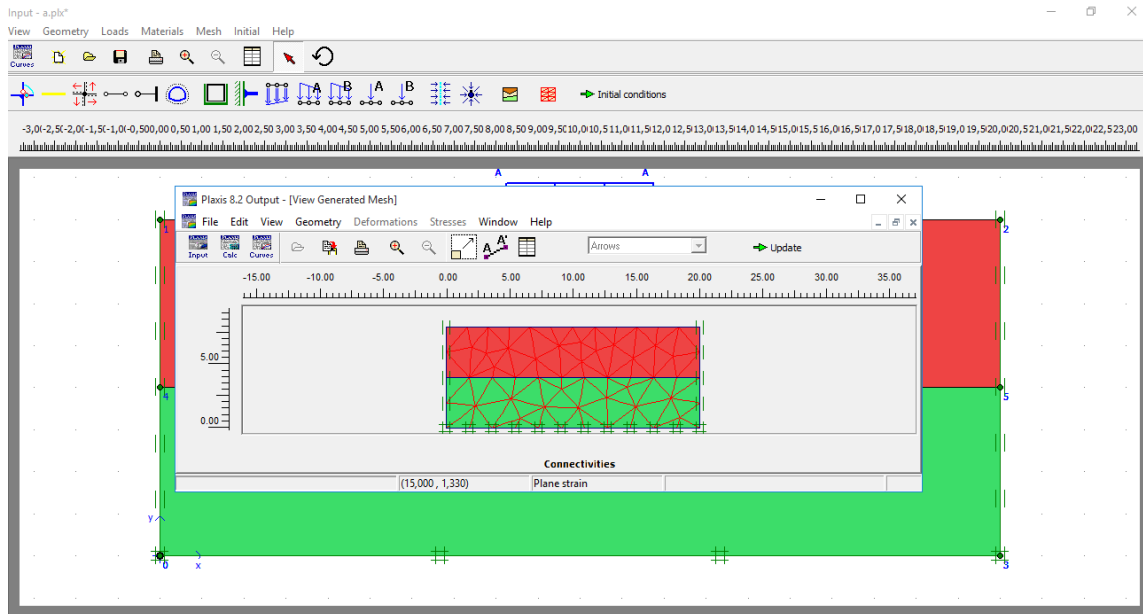


Figure (IV-2) : condition aux limites.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

Les options par défaut commencent dès le maillage (figure IV-3). L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci impotent, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le maillage est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.



Figure(IV-3) : Maillage.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques).

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 état du matériau après application de la gravité. L'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple) (figure IV-4).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

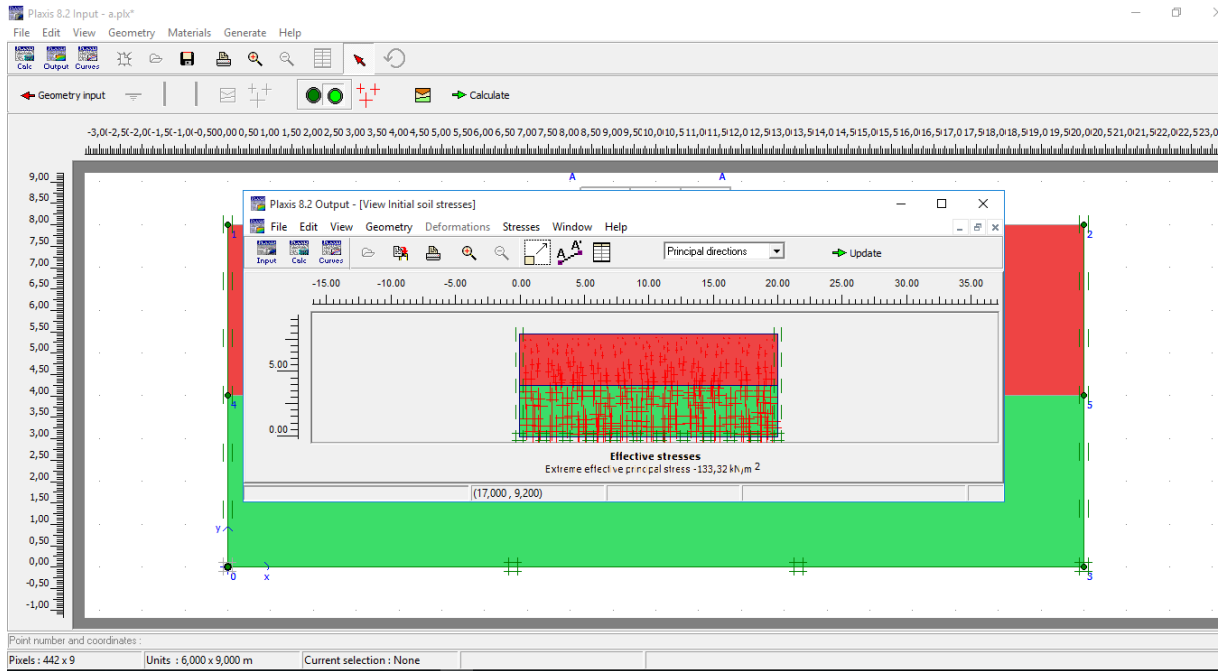


Figure (IV-4) : Contraintes initiales (condition K_0).

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel : l'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étape, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, etc. Figure (IV-4). S'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière.

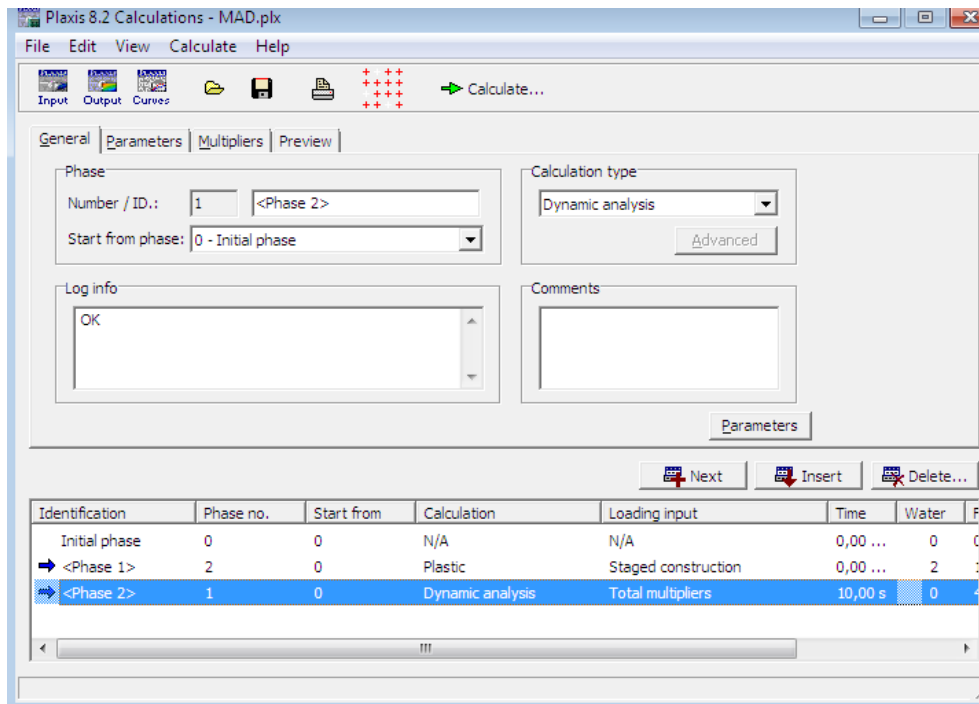


Figure (IV-5) : Option pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

IV-2-3-Modèles de comportement des sols :

IV-2-3-1- Modèle élastique linéaire :

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

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de poisson ν . L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u=G'$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module de Young non drainé est supérieur au module de Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu_u=0.5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. On passe de G à E par la relation :

$$E = \frac{E}{3(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots(4-1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

Le modèle élastique de Plaxis peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol, il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

La courbe effort-déplacement du comportement élastique parfaitement plastique que l'on trouve est présentée sur la figure (IV-6).

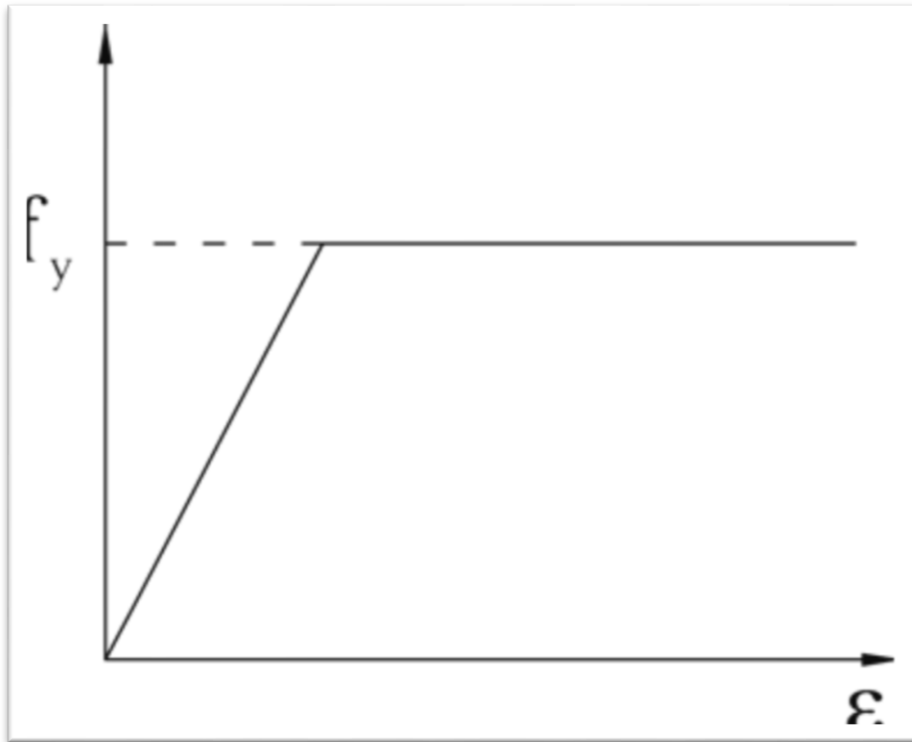


Figure (IV-6) : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

IV-2-3-2- Modèles élastoplastique :

Ce modèle bien connu 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 dilatance ψ .

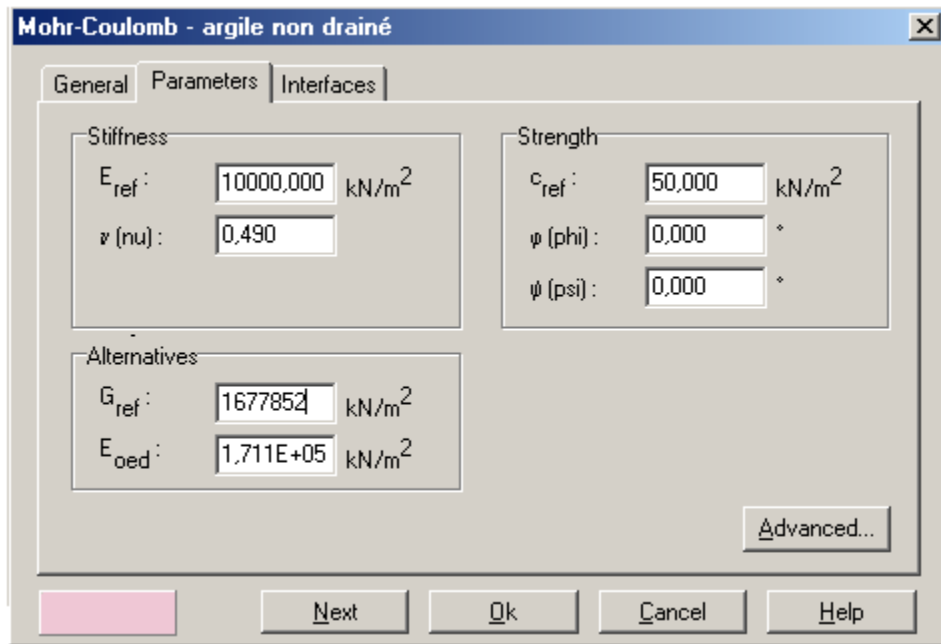


Figure1 (IV-7) : Paramètres de modèle Mohr-Coulomb.

Paramètre de Mohr-coulomb :

c : cohésion (effective). [KN/m^2]

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

Ψ : angle de dilatance. [$^\circ$]

Paramètre de rigidité :

E_{oed} : Module tangent dans un essai oedométrique ; [KN/m^2]

IV-2-4- le module dynamique du code plaxis :

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

Le code Plaxis offre deux types d'analyse aux chargements sismiques :

- une analyse pseudo-statique (de plus de la gravité normale, l'utilisateur peut prescrire une accélération indépendante pour modéliser des efforts dynamiques dans une analyse Pseudo-statique).
- une analyse dynamique (par exemple à partir d'accélérogrammes appliqués à la base du modèle) qui est une option de module dynamique complémentaire.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

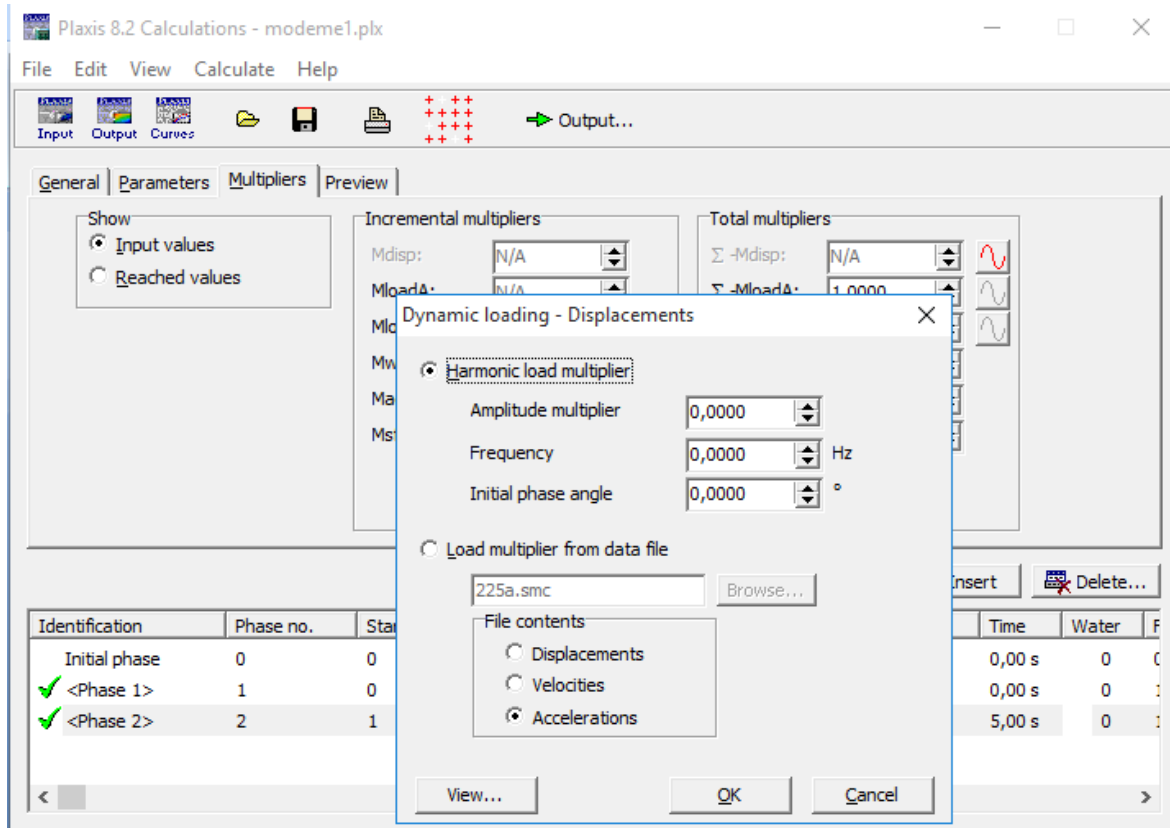


Figure (IV-8) : Fenêtre de commande d'une excitation harmonique.

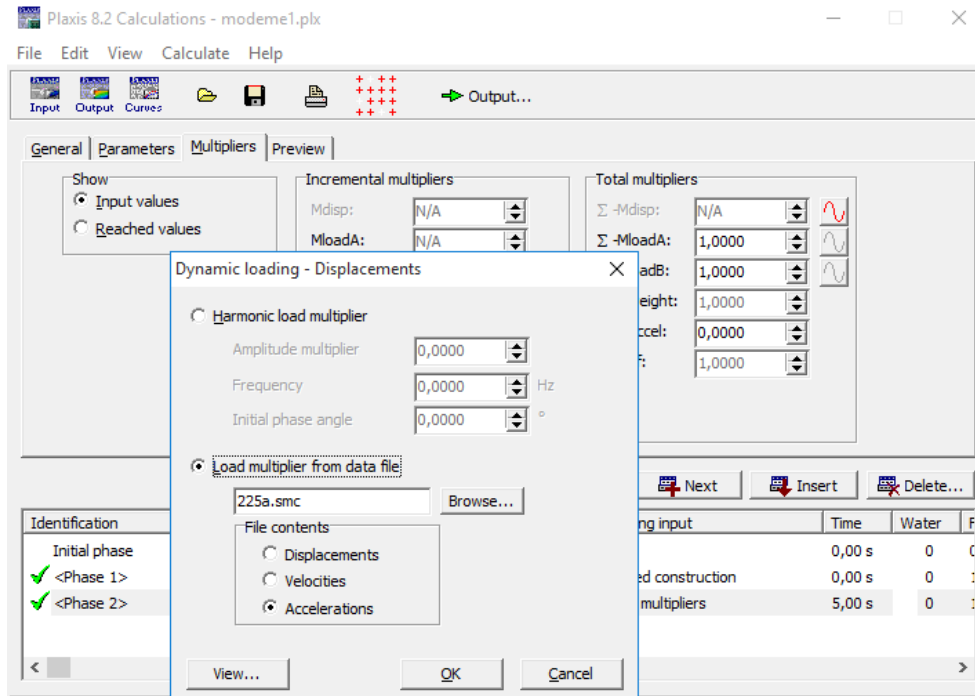


Figure (IV-9) : Fenêtre d'insertion d'un fichier accélérogramme.

Le plaxis 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 possible de porter plus de 200 valeurs par second.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

Pour l'action dynamique utilisée dans ce model, 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 et de 5 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-10).

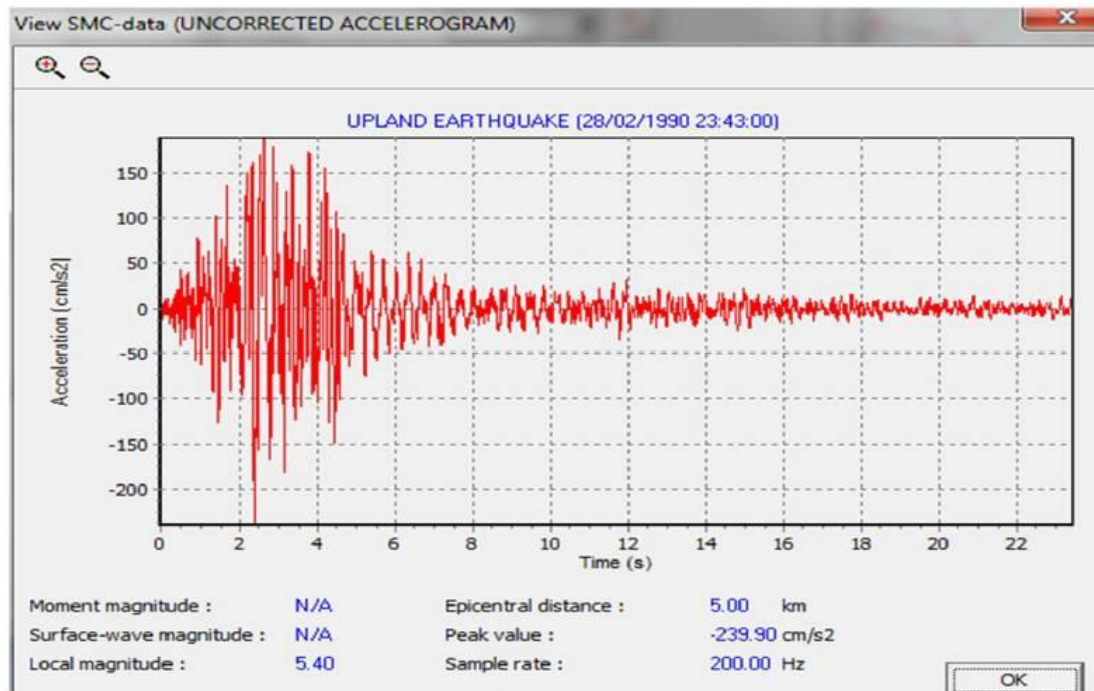


Figure (IV-10) : accélérogramme de l'U.S (Geological Survey).

IV-3- modèle de calcul retenu :

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présentée sur la figure (IV-11). Il est constitué d'une semelle de chaque B= 3,5m, reposant sur un massif de sol homogène sans eau, de 8m de hauteur et 20m de longueur. Pour des raisons de système, seule les moitié du modèle est représentée ici :

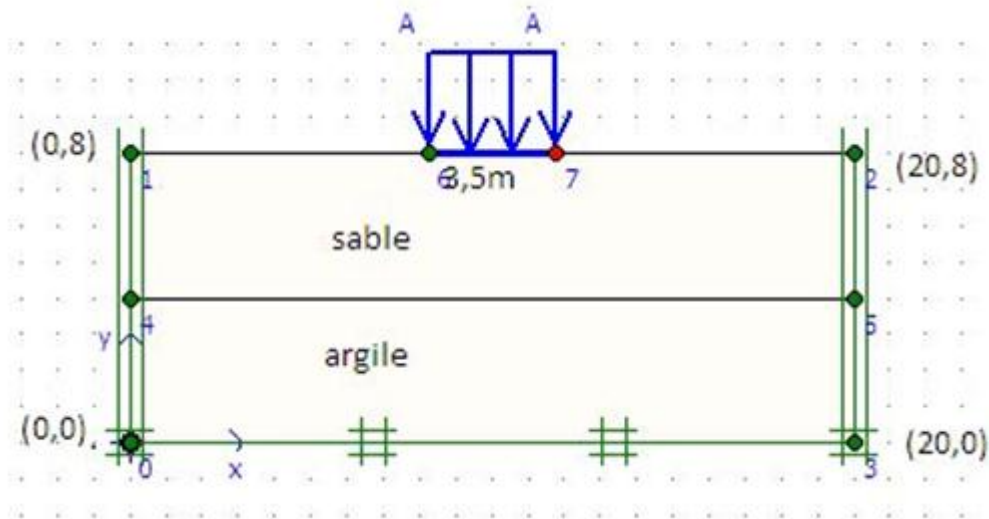


Figure (IV-11) : profil géométrique retenu.

Les conditions aux limites choisies correspondent aux limites par défaut :

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

IV.3.1 Caractéristiques des matériaux :

a) sol de fondation :

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

Paramètre	symb	Unité	*sable U C	*argile
Profondeur h		M	4	4
Poids volumique sec		KN/m ³	17,5	16
Poids volumique humide		KN/m ³	20	19
Perméabilité horizontale	Plaxis	m/s	Plaxis	Plaxis
Perméabilité verticale	Plaxis	m/s	Plaxis	Plaxis
Module young	d'	Mpa	140	170

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

Module G	G	Mpa	50	60
Coefficient de poisson	ν		0,3	0,45
Cohésion	C_{re}	Kpas	0,2	12
angle de frottement	φ	°	35	26
Angle de dilatation	ψ	°	5	0
Facteur de rigidité de	Rinter	-	1	1

Tableau (IV-1) : propriétés des couches de sols.

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 de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normale	EA	32160000	KN/m
Rigidité de flexion	EI	2680000	KN m^2/m
Epaisseur équivalente	D	1	M
Poids	W	25	KN/m/m
Coefficient de poisson	Y	0,2	-
Rayleigh dumping	α et β	0.01	-

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

IV-3-2- génération de maillage :

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires à 15noeds.

La figure (IV-12) présenté le maillage effectué du modèle.

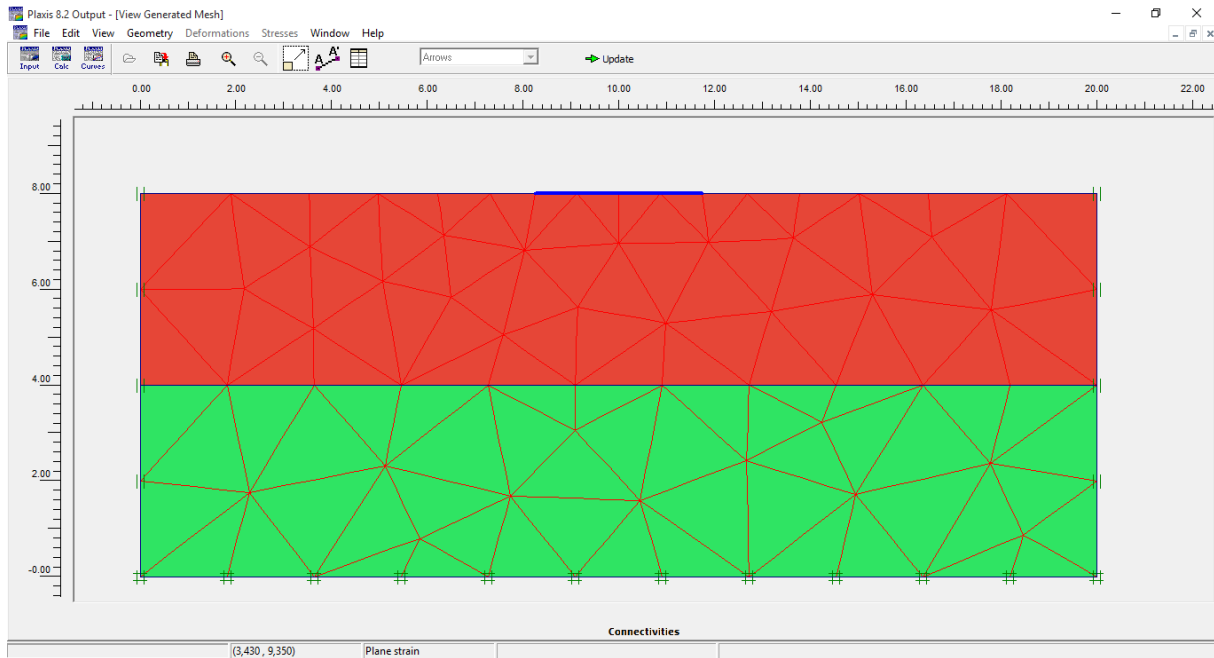


Figure (IV-12) : maillage du modèle.

IV-3-3- condition initiales :

Elles correspondent à un état de type $K_0=1$ (contrainte de type géotechnique) figure (IV-13) ;

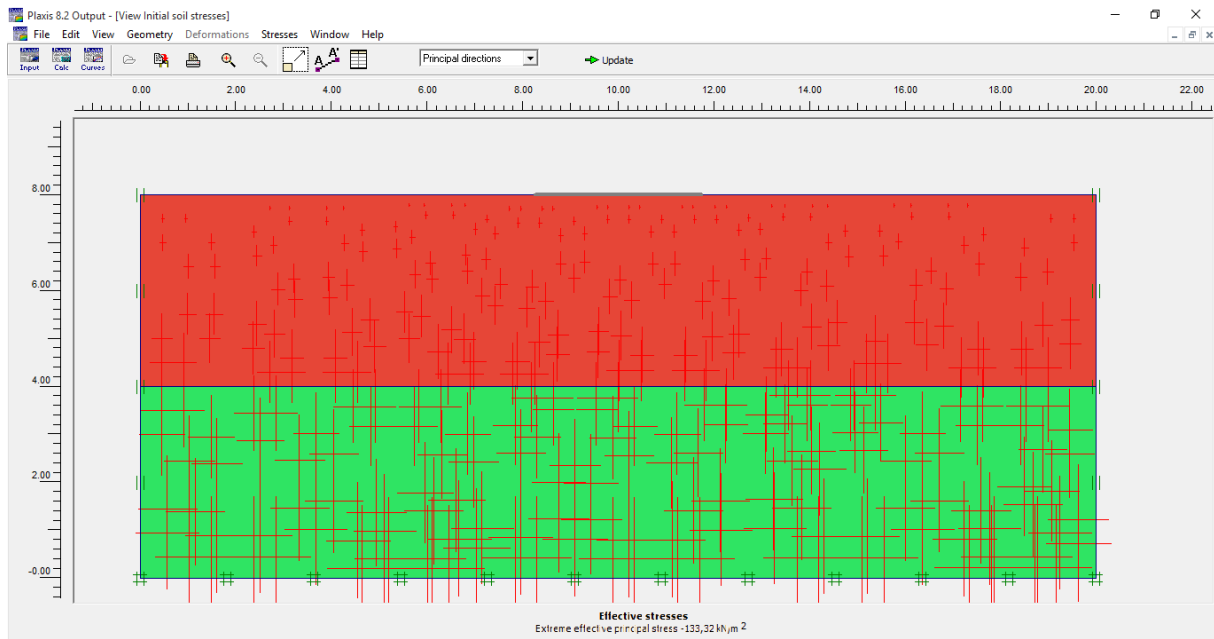


Figure (IV-13) : génération des contraintes initiales.

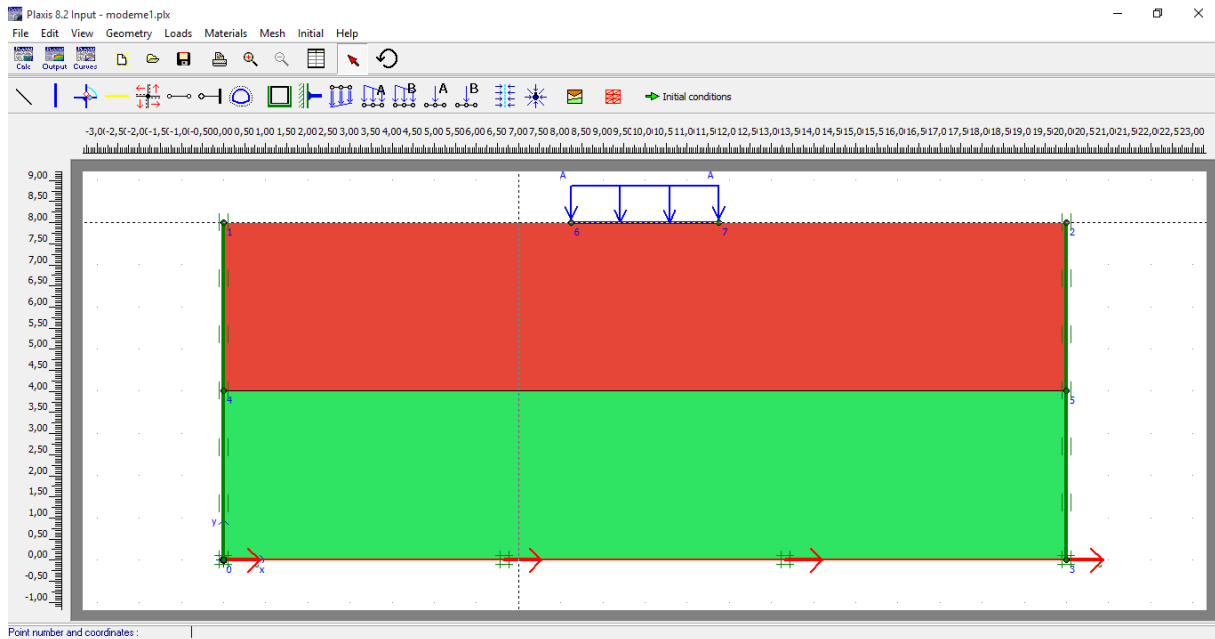
Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

IV-3-4- sollicitation sismiques :

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

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

a. Cas horizontale.



Figure(IV-14) : présente les trois sollicitations imposées à la base du modèle de calcul.

b. cas inclinée.

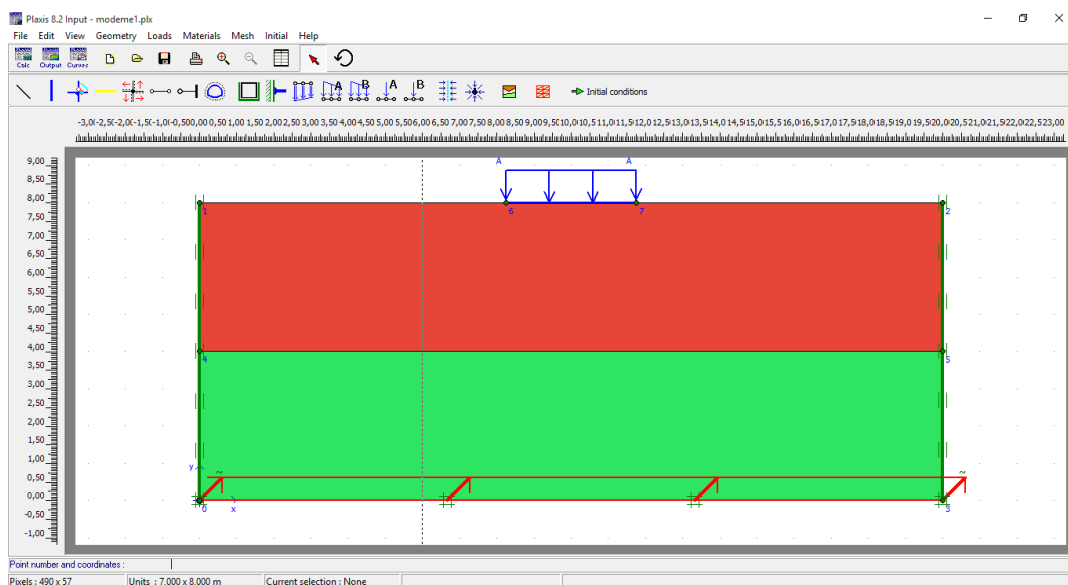
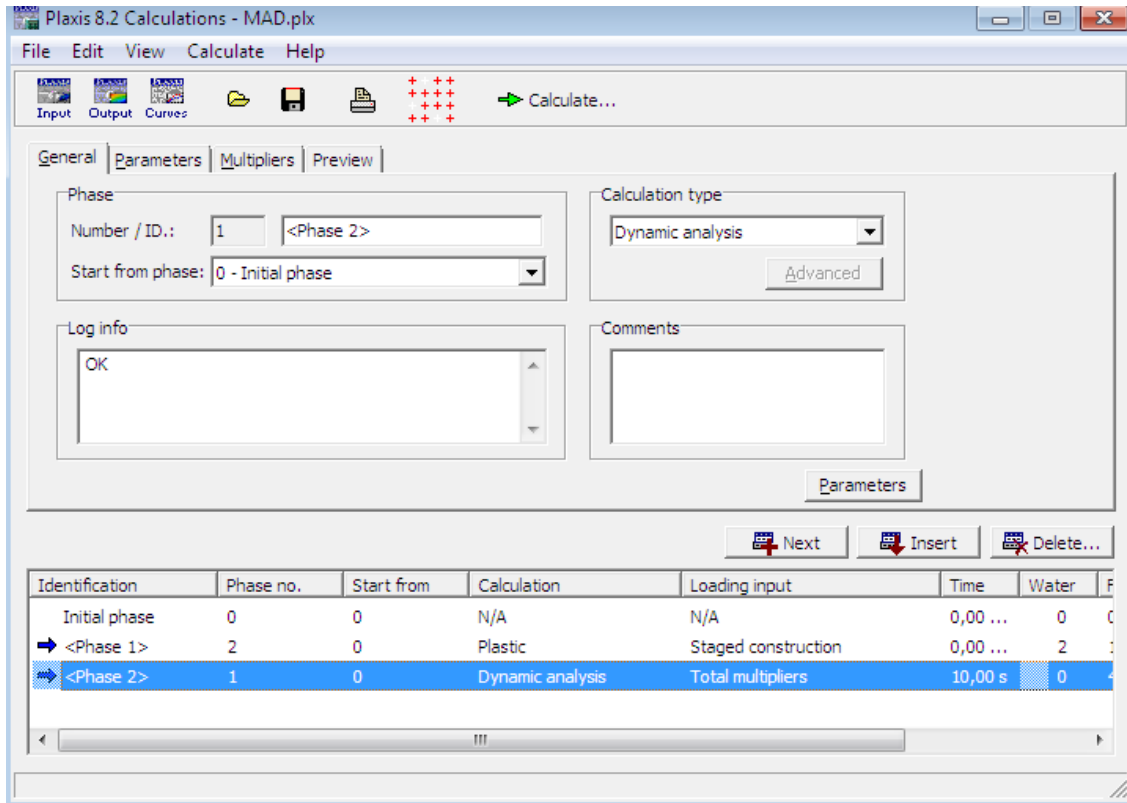


Figure (IV-15) : Sollicitations sismiques.



The calculations window with the general tab sheet.

Figure(IV-16) : phases de calcul.

IV-3-5- procédure de calculs :

Est faite en trois phases dans l'ordre suivant :

1. Phase (0) : initiation des contraintes géostatique (procédure K_0), une phase initiale suivie de deux phases, phase (01) et phase (02).
2. Phase (01) : calcul plastique avec la procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system $A=51.42 \text{ KN/m}^2$ ».
3. Phase (02) : chargement dynamique « dynamique anlysis » et « harmonique load multiplier » excitation harmonique.

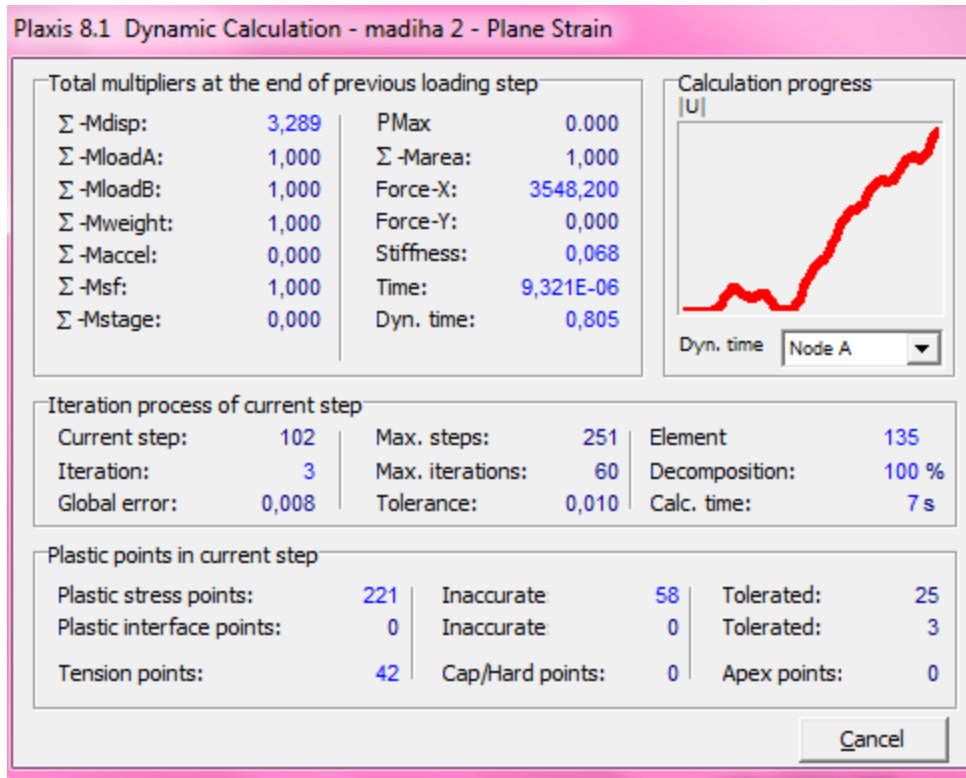


Figure (IV-17) : Fenêtre pour le calcul les déférentes phases.

La figure (IV-18) présente les points (A, B, C, D et E) choisis pour notre calcul.

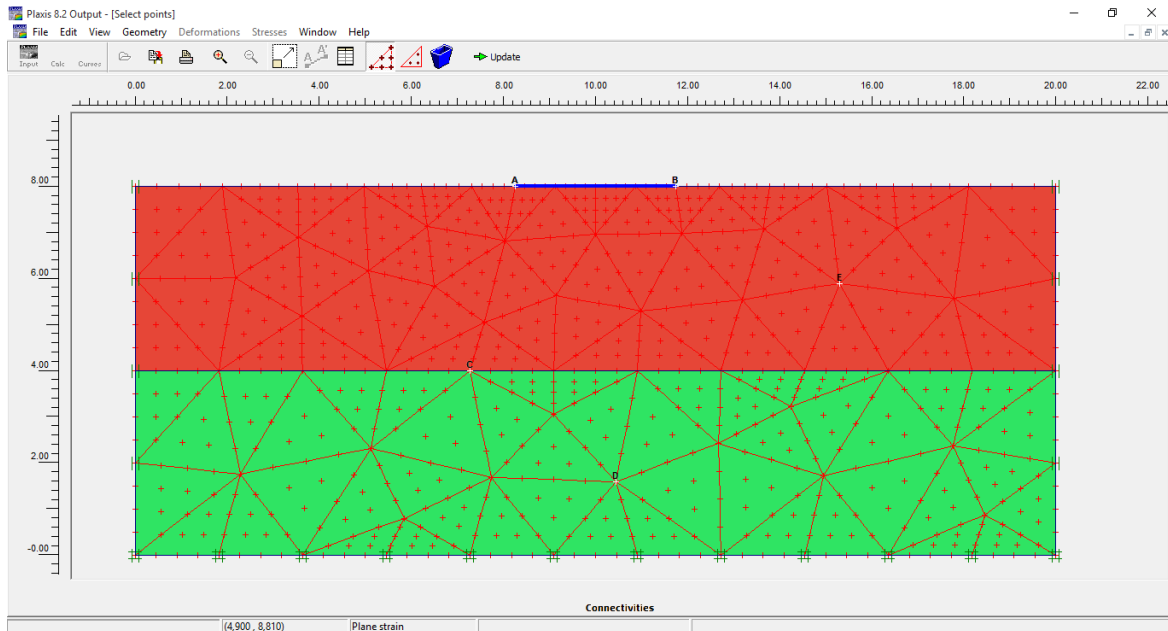


Figure (IV-18) : Trace des points sur le profil.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

IV-4- résultats des calculs et interprétation :

IV-4-1- le tableau (4-3) donnée les coordonnées des points étudiés :

N° de point	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E
X(m)	8,25	11,75	7,27	10,45	15,30
Y(m)	8	8	4	1,59	5,90

Tableau (4-3) : Données des points.

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

IV-4-2- résultats des calculs :

IV-4-2-1- Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base (1^{ere} cas) :

L'onde sismique horizontale est imposée à la base du modèle de calcul les étapes sont données dans l'ordre :

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

a/Maillage déformation : Le maillage déformé du modèle de calcul représenté sur la figure (IV-19).

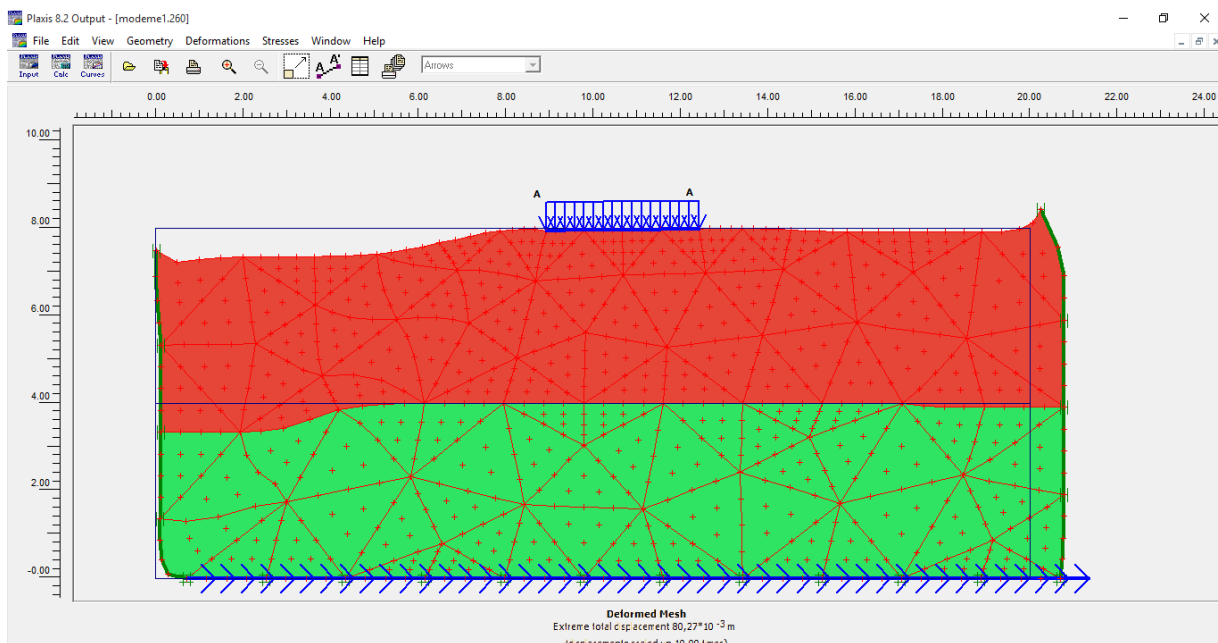
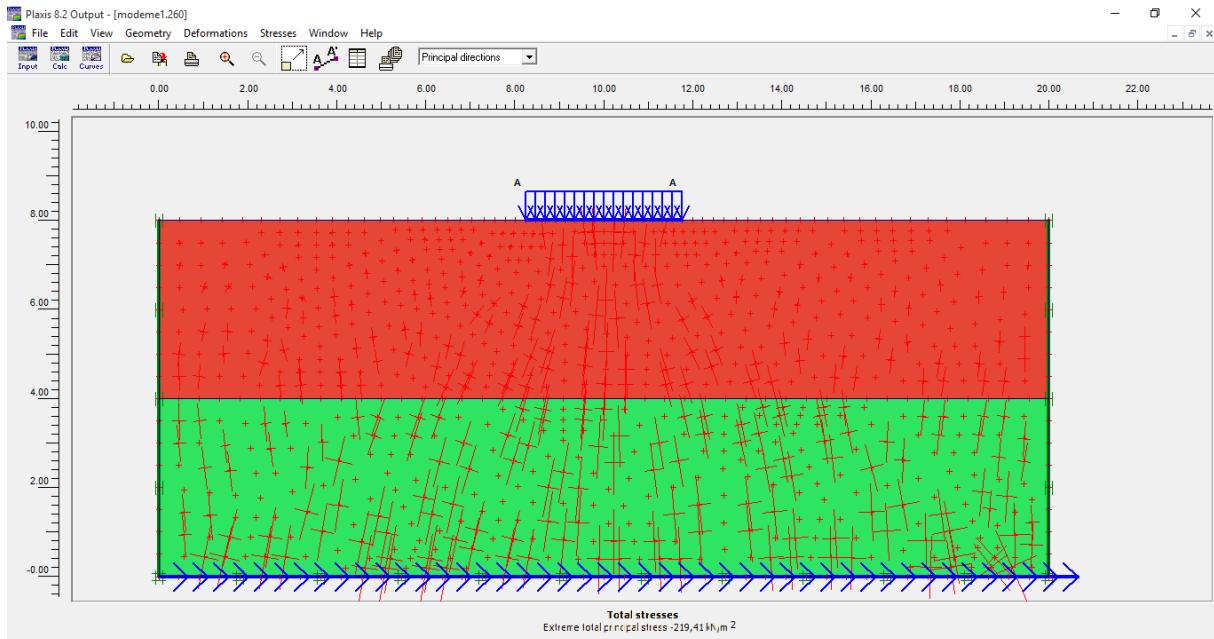


Figure (IV-19) : Maillage déformation du profil (1^{ere} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

b/Contraintes : Les iso valeurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure (IV-20).



Figure(IV-20) : Total stresses (1^{ere} cas).

c/déplacements : Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure(IV-21).

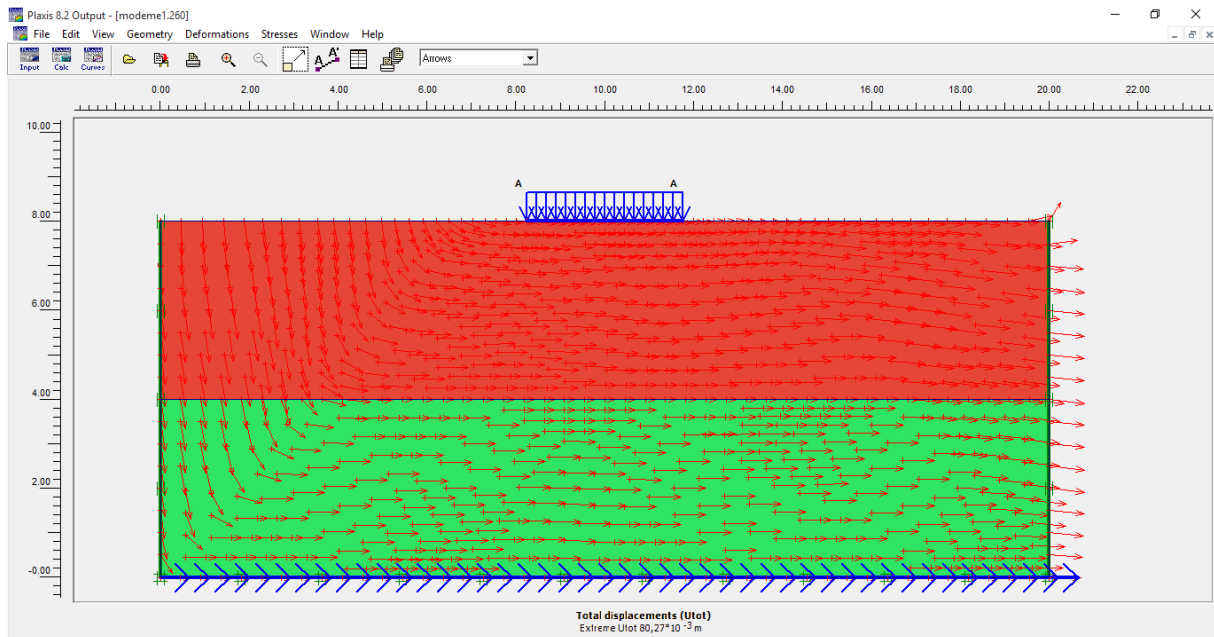


Figure (IV-21) : Total déplacements (1^{ere} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

d/courbes déplacement-temps :

Axe XX'

le champs de ces vecteurs est très intéressés au voisinage de la fondation et uniforme dans la majorité du modèle.

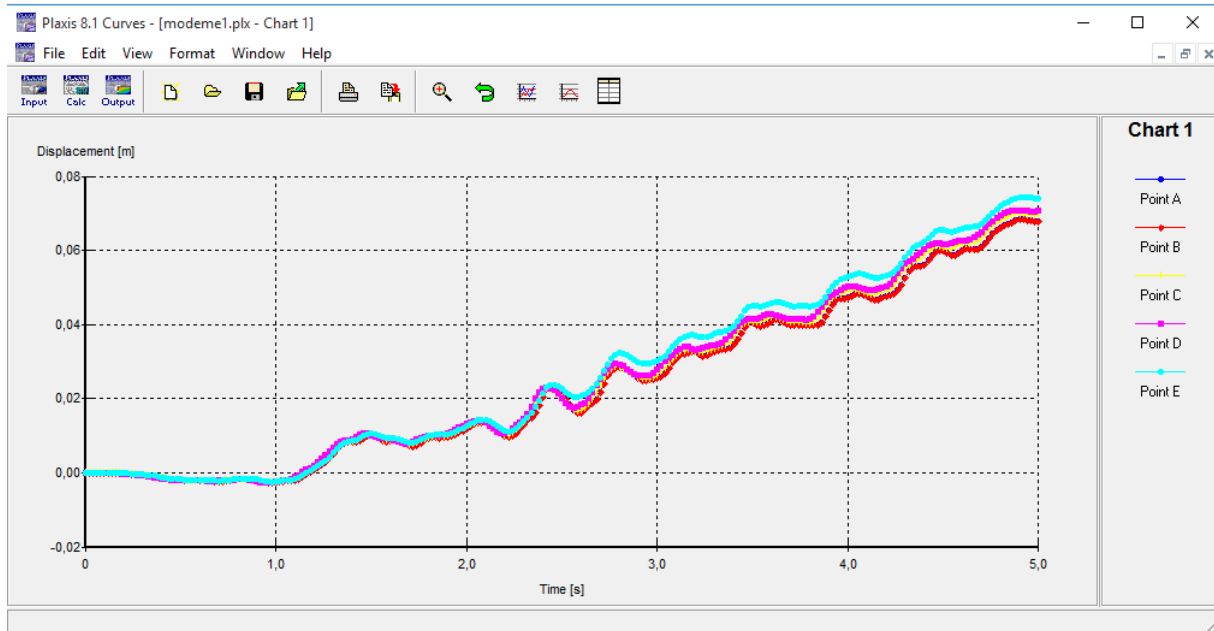


Figure (IV-22) : Déplacement-temps suivant l'axe XX' (1^{ere} cas).

La figure (IV-22) montre le déplacement pour les différents points du modèle la valeur du déplacement croît en fonction du temps. Première

Axe YY' :

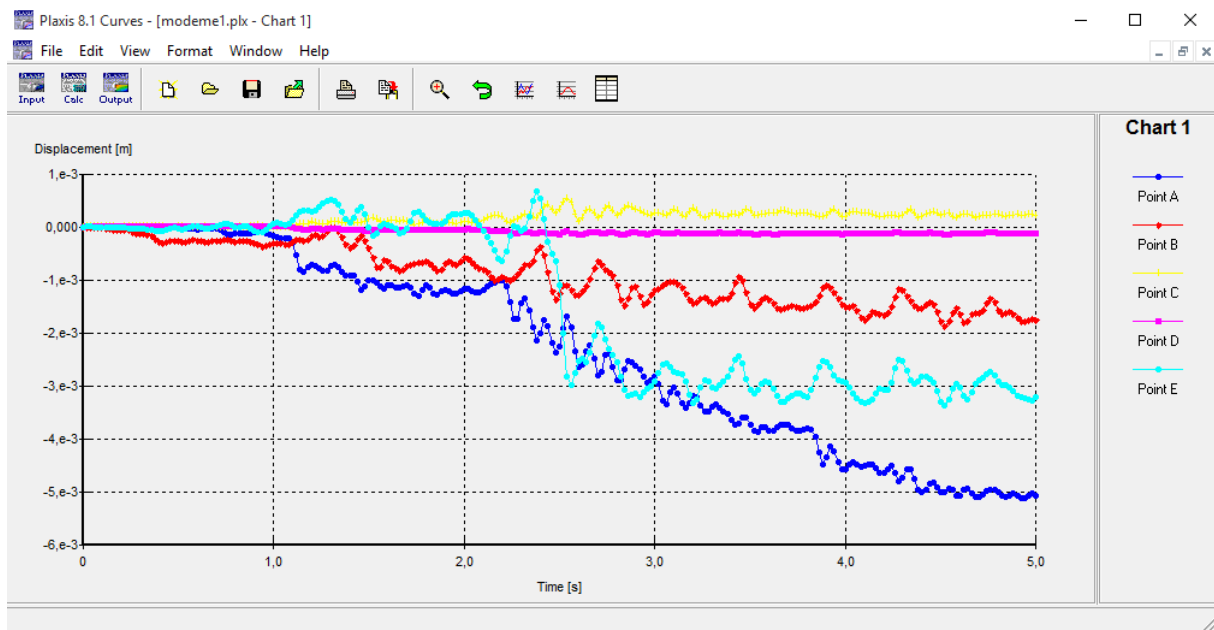


Figure (IV-23) : Déplacement-temps l'axe YY' (1^{ere} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

la figure (IV-23) montre le déplacement dans le sens YY' il est presque croissant pour les point C et D, décroissant pour les points B et A, E.

e/courbe vitesse-temps :

Axe XX' :

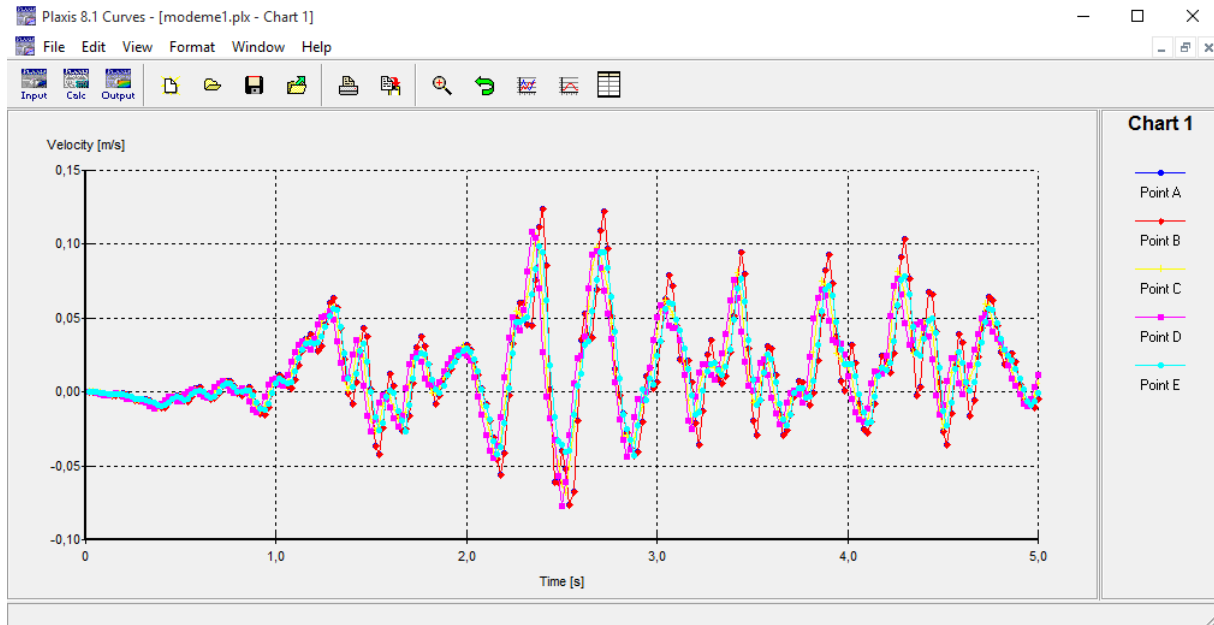


Figure (IV-24) : Vitesse-temps suivant l'axe XX' (1^{ere} cas).

La figure (IV-24) illustre de la vitesse en fonction l'axe XX', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2-3]s.

Axe YY' :

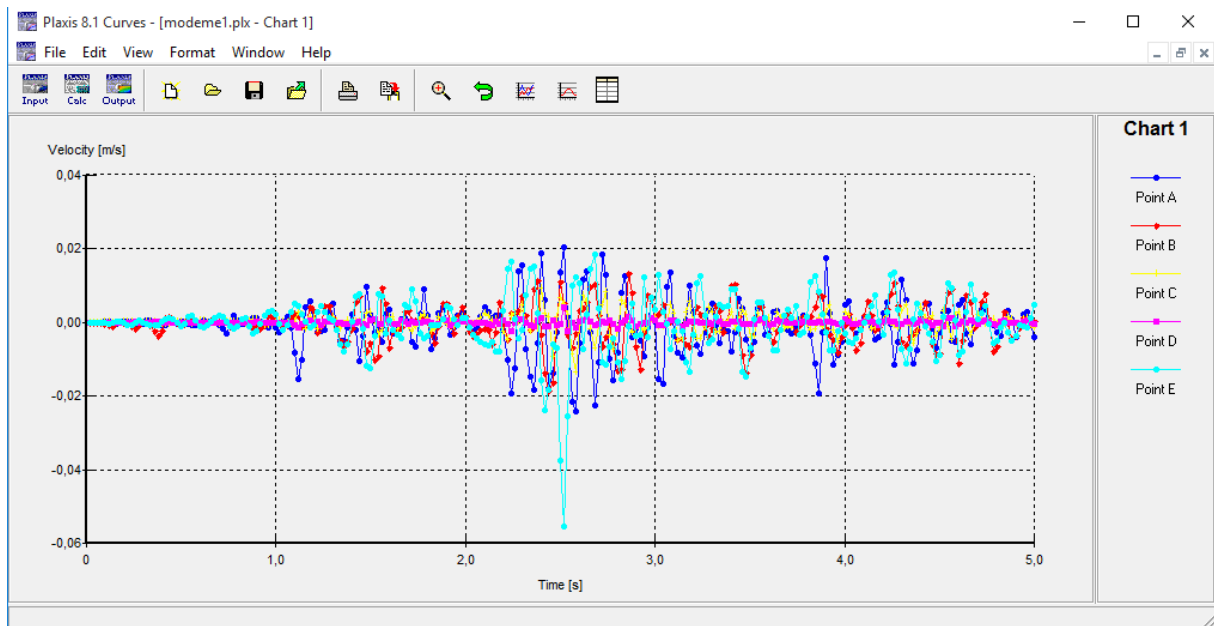


Figure (IV-25) : vitesse-temps suivant l'axe YY' (1^{ere} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

La figure (IV-25) illustre de la vitesse en fonction l'axe YY', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2-3]s.

f/courbe accélération-temps :

Axe XX' :

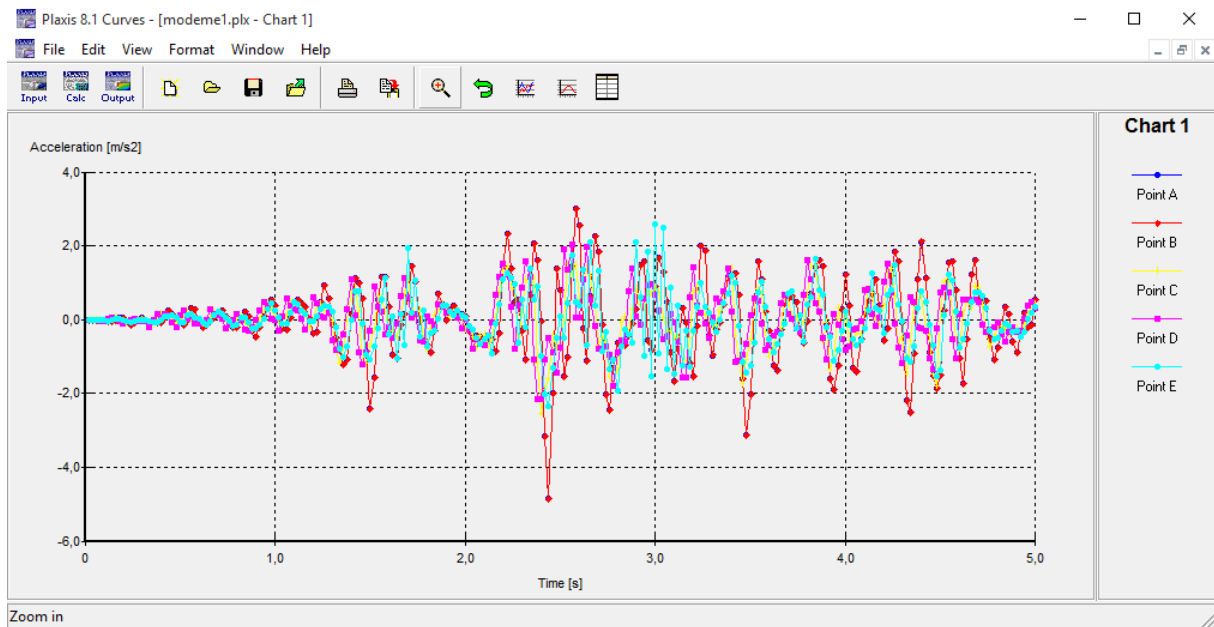


Figure (IV-26) : Accélération-temps suivant l'axe XX' (1^{ere} cas).

La figure (IV-26) illustre de la accélération en fonction l'axe XX', l'histoire de accélération du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2-3]s.

Axe YY' :

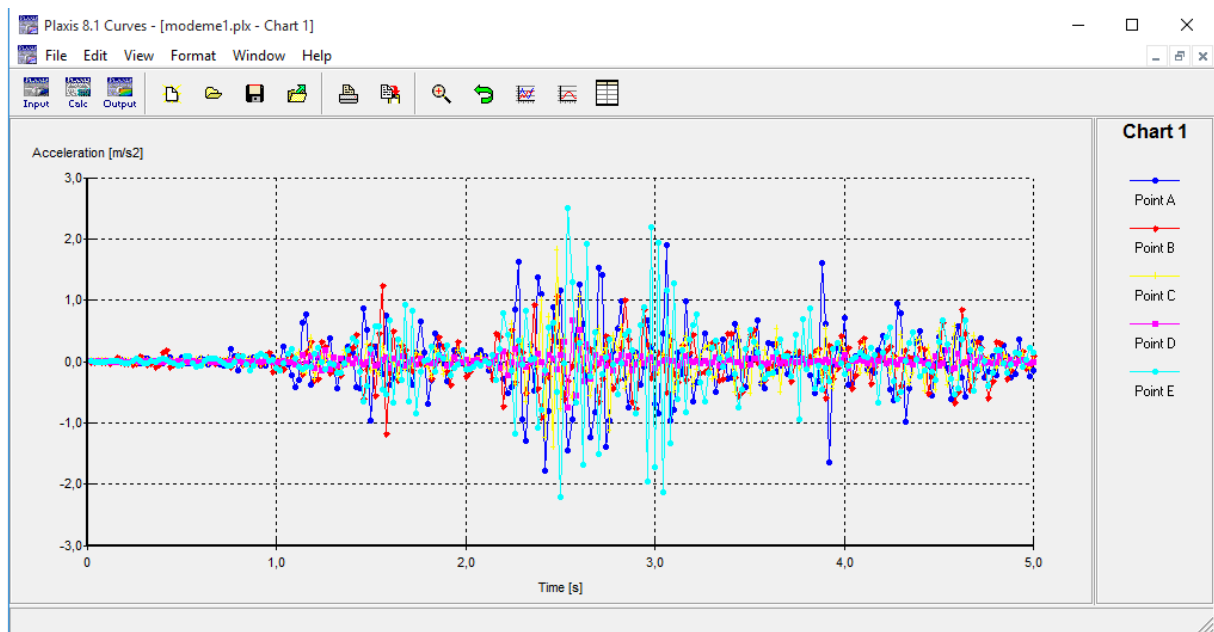


Figure (IV-27) : Accélération-temps suivant l'axe YY'(1^{ere} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

La figure (IV-27) illustre de la accélération en fonction l'axe XX', l'histoire de accélération du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2-3]s.

g/courbe force-temps :

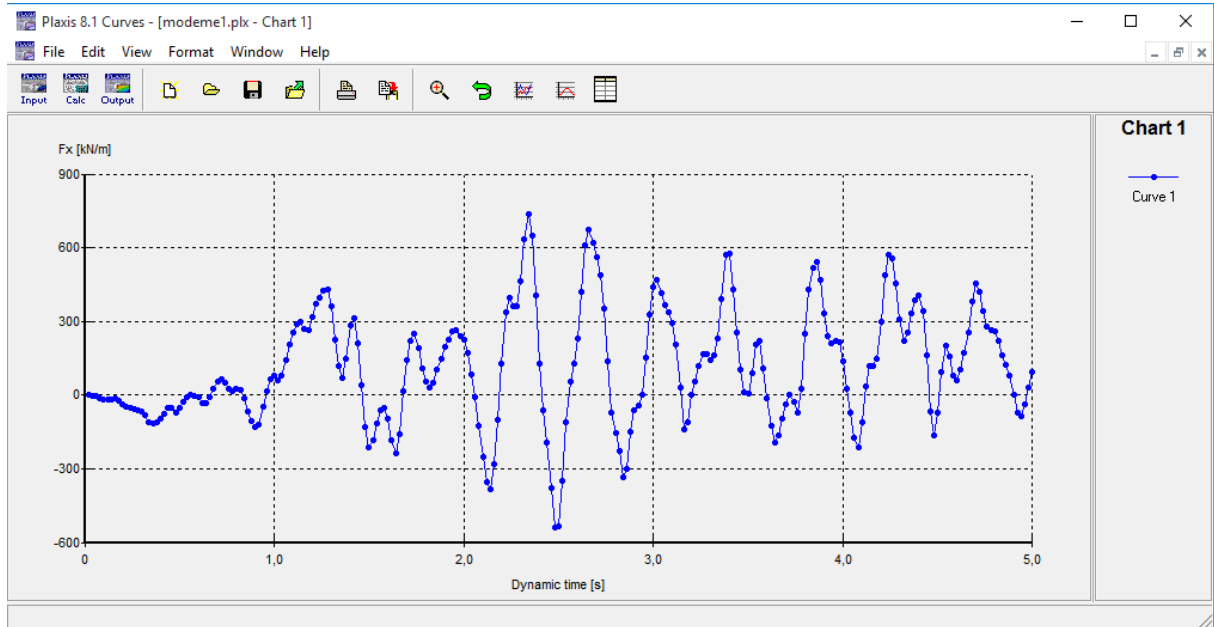


Figure (IV-28) : La force (Fx) en fonction du temps.

La figure (IV-28) illustre de la force en fonction l'axe XX', l'histoire de force du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2-3]s.

h/synthèse :

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

	N° de point	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E
Déplacement (m)	XX	0,068	0,068	0,070	0,071	0,074
	YY	5,126* 10 ⁻³	1,865* 10 ⁻³	5,281* 10 ⁻⁴	1,468* 10 ⁻⁴	3,375* 10 ⁻³
Vitesse (m)	XX	0,124	0,124	0,105	0,108	0,099
	YY	0,024	0,019	0,013	4,23*10 ⁻³	0,055
Accélération (m)	XX	4,837	4,837	2,549	2,150	2,593
	YY	1,895	1,242	1,817	0,757	2,507

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

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

IV-4-2-3- Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (2^{eme} 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-29).

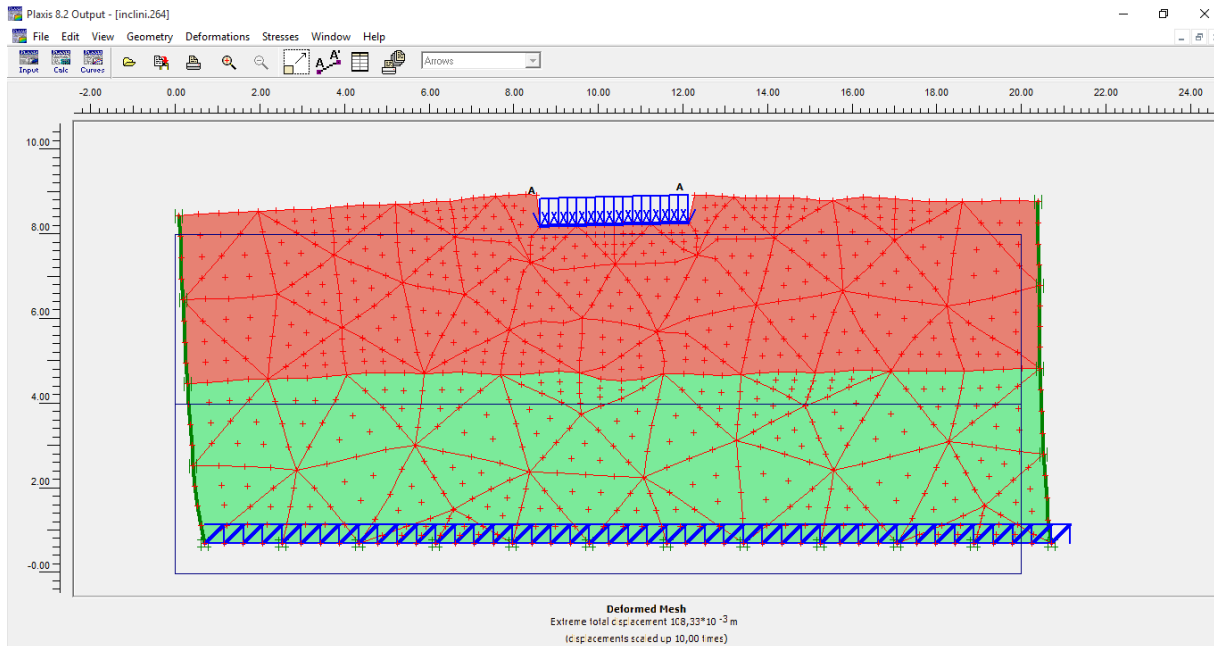


Figure (IV-29) : Maillage déformé du profil (2^{eme} cas).

b/Contraintes : Les iso valeurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure (IV-30).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

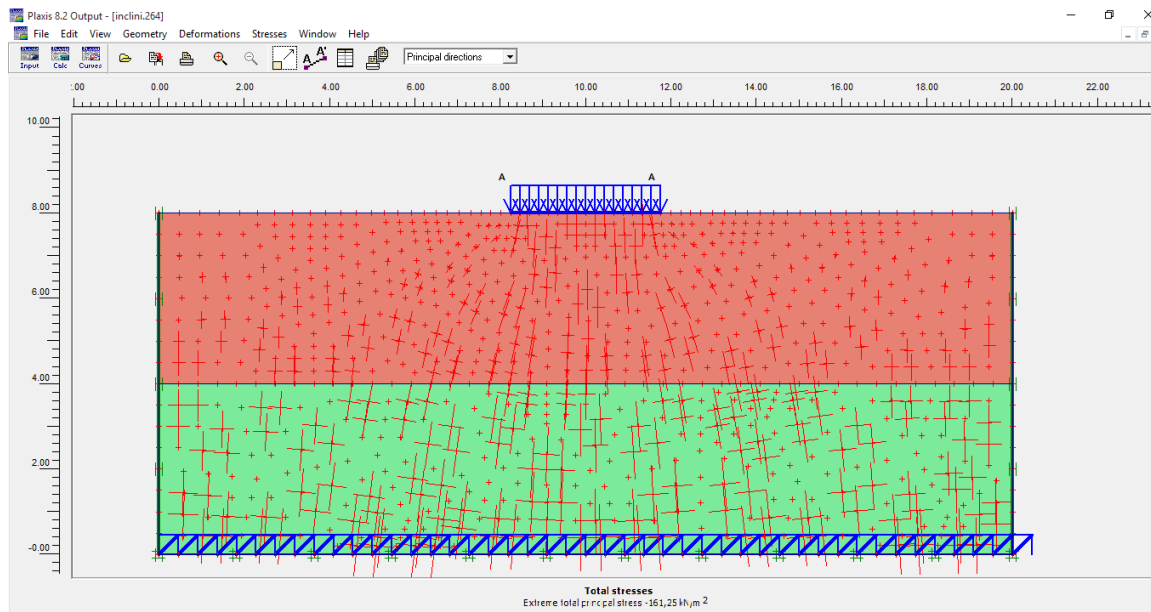


Figure (IV-30) : Total stresses (2^{eme} cas).

c/déplacements : Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure(IV-31)

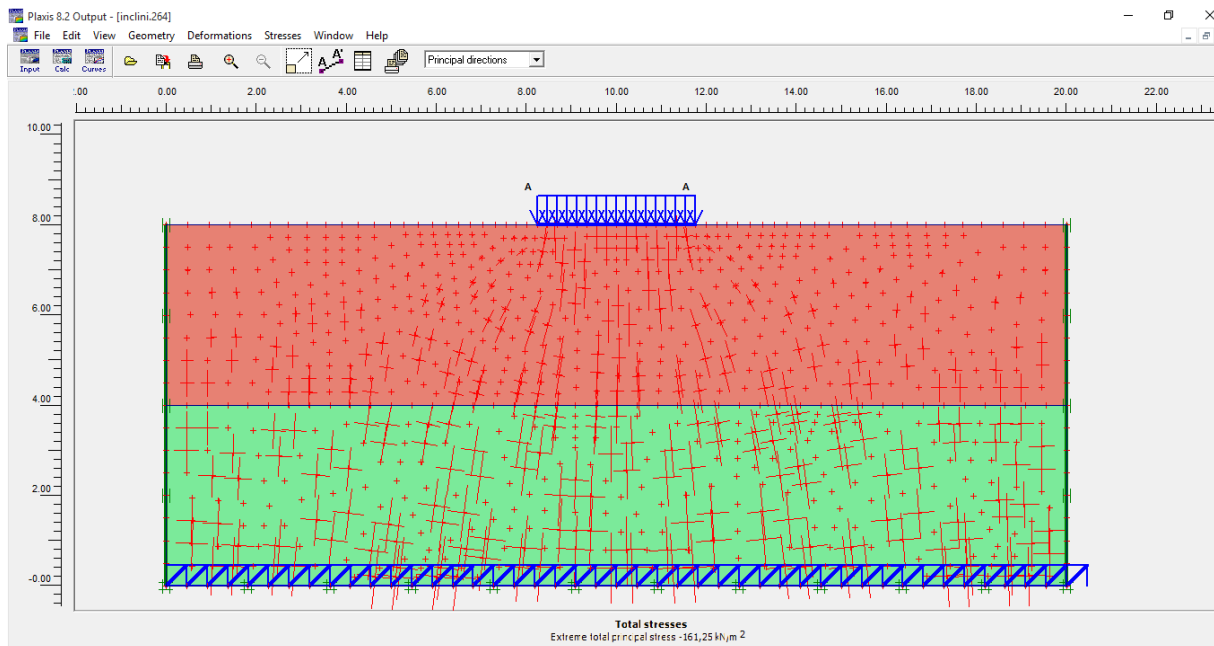


Figure (IV-31) : Total déplacements (2^{eme} cas).

d/courbes déplacement-temps :

Axe XX' :

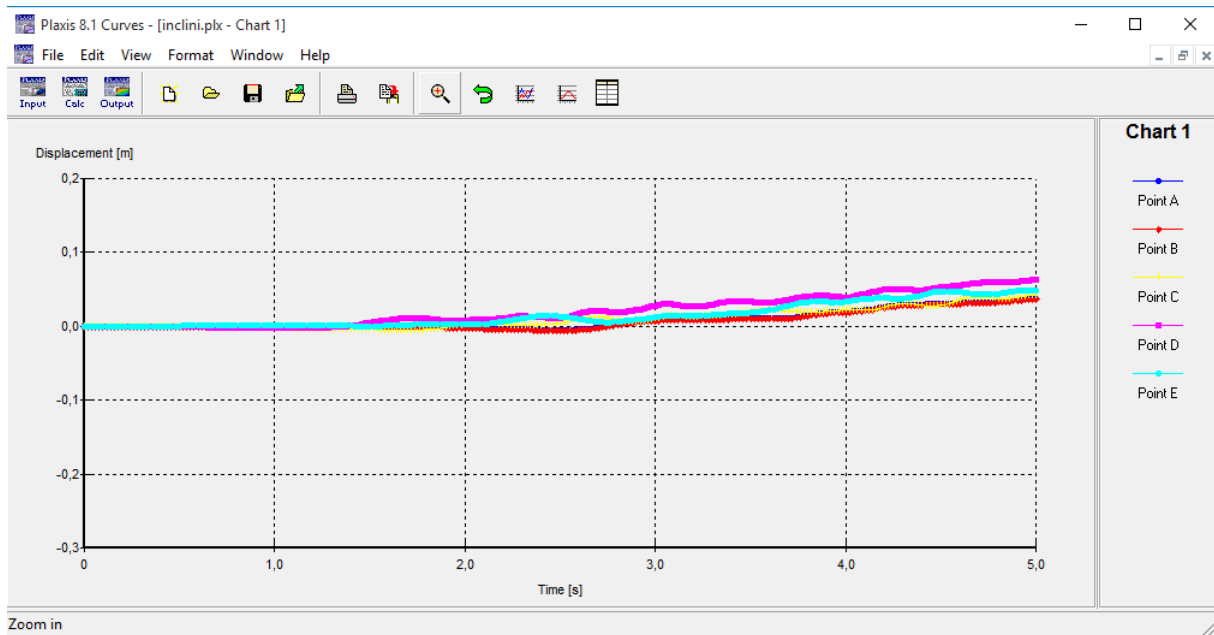


Figure (IV-32) : Déplacement-temps suivant l'axe XX' (2^{eme} cas).

La figure (IV-32) montre le déplacement pour les différents points du modèle la valeur de déplacement croît en fonction du temps.

Axe YY' :

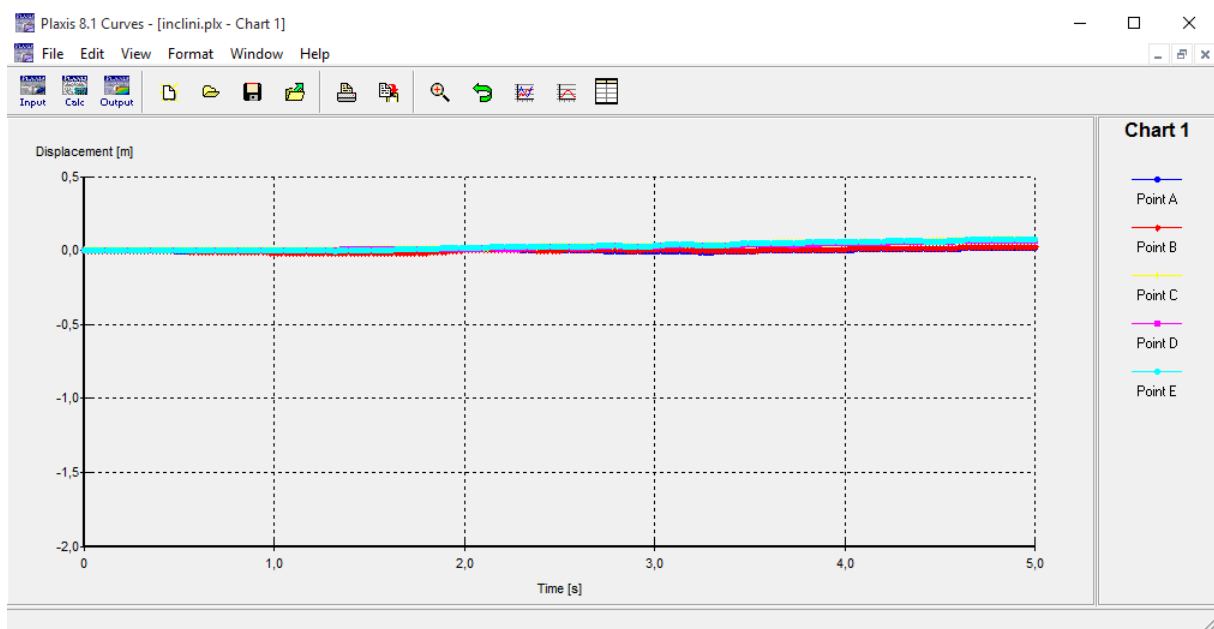


Figure (IV-33) : Déplacement-temps suivant l'axe YY' (2^{eme} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

La figure (IV-33) montre le déplacement pour les différents points du modèle la valeur du déplacement croît en fonction du temps.

e/courbe vitesse-temps :

Axe XX' :

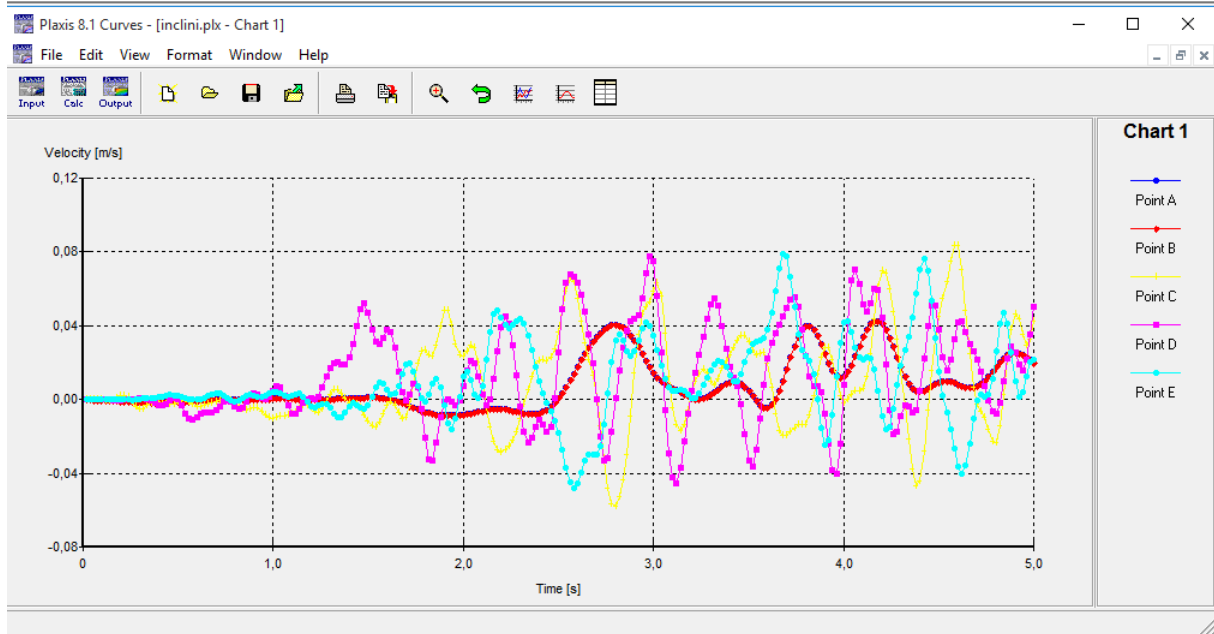


Figure (IV-34) : vitesse-temps suivant l'axe XX' (2^{eme} cas).

La figure (IV-33) illustre de la vitesse en fonction l'axe XX', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2.5-5]s

Axe YY' :

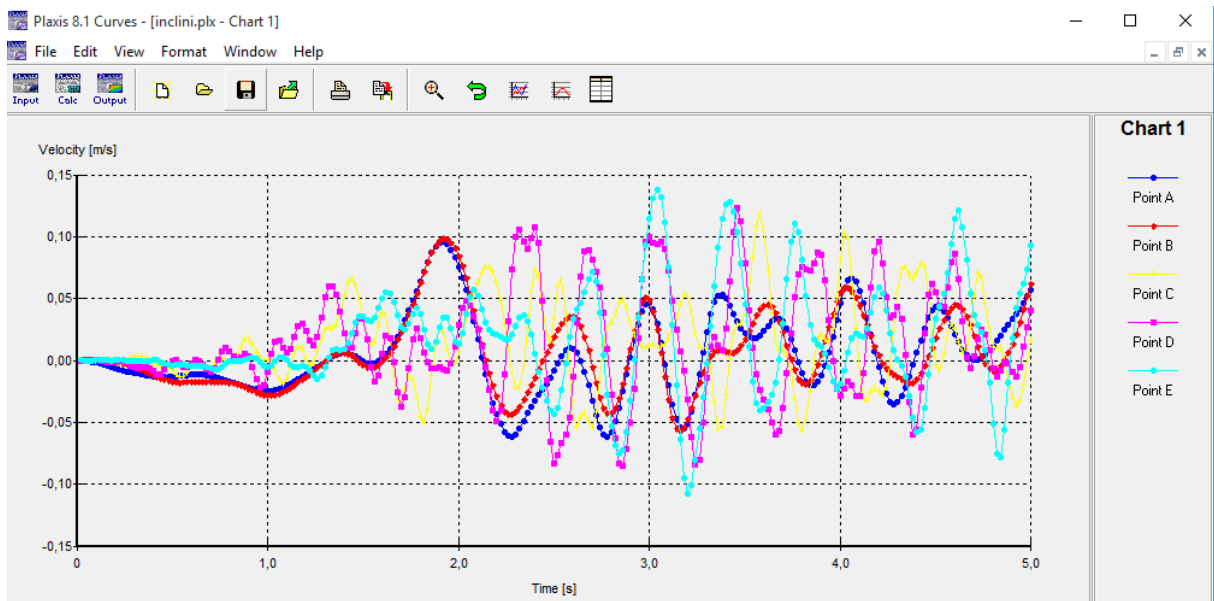


Figure (IV-35) : Vitesse-temps suivant l'axe YY' (2^{eme} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

La figure (IV-35) illustre de la vitesse en fonction l'axe YY', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2.5-5]s

f/courbe accélération-temps :

Axe XX' :



Figure (IV-36) : Accélération-temps suivant l'axe XX'(2^{eme} cas).

La figure (IV-36) illustre de la accélération en fonction l'axe XX', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2.5-5]s.

Axe YY' :

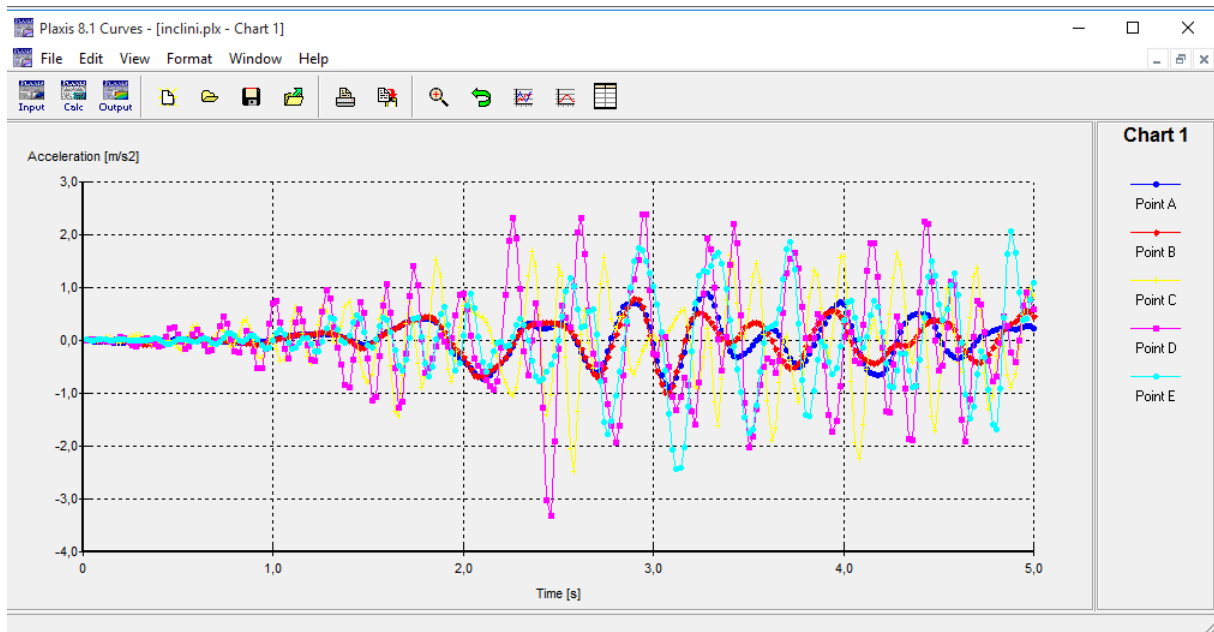


Figure (IV-37) : Accélération-temps suivant l'axe YY' (2^{eme} cas).

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

La figure (IV-37) illustre de la vitesse en fonction l'axe YY', l'histoire de vitesse du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2.5-5]s.

g/courbe force-temps :

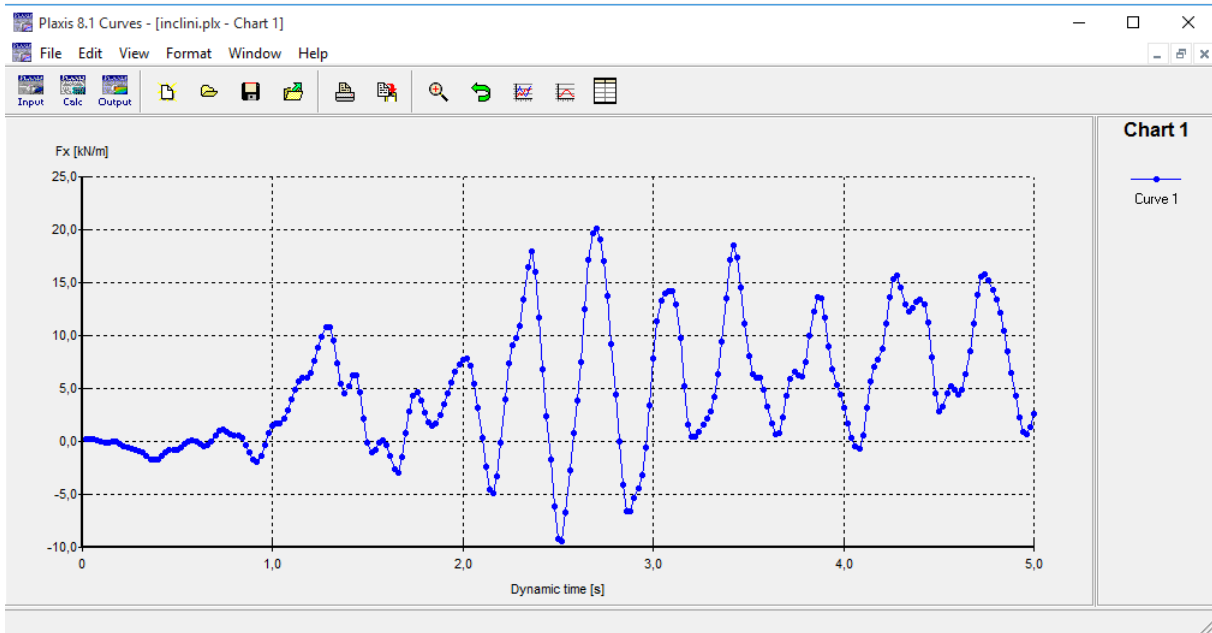


Figure (IV-38) : La force (Fx) en fonction du temps.

La figure (IV-28) illustre de la force en fonction l'axe XX', l'histoire de force du système sol-fondation il atteint des valeurs de pic dans la domaine [2.5-5]s.

h/synthèse :

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

	N° de point	Point A	Point B	Point C	Point D	Point E
Déplacement (m)	XX	0,036	0,036	0,042	0,062	0,048
	YY	0,020	0,036	0,072	0,068	0,077
Vitesse (m/s)	XX	0,043	0,043	0,082	0,077	0,077
	YY	0,092	0,095	0,119	0,125	0,137
Accélération (m/s ²)	XX	0,330	0,330	1,231	1,808	1,111
	YY	0,905	0,982	2,517	3,392	2,430

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

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

IV-4-3-Interprétations des résultantes :

IV-4-3-1-Comparaison des calculs :

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

	1 ^{ere} cas	2 ^{eme} cas
Déplacement (m)	0,074	0,077
Vitesse (m/s)	0,124	0,137
Accélération (m/s ²)	4,837	2,517

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

On observe la valeur de (déplacement, vitesse) dans le 2^{zmz} cas supérieur aux 1^{ere} cas par contre la valeur de accélération dans le 1^{ere} cas supérieur aux 2^{eme} cas.

Les résultats montrent que :

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

IV-4-4- Effet des ondes horizontal :

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	7,27	14,55	20
Déplacement(m)	XX	0,012	0,070	0,071	0,079
	YY	0,066	5,281*10 ⁻⁴	7,341*10 ⁻⁴	9,374*10 ⁻³

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

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la figure (IV -39) :

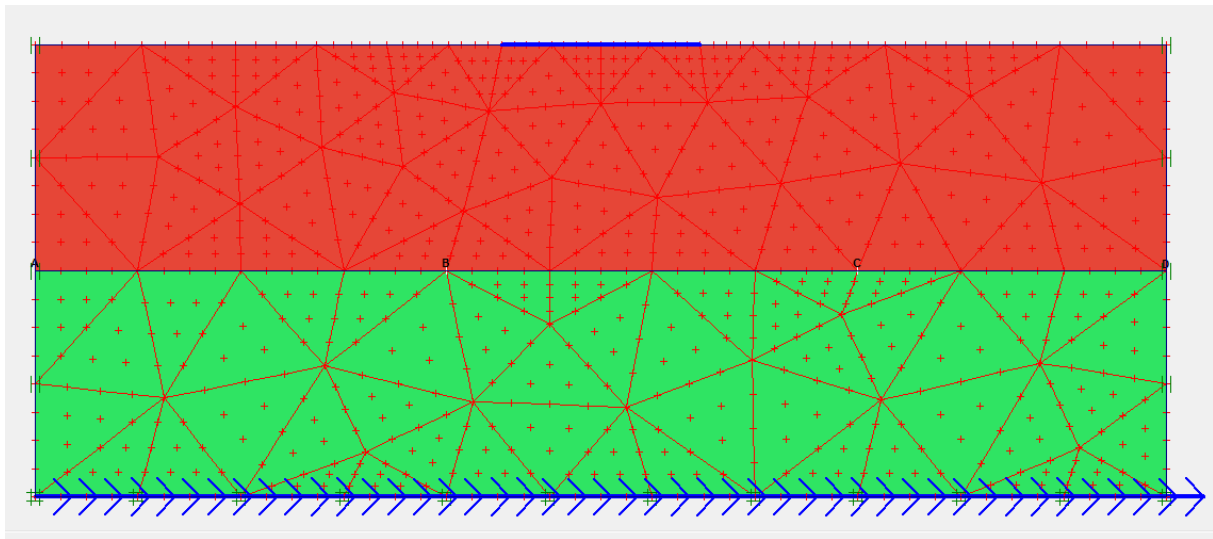


Figure (IV -39) : Schématisation des points de l'axe xx.

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivantes figure (IV-40) et (IV-41).

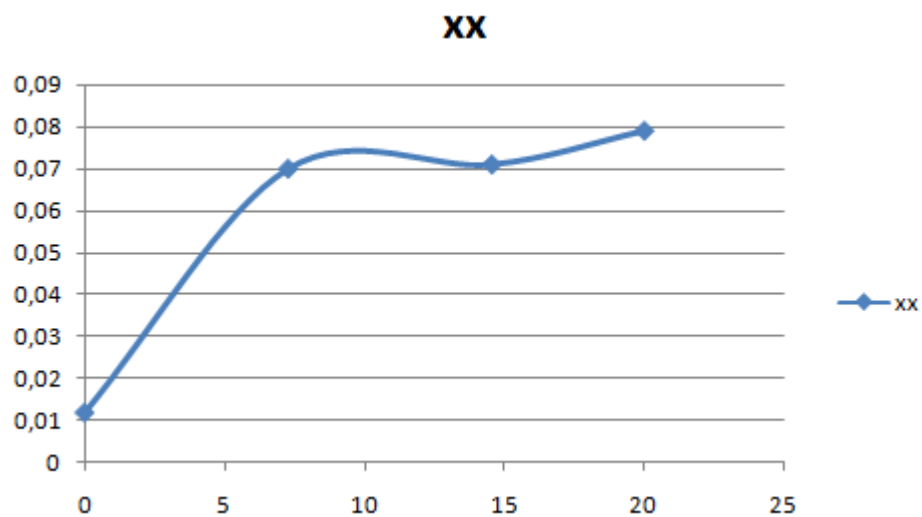


Figure (IV-40) : Déplacement-distance XX'.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

On remarque que le déplacement passe par deux phase 1^{ère} phase [0,7m] le déplacement est croissant au de la 7 m le déplacement entre régime permanent.

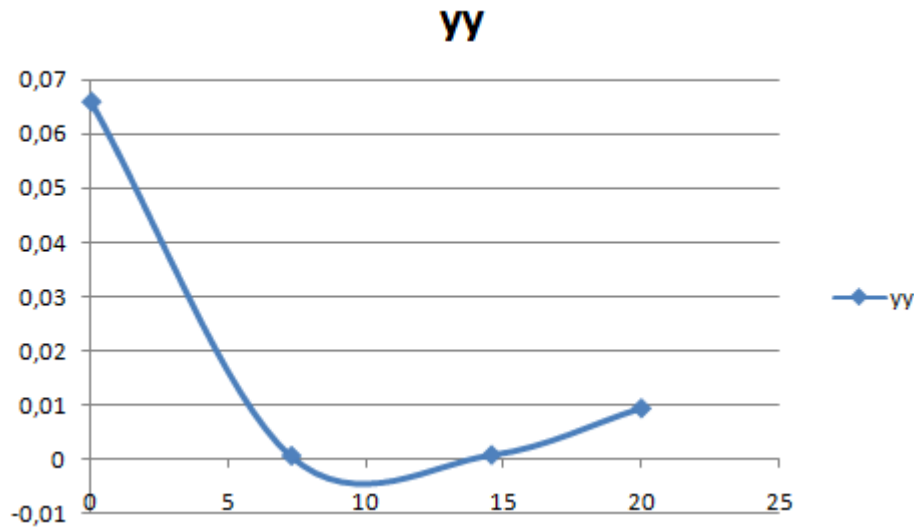


Figure (IV-41) : Déplacement-distance YY'.

La figure (IV-41) montre que déplacement de croit pour les valeur de $x \in [0-10]$ m puis elle augmente à partir de $x > 10$ m.

Les valeurs de pic de touts les simulations ont été mises sur un graphique qui donne les paramètres de mouvement sismique en fonction de la profondeur-distance et ce pour voir le comportement vis-à-vis les différents paramètres de mouvement sismique.

*Commentaire de cas horizontal

Selon l'axe XX' :

Le déplacement voire d'une façon parabolique et cela est du à la variation de la distance et la structure du sol ; Il est faible au voisinage de la structure, il augmente en s'éloignant de la structure et prend des valeurs max presque au milieu.

Selon l'axe YY' :

Le déplacement augmente à mesure que la distance augmente à partir du site de contact.

IV-4-5- 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 put dire que : l'étude effectuée sur le facteur de profondeur.

Chapitre IV : présentation des outils de simulation numérique

- 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 se propageant dans le sens incliné influent beaucoup plus que celle qui se propageant dans le sens horizontale et verticale.
- 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.

IV-5-Conclusion

La modélisation numérique du creusement d'un pont en tenant compte du déconfinement cette étude est effectuée à l'aide du code de calcul PLAXIS est un programme de calcul basé sur la méthode des éléments finis nécessite une modélisation nécessairement approchée d'une réalité complexe, il permet le calcul des contraintes et des déplacements du massif du sol et des éléments structuraux. Cela conduit à faire un certain nombre de choix qui concernent Pour simuler le comportement des massifs des sols et de l'ouvrage (pont), une modélisation numérique bidimensionnelle a été effectuée avec le logiciel PLAXIS en utilisant le modèle de comportement de Mohr-Coulomb. Nous avons simulé des problèmes fortement non linéaires (modules de sol, interfaces), et de géométrie complexe (tunnels non circulaires et la superstructure) avec une bonne stabilité numérique aussi bien les paramètres de l'outil numérique que le modèle de comportement utilisé .

conclusion générale

CONCLUSION GENERAL

Pour la plupart des structures de Génie civil, le comportement du sol et le comportement de la structure peuvent être investigués de manière dissociée, ce qui facilite grandement l'analyse tout en permettant généralement d'atteindre les buts visés. Dans certains cas cependant, l'interaction sol-structure est beaucoup plus importante et peut influencer de manière significative la conception et le dimensionnement de la structure. Une bonne maîtrise du comportement combiné de la structure et du sol améliore alors sensiblement la conception de la structure. Une mauvaise interprétation de cette interaction peut par contre mener à des solutions structurales inadaptées.

Le but de ce mémoire est démontrer les effets de l'interaction sol-pile de pont. Les applications réalisées sont faites à l'aide du logiciel plaxis qui a permis de bien modéliser la structure avec la prise en compte de l'ISS et d'en tirer les résultats essentiels pour pouvoir conclure l'influence de la profondeur sur l'ISS.

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

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-pile de pont » 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 de pont. Ainsi que la fréquence qui 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 des éléments finis par le code et la profondeur sur arbitraire est suffisante pour décomposer le problème car elle est basée sur plusieurs paramètres.

conclusion générale

- Examiner l'effet des paramètres sismique de 'interaction sol-pile, sur les propriétés vibratoires ou comportement dynamique du système étudié.

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] Donovan, N.C. (1978) - "Soil & Geologic Effects on site Response". Sec. Inter. Conf. on Microzonation for safer constr., San Francisco, Vol. I, pp. 55 - 71.
- [6] Boore, D.M., Oliver, A.A., Page, R.A. et Joyner W.B. (1978) "estimation of ground Motion Parameters". Open - File report N° 78, 509, United State Department of interior, Geotechnical Survey, USA.
- [7] Seed, H.B., et Idriss, I.M. (1971, a) - "Influence of Soil Conditions on Building Damage Potential During Earthquakes". J. Struc. Div. ASCE, Vol. 87,N°. St2, February, pp. 638 – 663.
- [8] Okamoto, s. (1973) -"Introduction to Earthquake Engineering ".University of Tokyo Press, Tokyo, 571 pp.
- [9] Mindlin, R.D., (1949) - Il Compliance of Electric Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, Transaction, ASME, vol. 71, pp. A-259-268.
- [10] 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.
- [11] Pecker, A. (1984). Dynamique des sols. Presse, ENPC, Paris, France.
- [12] Wolf, J. (1988). Soil-Structure-Interaction Analysis in time domain. Prentice Hall International .Series, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [13] Crémer, C. (2001). Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes. Thèse de doctorat, LMT Cachan - ENS, Cachan, France.
- [14] Kausel, E., Whitman, A., Murray, J. et Elsabee, F. (1978). The spring method for embedded foundations. Nuclear Engng. and Design, 48.
- [15] .Chebli, H., Othman, R., Clouteau, D., Arnst, M. et Degrande, G. (2008). 3d periodic be-fe model for various transportation structures interacting with soil.Computers and Geotechnics,35:22–32.
- [16] Gazetas, G. (1991). Foundation Engineering Handbook, Chapter 15. Fang H-Y (ed.), van Nostrand Reinhold: New York.

BILIOGRAPHIE

[17] Pitilakis, D., Dietz, M., Wood, D. M., Clouteau, D. et Modaressi, A. (2008). Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28:453–467.

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.algérien>.

ملخص

تعقيد بنية التربة مشكلة التفاعل يكمن في التكامل واقتزان في عنصرين ,والتربة والهيكل .هذا قد وصف الآثار التي تحدث في الطائرة من تربة الاتصال/ هيكل ,بحيث في تحليل الاستجابة الديناميكية مدرجة ليس فقط الخصائص الهيكلية ولكن أيضا وراء الخواص التربة .بنية تربة التفاعل يمكن التكبير أو تقلل من الاستجابة الديناميكية للهيكل.

باستخدام طريقة العناصر المحددة برمز بلاكسيس في مجال جيوتقنية أمر شائع جدا لدراسة المشاريع الكبيرة .أنها تسمح لتحليل العناصر المحدودة للتحقق من استقرار الهياكل ,وتحديد السرعة والتسارع ,مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل كومة تربة الجسر ونشرع في تصميم الجسور .الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو:

دراسة العوامل التي تلخص على نحو فعال خصائص الحركة الزلزالية مع الاهتمام الخاص لآثار الزلازل الحقيقية والمحاكاة .في هذا التقييم اعتمدت ردود نظام الطابق بطارية جسر اقترحت الدراسة .هذا إمكانية تميز الزلزال من الحد الأدنى لعدد المعلمات .
لدراسة تأثير تفاعل التربة هيكل على الحركة الزلزالية

كلمات مفتاحية

زلزال و التفاعل التربة البنية والسلوك للتفاعل البنية التربة ,بلاكسيس.

ABSTARCT

The complexity of soil structure interaction problem lies in the integration and coupling of two elements, the soil and the structure. This may describe the effects that occur in the plane of the contact soil / structure, so that, in the analysis of the dynamic response not only the structural properties are included but also the underlying soil properties. The interaction soil structure can magnify or reduce the dynamic response of the structure.

Using the finite element method with the code "Plaxis" in the geotechnical field is very common for the study of large projects. It allows for finite element analysis to check the stability of structures, determine its velocity and acceleration, taking into account the soil-bridge pile interaction and we proceed to the design of bridges.

The main objective of this study was:

Examine the factors that effectively summarize the characteristics of the seismic movement with particular attention to the effects of real and simulated earthquakes. In this evaluation the responses of a bridge floor-battery system were adopted .This study suggested the possibility of characterizing the earthquake by a minimum number of parameters

To study the effect of soil-structure interaction on seismic motion Keywords :

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

RESUME

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

L'utilisation de la méthode des éléments finis par le code « 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-pile de pont et de nous de procéder au dimensionnement des ponts.

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 d'un système sol-pile de pont 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 :

سéisme, Interaction sol-structure, Comportement de l'interaction sol-structure, Plaxis.