

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Faculté De Technologie

Département De Génie Civil

N° :



Domaine : Technologie

Filière : Génie civil

Option : Structure

Mémoire Présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : BENTOUMI Rachida

DAFFAF Nadia

Intitulé

**INTERACTION SOL-STRUCTURE D'UN
PASSAGE SUPERIEUR D'UNE VOIE
FERREE (CAS D'UN PONT DALLE)**

Soutenu devant le jury composé de :

MAHAMEDI Abdelkrim	Université de M'sila	Président
MENASRI Abderazzak	Université de M'sila	Rapporteur
BENYAHIA Abdessalem	Université de M'sila	Examineur
GUERRICHE Amar	Université de M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous remercions le Tout-Puissant de nous avoir aidés à compléter ce travail, ce que nous espérons avoir fait Dans celui-ci, nous remercions la famille **DAFFAF** et la famille **BEN TOUMI**. Dans ce dernier, nous sommes heureux d'étendre nos sincères phrases remerciements et sa gratitude à M. Fadil « **MINASRI ABDERAZZAK** » pour ses conseils et des avis et des conseils ainsi que le soutien moral, et d'étendre nos sincères remerciements aux messieurs de formateurs et à tous privés: **Djamel Ouzendja, Naoui Tallah, et HAMITOUCHE AMAR. etc,** que nous ne pouvons manquer d'étendre nos remerciements à l'équipage de l'usine de ciment Lafarge spécial Holcim dette mois : **Mr Nasser C HAHREDINE, Abd elkarim Zaghad.** et la Faculté des travailleurs technologie distingué (Département Génie civil), et à tous ceux qui nous a donné Un coup de main d'un parent De loin à tous ces remerciements et toutes les salutations et la gratitude.*

Enfin, nous envoyons des expressions de gratitude et de gratitude

La paix est une bonne conclusion.

DÉDICACE

En premier et en dernier lieu, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir guidé dans l'accomplissement de ce travail humble, que j'espère avoir gagné, et de prier et de prier le Prophète bien-aimé Muhammad (paix soit sur lui). Mais après Je dédie ce travail à ceux qui ont obéi à Dieu après leur obéissance à mes parents. Au saint homme qui a fait espérer et briller à mes yeux ceux qui ont tracé le chemin du succès de mon enfance jusqu'à ma jeunesse à ceux qui ont sacrifié le précieux et le noble pour informer le plus haut rang - mon père est grand – Dieu m'a récompensé. Pour lequel je ne connaissais pas le réconfort des nuits, je passais le reste de mon réconfort à ce qui était toujours à mes côtés dans le bien et le mal de la douceur et de la patience - ma douce mère - Dieu m'a récompensé d'une bonne récompense. "Mon père, que les prières de Dieu soient sur eux, À la grand-mère aimante qui était une école pour nous enseigner le sens de la vie et nous avons puisé dans les expériences auxquelles nous avons planté la patience, la sincérité et la tendresse dans notre ventre. A ceux qui partagent avec moi le sens de la vie par sa solution et mes frères, à ceux qui nous ont apporté l'amour À tous les enseignants et professeurs à tous les enseignants de la vie dans toutes ses significations, Amon binôme RACHIDA A tous ceux qui ont le pouvoir de mon coeur et qui n'ont pas mentionné ma plume, je dédie cet humble travail.

DAFFAFAF Nadia

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

*A mes chères sœurs **NADJET**, **SOURIA**, **KHADIDJA** et **ZINEB** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*A mes chers frères, **NASSER** et **MOHAMED** pour leur appui et leur encouragement.*

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet sans oublié ma grand-mère et ma grand-père

A toute ma famille, et mes amis

*A mon binôme **NADIA***

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

BENTOUMI Rachida

RESUME

Selon les caractéristiques de la structure et le mouvement du sol, l'influence mutuelle entre le sol et la structure générée des forces internes dans la structure et le comportement sismique associé à la nature des ondes sismique terrestre qui vient à travers les fondations, et la réponse du structure à l'intensité du séisme n'est pas liée seulement aux caractéristiques de la structure du pont mais inclus également les propriétés du sol c'est pourquoi on tient compte de l'influence et de l'interaction mutuelle entre le sol et la structure du pont.

dans ce travail:

On a choisi le code d'éléments finis plaxis, qui nous permet d'établir un modèle de calcul de référence à partir des données de projet, effectivement de faire l'étude dynamique avec la prise en compte de la variation des paramètres géotechniques tels que (la cohésion et l'angle de frottement). Les résultats montrent clairement l'effet de variation des paramètres géotechniques sur le comportement dynamique ainsi que nous montrent que nous pouvons étudier les changements qui peuvent arriver à l'immeuble en étudiant le déplacement de structure et ce en changeant type du sol.

Mots- clefs: Modélisation numérique, interactions dynamique, paramètre, géotechniques, plaxis, séismes.

ABSTRACT

To the characteristics of the structure and movement of the ground, the mutual influence between the ground and the structure generates internal force in the structure and seismic behavior associated with the nature of land seismic waves coming through the foundation, and response of the structure to the intensity of the earthquake is not only related to the characteristics of the structure but also includes soil properties that is why we take into account the influence and mutual interaction between soil and structure .

in this travail:

we choose the finite element code plaxis, which allows us to establish a baseline calculation model from the project data, and make the dynamic study with the consideration of the variation of the géotechnical parameters such as (the cohésion and the friction angle). The results clearly show the effect of change in the géotechnical parameters of dynamic behavior.

Ainsi we show that we can study the changes that can happen to the building structure by studying the mouvement and changing soil type.

Keywords: numérique modling, dynamic interaction parameter, géotechnical, plaxis, earthquake.

وفقا لخصائص الهيكل وحركة التربة فان التأثير المتبادل بين التربة و الهيكل يولد قوى داخلية في الهيكل ويرتبط السلوك الزلزالي للمنشأة بطبيعة موجات الأرض الزلزالية التي تأتي من خلال الأساسات واستجابة الهيكل لشدة الزلزال ولا ترتبط فقط بخصائص الهيكل ولكنها تشمل أيضا خصائص التربة ولهذا نأخذ بعين الاعتبار التأثير المتبادل و التفاعل بين التربة و الهيكل. وفي هذا العمل:

اخترنا رمز عنصر محدود plaxis و الذي يسمح لنا بتأسيس نموذج خط الأساس من بيانات المشروع ، وجعل دراسة

ديناميكية مع النظام في الاختلاف في المعاملات الجيوتقنية مثل (التماسك، زاوية الاحتكاك)، وتظهر النتائج بشكل واضح تأثير

التغيرات في المعاملات الجيوتقنية من السلوك الديناميكي.

وتبين لنا أن نتمكن من دراسة التغيرات التي يمكن أن تحدث لهيكل من خلال دراسة تزحزح الهيكل وتغير نوع التربة.

: النمذجة العددية، معلمة التفاعل الديناميكي، الجيوتقنية، بلاكسيس، زلزال.

SOMMARE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTS DES NOTIONS

NOTATION ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERAL.....1

Chapitre I : Notion sur les ponts

I-1-Introduction.....	1
I-2.Définition d'un pont.....	1
I-3-Le rôle des ponts.....	1
I-4-composition d'un Pont.....	2
I -5 -.les modes de ponts.....	3
I-5-1-.Pont à poutre.....	3
I-5-2- pont mixte	3
I-5-3-Ponts dalles.....	4
I-5-3-1-Domaine d'emploi.....	4
I-5-3-2-Charges et sur charges.....	5
A-Charges permanentes:.....	5
B- Système de charge A (L).....	5
C- Système de charge B.....	6
D-Surcharges militaires.....	8
I-6 -Les combinaisons d'actions.....	9
Conclusion.....	10

Chapitre II : les seismes

Introduction.....	11
II-1- Tectonique des plaques et répartition de la sismicité.....	11

II-2- Définition d'un séisme	12
II-3-Origine des séismes.....	12
II-4-Classification des séismes.....	13
II-4-1- Les séismes superficiels.....	14
II-4-2- Les séismes intermédiaires.....	14
II-4-3-Les séismes profonds.....	14
II-5-.Les caractéristiques principales d'un séisme.....	14
II-5-1- Faille.....	14
II-5-2-Foyer et épicentre.....	16
II-6-Perception du séisme.....	16
II-6-1- Localisation des séismes.....	16
II-6-2- Ondes sismiques	17
II-6-3- Notions d'Intensité et de Magnitude.....	19
Conclusion.....	21

Chapitre III : Interaction sol-structure

Introduction	22
III-1-Définition d'interaction sol structure	22
III-2- Différent types de l'interaction sol-structure.....	23
III-3- Illustration de l'effet de l'interaction sol-structure	23
III-3-1 Modèle analogique simplifié	23
III-3-2- Influence de l'interaction sol structure	24
III-4-Comportement des sols sous sollicitations sismiques	24
III-4-1-Comportement élastique du sol.....	25
III-4-2-Comportement élastoplastique du sol.....	25
III-5- Mouvement du sol en champ libre	25
III-6- Caractéristiques dynamiques des sols	26
III-6-1- Module de cisaillement maximal.....	26
III-6-2-Détermination de γ_{max}	26
III-6-3- Amortissement d'hysteres.....	27
III-7- Comportement sol-structure.....	27
III-8- Modalisation de l'interaction sol-structure	27

III-8-1- Les phénomènes physiques dus a l'interaction sol-structures.....	27
III-8-2- Fonctions d'impédance.....	28
III-8-3-Formulation d'un problème d'interaction sol-structure	29
III-9- Méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure.....	30
III-9-1- Méthode globale.....	30
III-9-2- Méthode de sous-structures.....	30
Conclusion	31

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

Introduction	32
IV-1- Présentation de PLAXIS.....	32
IV-1-1 Le code Plaxis	32
IV-1-2- les sous-programmes de PLAXIS	33
IV-1-3- Options par défaut et de solutions approchées	33
IV-1-4- Les modèles de comportements intégrés dans Plaxis.....	37
IV-1-5 Module dynamique du code PLAXIS	40
IV-2 Modèle de calcul retenu	42

Chapitre V: Résulta des calculs et interprétation

V-1- Le déplacement horizontal imposé à la base	51
V-2 -Maillage déformé	51
V-3 -contraintes	51
V-4 -déplacements	52
V-5 -Courbes déplacements-temps	52
V-6- Courbes vitesses-temps	53
V-7- Courbes accélérations-temps	54
V-8- Courbe force-temps	55
V-9- Synthèse	55
V-10- Effet des ondes horizontales	56
V-11- Effet des ondes verticale	58
V- 12- Synthèse	59
CONCLUSION GENERALE	60
BIBLIOGRAPHIE	

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau (I-1) : Coefficient de dégressivité transversale a_1 de A(l).....	06
Tableau (I-2) : Les valeurs du coefficient b_c	07
Tableau (I-3) : Les valeurs du coefficient b_t	08

Chapitre IV

Tableau (IV-1) : Propriétés du sol de fondation.....	44
Tableau (IV-2) : Propriétés de l'élément structural (plate).....	45
Tableau (IV-3): Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calcul.....	51

Chapitre V

Tableau (V-1): Les valeurs maximale de déplacement,vitesse et accélération pour les différents points.....	54
Tableau (V-2): Déplacement des points (cas horizontales	55
Tableau (V-3): Déplacement des points (cas vertical	56

Listes des figures

Chapitre I

Figure(I-1) : schéma pour la composition d'un pont.....	02
Figure (I-2) : Pont à poutre.....	03
Figure (I-3) pont mixte.....	04
Figure(I-4) Pont dalle.....	04
Figure (I-5) : Le système de charge B_c	07

Figure (I-6) : système de charge Bt.....	08
Figure (I-7) : système de charge Br.....	08
Figure (I-8) : système de charge Mc120.....	09
Figure (I-9) : système de charge Me120.....	09

Chapitre II

Figure (II-1):photo de séisme Northridge (Californie, 1994), et conséquence d'un séisme de Mexico	12
Figure (II-2) : Eléments caractéristiques en géo-sismique	13
Figure (II-3) : Vue aérienne de la faille de San Andreas (Californie)	15
Figure (II-4) : types des failles	15
Figure (II-5) : faille et épicentre	16
Figure (II-6) : Localisation des séismes.....	17
Figure.(II-7) des quatre modes de propagation des ondes sismique.....	18
Figure(II-8) : Echelle d'intensité et de magnitude.....	21

Chapitre III

Figure (III-1) : Modèle simplifié d'interaction sol-structure.....	24
Figure (III-2) : modèle élastoplastique parfait.....	24
Figure (III-3) : modèle élastique de Hooke.....	24
Figure (III-4):Accélération en champ libre.....	26
Figure (III-5) : Principe de superposition de Kausel.....	31

Chapitre IV

Figure (IV-1): Interface utilisateur pour l'entrée des données.....	34
Figure (IV-2): condition aux limites.....	35

Figure (IV-3): Exemple de maillage.....	35
Figure (IV-4): Définition des contraintes initiales : condition « k0 ».....	36
Figure (IV-5): Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	38
Figure (IV-6): Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.....	38
Figure (IV-7): fenêtre au modèle Mohr-Coulomb.....	39
Figure (IV-8): Définition du module à 50 % de la rupture.....	39
Figure (IV-9) : sollicitation harmonique	41
Figure (IV-10) :sollicitation sismique.....	41
Figure (IV-11) : spectre de réponse selon RPA99 version 2003	42
Figure (IV-12) : Profil géométrique retenu	42
Figure (IV-13) : Maillage de la géométrie	45
figure (IV-14) : Génération des contraintes initiales.....	45
Figure (IV-15) : Génération de contrainte effective	46
Figure (IV-16) : Sollicitation sismiques horizontal	46
Figure (IV-17) : Le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA 2003	48
Figure (IV-18) : Activation de la charge dynamique.....	48
Figure (IV-19) : position du point choisis	49
Figure (IV-20) : Fenêtre pour calcul les déférentes phases	49
Figure (IV-21) : Déclarations des phases (Plaxis).....	50

Chapitre V

Figure (IV-1): Maillage déformé du profil.....	51
Figure (IV-2): Isovaleurs des Contraintes	52
Figure (IV-3) : Vecteurs déplacements.....	52
Figure (IV-4) : Déplacements des différents points en fonction de temps.....	53
Figure (IV-5) : Déplacements des différents points en fonction de temps.....	53
Figure (IV-6) : Vitesses des différents points en fonction de temps.....	54
Figure (IV-7) : Vitesses desdifférents points en fonction de temps.....	54

Figure (IV-8) : Accélérations des différents points en fonction de temps.....	55
Figure (IV-9) : Accélérations des différents points en fonction de temps.....	55
Figure (IV-10): Courbe donnant la force en fonction de temps.....	56
Figure (IV-11): Déplacement horizontal selon l'axe XX'	57
Figure (IV-12): Déplacement horizontal selon l'axe YY'	58
Figure (IV-13): Déplacement vertical selon l'axe XX'	59
Figure (IV-14): Déplacement vertical selon l'axe YY'	59

NOTATION ET ABREVIATIONS

Lettres Grecques :

ν : Le coefficient de poisson.

ϕ : Angle de frottement effectif.

ψ : Angle de dilatance.

E : Le module de Yong.

R : Force de réaction.

Θ : Angle du plan de rupture.

σ : Contrainte.

τ : Contrainte de cisaillement (tangentielle).

C : Cohésion (effective).

Lettres Latines :

EA : Rigidité normale.

EI : Rigidité flexion.

G : Le module de cisaillement.

K : Le module de compressibilité volumique.

K_x : Perméabilité horizontale.

K_y : Perméabilité verticale.

K : coefficient de réaction.

K_0 : Coefficient des terres au repos.

χ_{ses} : Poids volumique sec.

χ_{sat} : Poids volumique humide.

U : déplacement.

W : poids.

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

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

$\{ u \}$: Vecteur de déplacement.

$\{ Q \}$: Vecteur des forces.

$[M]$: Matrice de masse.

[C] : Matrice d'amortissement.

[K]: Matrice de rigidité.

L : Longueur.

V_p: vitesse des ondes P.

V_s : vitesse des ondes S.

M : Magnitude.

Abréviations :

MEF : Méthode des éléments finis.

ISS : Interaction sol-structure.

PSI.DA : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Armé.

PSI.DP : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Précontrainte.

Introduction



GENERALITES

INTRODUCTION GENERALE

La pratique reste limitée du fait de leur complexité et du nombre, parfois très élevé, des paramètres qu'ils nécessitent. Par ailleurs, des avancées considérables, associées à des moyens informatiques de plus en plus puissants, ont été réalisées en matière de méthode de résolution numérique.

Le présent mémoire est composé de cinq chapitres :

- Le premier chapitre traite des généralités et notions sur les ponts et les différents types de pont.
- Le deuxième chapitre de cette étude est un rappel de la sismologie, il tient compte de quelques généralités sur les séismes pour mieux comprendre le phénomène et ses effets sur le sol et la structure ; 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 souvent sous-estimé par les calculs courants.
- Le troisième chapitre présente le comportement des sols sous sollicitations sismiques. et traite de l'interaction sol-structure dans lequel sont évoqués les principes de la modélisation de l'interaction sol-structure, le choix de la loi de comportement convenable. Dans le même chapitre, nous parlons l'interaction sol-structure; dans cette partie on montre l'importance de l'interaction sol-structure, la formulation, la modélisation d'un problème d'interaction et les méthodes de prise en compte de ce phénomène.
- Les quatrième et cinquième chapitres présentent l'utilisation de la méthode des éléments finis en géotechnique ainsi que l'outil numérique que nous avons utilisé pour l'étude du problème.
- Dans le cinquième chapitre nous présentons les résultats de calcul et l'interprétation des résultats en utilisant le code de calcul (plaxis) en déterminant les déplacements, l'accélération, les contraintes, et la force.

GENERALITES

I-But de l'étude:

L'étude de l'effet de l'ISS sur un pont dalle situe sur la route l'hsonne (Ain touta-M'SI LA) .

Cette étude repose sur une analyse numérique on utilisant le code de calcule par Eléments finis(plaxis).

II-Présentation de l'ouvrage:

L'ouvrage objet de cette étude consiste à franchir la voie ferrée au niveau de l'hsonne comme passage supérieur.



Cliche n°1: montre comme vue de la face de l'ouvrage Ain touta- M'sila

GENERALITES



Figure (I) : Plan de situation de l'ouvrage. Source google earth.

III- Les caractéristiques de l'ouvrage:

- Nombre de travée: 01 travée
- longueur d'une travée: 10m
- longueur totale: 16.20m
- hauteur du gabari: 4.85m
- Largeur roulable: 6m
- Largeur total: 9m

GENERALITES

III-1-Profil en long:

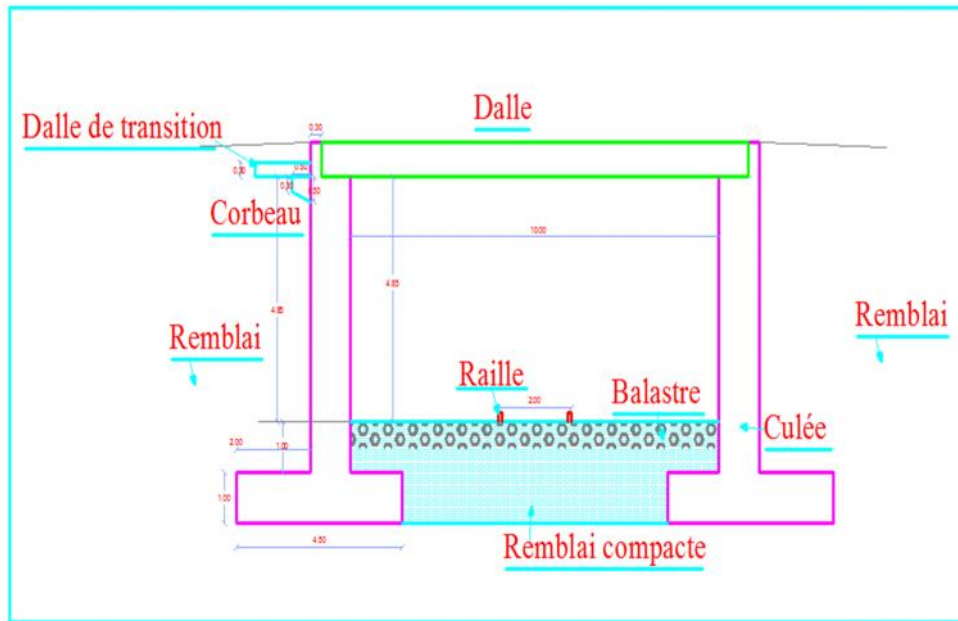


Figure (II) : Profil en long

III-2-Profil en travers:

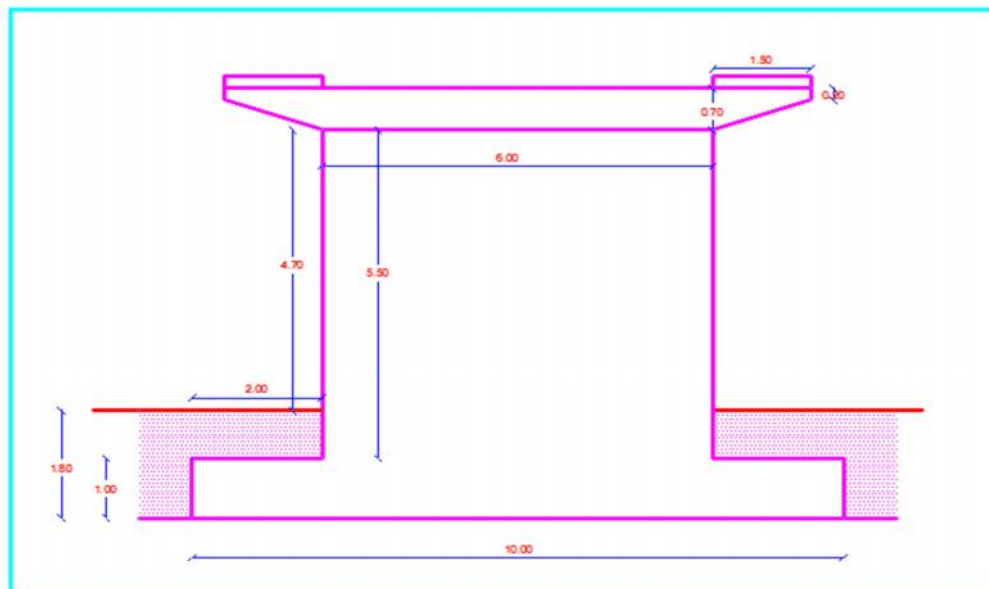


Figure (III): Profil en travers

Chapitre I



Chapitre I: Notions sur les ponts

I-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.

I-2-DEFINITION D'UN PONT :

Un pont est un ouvrage d'art (réalisation du génie civil), destiné à permettre le franchissement d'un obstacle (cours d'eau, voie de communication,...).

Un pont peut supporter une route, une voie ferrée ou une canalisation,...etc.

I-3- LE ROLE 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 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

Chapitre I: Notions sur les ponts

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 [1].

I-4-COMPOSITION D'UN PONT:

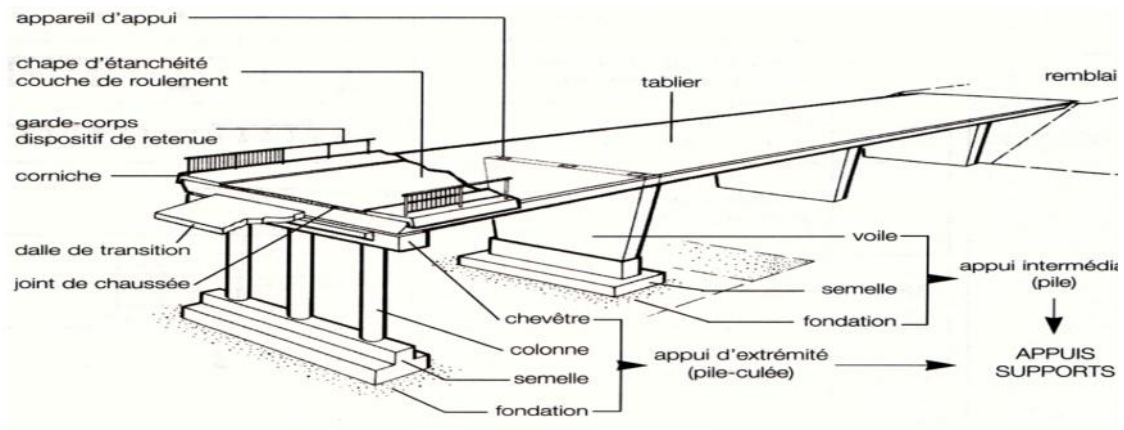


Figure (I-1) : schéma pour la composition d'un pont.

Les ponts sont constitués des trois éléments principaux:

- 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 ;

Chapitre I: Notions sur les ponts

- 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) [2].

I- 5- LES MODES DE PONTS :

I -5-1- Pont à 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 [3]



Figure (I-2) : Pont à poutre

I-5-2- 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.

Ils connaissent un fort développement depuis les années 1980 avec notamment les ponts bipoutres mixtes qui sont une solution relativement économique pour des portées comprises entre 35 et 80 m [4] .

Chapitre I: Notions sur les ponts



Figure (I-3) pont mixte

I-5-3-Ponts dalles :

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

Réaliser sur le chantier, les tabliers de ponts dalles sont en béton armé ou en béton précontraint. Généralement de faible épaisseur, les dalles donnent aux franchissements un aspect harmonieux très élancé pour des portées importantes.



Figure (I-4) Pont dalle

I-5-3-1-Domaine d'emploi:

Les ponts-dalles constituent une solution viable pour le franchissement des brèches de longueur variant de 15 m à 60 m avec des portées unitaires maximales de vingt cinq mètres environ. Il s'agit donc d'un type d'ouvrage très fréquemment utilisé pour les passages supérieurs ou inférieurs autoroutiers et, à un moindre degré, pour les ouvrages hydrauliques, certains ponts-rails, tranchées couvertes et passerelles pour piétons.

Chapitre I: Notions sur les ponts

Les tabliers du type PSI.DA ou PSI.DP ont presque entièrement supplanté les tabliers à poutres sous-chaussée en béton armé coulés en place compte tenu des conditions économiques du marché français. En effet, s'ils consomment en moyenne un peu plus de béton que ces derniers, ils permettent de gagner beaucoup sur les coffrages (environ 1 m²/m² de surface de tablier) et surtout, le gain est très important sur les cadences d'exécution. De plus, la simplicité des formes, la possibilité de réutiliser les cintres et les coffrages, l'utilisation d'une main-d'œuvre non spécialisée, donc moins onéreuse, compensent une consommation plus importante des matériaux. De même, pour les ouvrages de grande longueur (dépassant 150m), les ponts-dalles précontraints restent également compétitifs par rapport aux ouvrages à poutrelles préfabriquées prétendues (de type PRAD du SETRA) [5].

I-5-3-2-Charges et sur charges:

A-Charges permanentes:

Ensemble des actions totales du poids propre

Poids propre du remblai sur la dalle supérieure

B- Système de charge A (L)

Le système A est constitué d'une charge uniformément répartie dont l'intensité (en kg/m²) est dégressive suivant la longueur totale chargée L, exprimée en mètres :

$$A(L) = 2 + \frac{3}{L+1} \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

Avec : L : longueur chargée (portée du pont) .

De plus, cette charge est dégressive dans le sens transversal : la valeur de A (L) donnée par la formule précédente est multipliée par un coefficient a₁ décroissant en fonction du nombre de voies chargées, et variant suivant la classe du pont :

Nombre de voies		1	2	3	4	5
Classe du Pont	1 ^e	1	1	0.9	0.75	0.7
	2 ^e	1	0.9			
	3 ^e	0.9	0.8			

Tableau (1-1) : Les valeurs du coefficient a₁

Chapitre I: Notions sur les ponts

Un autre coefficient multiplicateur a_2 permet enfin d'ajuster la valeur de la charge de manière qu'elle soit indépendante de la largeur exacte de chaque voie de circulation

$$\text{Avec : } a_2 = \frac{v}{v_0}$$

: Étant la largeur d'une voie et v_0 ayant les valeurs suivantes :

) 3.5 m pour les ponts de première classe;

) 3.0 m pour les ponts de deuxième classe ;

) 2.75 m Pour les ponts de troisième classe.

La charge $A = a_1 * a_2 * A(l)$ ainsi obtenue est appliqué uniformément sur toute la largeur de chacune voies considérées.

C- Système de charge B :

Il se compose de trois systèmes (B_c , B_r , B_t)

Toutes les charges du système B sont multipliées par un coefficient de majoration dynamique, dont la valeur dépend de la longueur L (en m) de l'élément étudié, de sa charge permanente G et de la charge maximale S du système B, qui lui est appliquée. Ce coefficient est donné par la formule :

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2L} + \frac{0.6}{1+0.4(G/S)}$$

a) Surcharge B_c (camion type):

Les surcharges B_c se composent d'un ensemble de camion types.

Dans le sens longitudinal le nombre de camions est limité à deux (02) et dans le sens transversal il faut disposer autant de files que de voie de circulation et l'on place toujours ces files dans la situation la plus défavorable.

En fonction de la classe du pont et du nombre de files considérées, la valeur des charges du système B_c prise en compte est multipliée par le coefficient b_c , donné dans le tableau suivant:

Chapitre I: Notions sur les ponts

Nombre de files considérées		1	2	3	4	5
Classe du pont	1 ^e	1,20	1,10	0,95	0,80	0,70
	2 ^e	1,20	1,00			
	3 ^e	1,00	0,8			

Tableau (I-2) : Les valeurs du coefficient bc

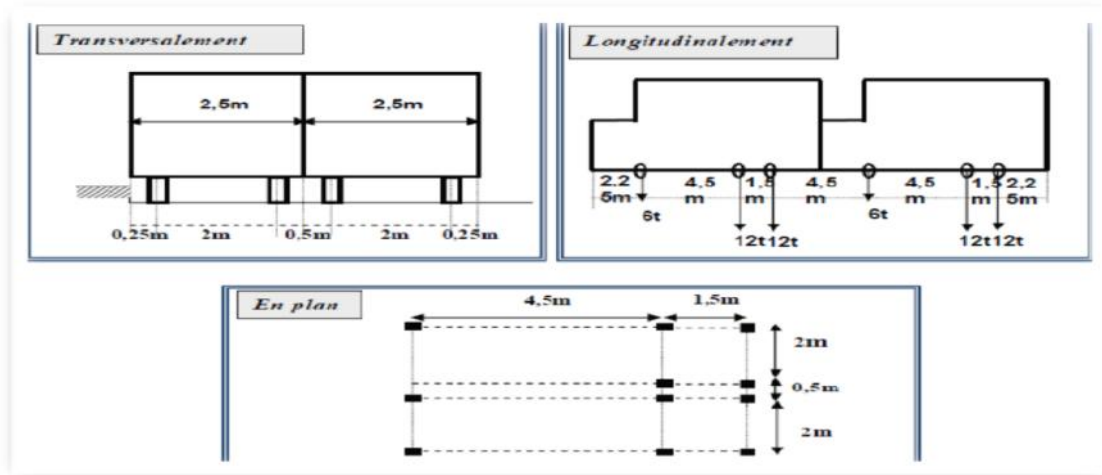


Figure (I-5) : système de charge Bc

b) Surcharge Bt (Essieu tandem) :

Le sous- système se compose de deux tandems à deux essieux de quatre roues chacun, le poids de chaque essieu étant de 16 t :

-)] Il ne s'applique qu'aux ponts de première et deuxième classe ;
-)] Le nombre de camions est limité à deux(02) dans le sens transversal ;
-)] Il est affecté d'un coefficient de pondération bt :

Chapitre I: Notions sur les ponts

Classe du pont	1 ^e	2 ^e
Coefficient	1	0.9

Tableau (I-3) : Les valeurs du coefficient bt

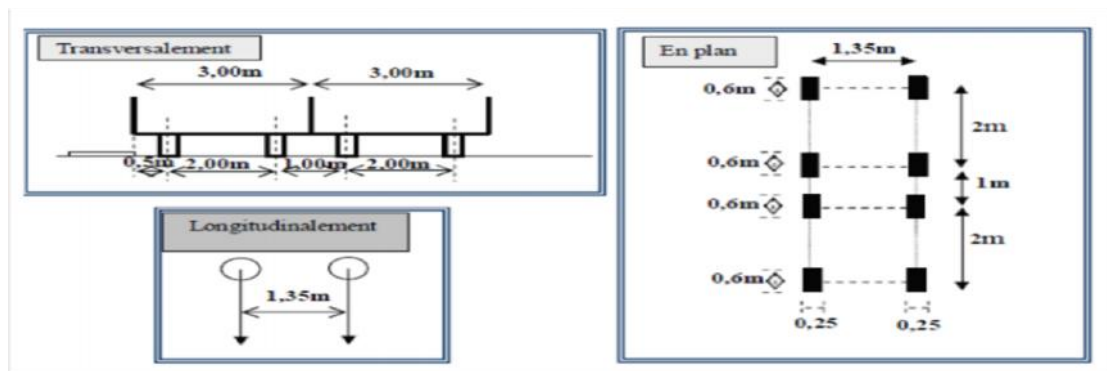


Figure (I-6) : système de charge Bt

c) Surcharge Br (roue isolée)

Le système se compose d'une roue isolée transmettant un effort de 10 t à travers une surface d'impact rectangulaire de 0,6 * 0,3m.

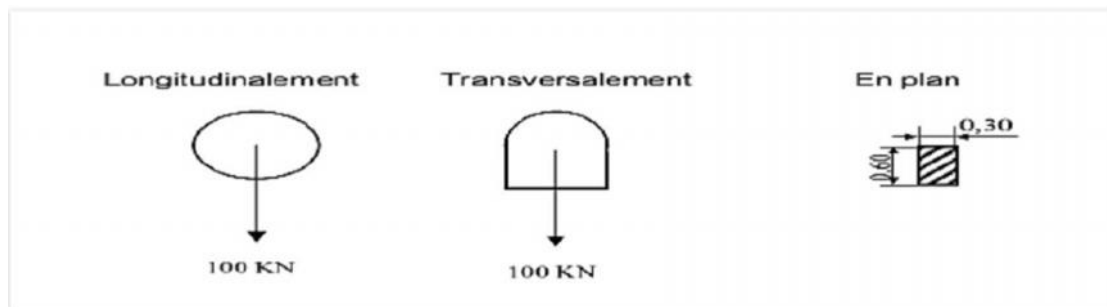


Figure (I-7) : système de charge Br.

D-Surcharges militaires

a) Surcharge militaire Mc120

Un véhicule type Mc120 comporte deux chenilles et répond aux caractéristiques suivantes :

Chapitre I: Notions sur les ponts

-) Masse totale : 110 t
-) Longueur d'une chenille : 6,10 m
-) Largeur d'une chenille : 1,00 m
- Distance d'axe en axe des deux chenilles : 3,30 m

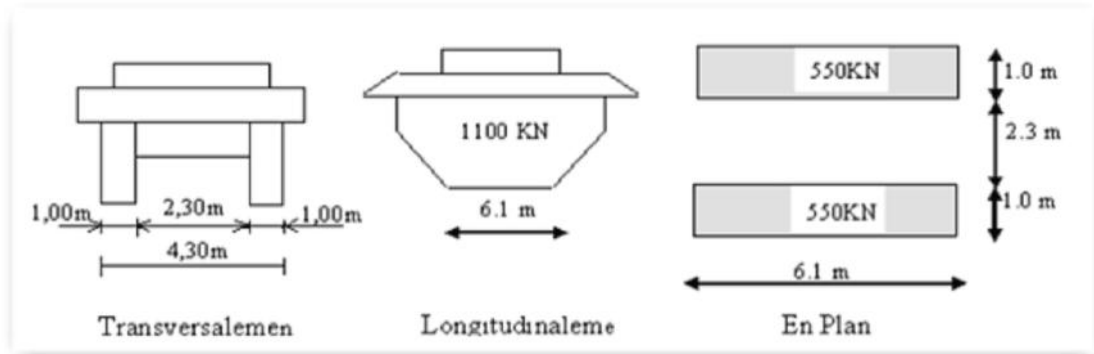


Figure (I-8) : système de charge Mc120

b) Surcharge militaire Me120:

Il est constitué d'un groupe de deux essieux distants de 1,80 m d'axe en axe et sont assimilés chacun à un rouleau. Chaque essieu porte une masse de 33 tonnes, sa surface d'impact est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 4,00 m et le côté longitudinal 0,15 m.

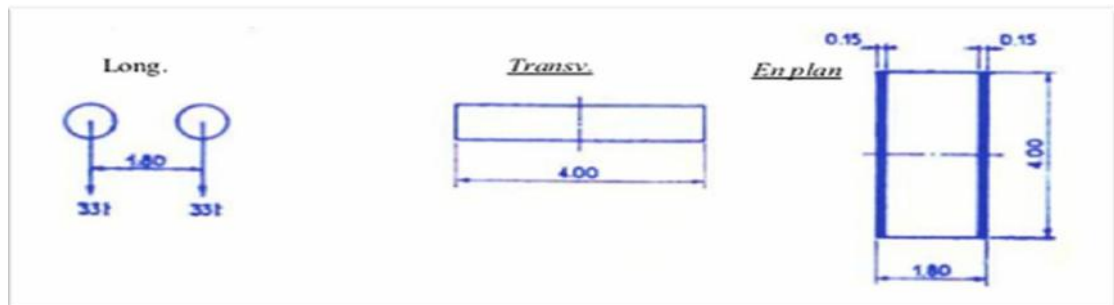


Figure (I-9) : système de charge Me120

I-6 -LES COMBINAISONS D' ACTIONS:

Conformément au BAEL91, les sections sont justifiées dans le cadre de l'état-limite ultime (E.L.U.) et de L'état-limite de service (E.L.S.).

Les deux calculs, en flexion simple, sont menés de façon indépendante [6].

Chapitre I: Notions sur les ponts

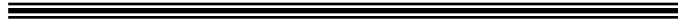
$$ELU : 1,35G + \max \left(1,60 * m \begin{pmatrix} A(l) \\ B \\ B \\ B \end{pmatrix} ; 1,35 * m \begin{pmatrix} M & 120 \\ M & 120E \end{pmatrix} \right) + 1,6 * \text{trottoir}$$

$$ELS : G + \max \left(1,20 * m \begin{pmatrix} A(l) \\ B \\ B \\ B \end{pmatrix} ; m \begin{pmatrix} M & 120 \\ M & 120 \end{pmatrix} \right) + \text{trottoir}$$

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 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.

Chapitre II



Chapitre II : LES SIESMES

INTRODUCTION

Compte tenu, des lois de comportement classiques, on sait que lorsqu'un matériau rigide est soumis à des contraintes de cisaillement, il subit d'abord une déformation de manière élastique, puis lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, il passe à la rupture, en libérant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulée durant la déformation élastique. Ce processus peut avoir lieu dans la lithosphère (écorce terrestre) qui est soumise en permanence à des contraintes causées le plus souvent par le mouvement des plaques tectoniques : choc inter- plaques ou « craquements » intra- plaques.

Sous ces conditions, lorsqu'en certains endroits de la lithosphère, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures d'équilibres sous la contrainte du mouvement.

La libération brutale de l'énergie potentielle accumulée dans les roches de l'écorce se produira le long des failles donnant lieu ainsi à des séismes de plus ou moins grandes magnitudes.

A cause des forces de frottement entre les parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne sont pas continus et uniformes, mais se font par intermittence dégageant à chaque fois un séisme.

II-1- TECTONIQUE DES PLAQUES ET REPARTITION DE LA SISMICITE :

La surface de la terre est constituée d'une douzaine de plaques tectoniques, de forme irrégulière et d'environ 100 km d'épaisseur. Il existe trois types de mouvements entre plaques : certaines s'écartent, d'autres convergent et enfin d'autres coulissent horizontalement. La plupart des séismes se produisent aux limites de ces plaques. Moins de 10% des séismes surviennent à l'intérieur même des plaques.

Les déplacements des plaques s'accommodent à l'intérieur de la lithosphère (manteau supérieur solide) par des mouvements le long des plans de failles.

Tandis que les plaques se déplacent régulièrement, de quelques millimètres à quelques centimètres par an, les failles restent bloquées durant de longues périodes, puis elles glissent brutalement rattrapant ainsi le retard accumulé et engendrant alors un séisme.

Chapitre II : LES SIESMES

II-2- DEFINITION D'UN SEISME :

Le séisme est une secousse de la terre plus au moins violente se produisant à une certaine profondeur à partir d'un foyer. Il est appelé : Secousse sismique, tremblement de terre, activité sismique.

Les vibrations sont occasionnées par les déplacements et les frictions abruptes de différentes plaques de la croûte. Ce phénomène est désigné sous le nom de tectonique des plaques.

Ces plaques sont faite de l'écorce de terre, appelé la lithosphère. Le mouvement des plaques terrestre les unes contres les autres met une pression plus forte que la force de la roche, elle peut se casser et changer de position.

Parfois la pression est forte, qu'elle cause de grandes vibrations appelées Ondes sismiques. Ces ondes sismiques sont les tremblements ressentis pendant les séismes.



Figure (II-1) photo de séisme Northridge (Californie, 1994), et conséquence d'un séisme de Mexico

II-3-ORIGINE DES SEISMES :

Les séismes prennent naissance en profondeur en un point appelé *foyer* ou *hypocentre*. Les ondes sismiques se propagent à partir de ce point jusqu'à la surface du sol, le point de la surface du sol situé à la verticale du foyer est son *épicerentre*.

La distance entre ce point et l'endroit d'enregistrement de l'accélérogramme est appelée *distance épicerentrale*. L'hypocentre peut se situer à une profondeur très variable : de quelques kilomètres à plus de 100 Kms.

Chapitre II : LES SIEMES

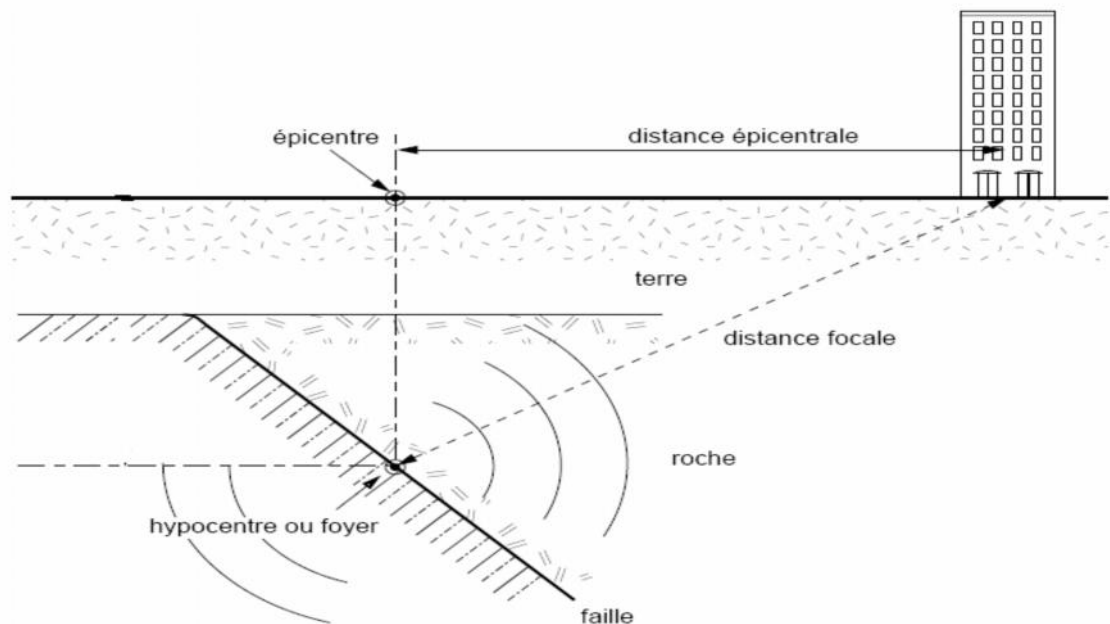


Figure (II-2) : Eléments caractéristiques en géo-sismique

II-4-CLASSIFICATION DES SEISMES :

Au jour d'aujourd'hui, on distingue trois catégories de séismes en fonction de leur origine : tectonique, volcanique ou artificielle. Les séismes tectoniques qui sont les plus fréquents et les plus dangereux ; sont différents à prévoir.

La principale cause des tremblements de terre est liée à la tectonique des plaques et aux contraintes engendrées par les mouvements d'une douzaine de plaques majeures et mineures qui constituent la croûte terrestre. La plupart des séismes tectoniques se produisent aux limites des plaques, dans les zones où une plaque glisse le long d'une autre.

Il arrive que des secousses rares mais très destructrices se produisent dans des zones réputées tectoniquement calmes.

Les séismes d'origine volcanique sont toujours annonciateurs des éruptions volcaniques. Ces tremblements de terre se manifestent lorsque le magma s'accumule dans la chambre magmatique d'un volcan. Tandis que le sommet du volcan se soulève et que les flancs s'inclinent, des ruptures dans les roches comprimées sont révélées par une multitude de microséismes.

Chapitre II : LES SIESMES

Les hommes peuvent ainsi provoquer des séismes à travers de certaines activités telles que la constitution d'énormes réserves d'eau derrière des barrages, le pompage de fluides profonds, l'extraction minière ou les explosions souterraines de bombes atomiques. De faibles séismes se produisent de temps en temps lors de l'effondrement de galeries de mines abandonnées.

On peut classer les séismes en fonction de la profondeur où ils se produisent, en trois classes :

II.4.1. Les séismes superficiels

Ils se produisent en faible profondeur, dont le foyer est relativement superficiel (moins de 100km de profondeur). Ces tremblements de terre sont rarement ressentis par les hommes et ne représentent que 5% environ de l'énergie sismique de la planète.

II.4.2. Les séismes intermédiaires

Là se dissipent environ 15% de l'énergie sismique de la Terre. Les tremblements qui en résultent, à des profondeurs superficielles ou intermédiaires (entre 100 et 300km).

II.4.3. Les séismes profonds

Ils se produisent à des profondeurs pouvant atteindre les 700km, le point de rupture se situant à une profondeur comprise entre 300 et 645km, soit en pratique la base de l'asthénosphère. On cite les séismes associés aux zones de subduction représentent presque la moitié des séismes destructeurs de la Terre et dissipent 75% de l'énergie sismique de la planète.

II-5- LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES D'UN SEISME :

II-5-1- Faille :

En géologie, une **faille** est une structure tectonique consistant en un plan ou une zone de rupture le long duquel deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ce plan divise un volume rocheux en deux compartiments qui ont glissé l'un par rapport à l'autre dans un contexte de déformation fragile. Ce déplacement et la déformation cisailant sont dus aux forces exercées par les contraintes tectoniques, qui résultent de la tectonique des plaques ou à la force gravitaire (instabilité gravitaire).

Chapitre II : LES SIESMES



Figure (II-3) Vue aérienne de la faille de San Andreas (Californie)

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

A-Faille normale : produite par des forces de distension, elle se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre s'écartent l'un de l'autre.

B- faille inverse : Elle est produite par des forces qui compriment la croûte terrestre, se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre subissent tous deux une compression et que l'un des blocs chevauche l'autre.

C-Décrochement (ou de transcurrente) : Se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre glissent l'un contre l'autre selon un mouvement principalement horizontal.

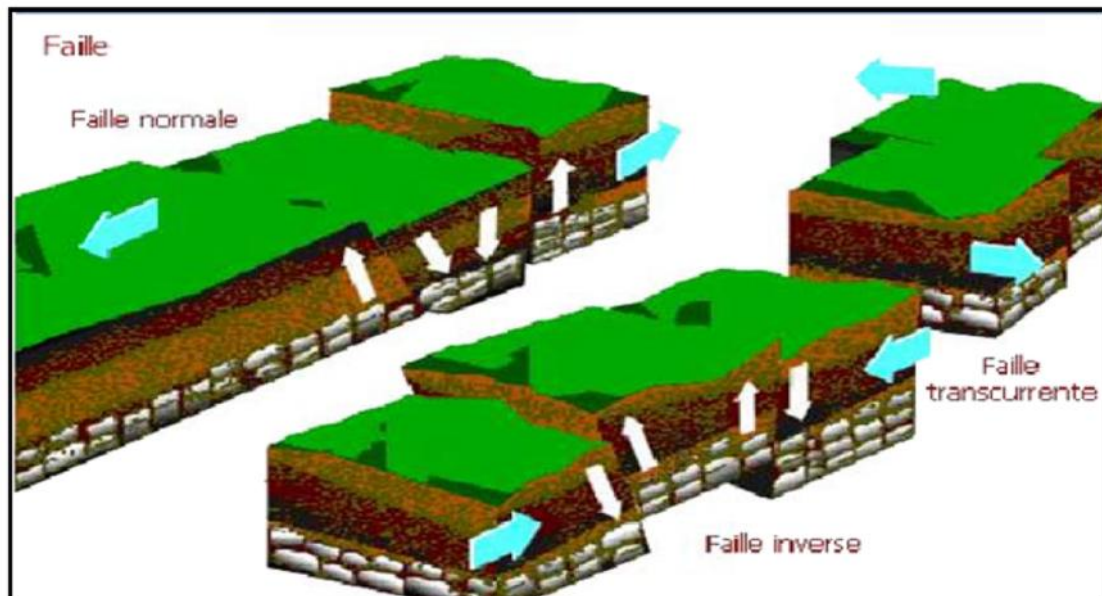


Figure (II-4) : types des failles

Chapitre II : LES SIESMES

II-5-2-Foyer et épicentre :

Foyer c'est le lieu origine d'un séisme sur une faille. Il est également appelé hypocentre.

L'épicentre se trouve à la verticale de l'hypocentre, en surface. Il est déterminé après un séisme par localisation, notamment en exploitant les enregistrements réalisés par les sismographes de la région concernée, voire de la planète.

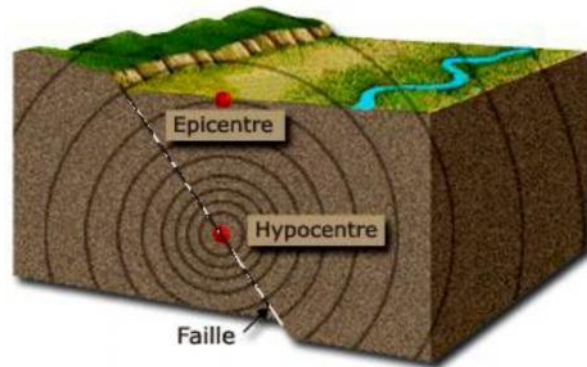


Figure (II-5) faille et épicentre

II-6-PERCEPTION DU SEISME :

II-6-1- Localisation des séismes :

Les séismes prennent naissance en profondeurs en un point appelé *foyer* ou *hypocentre*. Les ondes sismiques se propagent à partir de ce point jusqu'à la surface du sol, le point de la surface du sol situé à la verticale du foyer est son *épicentre*. La distance entre ce point et l'endroit d'enregistrement de l'accélérogramme est appelée *distance épacentrale* (fig.II-6).

La détermination de ces positions est un problème complexe et donne des résultats plus au moins précis car la libération de l'énergie n'est pas un événement ni ponctuel, ni instantané.

Chapitre II : LES SIESMES

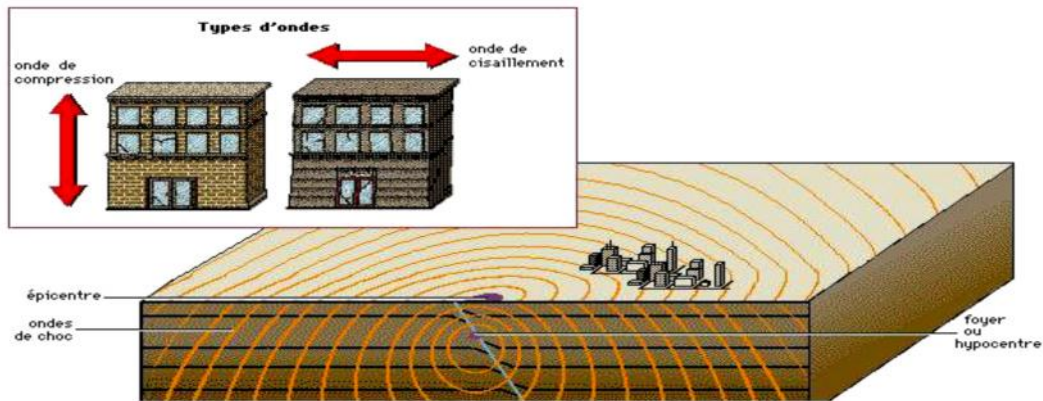


Figure (II-6) : Localisation des séismes

II-6-2-Ondes sismiques:

Lors de la rupture des roches, l'énergie est émise sous formes d'ondes élastiques qui se propagent à l'intérieur de la terre. On distingue deux types d'onde : les ondes de compression-dilatation et les ondes de cisaillement. Les ondes de compression-dilatation (qui sont longitudinales) sont appelées ondes P (primaires) car elles sont plus rapides (environ 1.8 fois) que les ondes de cisaillement (transversales) appelées ondes S (secondaire). lorsque le train d'onde arrive au niveau de la surface, il se forme des ondes qui se propagent parallèlement à la surface libre, les ondes de Love et de Rayleigh (figure II-7). Elles sont, en général, de forte amplitude et peuvent provoquer d'importants dommages.

Chapitre II : LES SIEMES

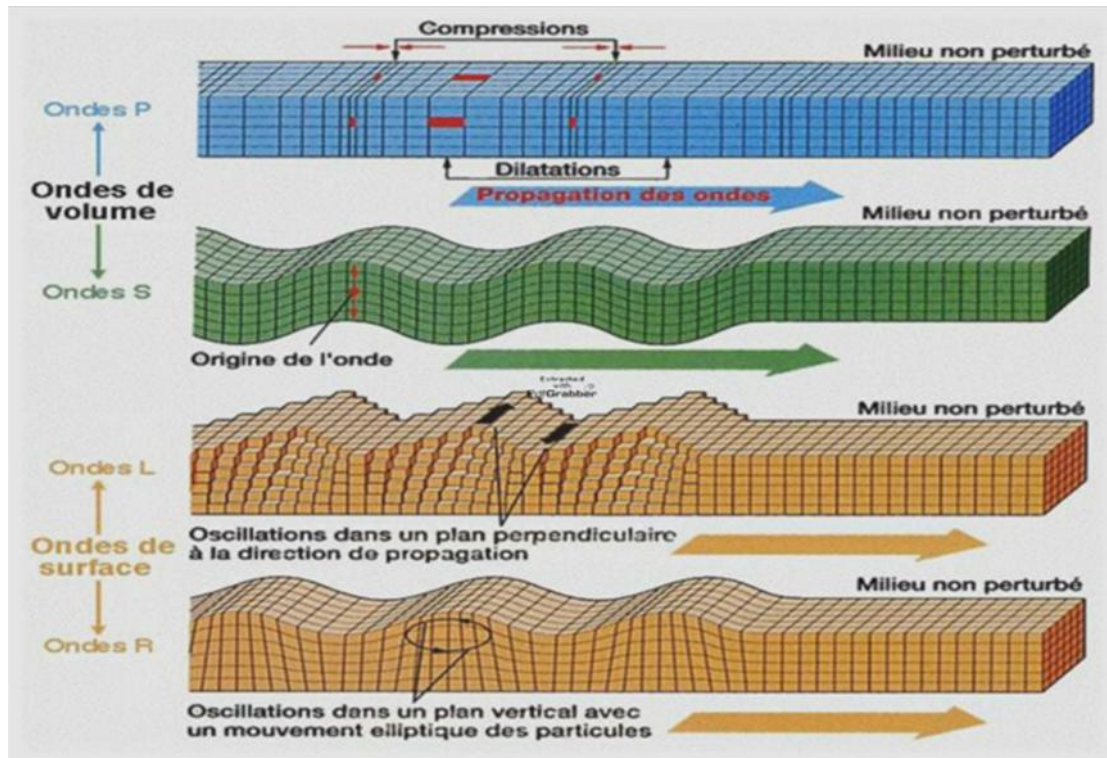


Figure (II-7) des quatre modes de propagation des ondes sismique.

a) Les ondes de volume :

Elles se propagent à l'intérieur du globe suivant des lois proches de celles de l'optique géométrique. Lorsqu'elles se réfléchissent sur des surfaces de discontinuité (et notamment sur la surface du globe), elles interfèrent et génèrent des "ondes de surfaces". Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur.

On distingue :

) Les ondes P ou ondes primaires :

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

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k+4/3}{\rho}}$$

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

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

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

) Les ondes S ou ondes secondaires :

Chapitre II : LES SIESMES

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

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

Leur vitesse est égale à :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

b) Les ondes de surface :

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

On distingue :

) L'onde de Love :

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

) L'onde de Rayleigh :

Elle se propage au voisinage de la surface de milieux homogènes et non homogènes. Elle résulte d'interférences entre les composantes verticales des ondes P et S.

II-6-3- Notions d'Intensité et de Magnitude

La question qui se pose est de savoir comment comparer les sévérités respectives des divers tremblements de terre. Vers la fin du XIX^e siècle, les sismologues ont cherché à décrire les séismes en définissant des caractéristiques physiques chiffrables applicables à tous les tremblements de terres.

II-6-3-1- Intensité macrosismique

Déterminée suivant les réactions humaines et les conséquences dommageables ou non sur les constructions et sur l'environnement en un endroit donné. Elle est donc

Chapitre II : LES SIESMES

variable d'un lieu à l'autre, maximale dans les régions de l'épicentre, elle décroît régulièrement sauf singularité, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point. Une décroissance rapide sera l'indice d'un foyer proche de la surface. Elle est évaluée en comparant les effets constatés avec ceux décrits dans les échelles macrosismiques.

Une échelle d'intensité (I à XII) de *Mercalli* a été adaptée internationalement sous le nom d'échelle macrosismique internationale d'intensité, en 1964 une échelle à été proposé : l'échelle *MSK*, elle tient mieux compte des indicateurs qui peuvent être rassemblés lors des enquêtes sismiques. Une autre échelle, à été adoptée en 1992, c'est l'échelle *EMS* (échelle macrosismique européenne, fig.6-3) se fonde sur les effets du séisme ressenties à la surface.

I-6-3-2- La Magnitude :

Cette notion a été introduite en 1935 par le sismologue Américain Richter. Elle caractérise l'énergie libérée par la rupture de la faille au point de déclenchement du tremblement de terre ou foyer (dans la zone épacentrale). Contrairement à l'intensité qui apparaît comme limitée supérieurement par définition au degré XII (fig.II-8), la magnitude peut atteindre théoriquement n'importe quelle valeur. La magnitude locale d'un séisme est définie par : $M = \log_1 \frac{A}{A_0}$

A : amplitude maximale mesurée en mm sur l'enregistrement d'un sismographe horizontal Wood – Anderson à une distance donnée ;

A_0 : amplitude de référence qui correspond à la magnitude 0 ;

Il existe une corrélation entre la magnitude et l'énergie libérée au foyer : $\log_{10} E = 1.5M - 1.6$.

Caractéristique intrinsèque d'un séisme, la magnitude mesure donc l'énergie totale libérée et ne doit évidemment être confondue avec l'intensité, qui évalue les effets destructeurs en un lieu particulier.

Chapitre II : LES SIESMES

Échelle EMS 1992	Échelle de Richter
I. Séisme non ressenti.	2.5 Enregistré par sismographe.
II. Faiblement ressenti (perçu par un très petit nombre d'individus, à l'intérieur des bâtiments).	3.5 Ressenti, mais n'occasionne pas de dégâts.
III. Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments.	
IV. Largement ressenti à l'intérieur, très faiblement à l'extérieur.	
V. Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur. Balancement des objets suspendus. Quelques fissures dans le plâtre des habitations.	4.5 Dégâts locaux.
VI. Ressenti par tous à l'intérieur et par la plupart à l'extérieur; de nombreuses personnes se précipitent hors de chez elles. Les meubles bougent, légers dommages (bris de verre, chutes d'objets et de plâtre).	
VII. Fortement ressenti. À l'intérieur beaucoup de personnes perdent l'équilibre et se précipitent au dehors. Les constructions à fondations peu solides sont considérablement endommagées; beaucoup d'autres constructions sont affectées dans leur partie supérieure.	6.0 Séisme destructeur.
VIII. Pertes d'équilibre, même à l'extérieur, scènes de panique. Chutes de meubles. Les édifices spécialement conçus sont légèrement endommagés, beaucoup d'autres s'écroulent en partie.	
IX. Panique générale dans la population. Tous les bâtiments sont endommagés, beaucoup de constructions légères sont détruites. Glissements de terrains et formation de crevasses dans le sol.	7.0 Séisme gravement destructeur.
X. Les édifices spécialement conçus subissent des dommages limités, les autres sont partiellement ou entièrement détruits. Le sol est très crevasse.	8.0 et plus. Séisme dévastateur ou catastrophique
XI. Pratiquement tous les édifices s'écroulent.	
XII. Destruction totale. Changements visibles dans le paysage.	

Figure(II-8) : Echelle d'intensité et de magnitude

II-7- CONCLUSION

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

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

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

Chapitre III



Chapitre III : Interaction sol-structure

INTRODUCTION :

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

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

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

III-1- DEFINITION D'INTERACTION SOL STRUCTURE :

L'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) lors d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol). Cette interaction est bien entendue plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation [12].

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

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

Chapitre III : Interaction sol-structure

III- 2- DIFFÉRENTS TYPES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE

Si on s'intéresse au mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant, le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique.

Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle. De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction.

III-3- ILLUSTRATION DE L'EFFET DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

III-3-1-Modèle analogique simplifié :

L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse d'un ouvrage peut être illustrée à l'aide du modèle analogique de la figure (III-1) La structure est assimilée à une masse et un ressort, placés à une hauteur h au-dessus de la fondation. La liaison entre la structure et la fondation est réalisée par une barre rigide. La fondation repose sur le sol et son interaction avec celui-ci est modélisée par le biais des fonctions d'impédance, c'est à dire les réactions exercées par le sol sur la fondation, peuvent être représentées par un ensemble de ressorts et d'amortisseurs indépendants de la fréquence. Le système de la figure (III-1) possède 3 degrés de liberté :

-) Le déplacement horizontal « u » de la masse « m » ;
-) Le déplacement horizontal « u_0 » de la fondation ;
-) La rotation « θ » de la fondation autour d'un axe horizontal.

Il est soumis à un déplacement horizontal du sol support, harmonique de pulsation « ω » et d'amplitude « u_g » [13].

Chapitre III : Interaction sol-structure

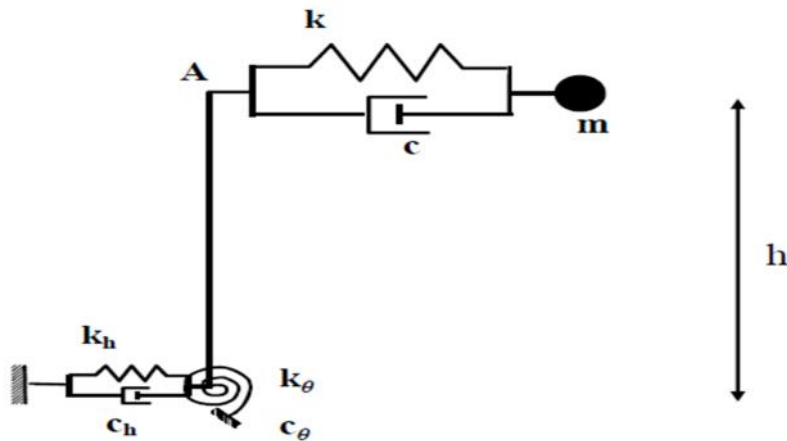


Figure (III-1) : Modèle simplifié d'interaction sol-structure.

III-3-2-Influence de l'interaction sol structure :

- Un mouvement du sol à la base du bâtiment supposé identique à celui du champ libre ; dans les cas courants cette approximation est considérée comme acceptable.
- Une rotation de la fondation qui peut modifier sensiblement le calcul de la déformée modale et donc la répartition des accélérations sur la hauteur du bâtiment [14].

III-4-COMPORTEMENT DES SOLS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES :

Les lois de comportement décrivent les relations entre les contraintes σ_{ij} et les déformations ϵ_{ij} dans un solide. Le modèle doit être simple et ne fait intervenir qu'un nombre limité de paramètres corrélables ou directement mesurable à partir des résultats d'essais courants de laboratoire. On distingue :

- Comportement élastique du sol.
- Comportement élastoplastique du sol [15].

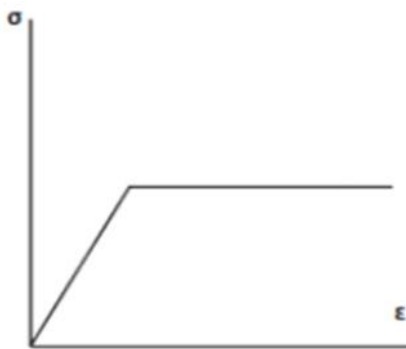


Figure (III-2) : modèle élastoplastique parfait.

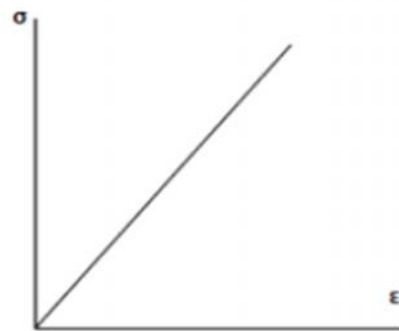


Figure (III-3) : modèle élastique De Hooke.

Chapitre III : Interaction sol-structure

III-4-1-Comportement élastique du sol :

Est celle qui relie linéairement les déformations aux contraintes, c'est l'élasticité linéaire donnée par la loi de Hooke.

Ce modèle est caractérisé par deux paramètres :

- le module de Young E .
- le coefficient de poisson ν [16].

III-4-2-Comportement élastoplastique du sol :

Est dit avoir un comportement élastoplastique quand au delà d'un certain niveau de chargement, il présente des déformations réversibles (élastiques) mais aussi des déformations irréversibles (plastiques) et que ces déformations et ces contraintes obéissent à des lois bien précises. Notons que la considération d'un corps élastoplastique se fait en excluant l'influence du paramètre temps. Il est caractérisé par cinq paramètres :

- le module de Young E ,
- le coefficient de poisson ν ,
- la cohésion c ,
- l'angle de frottement ϕ ,
- L'angle de dilatance ψ .

III-5- MOUVEMENT DU SOL EN CHAMP LIBRE :

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

L'étude d'un site doit suivre les principes suivants :

-) Définition du mouvement à la surface du sol ;
-) Niveau d'accélération réaliste pouvant être transmis par le sol ;
-) Caractéristique fréquentielle du mouvement compatible avec les caractéristiques physiques du site.
-) Variation de l'accélération avec la profondeur dans des limites raisonnables.
-) On peut utiliser la méthodologie suivante :
-) Définition d'un spectre. Sur un affleurement rocheux représentatif de l'environnement ismotechnique du site.
-) Calcul de la réponse du site ;
-) Ajustement éventuel du spectre de réponse pour compenser la prise en compte

Chapitre III : Interaction sol-structure

d'un seul type d'onde a propagation verticale.

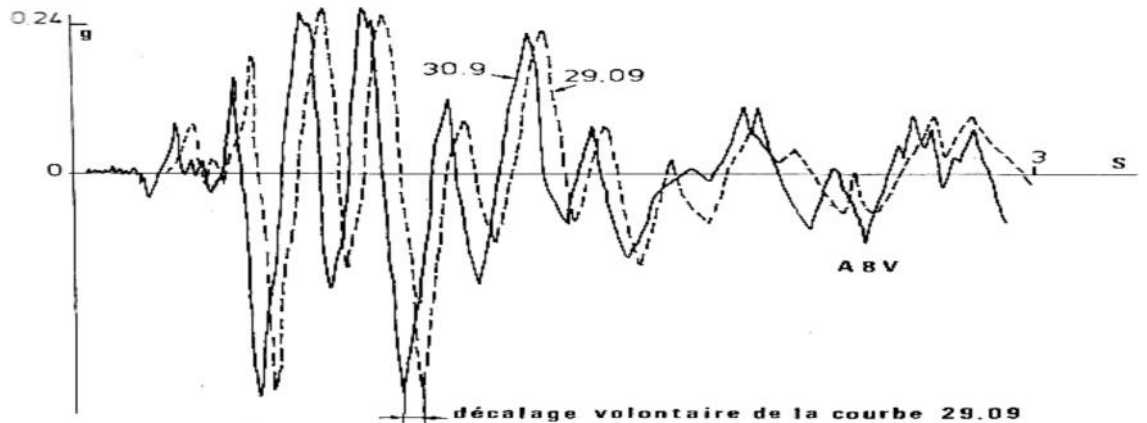


Figure (III-4): Accélération en champ libre

III-6- CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DES SOLS :

III-6-1- Module de cisaillement maximal :

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

Donc le module de cisaillement maximal est défini :

$$G_{max} = \frac{m}{\gamma_m} = \frac{F/A}{x/l} = \frac{F \cdot l}{x \cdot A}$$

= contrainte de cisaillement,

x_{max} = le déplacement latéral relatif,

A= l'aire sur laquelle la force agit,

F = La force appliquée,

L = L'épaisseur,

x = Le déplacement latéral.

III-6-2-Détermination de x_{max} :

On a vu que le module de cisaillement pour les petites déformations (γ_0) et la résistance ultime de cisaillement (τ_{max}) sont nécessaires pour évaluer la courbe de contrainte-déformation de cisaillement.

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

Chapitre III : Interaction sol-structure

$$\sigma_{max} = \left(\left| \left(\frac{1+K_2}{2} - \frac{1}{v} \right) \sin \phi + c' \cos \phi \right|^2 - \left| \left(\frac{1-K_2}{2} - \frac{1}{v} \right) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\frac{1}{v}$ = la contrainte verticale effective,

ϕ = l'angle de frottement interne effectif,

c' = la cohésion effective,

k = le coefficient de pression des terres au repos.

III-6-3- Amortissement d'hysteresis :

L'énergie amenée par le mouvement de la structure est dissipée :

Un amortissement hystérétique (matériel).

Une dissipation due au rayonnement des ondes dans le milieu semi-infini.

III-7- COMPORTEMENT SOL-STRUCTURE:

Le problème de géotechnique le plus courant encore aujourd'hui. selon la capacité du sol ou le roche à supporter les structure, les fondations peuvent être superficielles au profondes. Ce type de fondation permet de reporter les charges dues qu'elles supportent. Sur des couches de sol situé à une profondeur variante de quelque mètre à plusieurs dizaines de mètre [17].

Lorsqu'une structure est sujette à l'action d'un tremblement de terre, elle réponde en de déformation la réaction exercent sur la zone de contact enter la fondation.

Et le sol, dues à la déformation de la structure modifie à son tour la réponse du sol.

Cette déformation du sol au niveau de la fondation effectue également les mouvements de la structure.

III-8- MODALISATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

III-8-1- LES PHENOMENES PHYSIQUES DUS A L'INTERACTION SOL-STRUCTURES :

III-8-1-1- l'amortissement radiatif (ou géométrique):

Une autre source d'amortissement prend naissance par la transmission des vibrations à des distance plus où 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

Chapitre III : Interaction sol-structure

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-8-1-2- 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 [18].

III-8-2- FONCTIONS D'IMPEDANCE :

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.

Chapitre III : Interaction sol-structure

III-8-3-FORMULATION D'UN PROBLÈME D'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

Une analyse complète d'un problème d'interaction doit prendre en compte :

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

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

Dans les problèmes d'interaction sol-structure, le sol de fondation et la structure ne vibrent pas comme systèmes séparés sous excitations externes, plutôt qu'ils agissent ensemble de manière couplée. Par conséquent, ces problèmes doivent être traités d'une manière couplée. Afin de développer les équations fondamentales d'équilibre dynamique de l'interaction sol-structure, nous considérons le système sol-structure . Considérons que le modèle d'ISS est divisé en trois ensembles de points nodaux [19].

III-9- MÉTHODES D'ANALYSE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

. Pour prendre en compte l'effet de l'interaction sol-structure, nous distinguons deux catégories de méthodes qui sont respectivement les méthodes directes, les méthodes de sous-structures[20].

III-9-1- Méthode globale :

La méthode globale (ou méthode directe) traite le problème d'interaction sol-structure en un tout : le modèle numérique se base sur la discrétisation spatiale de la structure et du sol. L'analyse du système complet s'effectue en une seule étape[21,22] . Cette méthode permet d'inclure en principe tout comportement non linéaire du sol ou de la structure et toute hétérogénéité présente dans le sol. Il est aussi possible de traiter avec ce genre de méthode, les conditions de contact à l'interface sol-structure et la

Chapitre III : Interaction sol-structure

condition de radiation et de dissipation d'énergie dans la partie infinie du sol non borné. Les principales techniques utilisées pour traiter cette condition sont : l'utilisation de frontières absorbantes, le couplage éléments finis-éléments de frontière et le couplage éléments finis-éléments infinis ainsi que d'autres techniques. Le problème à résoudre est celui défini par l'équation :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Q\}$$

où les matrices $[M]$, $[C]$ et $[K]$ désignent la masse, l'amortissement et la rigidité du système complet sol-structure. Le vecteur $\{Q\}$ comprend les forces d'excitation sismique agissant à la base du modèle. Le vecteur $\{U\}$ contient les déplacements des nœuds du modèle par rapport à la base. Les dérivées temporelles $\{\dot{U}\}$ et $\{\ddot{U}\}$ sont les vitesses et les accélérations.

III-9-2- Méthode de sous-structures :

Cette méthode s'appuie sur le principe de superposition. Le système global est subdivisé en deux parties désignées par sous-structures qui concernent la structure elle-même et le sol sur lequel elle est posée. Chacune des sous structures peut être analysée séparément et la réponse totale est obtenue par la superposition des contributions des deux réponses à l'interface liant les deux sous structures [23] . La méthode permet de réduire considérablement la taille du problème : elle est par conséquent beaucoup plus rapide que la méthode globale. Toute fois, le fait qu'elle soit basée sur le principe de superposition restreint son domaine d'application aux cas linéaires. Elle est inadaptée aux problèmes d'interaction tenant compte du comportement non linéaire des matériaux.

L'approche, en utilisant le principe de superposition de [Kausel et al. 1978] illustré dans la figure (III-6) pour le cas des fondations rigides, consiste en trois étapes successives.

Chapitre III : Interaction sol-structure

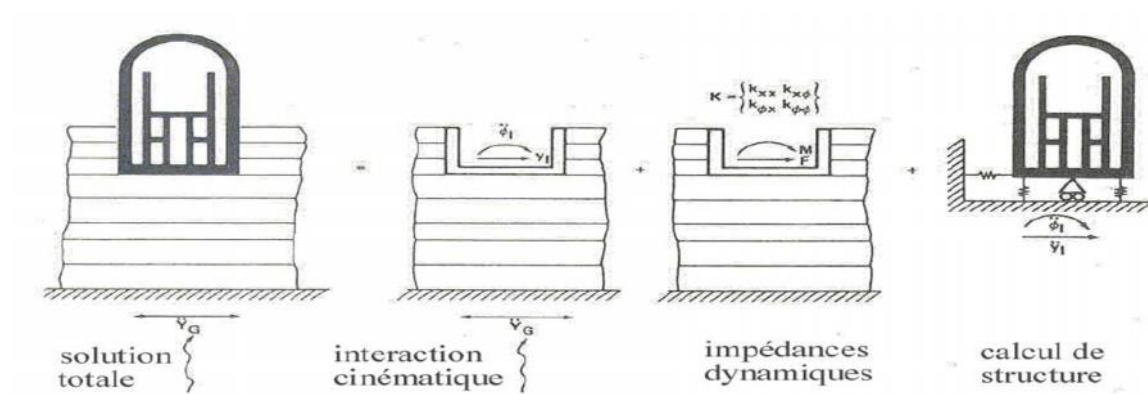


Figure (III-5) : Principe de superposition de Kausel.

CONCLUSION

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

Chapitre IV



Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

INTRODUCTION

PLAXIS traite les problèmes géotechniques bidimensionnels de valeur limite en utilisant la méthode des éléments finis pour les médias en continu et pour plusieurs types de chargements, où les déplacements, ou les forces de surface ou les forces de volume sont imposées. Il fonctionne en déformation plane et déformation axisymétrique, et pour des petites déformations. Il regroupe dans ses différentes versions plusieurs modèles élastoplastique (Mohr Coulomb, Hard soil model, soft soil model...) qui permettent de simuler le comportement des sols. Il reste toutefois à l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapté au problème étudié. Dans ce chapitre on va présenter les principes du code de calcul PLAXIS V8 utilisé pour élaborer les simulations numériques ainsi que les modèles de comportement utilisées.

IV-1-PRESENTATION DU PLAXIS:

C'est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériques de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code de calcul éléments finis Plaxis est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élastoviscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages de résolution récents comme la méthode de longueur d'arc.

IV-1-1- Le code Plaxis:

Le code Plaxis est un logiciel couramment utilisé dans les bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériques de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980.

Ce programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows.

IV-1-2 les sous-programmes de PLAXIS:

L'utilisation de PLAXIS consiste en quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output, Cuves):

) programme d'entrée de données (Input):

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

) Le programme de calcul (Calculations):

Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

) Le programme de résultats (Output):

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.

) Le programme courbe (Curves):

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformation [22].

IV-1-3 -Options par défaut et de solutions approchées:

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui sont un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassants, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. 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 : Outil numérique de calcul « code plaxis »

a) Définition graphique de la géométrie du modèle:

La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques faciles à utiliser, ce qui permet une description détaillée et précise des conditions réelles à modéliser. Figure (IV-1): Le maillage d'éléments finis en 2D est généré de manière automatique directement à partir de ce modèle géométrique.

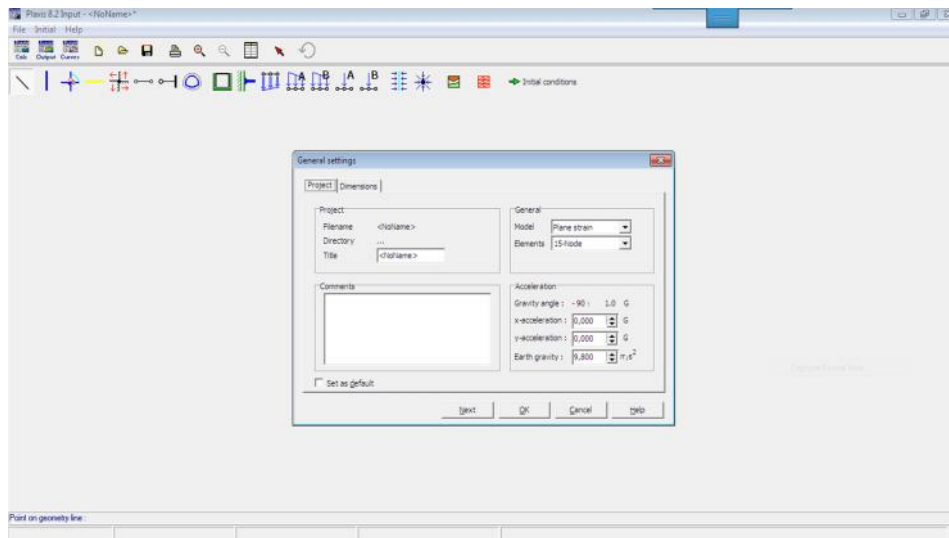


Figure (IV-1): Interface utilisateur pour l'entrée des données.

b) Conditions aux limites:

Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

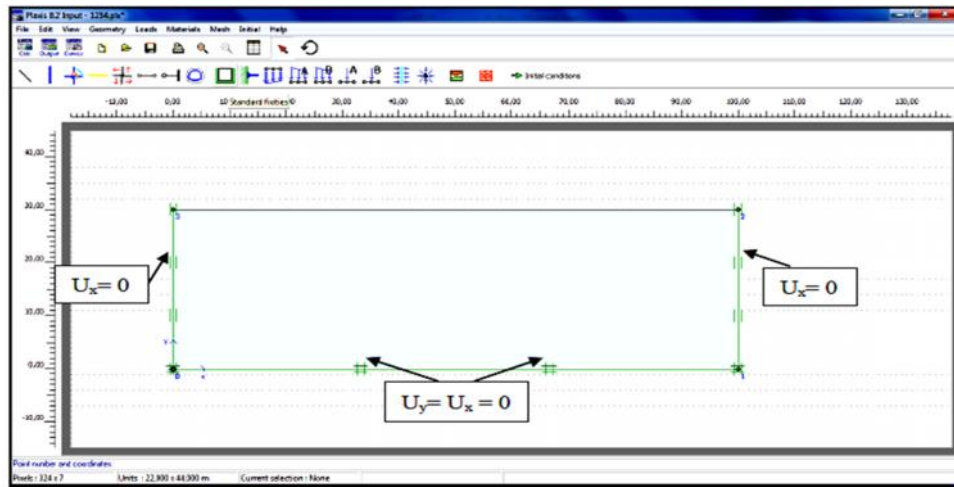


Figure (IV-2): condition aux limites.

c) Génération automatique du maillage:

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

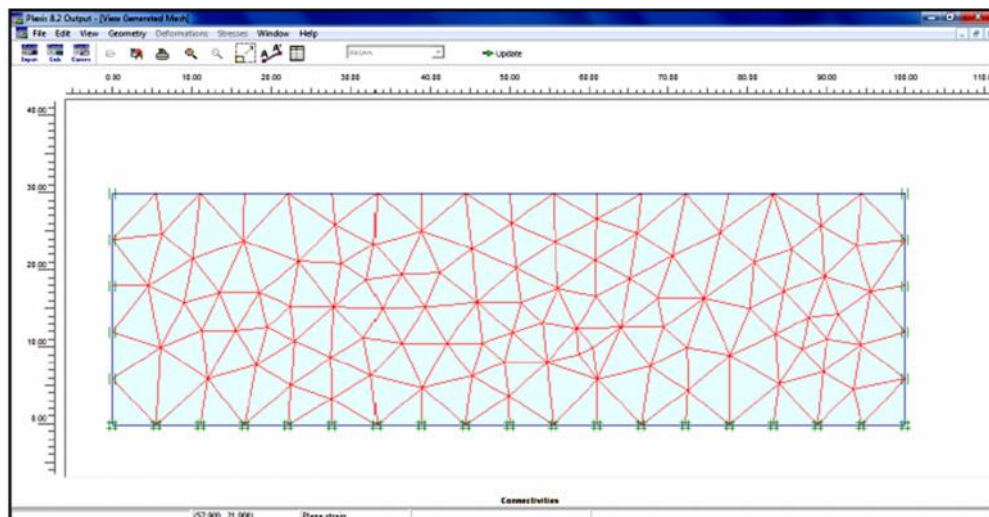


Figure (IV-3): Exemple de maillage.

d) Contraintes:

La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles.

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.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

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 l'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) [23].

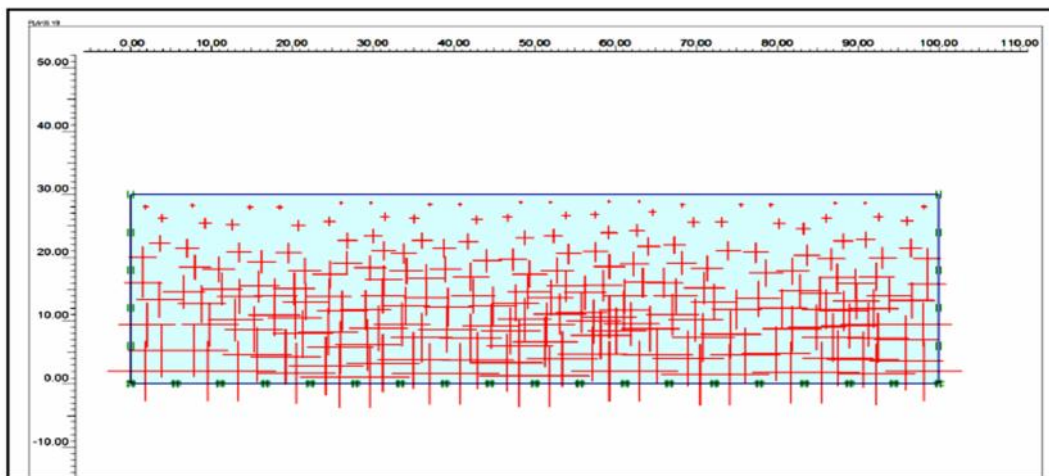


Figure (IV-4): Définition des contraintes initiales : condition « k_0 ».

f) Les pressions interstitielles:

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

g) Le coefficient de sécurité:

Est une notation un peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis [12].

IV-1-4-Les modèles de comportements intégrés dans Plaxis:

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plaxis: élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc

IV-1-4-1-Lois de comportement élastoplastique:

La plupart des matériaux ont un comportement élastoplastique, qui n'est pas caractérisé par l'apparition de déformations réversibles élastiques et de déformations irréversibles plastiques. Sur la surface de charge, deux cas de comportement sont possibles : la surface de charge n'évolue pas, on parle de loi élastique parfaitement plastique, c'est le cas du modèle de Mohr-Coulomb; la surface de charge évolue au cours du chargement, on parle de modèle élastoplastique avec écrouissage dont le modèle Hardening Soil de Plaxis fait partie.

IV-1-4-2-Modèle élastique linéaire:

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young E , et le coefficient de Poisson ν . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol. Si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. Les paramètres sont reliés par les trois expressions suivants :

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

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

$$K = \frac{E}{3(1+\nu)} \dots \dots \dots (4-2)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \dots \dots (4-3)$$

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

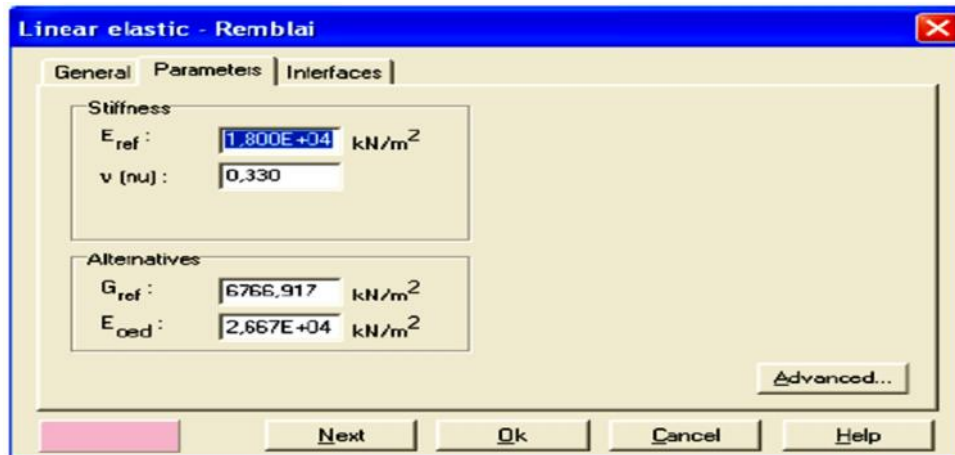


Figure (IV-5): Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

Et les paramètres avancés sur la figure (IV-6) :

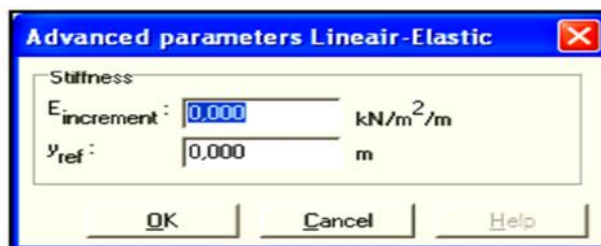


Figure (IV-6): Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.

IV-1-4-3- Modèle de Mohr-Coulomb:

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et ϕ , respectivement, la cohésion et l'angle de frottement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, et

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Enfin, ce modèle est non associé et ψ est l'angle de dilatance.

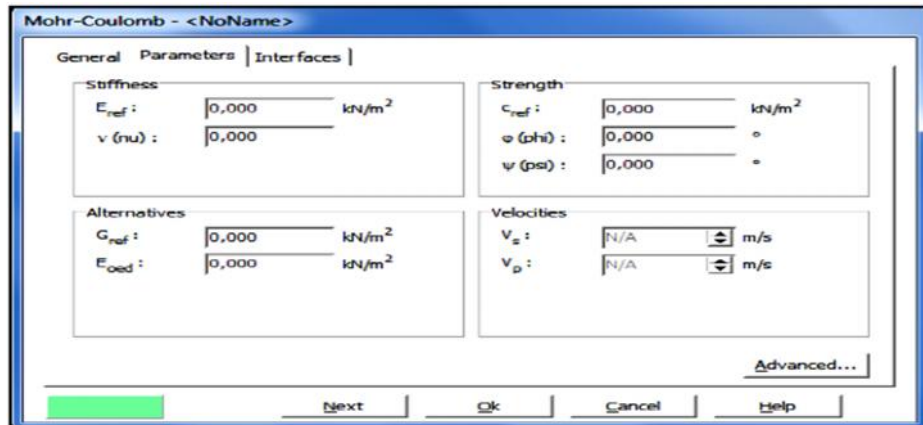


Figure (IV-7): fenêtre au modèle Mohr-Coulomb.

) Module de Young (E)

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il apparaît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondrait au G_{max} , mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). La détermination de ce module nécessite des essais spéciaux. Il est souvent conseillé de prendre un module "moyen", par exemple celui correspondant à un niveau égal à 50% du déviateur à la rupture (voir figure IV-8).

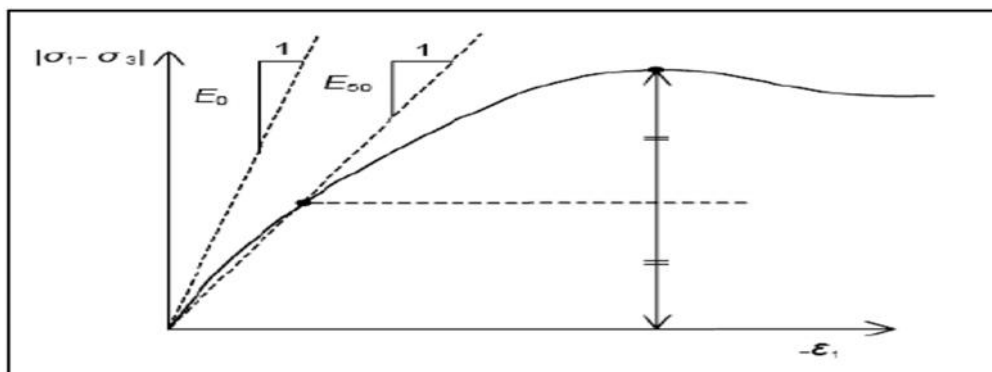


Figure (IV-8): Définition du module à 50 % de la rupture.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

) Coefficient de Poisson ()

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4 pour la majorité des sols.

) Cohésion (c)

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

) L'angle de dilatance()

L'angle de dilatance règle le comportement non associé du sol. Il peut être évalué par la corrélation $\Psi = \varphi - 30^\circ$ Le cas $\Psi = 0$ correspond à une plasticité sans variation de volume. Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure IV-9) sur l'hexagone de Mohr-Coulomb.

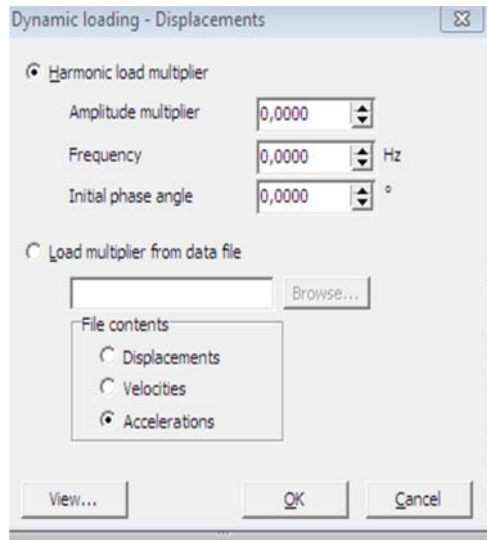
) Angle de frottement interne ()

L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic, soit l'angle de frottement de palier (valeur résiduelle). On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite.

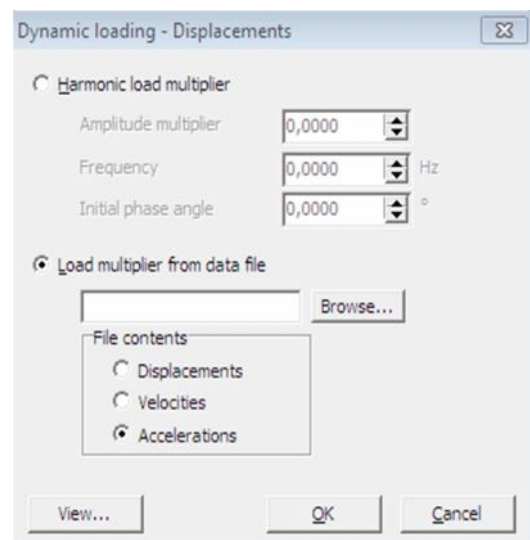
IV-1-5-Module dynamique du code PLAXIS

Le Plaxis V8 nous permet d'étudier un problème dynamique. La charge dynamique est généralement appliquée le long du substratum de la structure. Cette action peut être représentée par une force, vitesse, ou une accélération variable en fonction du temps, Dans le programme Input ; il faut spécifier quel est le système de chargement qu'on va choisir pour représenter L'action dynamique par l'option de (set dynamic load system). Dans le programme de calcul, on peut considérer soit une sollicitation harmonique (Figure IV-9) soit une sollicitation sismique (Figure IV-9).

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »



Figure(IV-9):solicitation harmonique



Figure(IV-10):solicitation sismique. .

Pour l'action dynamique utilisée dans ce modèle , elle est une accélération variable en fonction du temps de forme sinusoïdale avec un départ faible grandissante vers le pic à temps puis descendante et amortie vers zéro à la fin la durée totale de cette action et de 1 secs.

Dans cette étude on a utilisé « spectre réponse selon RPA99 version 2003 » sont présentés dans le figure suivant (Figure IV-11).

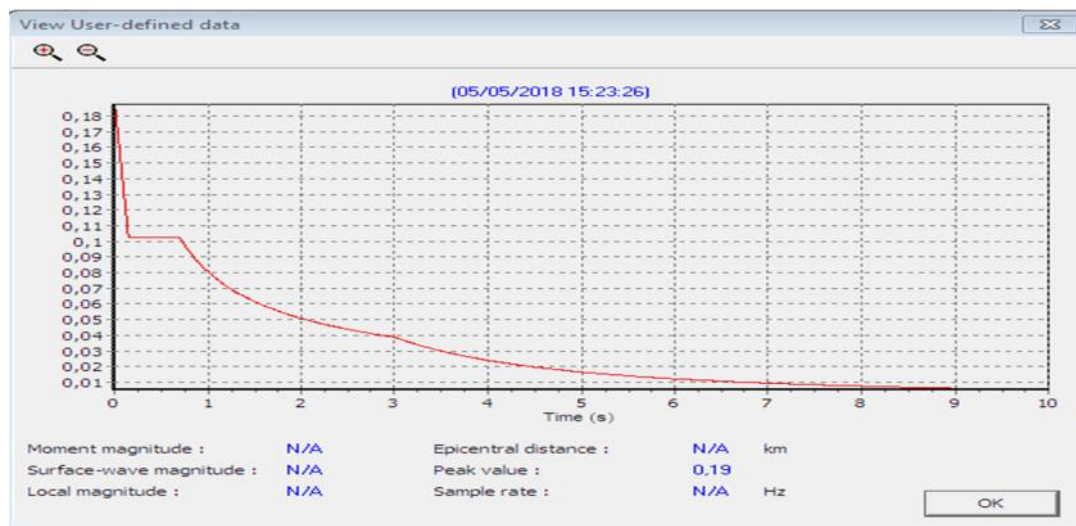


Figure (IV-11): spectre de réponse selon RPA99 version 2003.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

IV-2-Modèle de calcul retenu:

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présentée sur la figure (IV-12). Il est constitué d'une fondation de largeur $L=4,5$ m reposant sur deux couches de sol composant la géologie du site : une couche de sable de 3 m de profondeur et une couche de remblais de 2 m de profondeur et de longueur $l=18$ m. Pour des raisons de système seule la moitié du modèle est représentée ici :

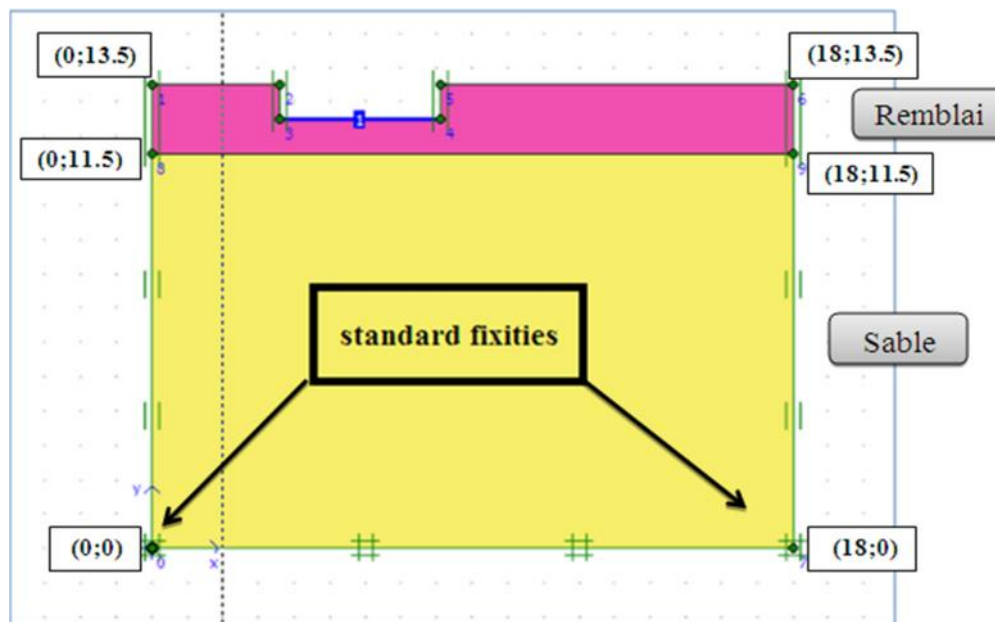


Figure (IV-12) : Profil géométrique retenu.

IV-2-1- Les conditions aux limites:

Choisies correspondent aux limites par défaut : Déplacements horizontaux nuls sur les deux faces verticales et sur la base du modèle et Déplacements verticaux nuls à la base du modèle. Les faces verticales ne sont modélisées par des Frontières absorbantes.

IV-2-2- Caractéristiques des matériaux:

- 1) **Propriétés des couches de sols** : Les propriétés du sol constituant le massif sont résumées dans le tableau (IV -1)

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

Paramètres	symbole	unité	remblais	sable
Modèle type	Mel	-	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb
Profondeur h	-	m	2	3
Poids volumique sec	γ_{ses}	KN/m ³	18	17
Poids volumique humide	γ_{sat}	KN/m ³	19	19
Perméabilité horizontale	K_x	m/s	0	0
Perméabilité verticale	K_y	m/s	0	0
Module d'Young	E_{re}	KN/m ²	300000	135000
Coefficient de poisson	ν	-	0,4	0,2
Cohésion	C_{re}	KN/m ³	0.2	0,2
Angle de frottement		°	32	34
Angle de dilatation		°	2	4
Facteur de rigidité de l'interface	R_{int}	-	1	1

Tableau (IV-1) : Propriétés du sol de fondation.

L'accélération de la pesanteur est posé égale à : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

- 2) **Fondation** : Les propriétés de l'élément structural de cette fondation sont résumées dans le tableau (IV-2).

Paramètre	Nom	Valeur	Unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	-
Rigidité normale	EA	$1,4 \cdot 10^7$	KN/m
Rigidité de flexion	EI	$2,0 \cdot 10^5$	KN / m ³
Epaisseur équivalente	D	1	m
Poids	W	28	KN/m/m
Coefficient de poisson	ν	0,2	-
Rayleigh dumping	et	0	-

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

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

- Valeur de charge de la structure :

La valeur de la charge statique de la structure applique sur l'élément est de $A = 1820 \text{ KN/m}^2$.

IV-2-3 Génération du maillage : le modale de référence choisi est constitué par éléments triangulaires à 15 noeuds. Le nombre d'éléments est de 129 éléments et le nombre de noeuds est de 1103. On règle la finesse du maillage (global Coarseness) sur « very fine », (figure IV-13).

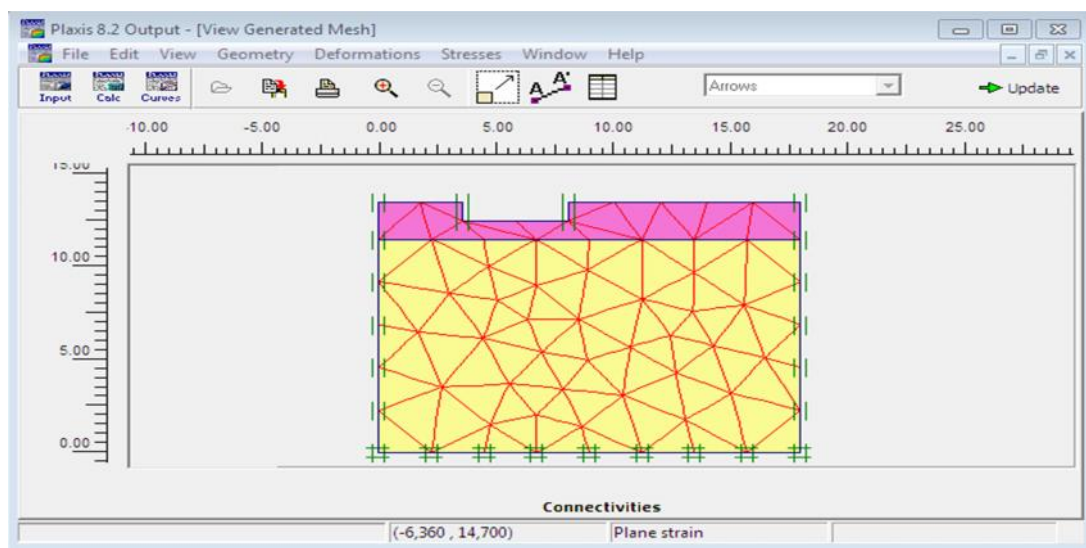


Figure (IV-13) : Maillage de la géométrie.

IV-2-4-Condition initiales:

Les conditions initiales fixées correspondent à un état de type $K0 = 1$ (contraintes de type géostatique).

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

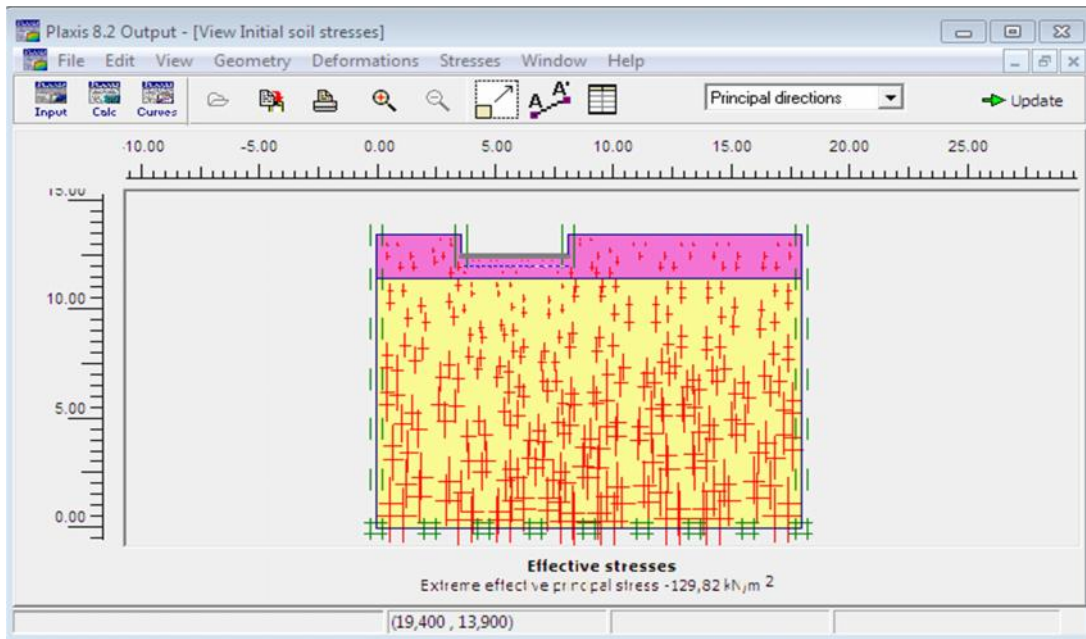


Figure (IV-14) : Génération des contraintes initiales.

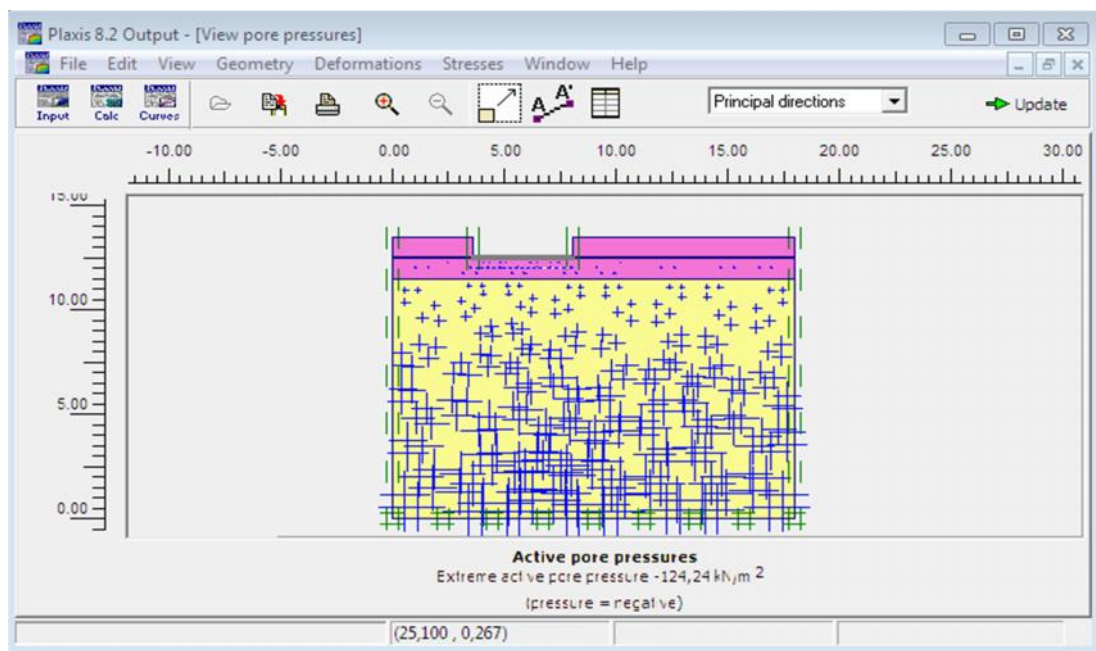


Figure (IV-15): Génération de contrainte effective

IV-2-5-Sollicitation sismiques:

Dans cette application numérique, une sollicitation sismique sous forme de déplacement imposés à la base du modèle de calcul dans le profile considérées :

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

- Accélération horizontale simulant le mouvement horizontal représentée dans la figure (IV-16).

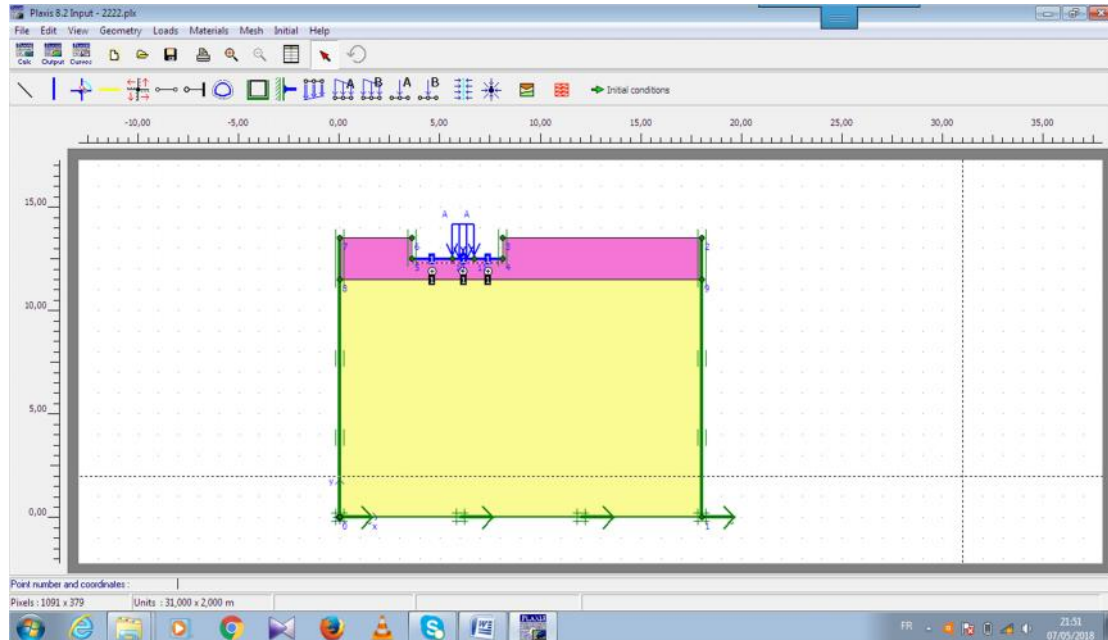


Figure (IV-16) : Sollicitation sismiques horizontales.

IV-2-6-Procédure de calculs :

Le calcul se fait en 4 phases :

-) Phase (0) : une phase initiale pour initier les contraintes initiales suivie de quatre phases, phase (1), phase (2), phase (3) et phase (4).
-) Phase (01) : calcul plastique avec le procédé « stage construction », en condition drainées.
-) Phase (02) : calcul plastique avec le procédé « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et « l'interface ».
-) Phase (03) : calcul plastique avec le procédé « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et « l'interface ». de la charge statique « statique load system A = 1910 KN/m² ».
-) Phase (04) : chargement dynamique « dynamique analysis » et « harmonique load multiple » excitation harmonique.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

La figure (VI-17) montre le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA99 V2003 en fonction de la période. Ce spectre dépend de plusieurs paramètres tels que :

-) Nom du fichier résultats et son chemin d'accès.
-) Coefficient d'accélération de zone.
-) Facteur de qualité.
-) Coefficient de comportement.
-) Pourcentage d'amortissement critique.
-) période caractéristique T2 du site.

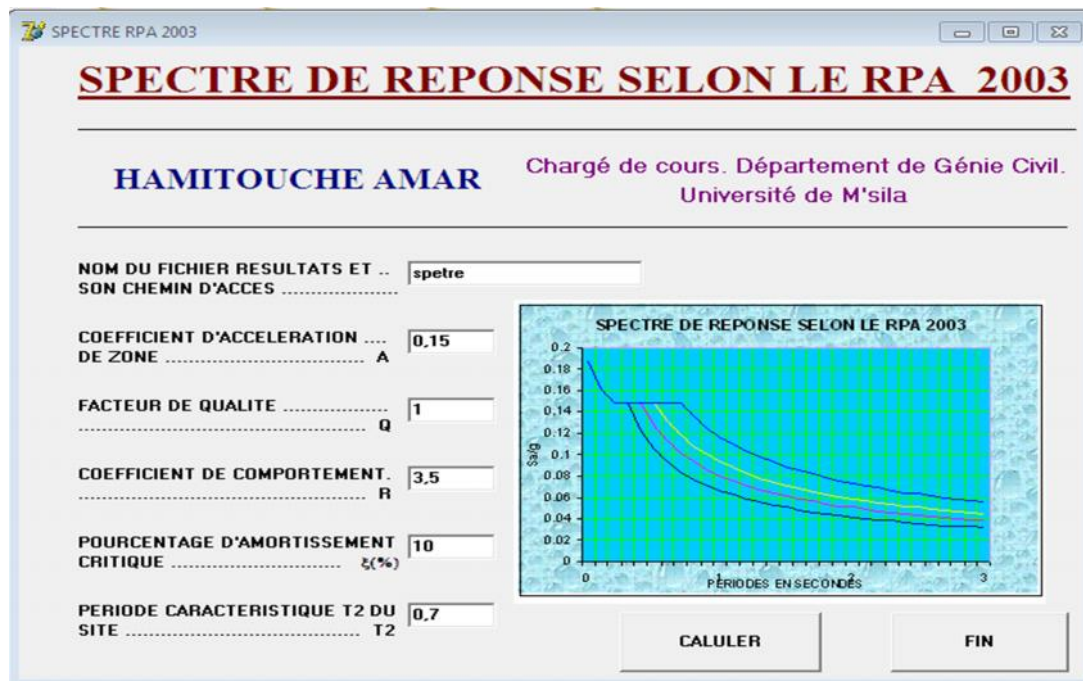


Figure (IV-17) : Le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA 2003.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

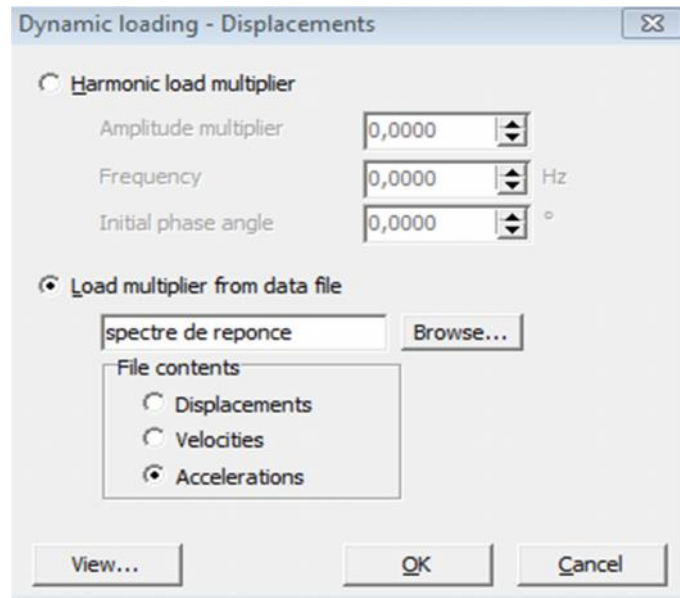


Figure (IV-18) : Activation de la charge dynamique

La figure (IV-19) présenté les points durcis pour le calcul (point A, B, C). Pour déterminer les déplacements, les vitesses et les accélérations.

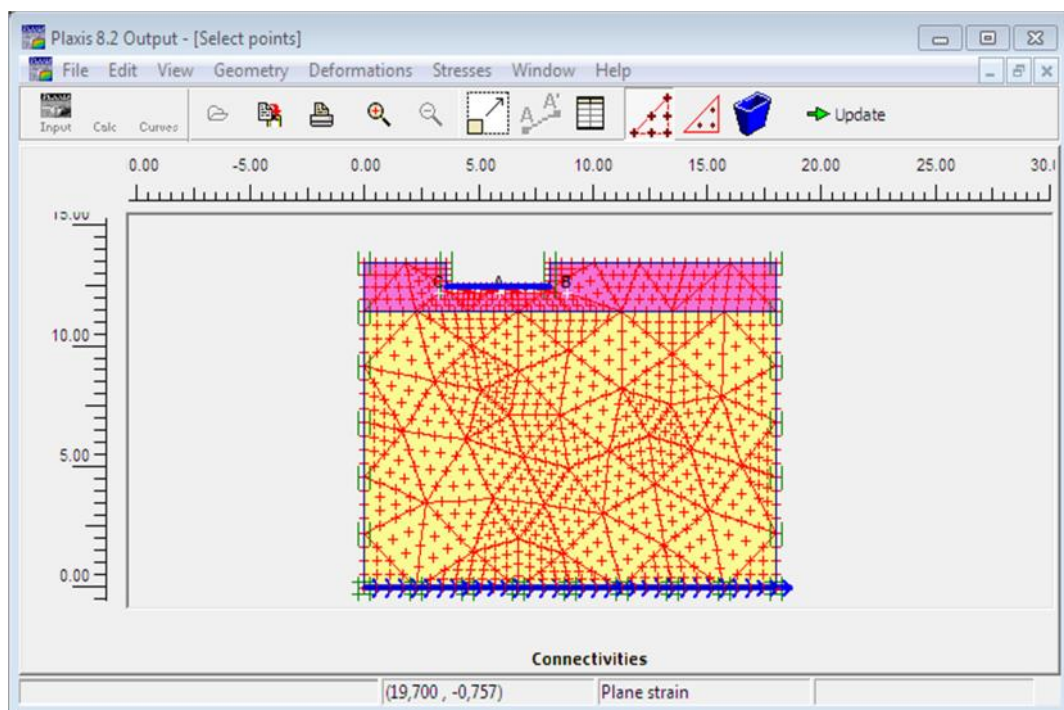


Figure (IV-19) : position du point choisis.

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

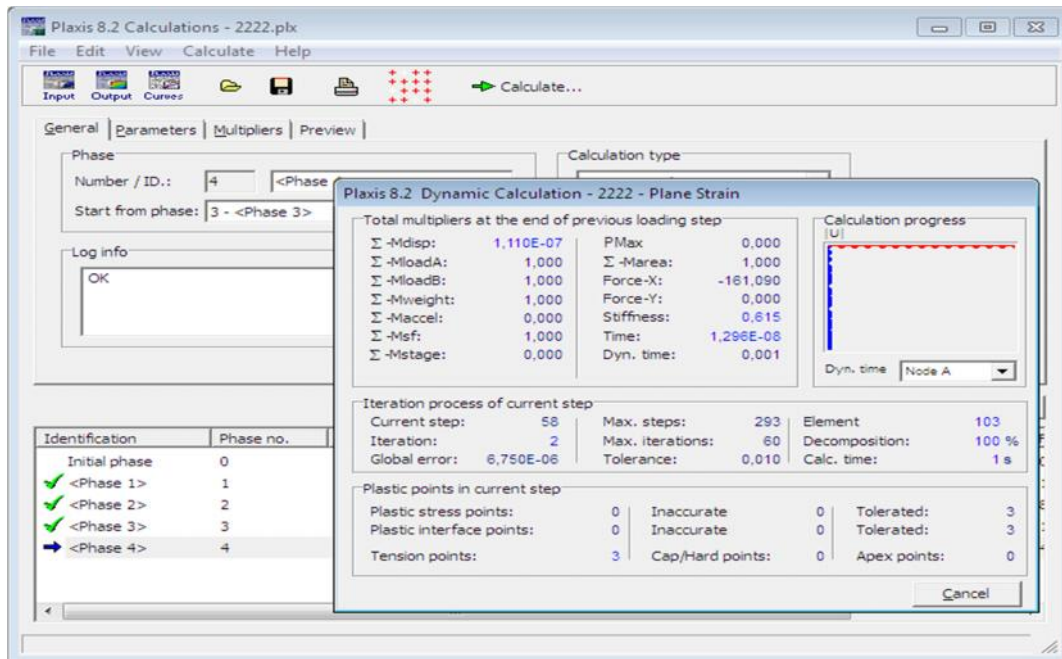


Figure (IV-20) : Fenêtre pour calcul les différentes phases.

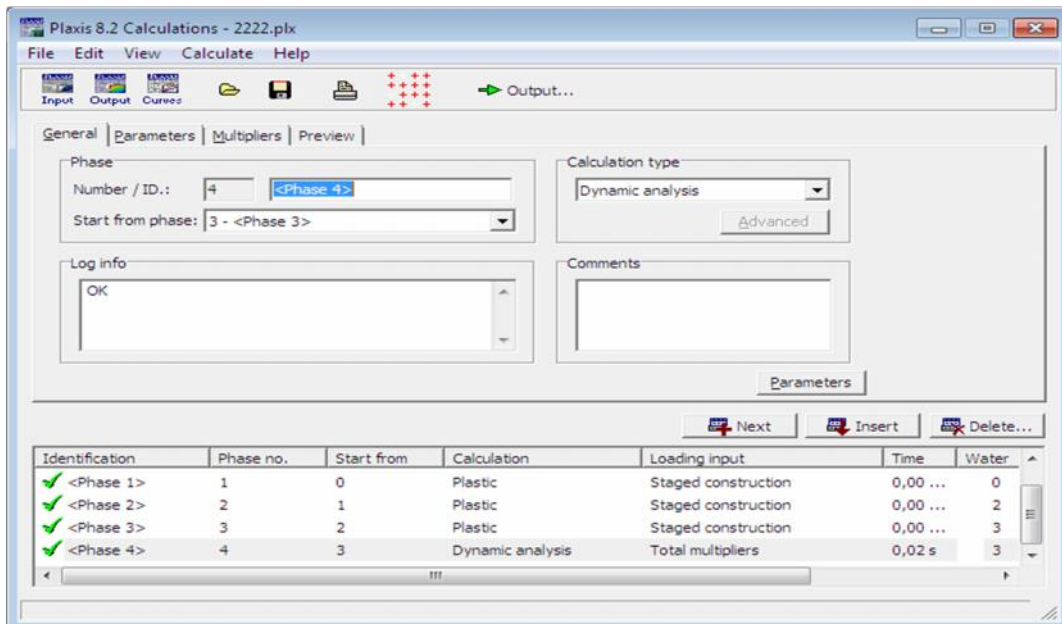


Figure (IV-21) : Déclarations des phases (Plaxis).

Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

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

N° de point	Point A	Point B	Point C
X(m)	5.33	5.12	4.63
Y(m)	12.25	11.14	6.28

Tableau (IV-3): Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.

Chapitre V



Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

V- 1- LE DEPLACEMENT HORIZONTAL IMPOSE A LA BASE:

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

1) Maillage déformé:

Le maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la figure (V-1)

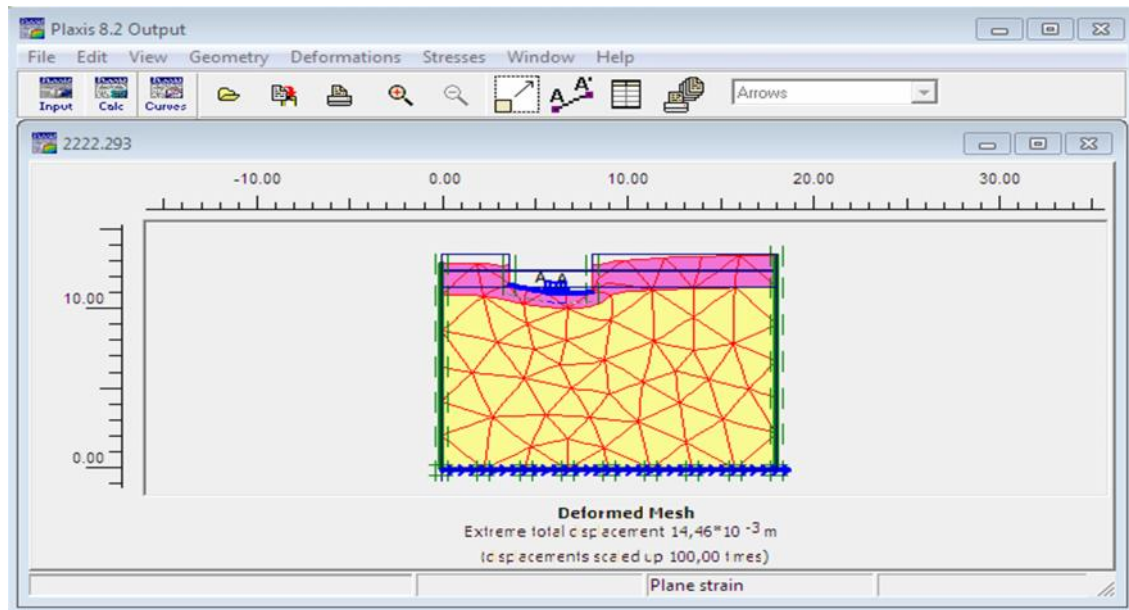


Figure (V-1): Maillage déformé du profil.

2) Contraintes:

Les iso valeurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure (V- 2) On note une contrainte initiale égale à : 431.02 KN/m².

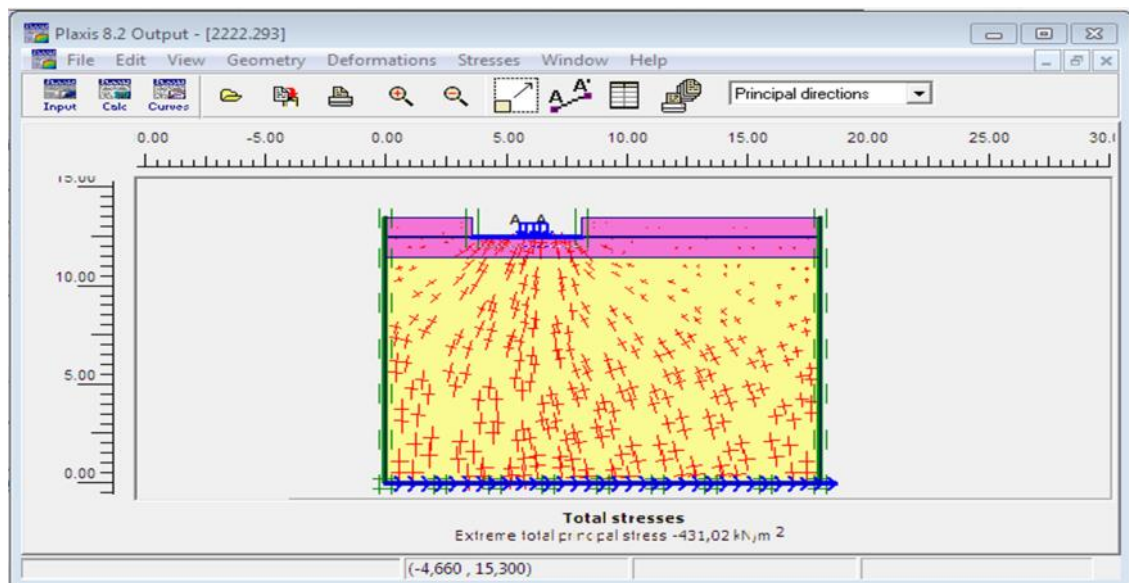


Figure (V-2): Isovaleurs des Contraintes.

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

3) Déplacements:

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure V-3. On note un déplacement maximal égal à : $14.46 \cdot 10^{-3}$ m.

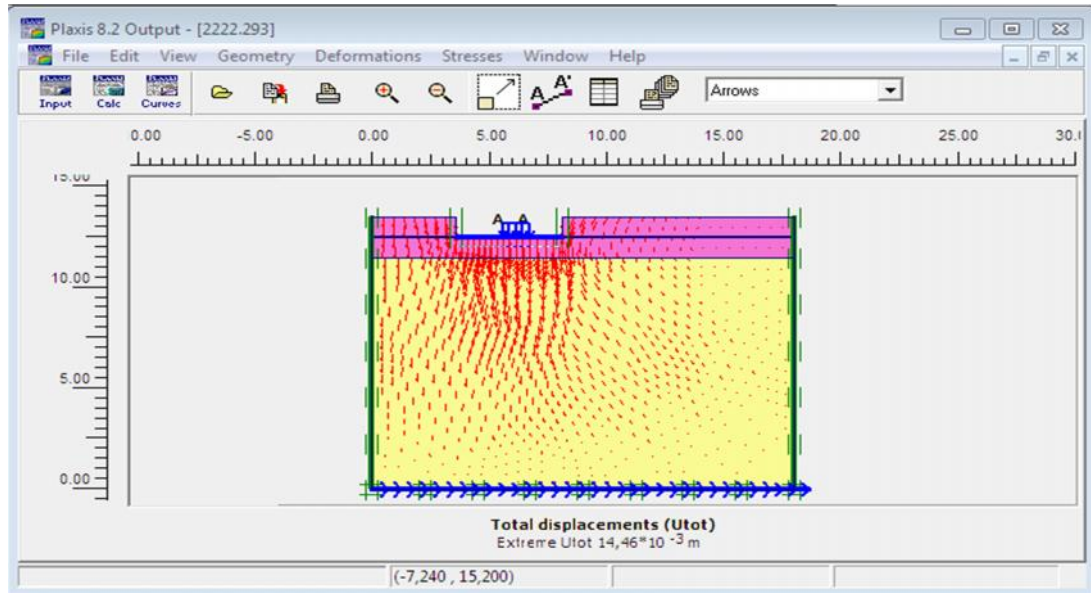


Figure (V-3): Vecteurs de déplacements.

4) Courbes déplacements-temps

L'axe xx :

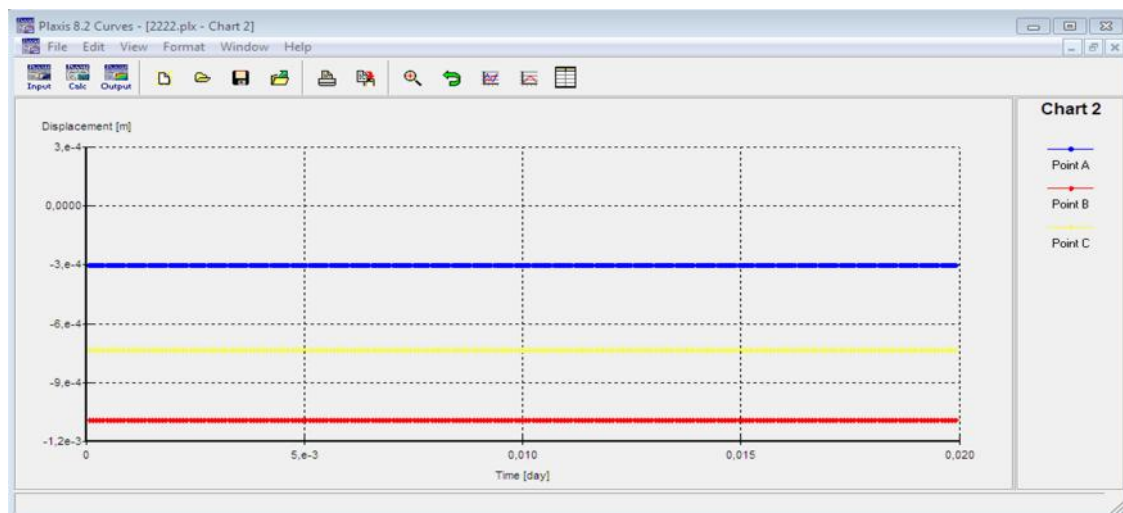


Figure (V-4): Déplacements des différents points en fonction de temps.

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

L'axe YY :

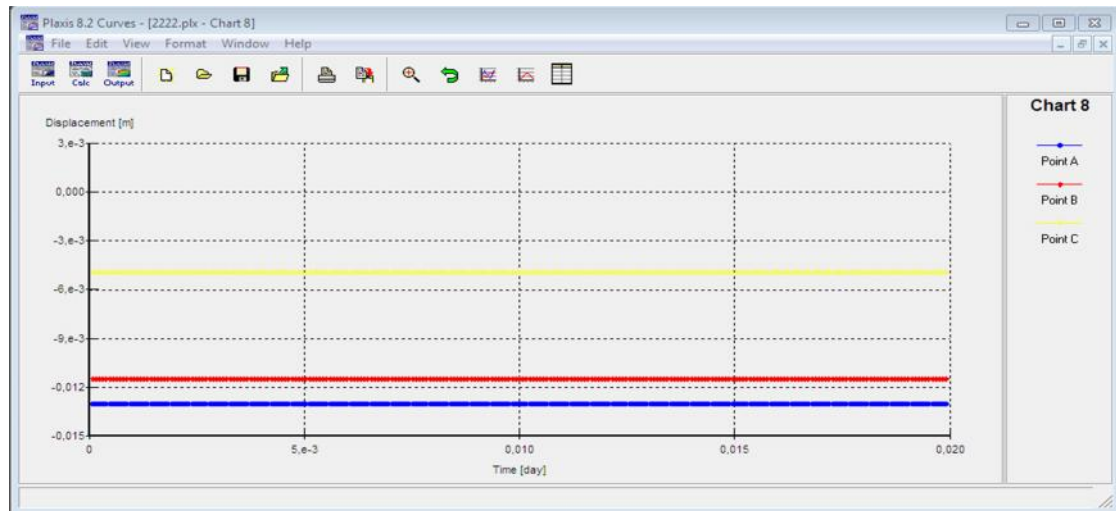


Figure (V-5): Déplacements des différents points en fonction de temps.

5) Courbes vitesses-temps

L'axe XX :

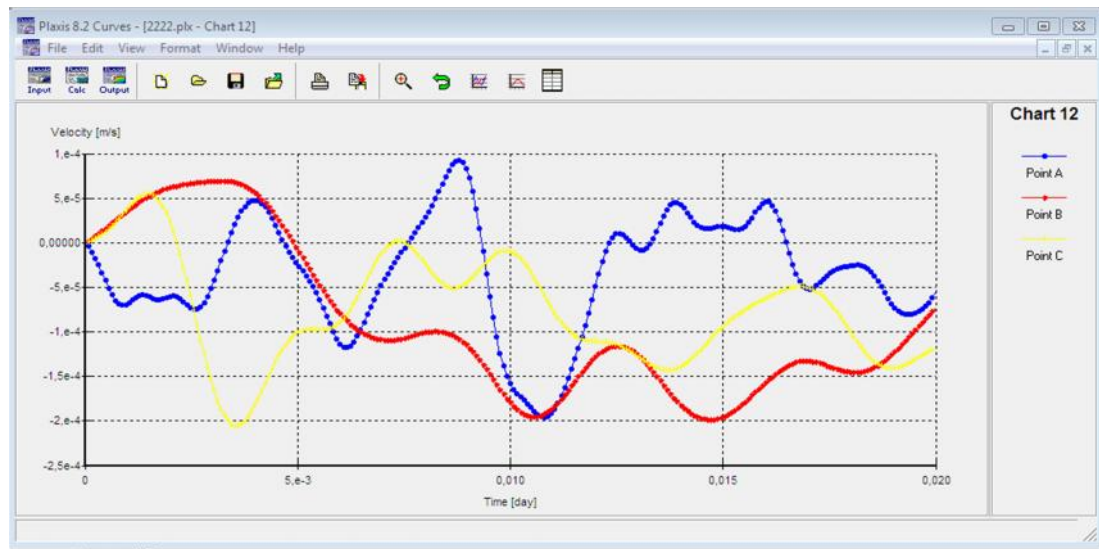


Figure (V-6): Vitesses des différents points en fonction de temps.

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

L'axe YY :



Figure (V-7): Vitesses des différents points en fonction de temps.

6) Courbes accélérations-temps :

L'axe XX :

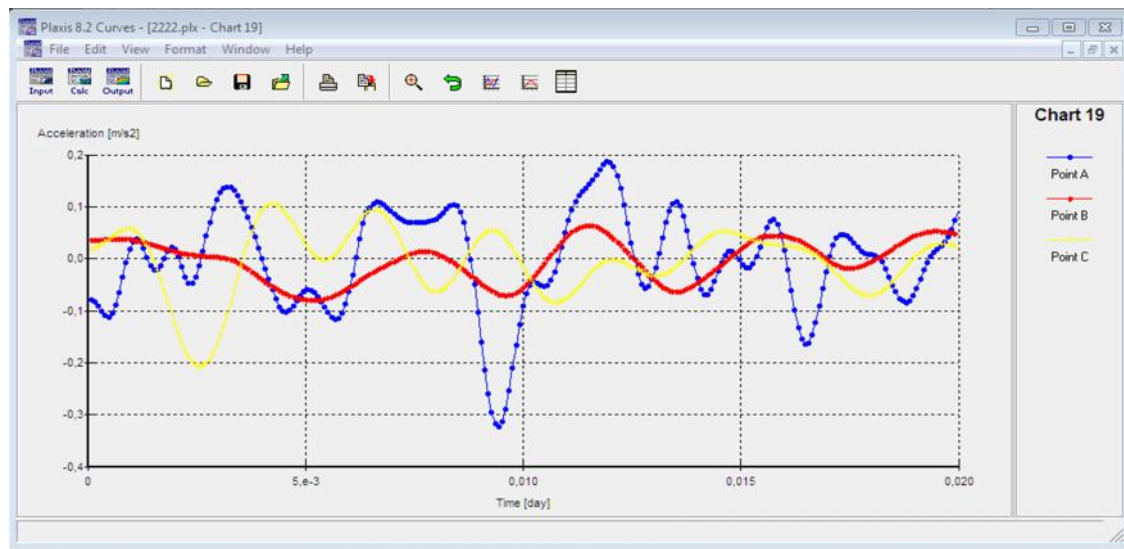


Figure (V-8): Accélérations des différents points en fonction de temps.

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

L'axe YY :

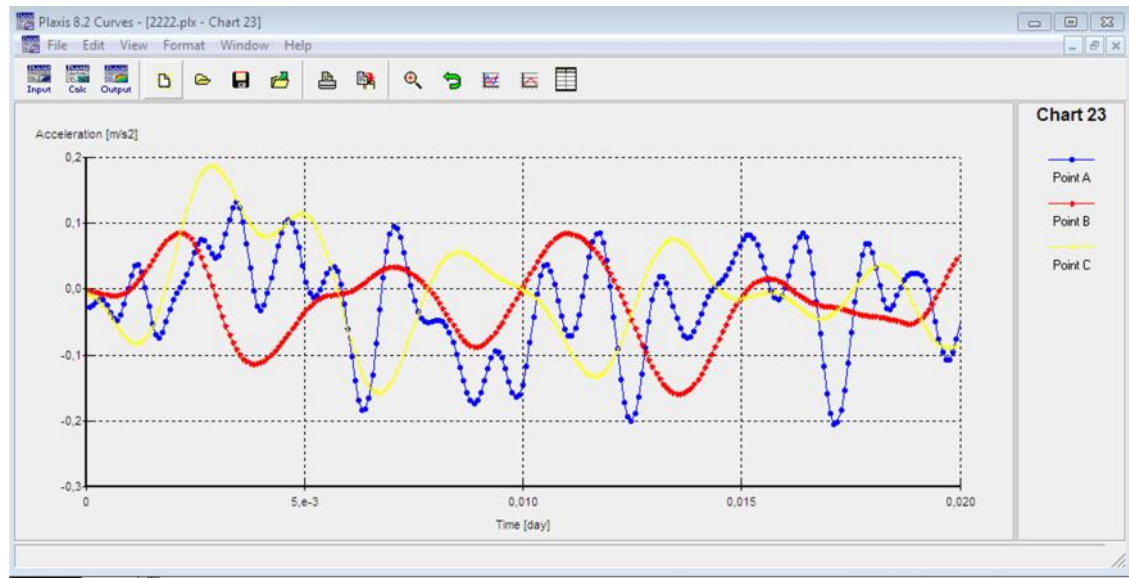


Figure (V-9): Accélérations des différents points en fonction de temps.

7) Courbe force-temps

L'axe XX :

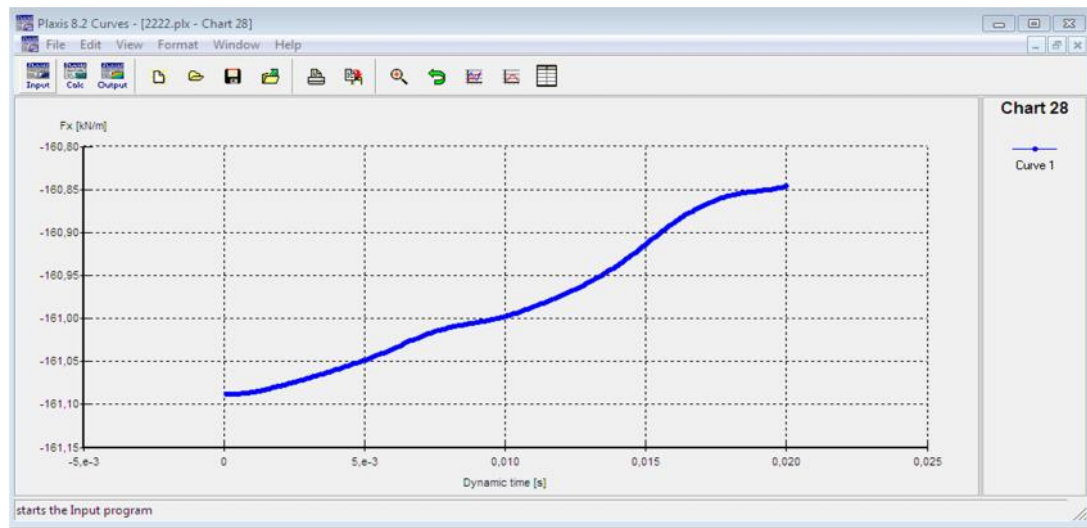


Figure (V-10): la force en fonction de temps.

8) synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau (5-1) considérés :

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

Points		A	B	C
Déplacement(m)	XX	$1,383 \cdot 10^{-4}$	$6,221 \cdot 10^{-5}$	$4,027 \cdot 10^{-4}$
	YY	0,014	0,014	$1,05 \cdot 10^{-3}$
Vitesse (m/s)	XX	$9,284 \cdot 10^{-5}$	$1,521 \cdot 10^{-4}$	$9,091 \cdot 10^{-5}$
	YY	$2,248 \cdot 10^{-4}$	$1,189 \cdot 10^{-4}$	$8,489 \cdot 10^{-5}$
Accélération (m/s ²)	XX	0,245	0,385	0,033
	YY	0,332	0,732	0,03

Tableau (V-1): Les valeurs maximale de déplacement, vitesse et accélération pour les différents points.

V-2-Effet des ondes horizontal :

Points		A	B	C
X(m)		5.33	6.24	7.02
Y(m)		12.25	11.14	2.38
Déplacement (m)	XX	$3.04 \cdot 10^{-4}$	$4.074 \cdot 10^{-4}$	$2.254 \cdot 10^{-4}$
	YY	0.013	0.013	$3.824 \cdot 10^{-4}$

Tableau (V-2): Déplacement des points (cas horizontales).

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivant figure (V-11) et (V-12).

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

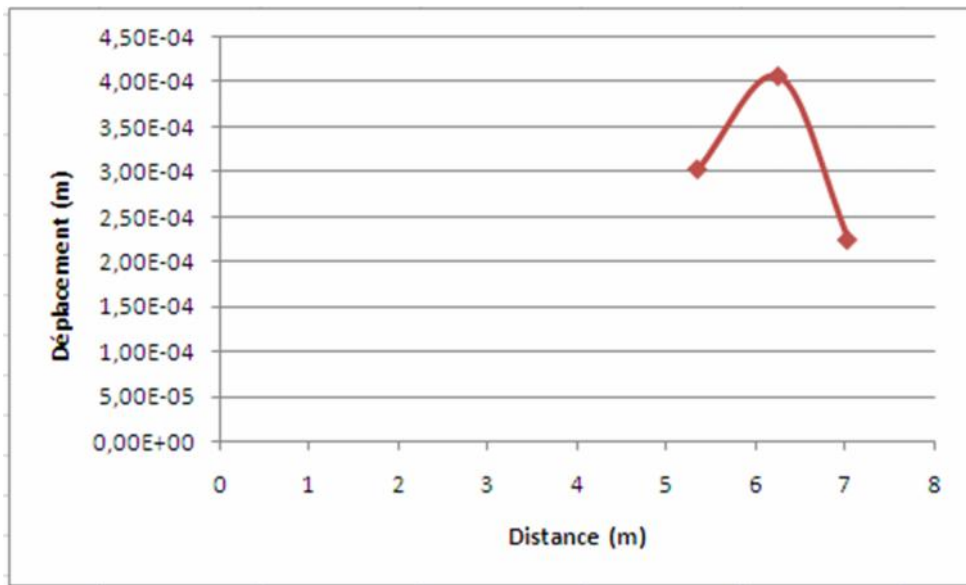


Figure (V-11): Déplacement horizontal selon l'axe XX'.

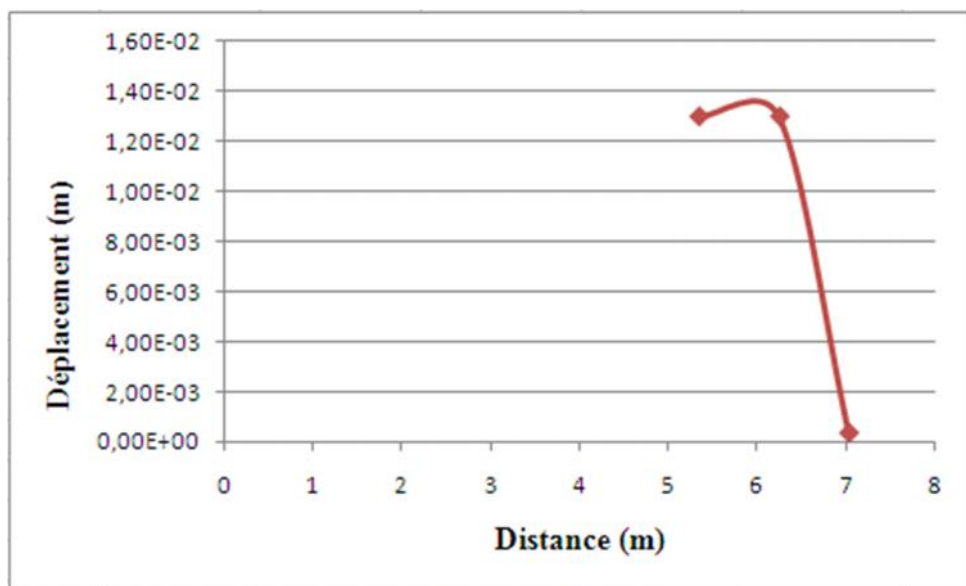


Figure (V-12): Déplacement horizontal selon l'axe YY'.

V-3-1 Commentaire de cas horizontal :

On remarque que le déplacement selon xx' on une allure d'une fonction que est croissante sur un [5,6] et décroissant sur l'intervalle [6 ; 7].

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

L'analyse de la courbe donnant le déplacement en fonction de la distance dans le sens YY' est composée de phase une première phase ; le déplacement est invariable, au delà de 6.24 m le déplacement décroît d'une façon linéaire.

V-3-Effet des ondes verticales:

On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau (V-3).

Points		A	B	C
X(m)		5.33	6.24	7.02
Y(m)		12.25	11.14	2.38
Déplacement (m)	XX	$2.605 \cdot 10^{-4}$	$3.408 \cdot 10^{-4}$	$4.671 \cdot 10^{-4}$
	YY	$5.688 \cdot 10^{-3}$	$2.78 \cdot 10^{-3}$	0.012

Tableau (V-3): Déplacement des points (cas vertical).

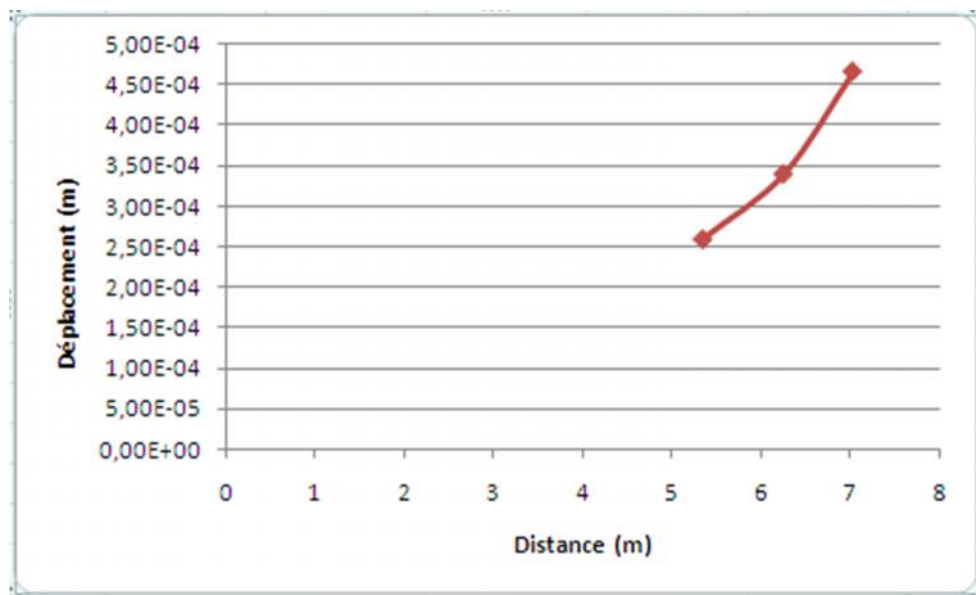


Figure (V-13): Déplacement vertical selon l'axe XX'.

Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

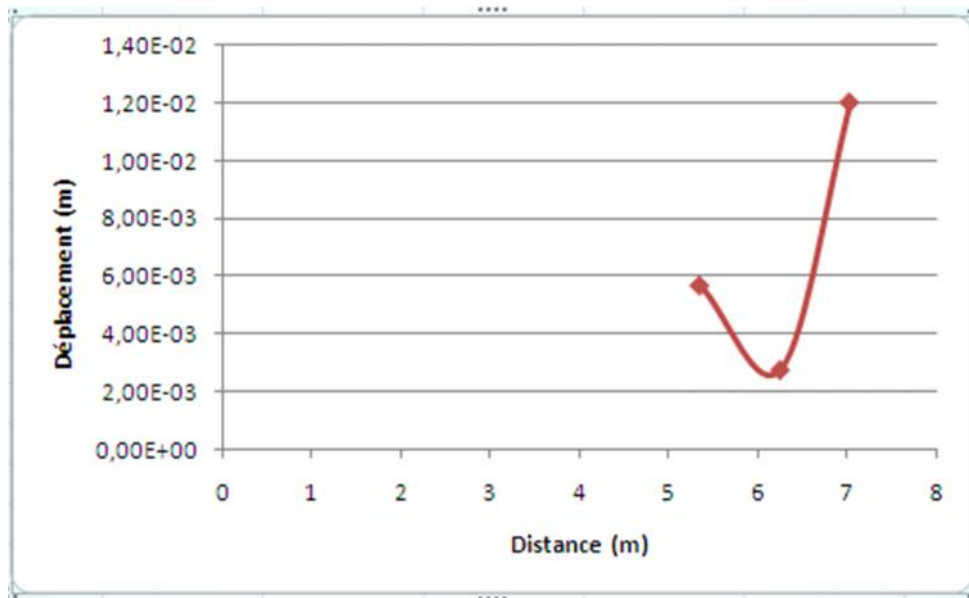


Figure (V-14): Déplacement vertical selon l'axe YY'.

V-3-1- Commentaire de cas vertical

L'interprétation de la courbe donnant le déplacement en fonction de la distance selon XX' la valeur de déplacement il augmente en s'éloignant du plan source et prend des valeurs max.

L'analyse de la courbe déplacement – distance selon l'axe YY' montre que ce dernier décroît avec une pente douce pour atteindre un minimum puis il croît avec une pente positive plus élevée que la première phase.

V-4- Synthèse :

D'après les résultats obtenus par les calculs avec le logiciel plaxis nous pouvons mettre les conclusions suivantes :

- La charge sismique élastique et permanente appliquées sur la structure de pont dalle engendrent des déplacements, vitesses et accélérations.
- La valeur du déplacement augmente au voisinage de la structure plus proche de la zone de contact et diminue en s'éloignant du plan de contact vu le plan de la source
- L'influence des paramètres de mouvement est plus marquée pour les accélérations car est lié à la force sismique engendrée par l'accélération.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

On doit être extrêmement prudent lorsqu'on effectue une analyse d'interaction sol-structure.

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

L'application numérique qu'on a utilisée à Montréal qui prend en compte de l'interaction sol-culé de pont sous son aspect général nécessite la modélisation de moyens et de temps de calcul considérables dans la mise en œuvre ne se justifie que pour des structures exceptionnelles.

Des remarques importantes à signaler dans cette étude sont les suivantes:

Les observations obtenues par cette modélisation ont conclu que:

- La vérification de la stabilité des systèmes «sol-structure» par le calcul de module dynamique est utile en utilisant le code plaxis.
- L'amplitude du séisme n'est pas le seul paramètre qui influence sur la réponse de la structure de pont, ainsi que peut aussi influencer largement sur cette réponse.
- Examiner l'applicabilité d'un modèle simple permettant de capturer l'effet prépondérant des phénomènes de l'interaction sol-structure.
- L'utilisation de la méthode des éléments finis par le code plaxis est suffisante pour décomposer le problème car elle est basée sur plusieurs paramètres.
- Examiner l'effet des paramètres sismiques et la profondeur de l'interaction sol-culé, sur les propriétés vibratoires ou le comportement dynamique du système étudié.

Bibliographie



Bibliographie

- [1] : 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.
- [2] : Okamoto, s. (1973) -"Introduction to Earthquake Engineering ".University of Tokyo Press, Tokyo, 571 pp.
- [3] : 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.
- [4] : « Pnmikti.org - Projet national MIKTI, ponts et passerelles de demain»
(http://www.pnmikti.org/PNMIKTI_RGCU2002. (consulté le 15 avril 2010).
- [5] : SETRA , *ponts-dalles guide de conception*, Bagneux, le 16 octobre 2000
- [6] : REFERENCE : Circulaire série A, n° 3 du 10 mai 1927 (1) modifiée en dernier lieu par la circulaire n° 27 du 14 octobre 1944 (2).
- [7] : FRANK SAMPSON : " les séismes".
- [8] : n° 180 secousses sismiques et équipements électriques a Eric Melmoux.
- [9] : Séisme et énergie a Jenney caine, aude le leivre et beroit welf.
- [10] : JEAN-ARTHUR OLIVE, Notes de cours de sismologie-Ecole normale supérieure, Département Terre-Atmosphère-Océan.
- [11] : Pierino Lestozzi et Marc Badoux : "Génie parasismique" , presses polytechnique et universitaire romande.
- [12] : Pecker, A. Dynamique des sols. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984.

- [13] : Alain Pecker : "Interaction sol structure et comportement des fondations".
- [14] : V. Davidovici, La construction en zone sismique, Editions Le Moniteur, Paris, 1999.
- [15] : Pecker A étude expérimental du comportement d'un vase sous chargement cyclique revue française de géotechnique, N 15,1981.
- [16] : V. Davidovici, Eurocode 8, Pratique du calcul sismique, Guide d'application, afnor éditions-Eyrolles, 2013.
- [17] : Règles parasismiques algériennes RPA 99/ version 2003.
- [18] : Wilson, E.L. Three-dimensional static and dynamic analysis of structures. A physical approach with emphasis on earthquake engineering, 3rd Ed (Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA), 2002.
- [19] : HAL-Modélisation physique et numérique des interactions sol-structure sous sollicitations dynamiques transverses.
- [20] : Pecker, A. Dynamique des ouvrages, dynamique des structures. Polycopie des cours, ENPC, website : <http://www.enpc.fr/fr/formations/école.vite/cours/pecker>, 2004.
- [21] : Wang, J. Influence of different boundary conditions on analysis of SSI. In 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), pages 3157-3164, Beijing, China, 2005.
- [22] : PLAXIS. ; PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 6, A.A. BALKEMA/ ROTTERDAM/ BROOKFIELD/ (1995).
- [23] : BRINKGREVE, R.B.J., Geomaterial models and numerical analysis of softening. Doctoral thesis, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology. (1994).