

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° : .....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : STRUCTURE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par : HAMDY Abderaouf  
ZERIG Abdelhakim**

**Intitulé**

**INTERACTION SOL-STRUCTURE D'UN PONT  
SITUE SUR LA VOIE FERREE AIN TOUTA-M'SILA**

**Soutenu devant le jury composé de:**

.....	Université : M'sila	Président
MINASRI ABDERAZZAK	Université : M'sila	Rapporteur
.....	Université : M'sila	Examineur
.....	Université : M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2017 /2018**

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord nous remercions notre bon Dieu le tout puissant, pour son aide et pour nous avoir donné le courage et la patience afin d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons aussi à remercier notre promoteur

Mr **Menassri abderazak** pour son suivi et ses précieux conseils durant l'évolution de ce travail.

Nous remercions qui vont également :

A tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi que tous les personnels de Collège.

A toute notre promotion pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble.

# DÉDICACES

Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :

**Ma mère (Zakia)**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

**Mon père (Seid)**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

**Mes frères** : Abdessalam (Yacine), Salah et Abderrahim qui m'ont assisté dans ces moments difficiles et m'ont servi d'exemple.

**Mes professeurs** qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

**Mes oncles** et leurs Famille ainsi que tous mes cousins.

**Mes Amis** : Mon binôme Abdelraouf, Anouar, Med Amine, Sami, Fatah, Moh Dadi, Yassine, Alla, Saleh, Beida, Zaki, Naser .....la liste est grand.

C'est pour cela que je leur dédie mon travail en leur disant :

« **Je vous aime et merci beaucoup pour tout ce que tout ce que vous m'avez offert** »

ZERIG ABDELHAKIM

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord nous remercions notre bon Dieu le tout puissant, pour son aide et pour nous avoir donné le courage et la patience afin d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons aussi à remercier notre promoteur

Mr **Menassri abderazak** pour son suivi et ses précieux conseils durant l'évolution de ce travail.

Nous remercions qui vont également :

A tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi que tous les personnels de Collège.

A toute notre promotion pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble.

➤ Hamdi Abderaouf

➤ Zerig Abdelhakim

# DÉDICACES

*Nous voila à la fin d'un parcours si long mais plein de bons événements, de meilleurs souvenirs et d'inoubliables amitiés tissées tout au long de nos années d'études ;*

*Ce mémoire n'est pas seulement la finalité d'une année d'étude mais le résultat de tant d'années de travail et de recherche du savoir ;*

*Cet humble travail que nous allons présenter ci-après, n'a pu avoir lieu si tout ceux qui me sont chers ne se pas consacrés et venus à mon aide ;*

*Je dédier mon modeste travail à :*

***Ma famille :** Mon père Abderrahmane et ma mère qui mon jamais laissé sentir de manque et qui me ont pris soin de moi depuis ma naissance, mes frères ; Abdelatif ,Bassam, Rida ainsi que ma petite sœur .Mes oncles et leurs Famille ainsi que tous mes cousins surtout Raid, Walid, Mohamed, Ahmed, Younes, Habib .....*

***Mes Amis :** Mon binôme Abdelhakim ,Fatah, Amine, Islam, Younes, Mohamed, Okba, Yassine ,Islam ,Yasser , Sami, Saleh , Beida , Achref ,Adil .....la liste est grande .*

*C'est pour cela que je leur dédie mon travail en leur disant :*

*« Je veux aime et merci beaucoup pour tout ce que tout ce que vous m'avez offert »*

*Hamdi Abderaouf*

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES NOTIONS

INTRODUCTION GENERALE

## Chapitre I : GENERALITES SUR LES SEISMES

Introduction .....	1
I-1. Définition d'un séisme .....	2
I-2. Origine des séismes.....	2
I-3. Aléa et risque.....	3
I-4. La faille .....	4
I-5. Les répliques.....	5
I-6. Caractéristiques d'un séisme.....	6
I-6.1. Les différents types de séismes .....	6
I-6.2. Magnitude et intensité d'un séisme .....	7
I-6.3. Les différentes échelles .....	8
I-7. Nature des ondes sismiques .....	9
I-7.1. Les ondes de volume .....	9
I-7.2. Les ondes de surface.....	10

I-8. Les séismes en Algérie .....	11
I-9. Critères de classification selon le « RPA99 » .....	12
Conclusion.....	13

## **Chapitre II : NOTION SUR LES PONTS**

Introduction .....	14
II-1. Définition d'un pont .....	14
II-2. Les principaux éléments d'un pont .....	14
II-2.1. Les fondations .....	14
II-2.2. Les appuis .....	15
II-2.3. Le tablier.....	15
II-3. Les types de ponts courants :.....	16
II-3.1. Ponts dalle .....	16
II-3.2. Ponts à poutres .....	17
II-3.2.1. Ponts à poutres en béton armé .....	17
II-3.2.2. Ponts à poutres mixtes acier/béton .....	18
II-3.2.3. Ponts à poutres en béton précontraint.....	18
II-4. Classes de ponts –routes .....	18
II-5. Charges et sur charges .....	19
II-5.1. Charges permanentes .....	19
II-5.2. Surcharges d'exploitation :.....	20

II-5.2.1. Surcharges des trottoirs.....	20
II-5.2.2. Système de charge A (L) .....	20
II-5.2.3. Système de charge B (B <sub>c</sub> ).....	21
II-5.2.4. Surcharges militaires.....	24
II-6. Les combinaisons d'actions.....	25

## **Chapitre III : INTERACTION SUR SOL-STRUCTURE**

III.1 Introduction .....	26
III.2: Généralités .....	26
III.3: Modelé analogique simplifié .....	29
III.4: Comportement des sols sous sollicitations sismiques .....	30
III.4-1 : Comportement élastique du sol .....	30
III.4-2 : Comportement élasto-plastique du sol .....	30
III.5: les effets de l'ESS .....	31
III.6: Equation générale formulant un problème d'ISS .....	32
III.7: Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS .....	33
III.7-1 : Les méthodes directes .....	33
III.7-2 : La méthode des sous-structures .....	35

## **Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »**

IV.1. Présentation de Plaxis.....	36
IV.2. Aperçu historique .....	36
IV.3. Le code éléments finis PLAXIS .....	37
IV.4. Paramètres du calcul dans le code d'éléments finis Plaxis .....	37
IV.5. Le système d'options du code Plaxis .....	41

IV-6. Module dynamique du code PLAXIS .....	43
IV-7. Modèle géométrique retenu.....	44
IV-7.1 Les conditions aux limites.....	45
IV-7.2 Caractéristiques des matériaux.....	45
IV-7.3 Génération du maillage.....	46
IV-7.4 Conditions initiales.....	47
IV-7.5 Sollicitation sismique.....	48
IV-7.6 Procédure de calcul.....	48

## **Chapitre V : Résulta des calculs et interprétation**

V-1 Le déplacement horizontal imposé à la base .....	51
1)Maillage déformé .....	51
2)contraintes .....	51
3)déplacements .....	52
4)Courbes déplacements-temps .....	53
5) Courbes vitesses-temps .....	54
6)Courbes accélérations-temps .....	55
7)Courbe force-temps .....	56
8)Synthèse .....	56
V-2 Effet des ondes horizontales .....	57
V-3 Effet des ondes verticale .....	60
V-4 Synthèse .....	63
Conclusion Générale .....	64
Bibliographie	

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I : GENERALITES SUR LES SEISMES

Tableau (I-1) : Echelle de magnitude (Richter) et échelle d'intensité EMS 98.....	8
---	---

## Chapitre II : NOTION SUR LES PONTS

Tableau (II-1) : Les valeurs du coefficient $a_1$ .....	21
---	----

Tableau (II-2) : Les valeurs du coefficient $b_c$ .....	23
---	----

## Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »

Tableau (IV-1) Propriétés du sol constituant le massif.....	45
---	----

Tableau (IV -2) : Propriétés de l'élément structural (plate).....	46
---	----

Tableau (IV-3) : Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.....	50
--	----

## Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

Tableau (V-1) : Valeurs maximal aux points considérés.....	56
--	----

Tableau (V-2) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal.....	57
---	----

Tableau (V-3) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas vertical.....	60
---	----

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : GENERALITES SUR LES SEISMES

Figure (I-1) : sismicité de la terre.....	1
Figure (I -2) : Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.....	5
Figure (I-3) : présentation schématique caractéristique d'un séisme.....	7
Figures (I-4) : d'un sismogramme et ses différentes composantes.....	9
Figure (I-5) : Les différents types d'ondes sismiques.....	11
Figure (I-6) : Carte de zonage sismique du territoire national d'Algérie (RPA99v 2003).....	13

## Chapitre II : NOTION SUR LES PONTS

Figure (II-1) : Schéma pour la composition d'un pont.....	15
Figure (II-2) : Coupes types d'un pont dalle.....	16
Figure (II-3) : Eléments constitutifs d'un pont à poutres sous chaussées.....	17
Figure (II-4) : Descente de charge d'un pont.....	19
Figure(II-5) : Système de charge Bc.....	23
Figure (II- 6) : Système de charge Mc120.....	24

## Chapitre III : INTERACTION SUR SOL-STRUCTURE

Figure (III.1) : Illustration de l'ISS.....	28
Figure (III.2) : Modèle analogique simplifié d'interaction sol-structure.....	29
Figure (III.3) : Lecture spectrale montrant les effets de la prise en compte de l'ISS.....	31
Figure (III.4) : décomposition du problème d'interaction sol structure.....	33
Figure (III.5) : Schématisation d'un problème d'interaction Sol structure en élément fini.....	34
Figure (III.6) : Principe de superposition de Kausel.....	35

## **Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code plaxis »**

Figure (IV-1) : Interface utilisateur pour l'entrée des données.....	38
Figure (IV-2) : fenêtre au modèle Mohr-Coulomb.....	39
Figure (IV-3) : Définition du module à 50% de la rupture.....	40
Figure (IV-4) : condition aux limites.....	41
Figure(IV-5) : Maillage.....	42
Figure (IV-6) : Contraintes initiales (condition K0).....	42
Figure (IV-7) : sollicitation sismique.....	44
Figure (IV-8) : sollicitation harmonique.....	44
Figure (IV-9) : profil géométrique retenu.....	44
Figure (IV-10) : maillage du modèle.....	47
Figure (IV-11) : Génération des contraintes initiales.....	47
Figure (IV -12) : Sollicitation sismiques horizontal.....	48
Figure (IV-13) : le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA 99 V 2003.....	49
Figure (IV-14) : spectre réponse selon RPA99 version 2003.....	49
Figure (IV-15) : Fenêtre pour calcul les différentes phases.....	50

## **Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation**

Figure (V-1) : Maillage Déformé du profile.....	51
Figure (V-2) : Iso-valeurs des Contraintes.....	52
Figure (V-3) les vecteurs de déplacements.....	52
Figure (V-4) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX'.....	53
Figure (V-5) : déplacement des points en fonction de temps l'axe YY'.....	53
Figure (V-6) : Vitesses des points en fonction de temps l'axe XX.....	54
Figure (V-7) : Vitesses des points en fonction de temps l'axe YY.....	54
Figure (V-8) : Accélérations des points en fonction de temps l'axe XX.....	55
Figure (V-9) : Accélérations des points en fonction de temps l'axe YY.....	55

Figure (V-10) : La force en fonction de temps.....	56
Figure (V-11) : Schématisation des points de l'axe XX' .....	57
Figure (V-12) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX' .....	58
Figure (V-13) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe YY' .....	58
Figure (V-14) : Déplacement-distance XX' .....	59
Figure (V-15) : Déplacement-distance YY' .....	59
Figure (V-16) : Schématisation des points de l'axe YY' .....	60
Figure (V-17) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX' .....	61
Figure (V-18) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe YY' .....	61
Figure (V-19) : Déplacement-distance XX' .....	62
Figure (V-20) : Déplacement-distance YY' .....	62

## NOTATION ET ABREVIATIONS

Lettres Grecques :

$\nu$  : Le coefficient de poisson.

$\varphi$  : Angle de frottement effectif.

$\psi$  : Angle de dilatance.

E : Le module de Young.

R : Force de réaction.

$\theta$  : Angle du plan de rupture.

$\sigma$  : Contrainte.

$\tau$  : 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.

$\gamma_{dry}$  : Poids volumique sec.

$\gamma_{wet}$  : Poids volumique humide.

m : Puissance.

P : Pression

U : Déplacement.

W : Poids

$\{u''\}$  : Vecteur d'accélération.

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

$\{u\}$  : Vecteur de déplacement.

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

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.

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

L'observation des séismes dans le temps relève d'une façon très marquée une dispersion régionale de leurs intensités et de leurs effets destructifs. Lors d'un séisme un grand nombre de structures peuvent être fortement endommagées ou détruites sur une zone localisée tandis que dans d'autres régions, pourtant adjacentes à celle-ci, des structures similaires auront assez bien résisté aux secousses sismiques.

En un site donné, les sols déformables donnent lieu à une amplification parfois importante du mouvement sismique, les enregistrements effectués sur les roches et les sédiments ont montré des variations significatives de l'accélération maximale et du contenu fréquentiel.

Pour un même séisme le contraste entre les mouvements des sols déformables enregistrés en surface de ces derniers et ceux des zones avoisinantes plus rigides fait apparaître l'influence des natures géologique et géotechnique. Celles-ci peuvent donner lieu d'un part à des effets « géométriques » reliés à l'empilement et à la géométrie des formations géologiques superficielles et d'autre part à des effets « rhéologiques » associés au comportement dynamique des sols.

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

La conception des ouvrages importants nécessite l'identification des zones sismiques et la caractérisation de leurs mouvements par un certain nombre de grandeurs directement utilisables par l'ingénieur. L'objet de cette étude est de fournir ces éléments.

Donc l'ingénieur de génie parasismique est appelé à résoudre le problème de la construction des ouvrages qui pourraient résister, dans un certain murage admissible de risque, à des secousses sismiques probables. Ceci ne peut pas se faire sans une bonne connaissance des caractéristiques du mouvement sismique, et une meilleure estimation de la maximisation probable de ce dernier et son avènement dans le temps et dans l'espace, même s'il dispose d'outils puissants que sont les nouvelles méthodes de l'évaluation de la réponse sismique du sol.

# INTRODUCTION GENERALE

---

- Dans le premier chapitre de cette étude, nous introduisons les paramètres qui participent à la description du mouvement sismique. Nous évoquons les imperfections qui subsistent dans la définition de certains paramètres et les incertitudes qui accompagnent leur détermination. Nous essayons de répertorier les facteurs qui influent sur les paramètres du mouvement sismique en un point donné de la surface du sol et, nous mettons l'accent sur le rôle des facteurs liés à la source, rôle sous-estimé par les calculs courants.

- Le chapitre deuxième, nous avons traité des notions sur les ponts courants utilisés en pratique, les systèmes de charges et surcharges supportées par les ponts.

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

- Le quatrième chapitre est consacré à la description générale de l'outil de calcul "PLAXIS" ainsi la mise en œuvre des calculs effectués à l'aide du "code PLAXIS" et études de mouvement sismique dans ce cas en utilisant le code de calcul "PLAXIS" qui nous a permis de déterminer les déplacements, les vitesses et l'accélération. Tous sa dans le cinquième chapitre.

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

## **1. But de l'étude :**

L'étude de l'effet de l'Interaction Sol-Structure (ISS) sur un pont poutre, situé sur la route RN45 Msila-BBA.

Cette étude repose sur une analyse numérique en utilisant le code de calcul par élément fini (plaxis).

## **2. Présentation de l'ouvrage :**

L'ouvrage objet de cette étude consiste à franchir la voie ferrée Ain touta Msila. Comme passage supérieur.



**Figure I : Montre une vue de face de l'ouvrage**

## **3. Les caractéristiques de l'ouvrage :**

-Nombre de travée : 3 travée.

-Longueur d'une travée : 12 m.

-Hauteur de gabare : 12 m.



## Chapitre I : Généralités sur les séismes

### Introduction :

Les séismes apparaissent comme une manifestation perceptible de phénomènes qui se poursuivent à l'échelle des temps géologiques. Il est malheureusement certain que les séismes continueront à surprendre l'homme. La seule chose que nous puissions prédire avec certitude, c'est que plus nous nous éloignons du dernier tremblement de terre, plus nous sommes proches du suivant.

On conçoit dès lors que, faute de pouvoir-et pour longtemps encore sans doute-prévoir ou empêcher les séismes, on doit s'efforcer d'en limiter les dégâts. Cette démarche commence par la connaissance détaillée de l'action sismique : naissance du séisme, formation et propagation des ondes, représentativité des accélérogrammes et des spectres associés, etc., l'aboutissement étant la construction parasismique.

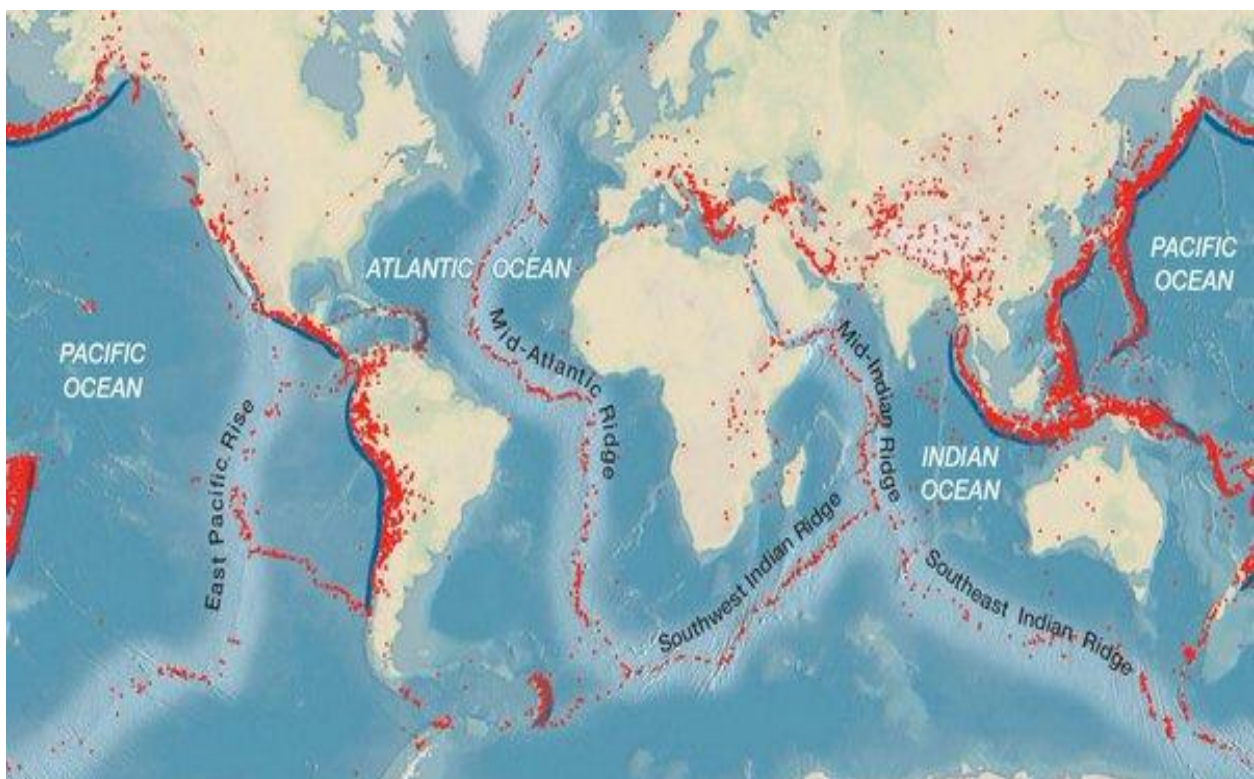


Figure (I-1) : sismicité de la terre

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

## I-1. Définition d'un séisme :

Le séisme est une catastrophe naturelle causé par une rupture des roches provoquant de nombreuses secousses. Il s'agit de secousses qui se produisent dans le sol après un mouvement des plaques tectoniques. Les pressions qui causent le mouvement des plaques s'accumulent et les roches se déforment. Au moment de la rupture, les plaques vibrent et les roches sont ramenées à leur forme initiale. L'énergie stockée est alors libérée sous formes d'ondes sismiques Un séisme est caractérisé par sa magnitude et son intensité. Il occasionne de nombreuses conséquences d'un point de vue humain, économique et environnemental. Nous pouvons aujourd'hui calculer le risque sismique dans un lieu donné ce qui permet de construire dans des endroits où le risque sera moins élevé.

## I-2. Origine des séismes :

Rappelons que tout matériau rigide, soumis à des contraintes de cisaillement, va d'abord se déformer de manière élastique, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, va se rompre, en dégageant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulée durant la déformation élastique.

C'est ce qui se passe lorsque la lithosphère (qui est solide et cassante) est soumise aux contraintes des mouvements des plaques tectoniques, elle accumule alors de l'énergie.

Lorsque certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures qui se traduisent par des failles. L'énergie brusquement dégagee le long de ces failles cause des séismes.

Si les contraintes se poursuivent dans cette même région, l'énergie va à nouveau s'accumuler et la rupture conséquent se fera dans les plans de faille déjà existants (failles actives).

A cause des forces de friction et de frottement entre les deux parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne se font pas de manière continue et uniforme, mais par coups successifs, dégageant à chaque fois un séisme.

Dans une région donnée, des séismes se produiront à plusieurs reprises le long d'une même faille, puisque cette dernière constitue un plan de faiblesse dans la lithosphère.

Il faut noter que les séismes ne se produisent que dans du matériel rigide et cassant. Par conséquent, les foyers sismiques trouveront leur source que dans la lithosphère, jamais dans l'asthénosphère qui est ductile et plastique.

Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre [1].

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

## I-3. Aléa et risque :

Dans le jargon des catastrophes naturelles existent de nombreux termes qui sont utilisée parfois à tort et parfois à raison.

Il faut donc faire la part entre ces termes et les utiliser chacun là où il convient le mieux.

Par exemple, il ne faut pas confondre entre l'aléa et le risque. Le premier est lié au phénomène lui-même, donc à la géologie, et le second est surtout lié à l'homme et sa façon de construire.

Ainsi on entend par 'aléa naturel' la probabilité d'occurrence d'un danger naturel (ex : probabilité d'apparition d'un séisme en un site donné).

Alors que le « risque » encouru représente la probabilité d'un dommage causé par un danger naturel. Ce dernier est directement lié à la vulnérabilité (protection ou non) du site concerné.

Par exemple si on s'intéresse au risque sismique, il est fonction de deux composantes :

- **L'aléa sismique**, qui dépend de la proximité de la zone sismique connue.
- **La vulnérabilité** : dépend des ondes de construction, parasismiques ou non prises pour éviter les dommages.

Dans ce cas, si on considère le nord de l'Algérie, il est effectivement situé dans une zone moyennement sismique, le bassin méditerranéen. Mais ce n'est pas le cas de la partie sud du pays, où l'activité sismique est quasiment absente.

- Alors, si on examine le risque sismique pour la région d'Alger, la capitale, on peut dire que l'aléa y est moyen (partie nord) et que la vulnérabilité y est médiocre car une bonne partie des constructions est vieille (époque coloniale) et n'a pas respecté les normes parasismiques. Dans ce cas le risque sismique pour une région comme Alger est fort.
- Mais si on considère une région du sud du pays, on trouvera que l'aléa sismique est négligeable car une bonne partie des constructions est vieille et n'a pas respecté les normes parasismiques. Donc le risque sismique pour les régions du sud est faible.
- En conclusion, dans une même zone sismique (donc même aléa), deux bâtiments construits l'un selon les normes parasismiques l'autre non, ne courent pas le même risque sismique, même si l'aléa y est le même, car le deuxième est plus vulnérable que le premier.

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

En somme, il est impératif de bien étudier et comprendre la distribution de l'aléa géologique (probabilité), c'est-à-dire une bonne connaissance de la géologie sous-jacente au phénomène redouté.

Pour traduire ces deux notions importantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité, et pour définir un risque naturel quelconque, une équation empirique existe qui s'écrit [1].

$$\text{Risque sismique} = \text{Aléa sismique} * \text{Vulnérabilité}$$

## I-4. Faille :

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

## Classification des failles :

La classification la plus simple (selon leur rejet) se résume comme suit :

➤ **Les failles normales** (failles directe, de distension), le rejet horizontal transversal correspondant à une distension. Ces failles se caractérisant par la séparation partielle des deux compartiments qui, soumis à des forces d'étirements s'écartent l'un de l'autre ce qui provoque l'effondrement de l'un des blocs.

➤ **Les failles inverses** (failles de compression), où le rejet horizontal transversal correspond à un raccourcissement (il y a alors chevauchement du compartiment situé au-dessus du plan faille sur l'autre compartiment), ces failles qu'on appelle également chevauchantes. A l'inverse du cas précédent, les deux blocs sont poussés l'un vers l'autre par des forces de compression.

➤ Le troisième type de faille se rapporte aux **failles décrochantes** ou tout simplement décrochement vertical. Un tel événement provoque le coulisage horizontal des deux blocs séparés en sens contraire de part et d'autre du plan de faille.

## Chapitre I : Généralités sur les séismes

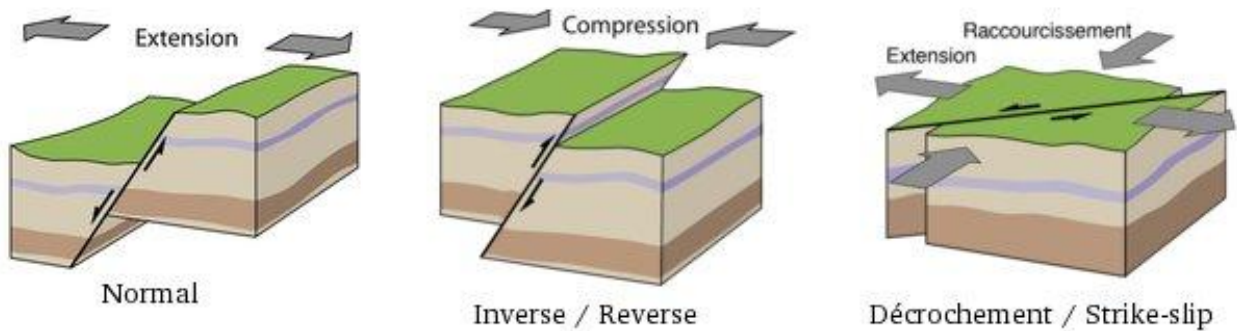


Figure (I -2) : Les principaux types de faille qui intéressent le génie sismique.

Les failles sont classées également comme suit :

➤ **Faille active** : C'est une faille qui a joué pendant le régime sismotectonique actuel et par conséquent jouera de nouveau dans le futur.

La majorité des séismes à l'échelle locale se produisent fort probablement le long des failles déjà existantes, car les forces tectoniques ne sont probablement pas assez importantes pour donner naissance à de nouvelles failles. Mais ces forces sont plutôt capables de réactiver des failles déjà existantes, soit le long des zones de faiblesse de la croûte terrestre.

➤ **Faille non active** : Cette définition est relative aux failles ayant joué durant une période mais présente un caractère d'inactivité dans le régime sismotectonique actuel.

### I-5. Les répliques :

Les répliques se caractérisent généralement par une magnitude moins importante que le choc principal, mais pouvant répondre le doute, l'angoisse au sein de la population et achever les destructions causées lors du séisme principal.

Dans certains cas les répliques peuvent être aussi, violentes que la secousse principale. Mais dans la majorité des cas, les répliques sont moins intenses que le séisme principal et ils peuvent durer des semaines voire des années.

Les épencentres des répliques sismiques ne coïncident pas forcément avec l'épicentre du choc principal.

Des statistiques font ressortir que les fréquences des répliques diminuent irrégulièrement et ils se caractérisent par des magnitudes moyennes devenant rapidement stationnaires.

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

## I-6. Caractéristiques d'un séisme :

On sait maintenant que les séismes sont provoqués par une rupture dans la lithosphère, ce point de rupture est appelé foyer ou plus scientifiquement hypocentre. Le point se situant à la verticale du foyer est appelé épicentre, c'est à ce niveau que les secousses les plus importantes seront ressenties. Ces secousses sont dues à une libération d'énergie, sous forme de chaleur et d'émission d'ondes sismiques. Plus la surface de la rupture et le déplacement sont importants, plus la quantité d'énergie libérée, plus les secousses sont violentes.

### I-6.1. Les différents types de séismes :

Un séisme résulte d'une secousse plus ou moins importante et qui peut avoir quatre origines :

➤ Rupture d'une faille : le séisme résultant de cette origine est appelé "séisme tectonique". Ce séisme est de loin le plus dévastateur et le plus violent des séismes connus à ce jour. L'existence de ce séisme est provoquée par des mouvements de plaques.

➤ Apparition de magma : le séisme résultant de cette origine est appelé séismes volcaniques. Ces séismes résultent d'une accumulation de magma dans la chambre magmatique d'un volcan. Les séismes provoqués par cette origine sont des microséismes car ils sont peu violents donc peu destructeurs.

➤ Craquements des calottes glaciaires se répercutant dans la croûte terrestre, le séisme résultant de cette origine est appelé "séisme polaire". En considérant que le réchauffement climatique est d'origine humaine alors on pourrait dire que d'une part les causes de ce séisme après 2000.

➤ Explosion ou effondrement d'une cavité, le séisme résultant de cette origine est appelé séisme artificiel. Ces séismes sont dus à certaines activités humaines comme l'extraction minière, les barrages, explosions souterraines ou nucléaires. Ces séismes sont tout de même de faible magnitude sauf quelques exceptions qui ont une magnitude moyenne mais jamais élevée.

# Chapitre I : Généralités sur les séismes

## I-6.2. Magnitude et intensité d'un séisme :

### Magnitude :

La magnitude est une notion instaurée en 1935 par le sismologue Charles Francis Richter. Elle représente la quantité d'énergie libérée par le séisme. Plus le séisme libère de l'énergie plus la magnitude sera élevée. Elle est calculée à partir de l'amplitude maximale des ondes sismiques enregistrée sur le sismogramme en tenant compte de la distance à l'épicentre, la profondeur de l'hypocentre ou encore la fréquence du signal. Il n'y a qu'une seule valeur de magnitude pour un séisme donné. La magnitude n'est pas une échelle mais une fonction logarithmique. A ce jour le séisme le plus violent a été localisé au Chili, en 1960 atteignant une magnitude de 9.5 sur l'échelle de Richter [1].

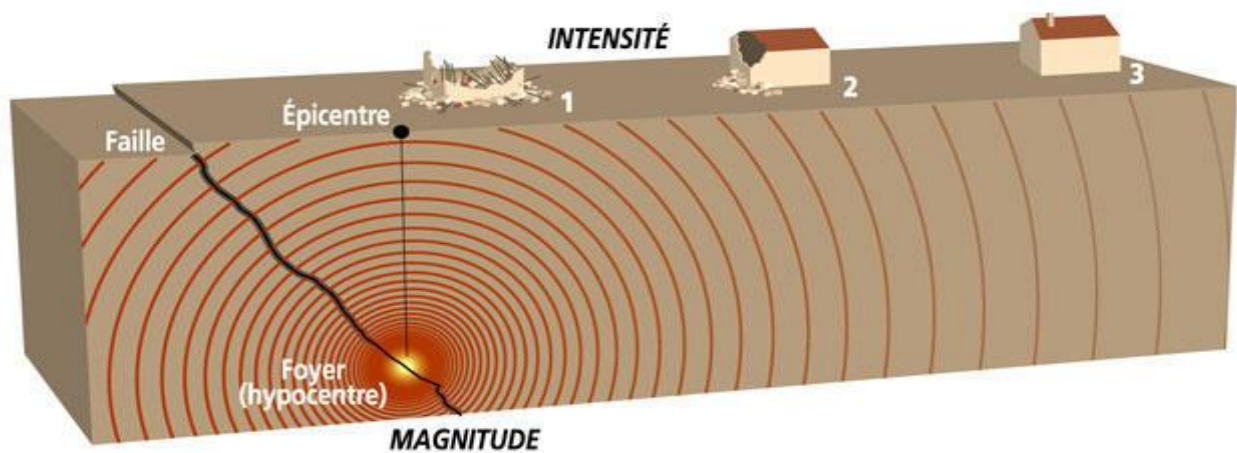


Figure (I-3) : présentation schématique caractéristique d'un séisme

### Intensité :

L'intensité caractérise le niveau de sévérité de la secousse au sol, elle témoigne du ressenti de la population, d'éventuels dommages associés sur l'environnement ou sur les constructions. Contrairement à la magnitude, cette évaluation ne nécessite aucune mesure instrumentale on pourra alors dire que cette évaluation se fait à l'échelle macroscopique et elle est toujours notée en chiffres romains allant de 1 à 12 (I à XII). L'intensité ne prend pas en compte, seulement le séisme mais aussi l'environnement où l'intensité a été prise. L'intensité qui est évaluée comme étant la plus forte du séisme se trouve au niveau de l'épicentre. L'échelle de référence de l'intensité est actuellement, en Algérie, l'échelle EMS 98.

## Chapitre I : Généralités sur les séismes

Magnitude	Ordre de grandeur du nombre de séismes par an dans le monde		
> 0	100 millions	I	Secousse non perceptible
1	10 millions	II	Secousse à peine perceptible
2	1 million	III	Secousse faible ressentie de façon partielle
3	100 000	IV	Secousse largement ressentie
4	10 000	V	Réveil des dormeurs
5	1 000	VI	Frayeurs
6	100	VII	Dommmages aux constructions
7	10	VIII	Destruction de bâtiments
8	1	IX	Dommmages généralisés aux constructions
9	1 tous les 10 ans	X	Destruction générale des bâtiments
		XI	Catastrophe
		XII	Changement de paysage
<b>L'échelle de MAGNITUDE mesure l'énergie libérée par le séisme.</b> Elle ne varie pas quand on s'éloigne de l'épicentre		<b>L'échelle d'INTENSITE EMS-98 (European Macroseismic scale 1998) définit les effets du séisme sur l'homme et les constructions.</b> Elle diminue en principe quand on s'éloigne de l'épicentre.	

**Tableau (I-1) : Echelle de magnitude (Richter) et échelle d'intensité EMS 98**

### I-6.3. Les différentes échelles :

#### L'échelle de Mercalli :

Cette échelle est une échelle de mesure des effets locaux d'un séisme que l'on peut traduire par intensité du séisme. Elle est définie sur 12 degrés. L'échelle de Mercalli sera modifiée en 1964 par Karnik pour être appelé "Echelle MSK", puis par l'European Macroseismic Scale (échelle EMS), qui est actuellement utilisée en Europe et en Algérie.

#### L'échelle de Richter :

Cette échelle est une échelle sismique de référence qui évalue l'énergie des séismes grâce à la valeur de magnitude. Elle fut instaurée en 1935.

C'est une échelle logarithmique : la magnitude, dite de Richter, correspond au logarithme de la mesure de l'amplitude des ondes de volume (de type P et S), à 100 km de l'épicentre.

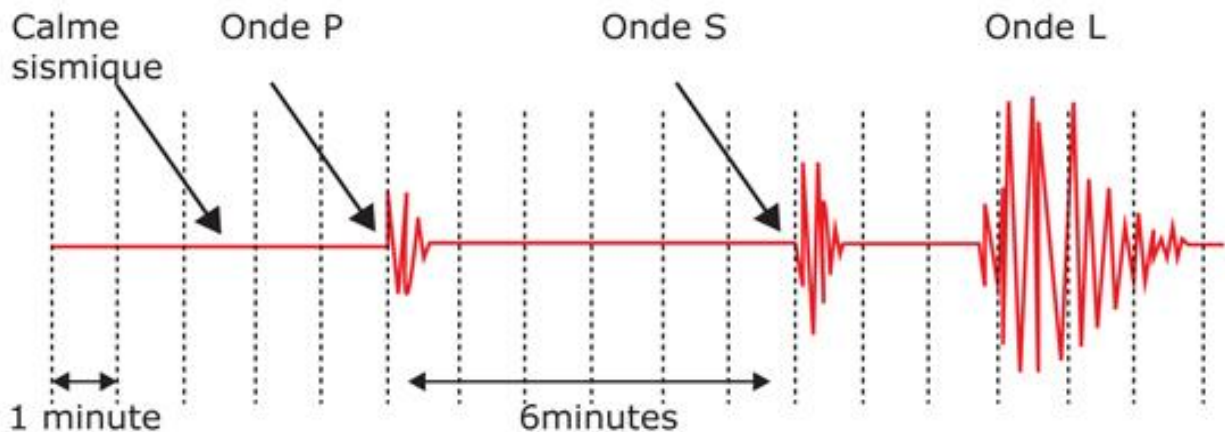
La formule utilise le logarithme décimal :  $ML = \log A - \log A_0$  où A représenté l'amplitude maximale relevée par le sismographe et  $A_0$  une amplitude de référence.

# Chapitre I : Généralités sur les séismes

## I-7. Nature des ondes sismiques :

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la terre et les ondes de surface se propagent parallèlement à sa surface.

Ces différents types d'ondes se succèdent sur des sismogrammes (Figures I-4)



Figures (I-4) : d'un sismogramme et ses différentes composantes

### I-7.1. Les ondes de volume :

Appartiennent à deux catégories :

**Les ondes P**, ou ondes primaire : ce sont des ondes de compression ou ondes longitudinales qui se propagent dans tous les milieux. Les particules se déplacent selon des mouvements de dilatation et de compression avant- arrière dans la direction de propagation de l'onde.

Ce sont les ondes sismiques les plus rapides (6Km/s près de la surface), responsables des tous premiers bruits et grondements sourds perçus au début d'un séisme. Elles sont particulièrement bien enregistrées sur la composante verticale des sismomètres ;

## Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

**Les ondes S, ou ondes secondaires :** ondes de cisaillement ou ondes transversales ; elles ne se propagent que dans les solides. Le mouvement des particules s'effectue dans un plan vertical, perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Moins rapides que les ondes P (1 à 7 fois moins rapides approximativement), elles sont après celles-ci sur les sismogrammes (figure I-4) et sont enregistrées principalement sur les composantes horizontales du sismomètre.

### I-7.2. Les ondes de surface :

Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre donnent naissance à des ondes de surface ne concernant le sol que sur une profondeur extrêmement faible.

Les ondes de surface les plus importantes sont les suivantes :

#### a) Ondes de Rayleigh :

Enregistrées sur trois composantes des sismomètres ; ce sont les moins rapides. Elles sont assimilables à des vagues, animées de mouvements elliptiques dans les sens horizontaux et verticaux. Leurs vibrations durent plusieurs minutes.

#### b) Ondes de Love :

Ce sont des ondes de cisaillement qui oscillent dans un plan horizontal. Elles se propagent à des vitesses de l'ordre de 4Km/s. Elles sont enregistrées uniquement sur les composantes horizontales des sismomètres. Elles provoquent un ébranlement horizontal du sol. Elles sont la cause principale des destructions et des dégâts provoqués aux édifices ;

# Chapitre I : Généralités sur les séismes

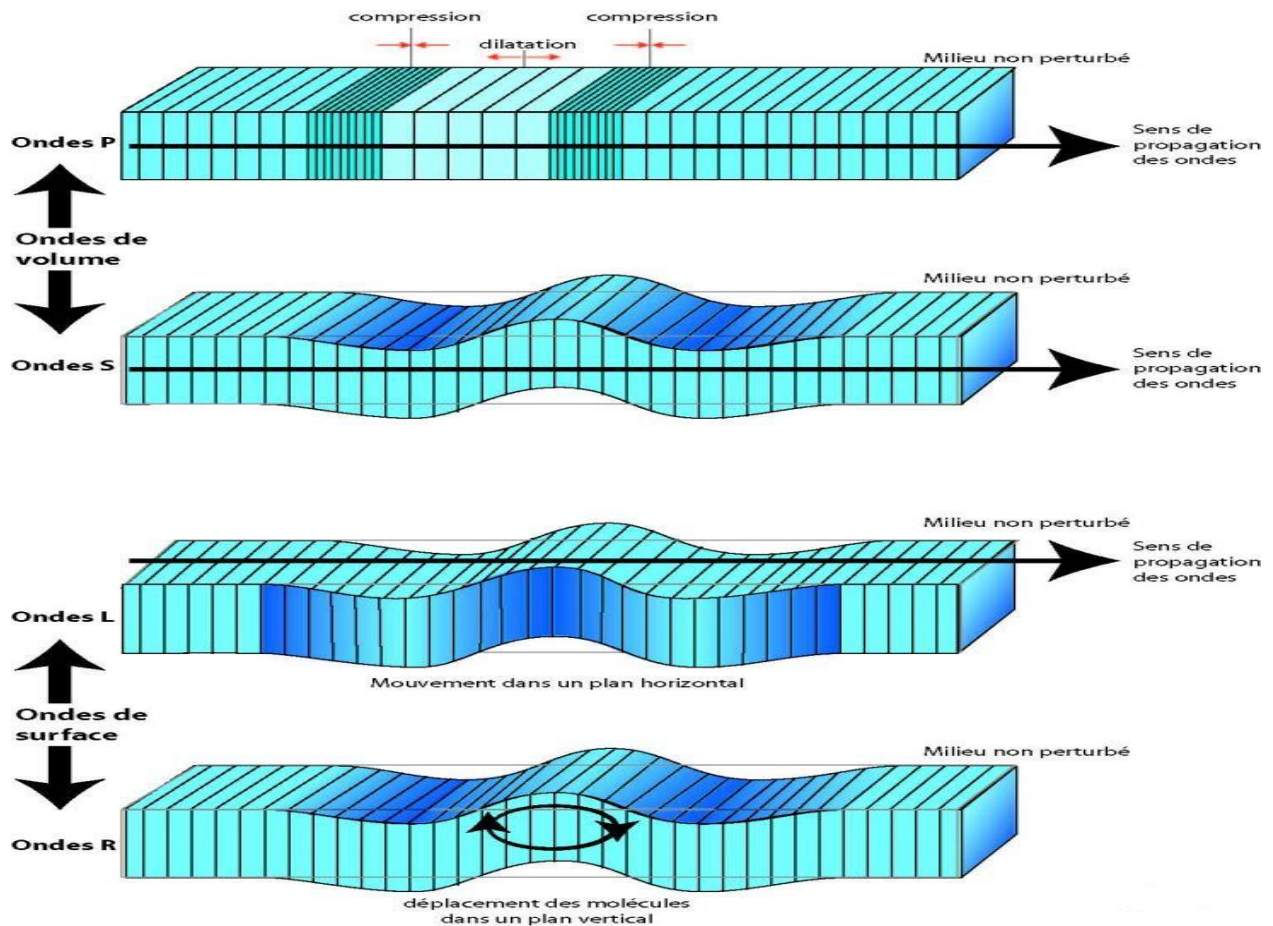


Figure (I-5) : Les différents types d'ondes sismiques

## I-8. Les séismes en Algérie :

L'Algérie, bien que n'étant pas parmi les régions les plus sismiques du monde, elle reste dans la partie nord une région à sismicité modérée.

Les séismes du bassin méditerranéen résultent du rapprochement complexe des plaques africaines et eurasiennes. Cette convergence qui s'effectue à des vitesses de l'ordre de 2 cm/an est à l'origine des orogènes alpines et pyrénéennes.

Les foyers sont essentiellement superficiels. Ils sont distribués le long de zones de failles et de plissements anciens. Ces séismes sont localisés surtout dans la région nord et nord-ouest du littoral algérien.

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

---

## I-9. Critères de classification selon le « RPA99 version 2003 » :

Les critères de classifications selon le « RPA 99, version 2003 » sont : les zones sismiques, l'importance des ouvrages, les sites, les systèmes de contreventement et la régularité des ouvrages.

Qui a été approuvé par la commission technique permanente pour le contrôle technique de la construction(CTP) lors de sa réunion du 4 Décembre 1999 se situe dans la continuité des documents précédents.

Le règlement en question vise deux objectifs :

Protéger les vies humaines en évitant l'effondrement des ouvrages sous l'effet d'un séisme majeur, rare, en limitant le choix des systèmes constructifs ainsi que la hauteur des ouvrages en fonction de l'importance et de la sismicité de la zone d'implantation,

Limiter les dommages dans les éléments secondaires fragiles dus à des déformations imposées par un séisme modéré plus fréquent.

Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité (Figure I-6) [2] :

- Zone 0 : Sismicité négligeable ;
- Zone I : Sismicité faible ;
- Zone II- a / II-b : Sismicité moyenne ;
- Zone III : Sismicité élevée.

# Chapitre I :Généralités sur les séismes

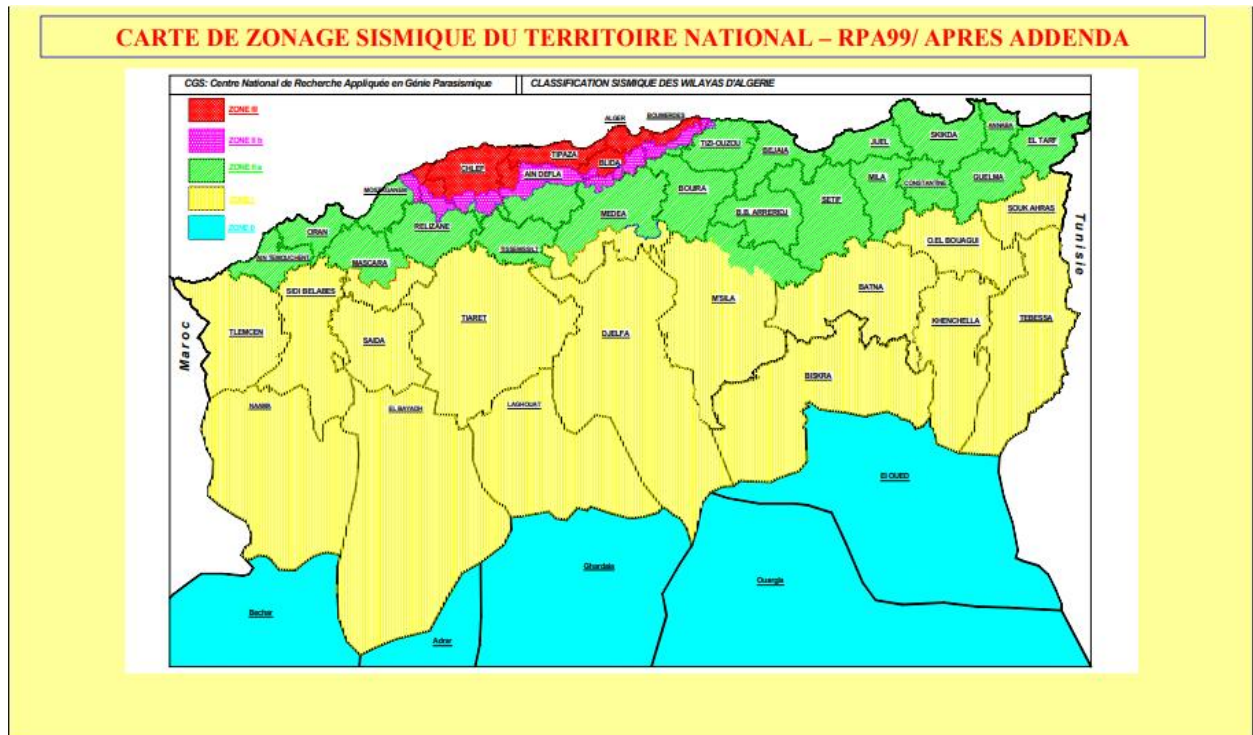


Figure (I-6) : Carte de zonage sismique du territoire national d'Algérie (RPA99v 2003)

## 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 structures. 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 effets a permis de développés et de perfectionner les règles humaines, que pour la sauvegarde des collectivités.

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

### Chapitre II : Notion sur les ponts

#### Introduction :

Au cours de la conception et la réalisation d'un passage routier (voie ferrée ou route) souvent en confronte avec un obstacle, en générale il existe deux type d'obstacles :

- Naturel (brèche, cours d'eau).
- Artificiel (route, voie ferrée, canal)

On a deux solutions pour assurer la continuité de l'ouvrage :

- ✓ L'élimination de l'obstacle (obturé une brèche, détourner un cours d'eau).
- ✓ Conserver l'obstacle mais on réalise (un tunnel au-dessous, faire une déviation, ou un pont au dessus)

#### II-1. Définition d'un pont :

Un pont est une construction qui permet de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voie de communication, vallée, ravin, canyon) en passant par-dessus cette séparation. Le franchissement supporte le passage d'humains et de véhicules dans le cas d'un pont routier ou d'eau dans le cas d'un aqueduc. Les ponts font partie de la famille des ouvrages d'art et leur construction relève du domaine du génie civil.

Il y'a cinq classes de ponts sont définies selon leur structure : les ponts voûtés, les ponts à poutres, les ponts en arc, les ponts suspendus et les ponts haubanés. Des critères spécifiques conduisent pour chacune de ces classes à définir un type qui lui est propre. Le matériau utilisé est un des critères de différenciation commun à l'ensemble des classes. Selon le matériau, les modes de conception, de construction, de surveillance et d'entretien seront différents. Chaque type de pont est adapté à une plage de portée, les ponts suspendus permettant les plus grandes portées.

#### II-2. Les principaux éléments d'un pont :

**II-2.1. Les fondations :** Les efforts de toute nature agissant sur l'ouvrage se trouvent reportés sur les poutres qui les transmettent aux appuis constitués par les piles et les culées qui, elles, à leur tour ont pour mission de les reporter au sol par l'intermédiaire des fondations.

## Chapitre II : Notion sur les ponts

On a trois types des fondations :

- ✓ Des fondations superficielles (semelles et radiers)
- ✓ Des fondations semi-profondes (puits)
- ✓ Des fondations profondes (pieux)

**II-2.2. Les appuis :** Ils transmettent à la fondation le poids propre de la structure et les surcharges routières, Ils existent deux types d'appuis :

**Les piles :** sont appelées appuis intermédiaires et permettent :

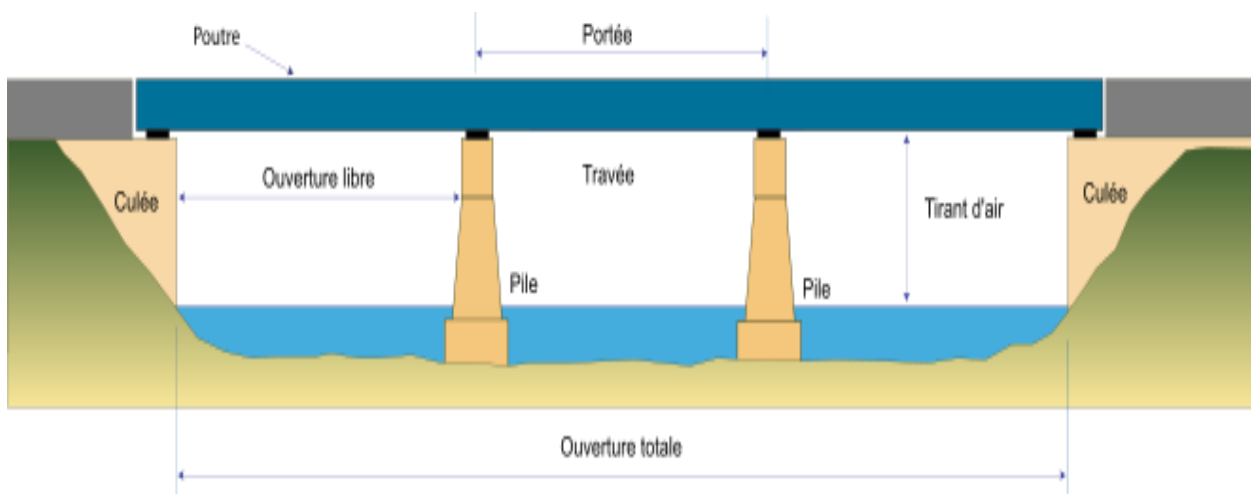
- Transmettre les charges provenant du tablier
- Liaison pile/tablier
- Résister et transmettre les efforts directs

**Les culées :** sont appelées appuis d'extrémités et permettent :

- Transmettre les efforts en provenance du tablier
- Résister à la poussée des terres
- Permettre l'accès au tablier
- Permettre la visite des appareils d'appuis

**II-2.3. Le tablier :** c'est l'élément sur lequel repose la voie de circulation. Il comporte essentiellement des dalles.

Le tablier comporte aussi des équipements nécessaires à son utilisation : les gardes corps, les dispositifs de retenue, les trottoirs, les corniches, etc.



**Figure (II-1) : Schéma pour la composition d'un pont.**

## Chapitre II : Notion sur les ponts

### II-3. Les types de ponts courants :

#### II-3.1. Ponts dalle :

Les ponts-dalles constituent le type d'ouvrage le plus répandu et le plus construit en monde, 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. Leur longueur varie d'une quinzaine à une soixantaine de mètres et parfois dépasse une centaine de mètres. Leurs travées déterminantes se situent entre une douzaine et une trentaine de mètres.

Ces ouvrages sont d'aspect élancé et restent cependant robustes, grâce à leur monolithisme. La simplicité de leur forme et leur grande réserve de sécurité constituent par ailleurs des atouts importants, ainsi que leur souplesse dans l'adaptation à toute difficulté d'implantation grâce à leur construction par coulage en place (dans le cas de tracé biais ou courbe en plan ou en élévation). Ces avantages s'avèrent d'autant plus intéressants que ce type d'ouvrage demeure parmi les solutions de franchissement les plus économiques, sur le double plan de l'investissement et de l'entretien [3].

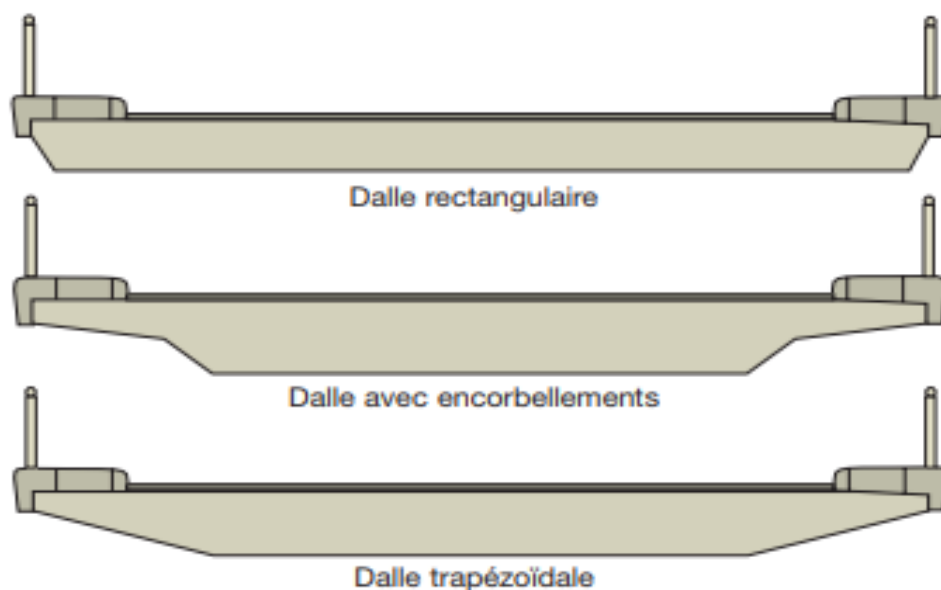


Figure (II-2) : Coupes types d'un pont dalle.

## Chapitre II : Notion sur les ponts

### II-3.2. Ponts à poutres :

Les ponts à poutres désignent tous les ponts dont l'organe porteur est une ou plusieurs poutres droites. Ils n'exercent qu'une réaction verticale sur leurs appuis intermédiaires ou d'extrémités et les efforts engendrés dans la structure sont principalement des efforts de flexion. Deux critères permettent de différencier les poutres : la forme ou le matériau, le croisement des deux permettant de déterminer un grand nombre de poutres. Il existe quatre formes de poutres : les poutres à âmes pleines, les poutres caissons, les poutres treillis et les poutres en arc, ces dernières sont néanmoins classées parmi les ponts en arc car l'organe porteur principal reste l'arc. Le matériau de constitution de la ou des poutres peut être le métal, le béton armé, le béton précontraint, le bois ou, plus récemment, des matériaux composites tels que la fibre de carbone.

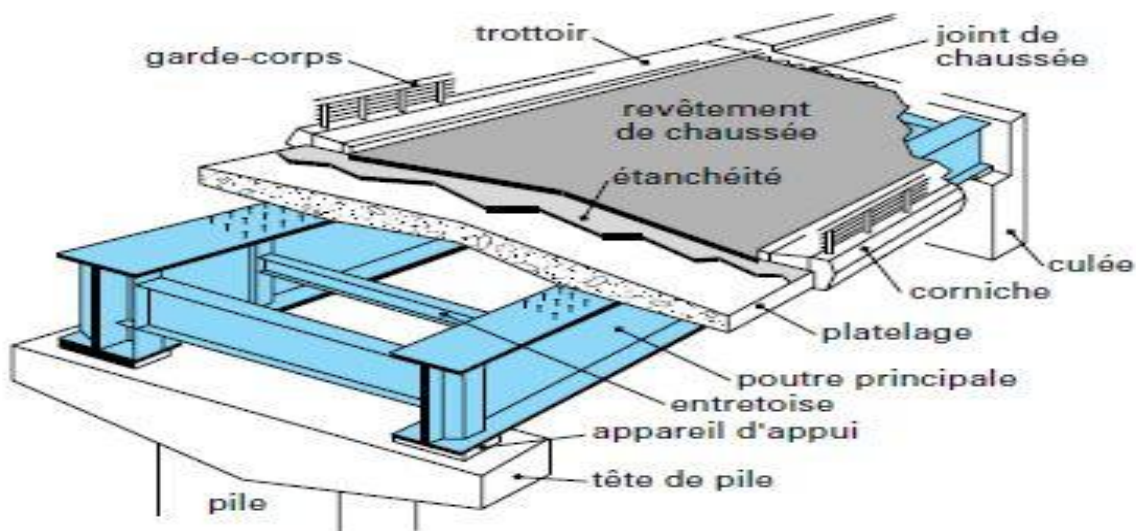


Figure (II-3) : Eléments constitutifs d'un pont à poutres sous chaussées

#### II-3.2.1. Ponts à poutres en béton armé :

Les poutres en béton armé sont parallèles sous la chaussée, presque toujours à âme pleine, solidarisiées transversalement par des voiles en béton armé formant entretoise. La couverture (le hourdis) est une dalle en béton armé qui joue le rôle de membrure supérieure de liaison des poutres. Selon les dimensions respectives et modes de liaison de ces deux éléments, on distingue trois types de tabliers de ponts en béton armé : les tabliers à hourdis nervuré, les tabliers tubulaires (il existe un hourdis inférieur en plus du hourdis supérieur, on peut aussi parler de

## Chapitre II : Notion sur les ponts

---

caisson) et les tabliers en dalle pleine (il n'y a pas de poutre). Ces ponts sont coulés en place. Beaucoup de ponts à portée modérée franchissant routes et autoroutes sont de ce type.

### II-3.2.2. Ponts à poutres mixtes acier/béton :

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.

### II-3.2.3. Ponts à poutres en béton précontraint :

Les ponts à poutres préfabriquées en béton précontraint sont souvent très économiques, pour des portées allant jusqu'à une trentaine de mètres en précontrainte par pré-tension, et pour des portées comprises entre 30 et 50 m en précontrainte par post-tension. Ils sont d'autant plus intéressants que le nombre de poutres à réaliser est plus grand car des moyens de mise en place appropriés se justifient aisément.

**NB.** Les ouvrages composés uniquement de béton armé ou précontraint, malgré l'acier qu'ils possèdent, ne sont pas considérés comme des ponts mixtes.

### II-4. Classes de ponts –routes :

Les ponts routes sont rangés en 3 classes en fonction de la largeur roulable et de leur destination :

#### 1ère classe :

Ce sont d'une part les ponts supportant des chaussées dont la largeur roulable est supérieure ou égale à 7 m et d'autre part les ponts supportant des bretelles d'accès aux chaussées citées plus haut.

#### 2ème classe :

Ils sont rangés en deuxième classe les ponts qui supportant des chaussées à deux voies de largeur roulable comprise entre 5,50 m et 7m valeurs limites exclues.

## Chapitre II : Notion sur les ponts

### 3<sup>ème</sup> classe :

Ils sont rangés en troisième classe les ponts qui supportant des chaussées à une ou deux voies de largeur roulable inférieure ou égale à 5,50m.

**La largeur roulable**, est la largeur comprise entre dispositifs de sécurité ou bordures de trottoir. Elle comprend outre la chaussée, les bandes d'arrêt d'urgence et les bandes dérasées.

**La largeur chargeable**, se déduit de la largeur roulable en déduisant 50 cm le long des dispositifs de sécurité. Les bordures de trottoir ne sont pas des dispositifs de sécurité [4].

### II-5. Charges et surcharges :

#### II-5.1. Charges permanentes :

- Ensemble des actions totales du poids propre.
- Poids propre du remblai sur la dalle supérieure.

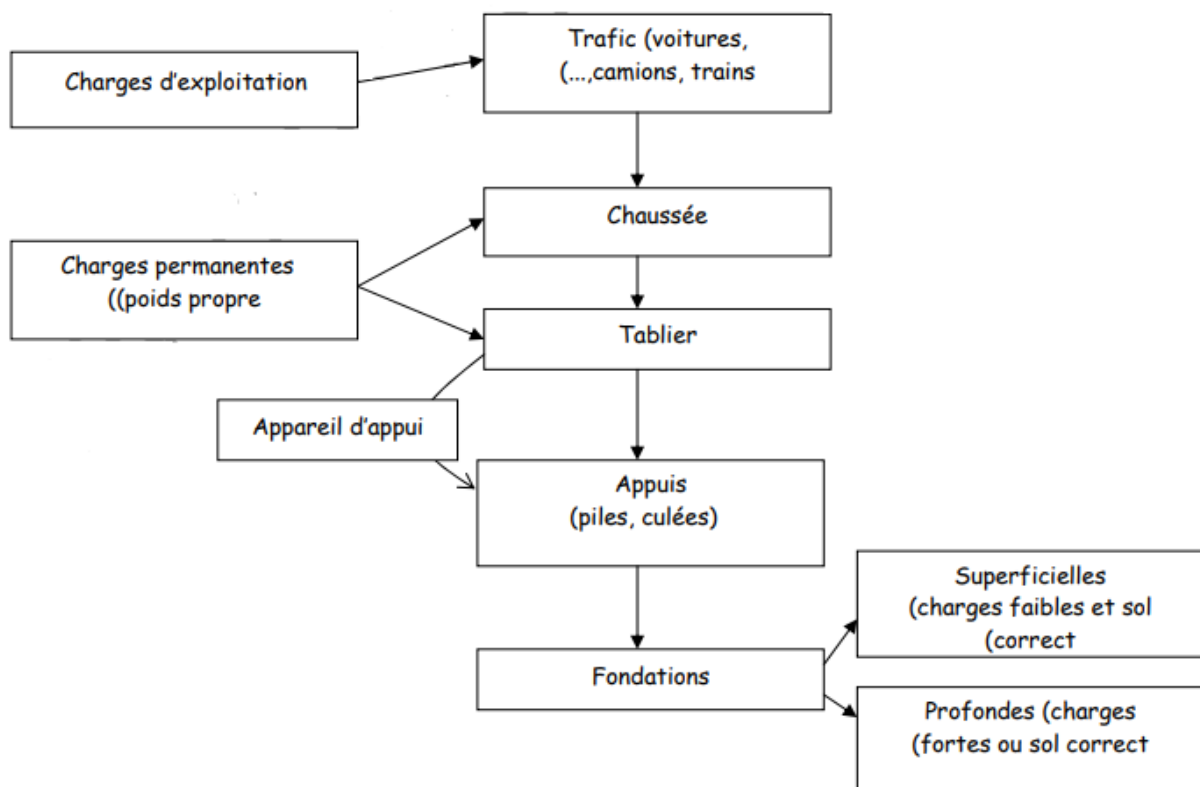


Figure (II-4) : Descente de charge d'un pont

## Chapitre II : Notion sur les ponts

---

### II-5.2. Surcharges d'exploitation :

Sont prises en compte deux natures de surcharge ; les surcharges routières A et B et les surcharges des trottoirs.

Les systèmes A et B sont distincts et indépendants, en ce sens que pour le calcul d'un effet donné, les deux systèmes ne peuvent être appliqués simultanément.

#### II-5.2.1. Surcharges des trottoirs :

Les trottoirs et les pistes cyclables, qui leur sont assimilées, supportent des charges différentes selon le rôle de l'élément structural considéré et selon qu'il s'agit de ponts portant à la fois une ou des chaussées et un ou des trottoirs, ou des ponts réservés exclusivement à la circulation des piétons et des cycles.

Une charge générale de  $150 \text{ kg/m}^2$  est appliquée pour la détermination des fermes maîtresses qui supportent à la fois une chaussée et un ou des trottoirs.

Une charge uniforme de  $450 \text{ kg/m}^2$  est appliquée pour la détermination des autres éléments, autres que les fermes maîtresses.

#### II-5.2.2. Système de surcharges A :

La chaussée supporte une surcharge uniforme dont l'intensité A, exprimée en kilogrammes par mètre carré (en  $\text{kg/m}^2$ ), est donnée en fonction de la longueur surchargée, l, exprimée en mètres par la formule :

$$A(l) = 230 + \frac{36000}{l+12} \quad \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right)$$

Avec :  $l$  : longueur chargée (portée du pont).

Dans le sens transversal la largeur de la zone surchargée comprendra un nombre entier de voies de circulation, et variant suivant la classe du pont, la valeur d'A(l) est multipliée par les coefficients  $a_1$  du tableau suivant :

## Chapitre II : Notion sur les ponts

Nombre de voies		1	2	3	4	$\geq 5$
Classe du pont	1 <sup>ère</sup>	1	1	0,9	0,75	0,7
	2 <sup>ème</sup>	1	0,9	-	-	-
	3 <sup>ème</sup>	0,9	0,8	-	-	-

Tableau (II-1) : Les valeurs du coefficient  $a_1$

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.

Avec :  $a_2 = \frac{V_0}{v}$  .

V 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.

Dans le sens longitudinal, les zones surchargées seront déterminées par la considération de la ligne d'influence de l'effet envisagé. Les limites de ces zones devront coïncider avec les zéros de la ligne d'influence. Si l'on ne surcharge qu'une zone, la longueur surchargée  $l$  sera la différence des abscisses de ces zéros. Si l'on surcharge plusieurs zones, contiguës ou non, la longueur surchargée  $l$  sera prise égale à la somme des longueurs de ces zones surchargées [4].

### II-5.2.3. Système de surcharges B :

Le système de surcharges B comprend trois systèmes distincts dont il y aura lieu d'examiner indépendamment les effets pour chaque élément d'ouvrage :

- Le système Bc se compose de camions-types ;
- Le système Be se compose d'un essieu isolé ;
- Le système Br se compose d'une roue isolée.

## Chapitre II : Notion sur les ponts

---

Les deux premiers systèmes Be et Br s'appliquent à tous les ponts quelle que soit leur classe ; le système Bt ne s'applique qu'aux ponts de première ou de deuxième classe. Les charges du système B sont frappées de majoration dynamique et le coefficient de majoration applicable aux trois systèmes Be, Br et Bt est le même pour chaque élément d'ouvrage. Coefficient de majoration dynamique :

$$\delta = 1 + \alpha + \beta$$

$$\alpha = \frac{0,4}{(1 + 0,2 * L)} \quad L = \text{Portée du pont .}$$

$$\beta = \frac{0,6}{1 + 4 \left(\frac{G}{S}\right)} \quad G = \text{Charge permanente de la dalle.}$$

S = Masse totale de camions de 30T ou essieux-tandems de 16T

La valeur de S à introduire dans la formule est celle obtenue après multiplication par le coefficient be ou bt [4].

### Un camion-type du système Bc (camion type) :

Un camion type du système Be comporte trois essieux, tous trois à roues simples munies de pneumatiques, et répond aux caractéristiques suivantes :

- Poids total..... 30 tonnes
  - Poids de chacun des essieux arrière ..... 12 t
  - Poids de l'essieu avant..... 6 t
  - Longueur d'encombrement.....10,50 mètres
  - Largeur d'encombrement.....2,50 mètres
  - Distance des essieux arrière.....1,50 mètres
  - Distance de l'essieu avant au premier essieu arrière.....4,50 mètres
  - Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu..... 2 mètres
- 
- Surface d'impact d'une roue arrière : carré de 0,25 m de côté.
  - Surface d'une roue avant : carré de 0,20 m de côté.

On disposera sur la chaussée au plus autant de files ou convois de camions que la chaussée comporte de voies de circulation, et l'on placera toujours ces convois dans la situation la plus défavorable pour l'élément considéré.

## Chapitre II : Notion sur les ponts

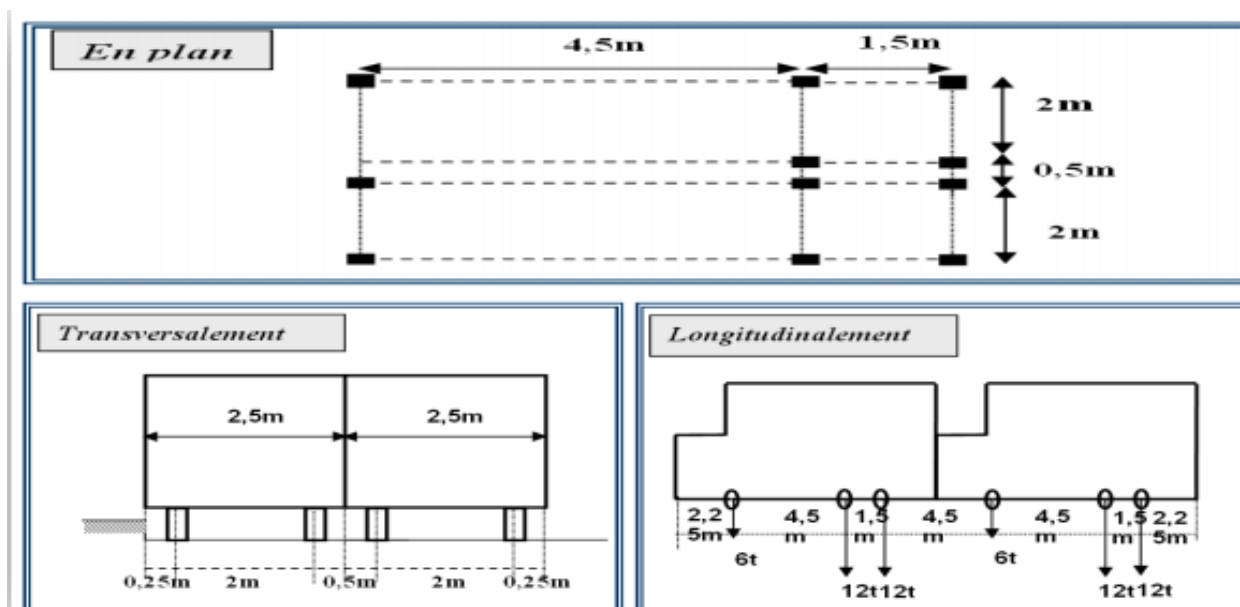
Dans le sens transversal, chaque convoi sera supposé circuler dans l'axe d'une bande longitudinale de 2,50 mètres de largeur. Les diverses bandes pourront être contiguës ou séparées ; les bandes latérales pourront toucher les bords de la chaussée mais non empiéter sur eux.

Dans le sens longitudinal, le nombre de camions par convoi sera limité à deux. La distance des deux camions d'un même convoi sera déterminée pour produire l'effet le plus défavorable. Les divers convois homologues seront disposés de front, tous les camions étant orientés dans le même sens [5].

La valeur des charges du système Bc prise en compte est multipliée par le coefficient  $b_c$ , donné dans le tableau suivant :

Nombre de voies		1	2	3	4	5
<b>Classe du pont</b>	1 <sup>ère</sup>	1,2	1,1	0,95	0,8	0,7
	2 <sup>ème</sup>	1,2	1,00	-	-	-
	3 <sup>ème</sup>	1,00	0,8	-	-	-

**Tableau (II-2) : Les valeurs du coefficient  $b_c$**



**Figure(II-5) : Système de charge Bc**

## Chapitre II : Notion sur les ponts

### II-5.2.4. Surcharges militaires Mc 120 :

Les véhicules des systèmes  $M_C$  peuvent circuler en convoi :

Dans le sens transversal un seul convoi est supposé circuler quelle que soit la largeur de la chaussée.

Dans le sens longitudinal. Le nombre des véhicules de convoi n'est pas limité et la distance des deux véhicules successifs est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable. la distance entre leurs points de contact avec la chaussée devant être au moins égale à 30,50 m.

Les impacts des chenilles sur la chaussée sont dirigés parallèlement à l'axe de celle-ci et peuvent être disposés sur toute la largeur chargeable. Sans pouvoir empiéter sur les bandes de 0,5 m réservées le long des dispositifs de sécurité [4].

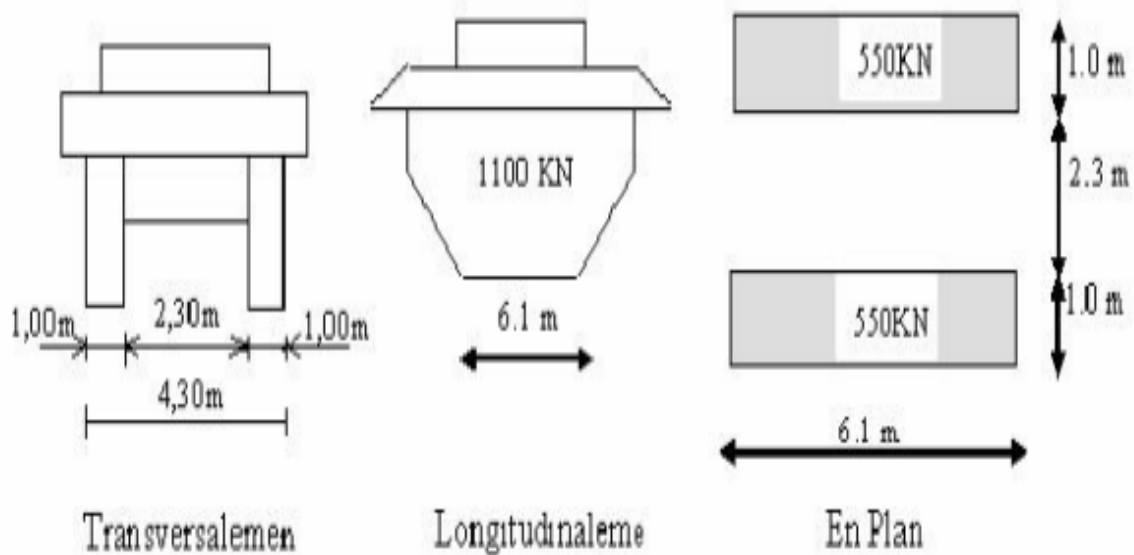


Figure (II- 6) : Système de charge  $M_c120$

## Chapitre II : Notion sur les ponts

---

### II-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.

Etat-limite de service selon le BAEL 91 il y a lieu de considérer :

$$\text{ELU : } 1,35G + \max \left( 1,60 * \max \begin{pmatrix} A(l) \\ Bc \\ Bt \\ Br \end{pmatrix} ; 1,35 * \begin{pmatrix} Mc120 \\ Me120E \end{pmatrix} \right) + 1,60 * \text{trottoir}.$$

$$\text{ELS : } G + \max \left( 1,20 * \max \begin{pmatrix} A(l) \\ Bc \\ Bt \\ Br \end{pmatrix} ; \max \begin{pmatrix} Mc120 \\ Me120 \end{pmatrix} \right) + \text{trottoir}.$$

### Chapitre III : Interaction Sol-Structure

#### III-1. Introduction :

On a également étudié les mouvements du sol support lorsque les ondes sismiques se propagent dans celui-ci avant d'atteindre l'ouvrage dont on cherche à étudier la réponse. La question se pose de savoir comment ces deux phénomènes interagissent et dont quelle mesure le mouvement du support et affecté par la réponse de la structure, dont la réponse sera elle-même modifiée par le mouvement du support. Le terme générique regroupant l'étude de ces phénomènes est désigné dans la littérature sous le nom d'interaction sol-structure [10].

L'interaction entre le sol et les structures est étudiée depuis le 18ème siècle [Linger 1972]. Les premières études se concentrèrent sur la détermination de la pression latérale des terres contre les murs [Heyman 1972]. Plus récemment, des recherches ont été effectuées sur l'influence de la rigidité des conduites enterrées sur la pression des terres à considérer lors de leur dimensionnement [Linger 1972] et par la suite, de la même manière, pour les tranchées couvertes [Tisa et Kovári 1993 ; Kovári et Tisa 1998 ; Plumey et al. 2006 et Plumey 2007] [15].

Ces études ont montré la complexité de l'interaction sol-structure et la nécessité de considérer les propriétés spécifiques du sol ainsi que celle concernant la géométrie et la rigidité de la structure pour déterminer correctement la pression des terres ainsi que le comportement global du système.

#### III-2. Généralités :

Lors d'un séisme les charges appliquées sur une fondation proviennent des forces d'inerties se développant dans la superstructure et des déformations du sol, provoquées par le passage des ondes sismiques, imposées à la fondation. Ces deux types de chargement sont nommés :

\* **Chargement inertielle**

\* **Chargement cinématique**

L'importance de ces chargements dépend des caractéristiques de la fondation ainsi que de la nature des ondes sismiques.

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

---

Le terme générique englobant ces deux phénomènes est appelé Interaction Sol-Structure (ISS) [10].

Cependant le plus souvent les ingénieurs emploient ce terme pour désigner le chargement inertielle en ignorant la part dû au chargement cinématique. Cela provient du fait que :

- \* Dans certains cas l'interaction cinématique est négligeable.
- \* La plupart des règlements parasismiques, excepté certain dont l'Eurocode 8, ne le mentionne pas [9].
- \* Les effets de l'interaction cinématique sont plus difficiles à évaluer rigoureusement que les effets inertiels.

La réponse d'une structure à une action sismique dépend de nombreux paramètres tels que :

- \* La nature du mouvement sismique
- \* Les propriétés dynamiques de l'ouvrage
- \* Les propriétés dynamiques du sol.

Il existe donc une interaction entre la structure et le milieu extérieur, c'est l'interaction sol-structure (ISS). La Figure (III.1) illustre bien le problème de l'ISS. Ce schéma montre le cas général d'une fondation, de type radier, encastrée dans le sol et supportée par des pieux traversant plusieurs couches de sol et se reposant sur une couche rigide ou rocheuse. Le problème de l'ISS reste cependant le même pour tous les types de fondations.

La couche de sol autour de la structure est soumise à plusieurs types d'ondes sismiques :

- des ondes de cisaillement : onde S
- des ondes de dilatation : onde P
- des ondes de surfaces : onde R ou L

La nature des ondes est dictée par des conditions sismologiques, cependant la géométrie, la raideur et l'amortissement du sol modifient le mouvement de ce dernier sous sollicitations sismiques. Ce mouvement modifié correspond au mouvement en champ libre dont la détermination est complexe.

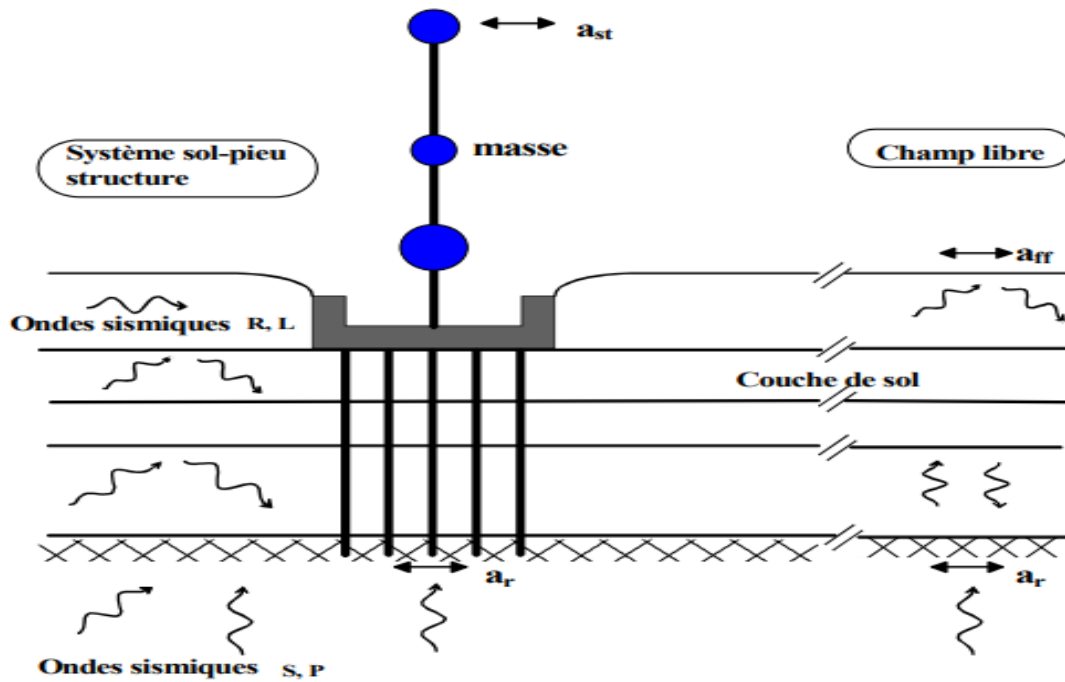


Figure (III.1) : Illustration de l'ISS

Le mouvement des fondations est différent du mouvement du sol en champ libre. En effet, sous sollicitations sismiques, la déformation du sol va obliger les pieux et le radier à se déplacer et par conséquent entrainer la structure supportée. Même sans superstructure, le mouvement de la fondation sera différent de celui du sol en champ libre à cause de la différence de rigidité entre le sol d'une part et les pieux et radier d'autre part. Les ondes incidentes sont également reflétées et dispersées par la fondation et les pieux qui en retour développent des moments de flexion. C'est l'interaction cinématique. Le mouvement des fondations génère des oscillations dans la superstructure qui développe des efforts inertiels et des moments à sa base. Ainsi la fondation, les pieux et éventuellement le sol aux alentours subissent des forces dynamiques et des déplacements supplémentaires. C'est le phénomène d'interaction inertielle.

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

### III-3. Modelé 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.2). 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. On admettra pour l'instant que les 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 ; l'amortisseur rend théoriquement Compte à la fois de l'amortissement radiatif, c'est à dire de la dissipation d'énergie Par les ondes s'éloignant de la fondation, et de l'amortissement propre du matériau "sol", appelé amortissement matériel.

Dans un souci de simplification de la présentation, on supposera que l'amortissement matériel est négligeable devant l'amortissement radiatif (comportement élastique du sol), ce qui est valide pour un milieu homogène et des sollicitations sismiques d'amplitudes faibles à moyennes.

Le système de la figure (III.2) possède 3 degrés de liberté :

- le déplacement horizontal  $u$  de la masse  $m$ ,
- le déplacement horizontal  $u_0$  de la fondation,
- la rotation  $\theta$  de la fondation autour d'un axe horizontal.

Il est soumis à un déplacement horizontal du sol support, harmonique de pulsation  $\omega$  et d'amplitude  $U_g$  [10].

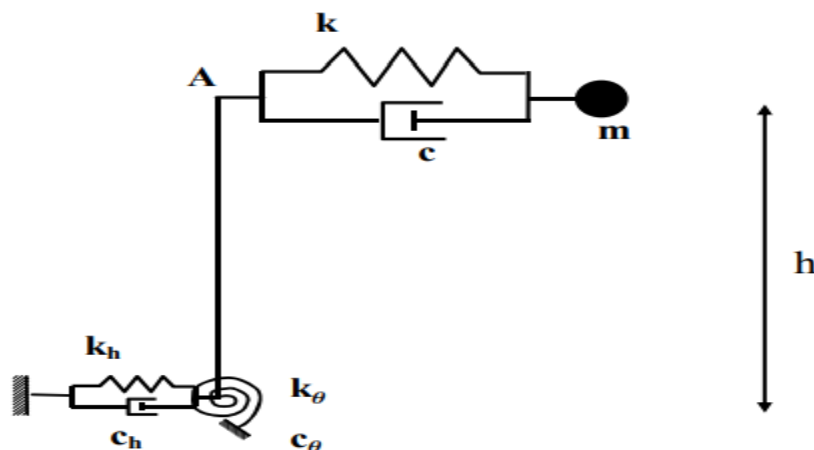


Figure (III.2) : Modèle analogique simplifié d'interaction sol-structure

### III-4. Comportement des sols sous sollicitations sismiques :

#### III-4.1. Comportement élastique du sol :

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

$$\sigma_{ij} = F_{ij} \cdot \varepsilon_{ijk} \dots\dots\dots(III.1)$$

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

#### III-4.2. Comportement élasto-plastique du sol :

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

La contrainte de cisaillement à la circonférence de contact est infinie. Donc, le glissement doit se produire même pour la plus petite force tangentielle. Mindlin [14] admet le glissement en limitant la contrainte de cisaillement à la résistance de frottement, donc le glissement se produit sur une partie de la surface de contact.

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

### III-5. Les effets de l'ISS :

En général, l'ISS entraîne [6], [7] :

- \* Un allongement de la période de vibration du 1er mode notamment, qui peut provoquer une variation en plus ou en moins de la valeur de l'accélération selon la zone où l'on se situe sur le spectre élastique
- \* Un amortissement non négligeable (amortissement radiatif + amortissement propre au matériau-sol) puisque toujours supérieur à celui des matériaux de la structure. Ne pas le prendre en compte conduit à surestimer la réponse
- \* 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
- \* 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.

Pour la majorité des structures usuelles de bâtiments, les effets de l'ISS ont tendances à être bénéfiques puisqu'ils réduisent les moments fléchissant et les efforts tranchants dans les différents éléments de la structure [8].

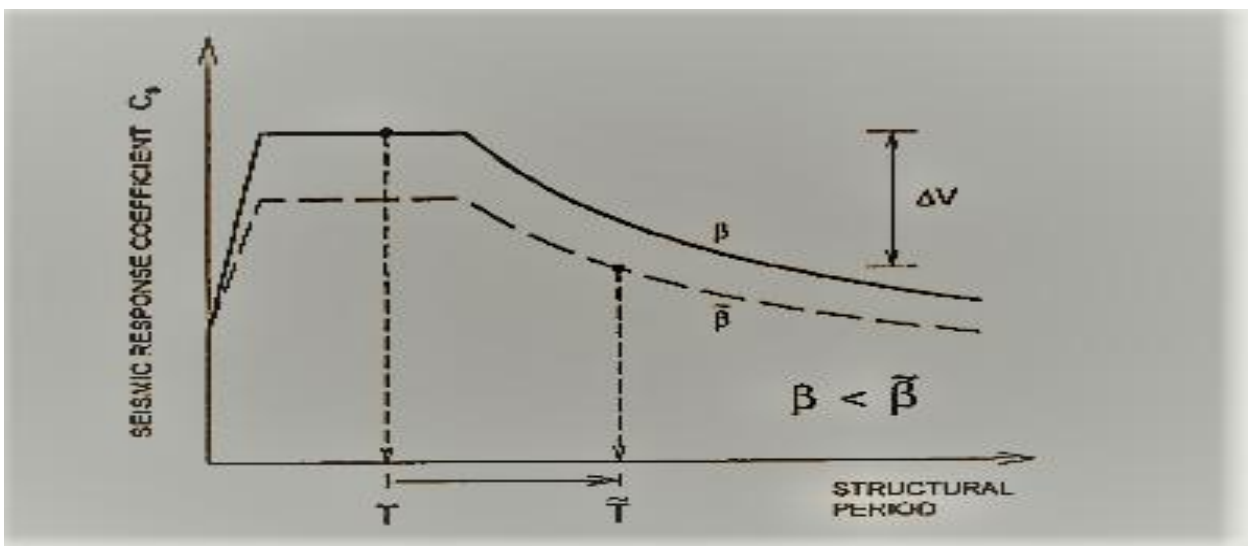


Figure (III.3) : Lecture spectrale montrant les effets de la prise en compte de l'ISS

Les effets favorables correspondent en moyenne à une réduction de la réponse de 10 à 12% et à une aggravation de quelques pour cent lorsqu'ils agissent dans un sens défavorable. [7]

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

---

### III-6. Equation générale formulant un problème d'ISS :

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

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

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{Q_f\} \dots\dots\dots (III.2)$$

Avec

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

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

$$\{u\} = \{u_i\} + \{u_f\} \dots\dots\dots (III.3)$$

On décompose le problème en deux sous problèmes :

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

$$[M_f] \{\ddot{u}_f\} + [C_f] \{\dot{u}_f\} + [k_f] \{u_f\} = \{Q_f\} \dots\dots\dots (III.4)$$

Problème source figure (III-6c)

$$[M] \{\ddot{u}_i\} + [C] \{\dot{u}_i\} + [k] \{u_i\} = \{Q_i\} \dots\dots\dots (III.5)$$

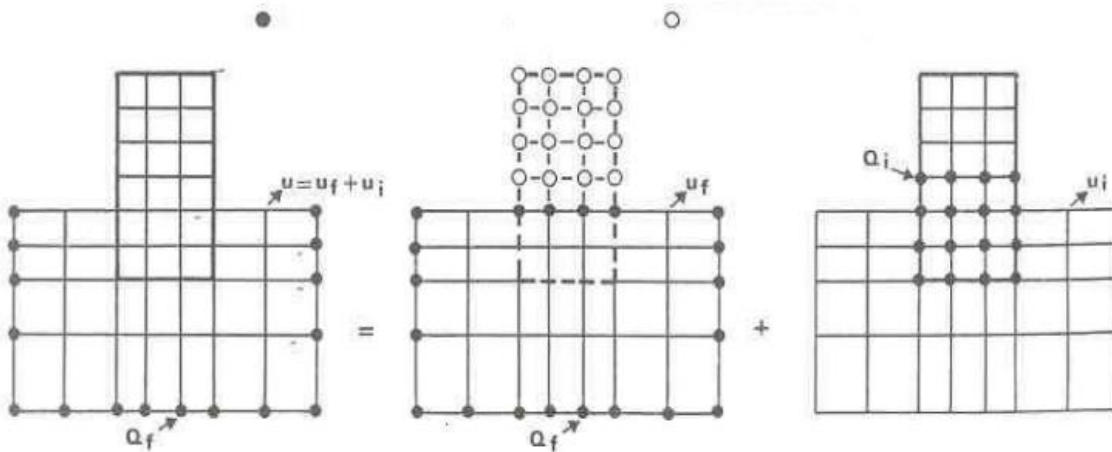
Tel que  $\{Q_i\}$  est donné par

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

$$\{Q_i\} = [[M]- [M_f]] \{ \ddot{u}_f \} + [[C]- [C_f]] \{ \dot{u}_f \} + [[k]- [k_f]] \{ u_f \} = \{ Q_f \}$$

..... (III.6)

A partir de cette dernière équation, on conclue qu'il y a interaction dès qu'il y a différence de masse ou de raideur entre le sol et la structure [10].



**Figure (III.4) : Décomposition du problème d'interaction sol structure**

### III-7. Les différentes méthodes pour prendre en compte l'ISS :

Déférentes méthodes existent pour prendre en compte l'ISS. Elles sont décrites et détaillées dans [Pecker, 1984] [10] ou [Wolf, 1988] [11] ou encore dans la thèse [Crémer, 2001] [12]. Nous allons les présenter brièvement dans ce paragraphe.

#### III-7.1. Les méthodes directes :

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

$$M. \ddot{u} + C. \dot{u} + K. u = -M. I a \dots\dots\dots (III.7)$$

Où **U** représente le vecteur de déplacement du système par rapport au repère de référence soumis à l'accélération **a** par rapport à un repère galiléen, **I** un vecteur contenant des 1 pour les directions soumises à l'accélération **a**, et **M**, **C**, et **K** les matrices de masse, amortissement et raideur du système. Le symbole. Représente les dérivées par rapport au temps.

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

La résolution directe de ce système d'équation utilise les algorithmes classiques de la méthode des éléments finis (méthode de Newton-Raphson et algorithme d'intégration temporelle de Newmark).

La première difficulté est que cette résolution requiert une bonne connaissance des lois de comportements des matériaux et des frontières entre les différentes parties du système. Par exemple, des lois de contacts, entre la fondation et le sol doivent être prises en compte pour bien reproduire les différentes non linéarités

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

Il est d'ailleurs assez difficile de définir de manière précise la frontière de ce massif de sol. En effet, une onde frappant cette frontière peut numériquement se réfléchir et venir solliciter une nouvelle fois la structure, alors qu'en réalité, nous l'avons vu, cette onde part à l'infini et emmène avec elle une partie de l'énergie de la structure et du sol (amortissement radiatif).

Des frontières absorbantes devront donc être ajoutées aux limites du massif de sol pour tenir compte de cet amortissement.

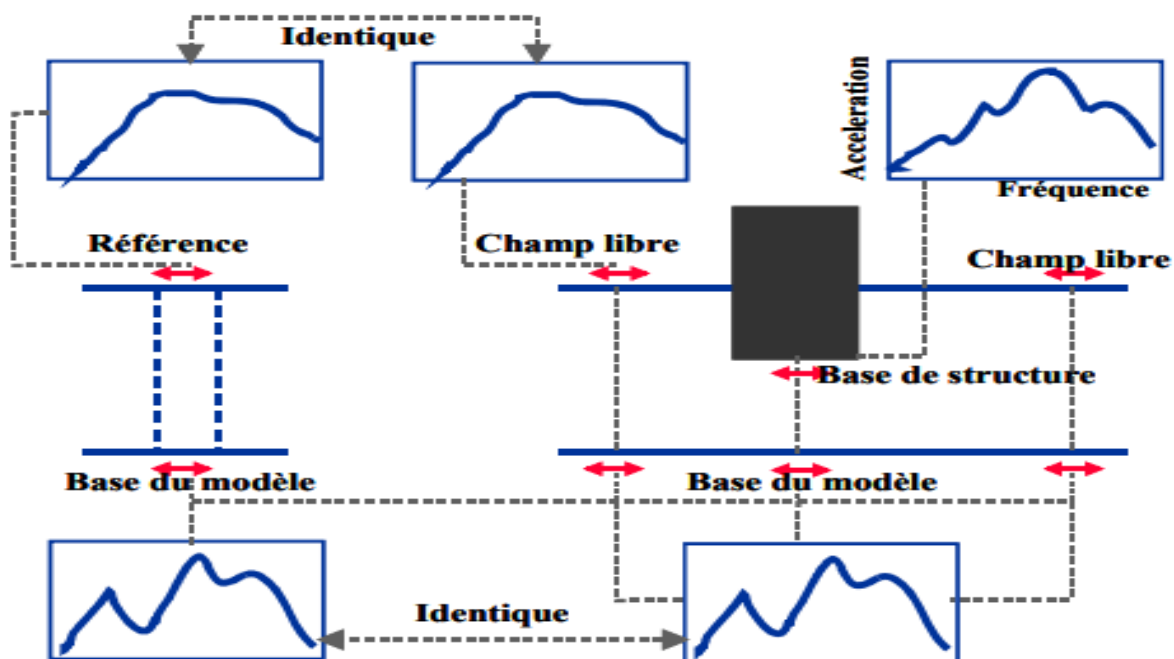


Figure (III.5) : Schématisation d'un problème d'interaction Sol structure en éléments finis

## Chapitre III : Interaction Sol-Structure

### III-7.2. La méthode des sous-structures :

Elle vise à décomposer le problème en la somme de sous problèmes plus simples à résoudre. Dans le cas de fondations rigides cette méthode consiste à utiliser le principe de superposition de [Kausel et al., 1978] [13]. Cette démarche est illustrée par la figure III.6.

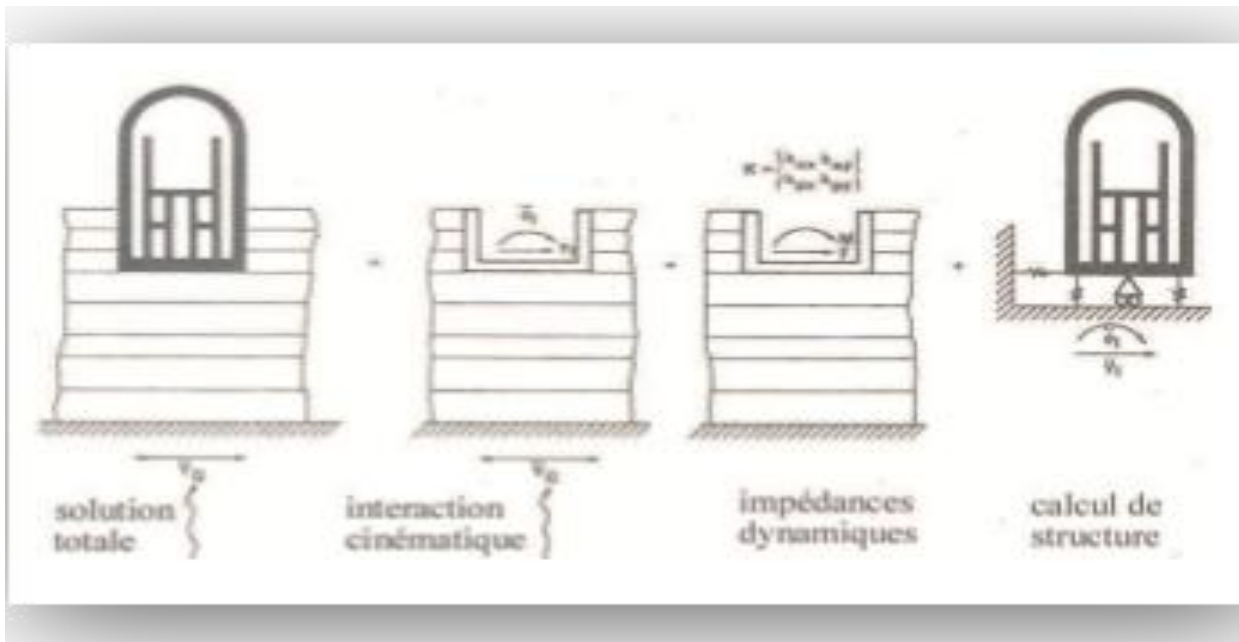


Figure (III.6) : Principe de superposition de Kausel

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

- (i) Nous considérons le milieu {sol + fondation rigide sans masse}. En appliquant la sollicitation sismique à la base de ce milieu nous déterminons l'accélération à laquelle sera soumise la fondation. C'est le calcul de l'interaction cinématique.
- (ii) Nous calculons la matrice d'impédance dynamique de la fondation permettant d'obtenir les raideurs ainsi que les termes d'amortissement dans les différentes directions.
- (iii) Nous calculons la réponse dynamique de la structure supportée par les ressorts d'impédances trouvés en (ii) et soumise à la sollicitation calculée en (i)

### Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code Plaxis »

#### IV-1. Présentation de Plaxis :

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et des divers aspects de la loi de comportement des sols. Le logiciel de calcul PLAXIS est utilisé dans cette étude, il est fondé sur ces principes et il est connu pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants [16].

#### IV-2. Aperçu historique :

Le développement du logiciel PLAXIS a commencé en 1987 à l'université technique de Delft à l'initiative du département allemand des travaux publics et gestion des eaux. L'objectif initial était réservé à développer un code d'éléments finis en 2D facile à manier permettant l'analyse des talus en sols mous implantés aux bords des rivières situées dans les plaines Hollandaises. Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir d'autres domaines de la géotechnique. Avec l'extension des différentes activités géotechniques, une compagnie nommée PLAXIS b. v. a vu le jour en 1993. En 1998, la première version PLAXIS pour Windows a été lancée. En même temps le module kernel pour le calcul en 3D a commencé de connaître son développement. Plusieurs années de développement, il y a eu le lancement en 2001 du programme tunnel PLAXIS 3D.

Le but principal de PLAXIS est de pourvoir un outil adéquat pour une analyse pratique dans le domaine de la géotechnique pour des utilisateurs qui ne soient nécessairement des spécialistes en calcul numérique. Souvent, les ingénieurs considèrent les calculs non-linéaires par éléments finis sont laborieux et consomment beaucoup de temps. Le groupe de recherche et de développement de PLAXIS ont, à cet effet, recherché à mettre à la disposition des utilisateurs un logiciel facile à utiliser, basé sur des procédures théoriques robustes [16].

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

---

### **IV-3. Le code éléments finis PLAXIS :**

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. [17].

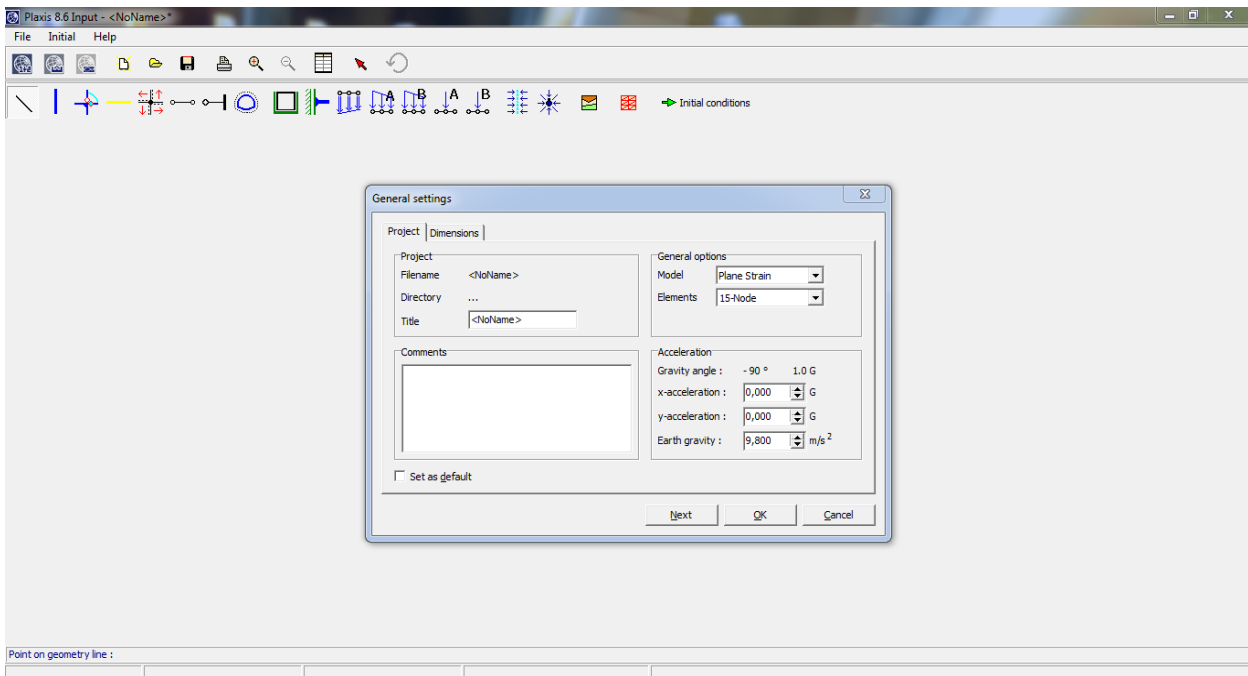
### **IV-4. Paramètres du calcul dans le code d'éléments finis Plaxis :**

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 sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes d'éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels.

La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code élément 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.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implantés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèle de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc. [18].



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

### ▪ **Modèle de Mohr-Coulomb :**

Le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres.

- Deux paramètres élastiques : le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ .
- Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion  $C$  et l'angle de frottement  $\varphi$ .
- Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance  $\psi$ .

Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité [18].

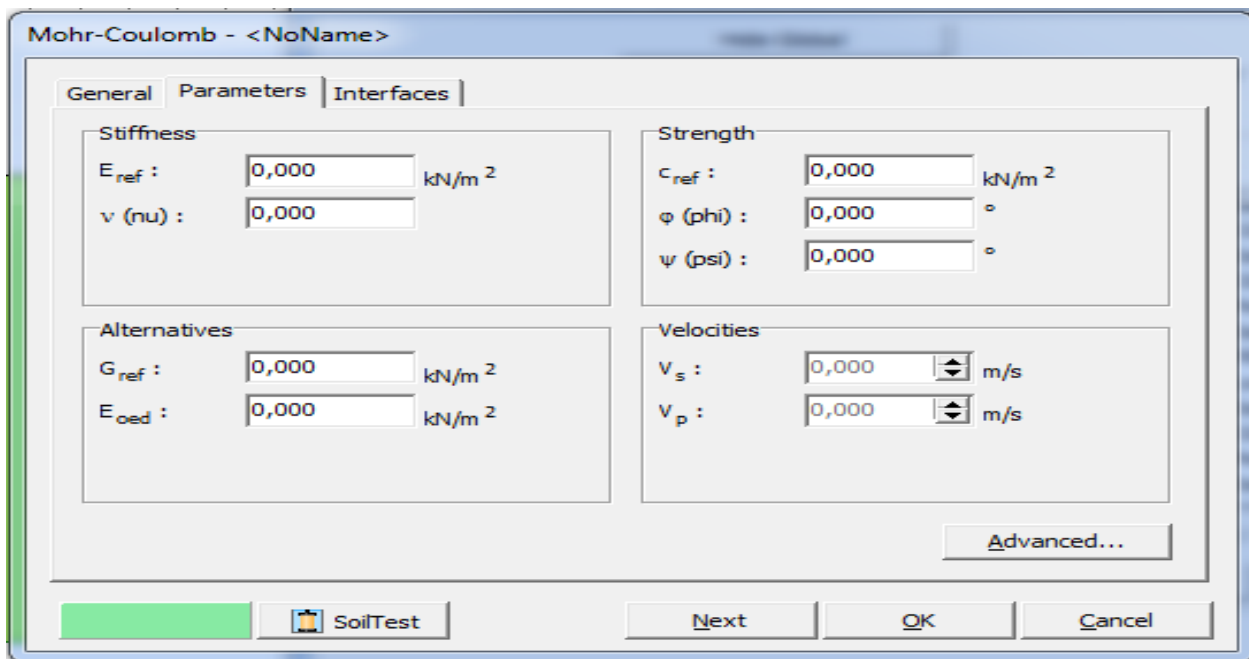


Figure (IV-2) : fenêtre au modèle Mohr-Coulomb

### \*Le 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 [16].

Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{max}$  mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module « moyen », par exemple celui correspondant à un niveau de 50% du déviateur de rupture (Figure IV-3).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple. Dans les boîtes de dialogues, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

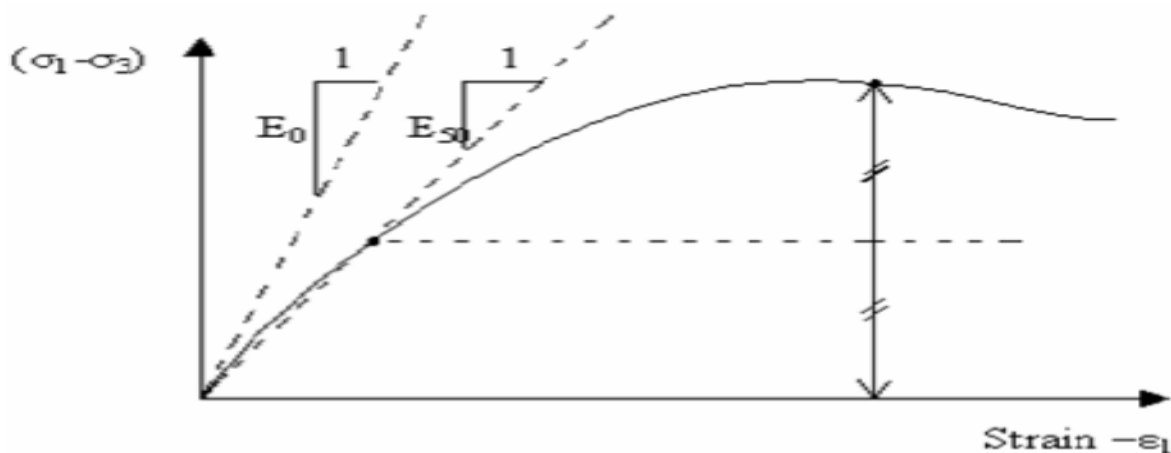


Figure (IV-3) : Définition du module à 50% de la rupture.

### \*Module de cisaillement :

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module d'Young  $E$  et le coefficient de poisson  $\nu$  et par défaut il calcul  $G$ .

L'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G'$ ), si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique [18].

### \*L'angle de frottement :

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à  $35^\circ$  peuvent considérablement allonger les temps de calcul.

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr- Coulomb [18].

### \*La cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0.2 à 1kPa). Pour les analyses en non drainé avec  $\phi_u = 0$ , Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur ou résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre  $c$ -depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans les problèmes (typiquement en kPa) [18].

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### \*L'angle de dilatance :

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

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ$$

$$\Psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ$$

Les cas où  $\Psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (liquéfaction statique).

La valeur  $\Psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes [18].

### IV-5. Le système d'options du code Plaxis :

#### \* Les conditions aux limites en déplacement :

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

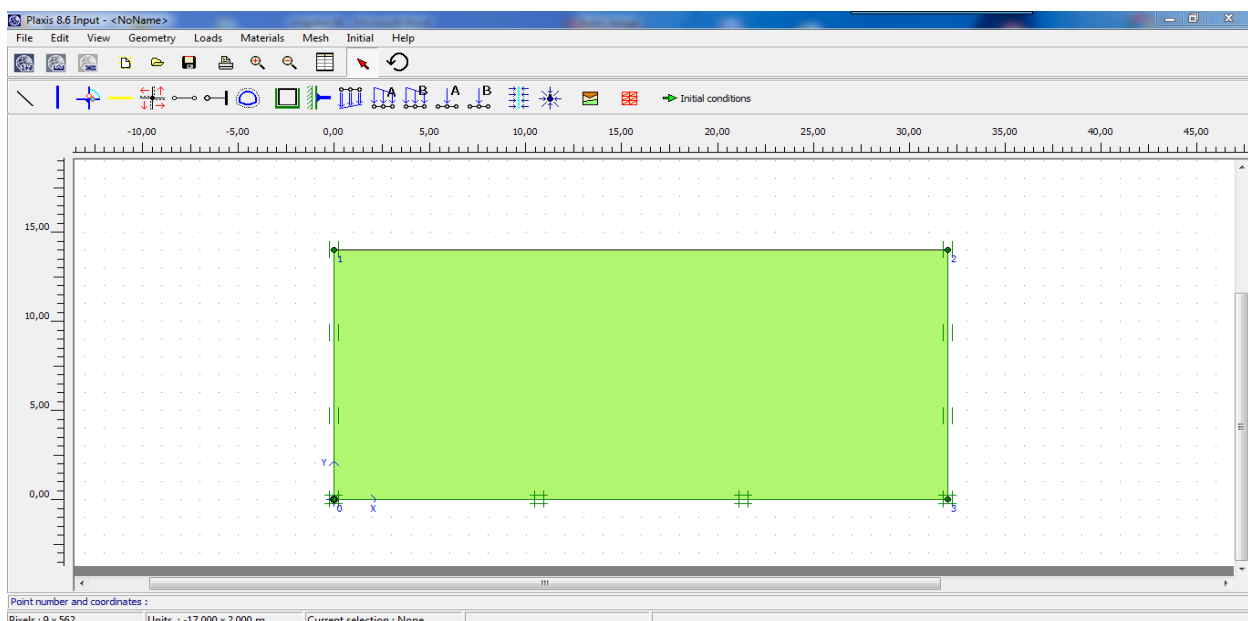


Figure (IV-4) : Condition aux limites.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### \* Le Maillage :

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

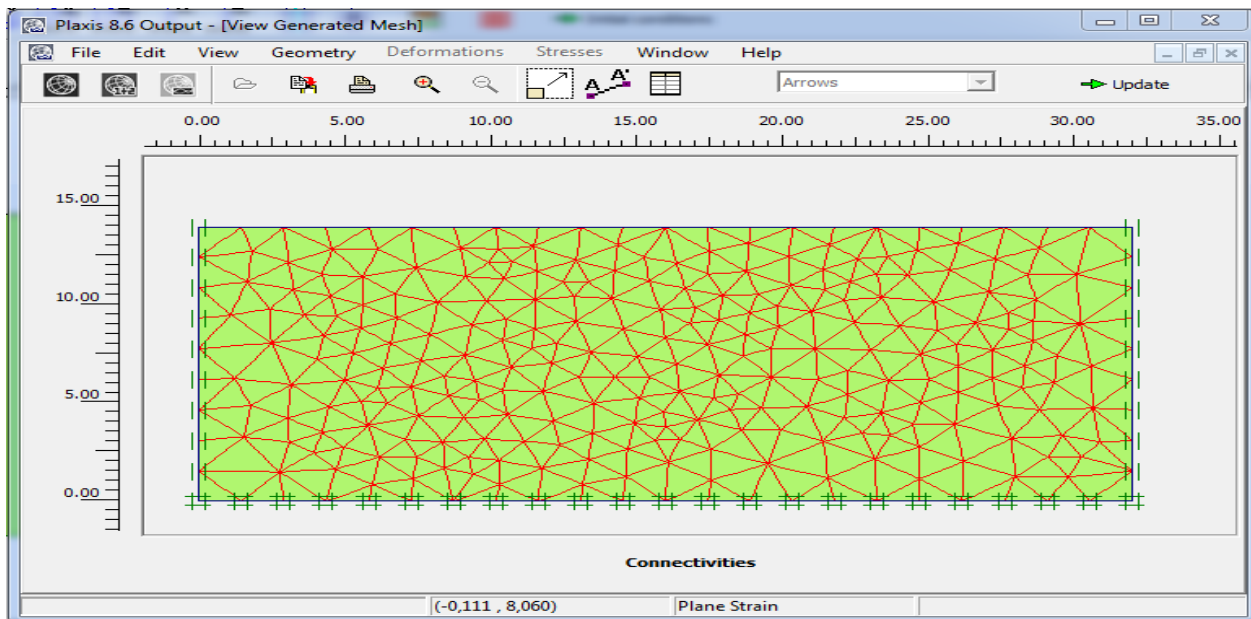


Figure (IV-5) : Maillage.

### \* Les contraintes initiales dues au poids des terres :

Peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

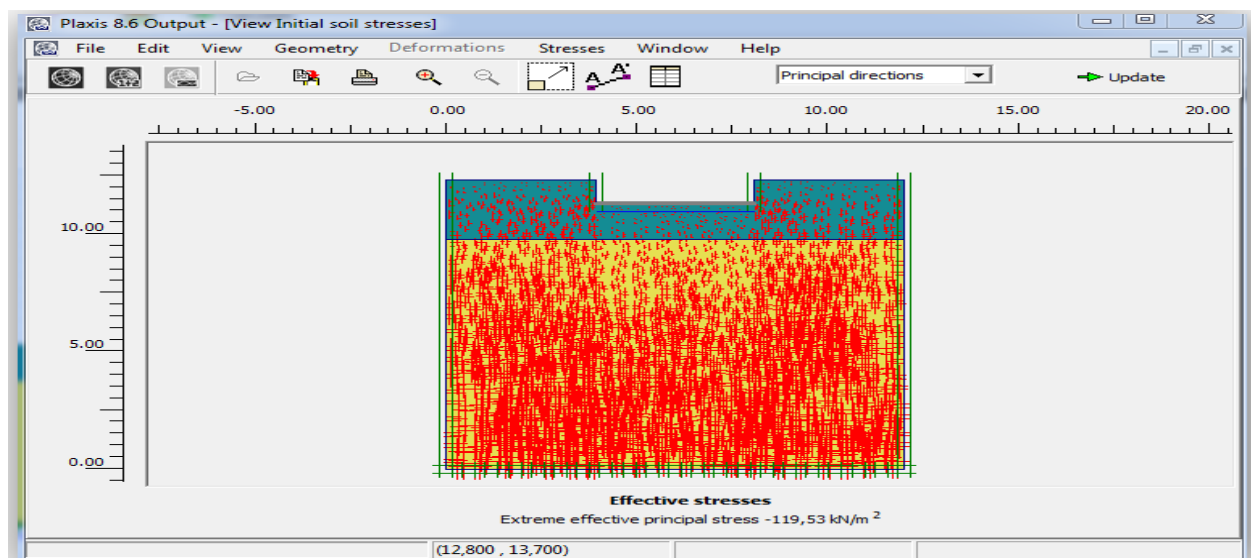


Figure (IV-6) : Contraintes initiales (condition  $K_0$ ).

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

---

### \* **Chargement :**

Deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, les charges réparties à n'importe quelle ligne de la géométrie, sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.

### \* **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).

### \* **Le coefficient de sécurité :**

C'est une notation très importante en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une qualité considérable de données, supposant une réduction proportionnelle de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue pas un état réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis.

### **IV-6. 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-7) soit une sollicitation sismique (Figure IV-8).

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

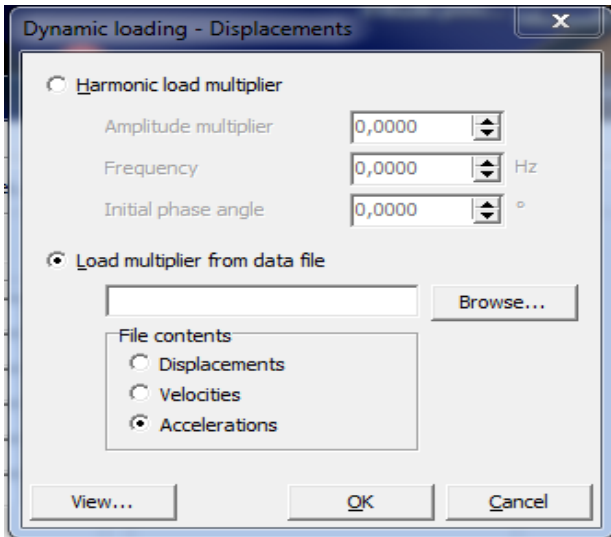


Figure (IV-7) : Sollicitation sismique.

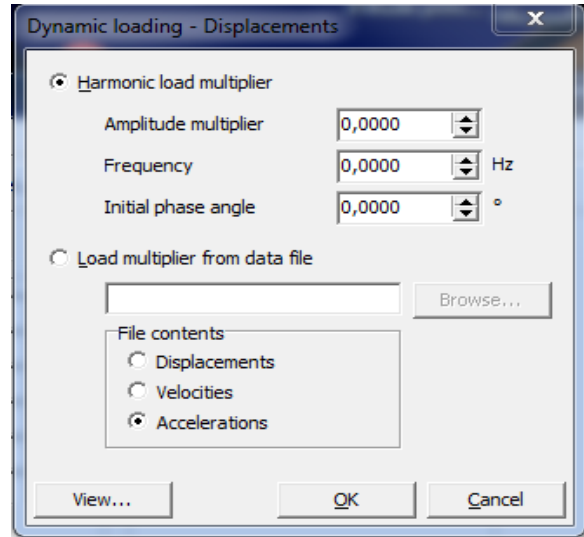


Figure (IV-8) : Sollicitation harmonique.

### IV-7. Modèle géométrique retenu :

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présentée sur la figure (IV-8). Il est constitué d'une fondation de largeur  $L=4,1$  m proposant sur deux couches de sol composent la géologie du site : une couche '01' de 2,5 m de profondeur et une couche '2' de 9,8 m de profondeur. Et de longueur  $l=12$  m. pour des raisons de système seule les moitiés du modèle est représentée ici :

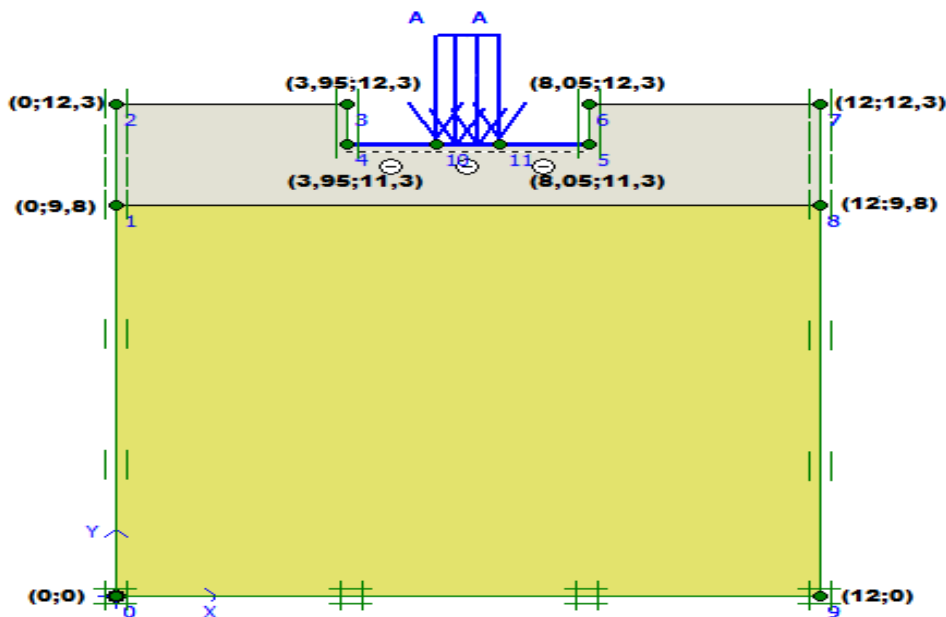


Figure (IV-9) : Profil géométrique retenu

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### IV-7.1. 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-7.2. Caractéristiques des matériaux :

#### 1) Propriétés des couches de sols :

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

Paramètres	symbole	unité	S2	S1	Béton
Modèle type	Mel	–	Mohr-Colomb	Mohr-Colomb	Linear -elastic
Profondeur h	h	m	5	2,5	1
Poids volumique sec	$\gamma_{dry}$	KN/m <sup>3</sup>	17	18	25
Poids volumique humide	$\gamma_{wet}$	KN/m <sup>3</sup>	19	19	25
Perméabilité horizontale	$K_x$	m/s	0	0	0
Perméabilité verticale	$K_y$	m/s	0	0	0
Module d'Young	$E_{ref}$	KN/m <sup>2</sup>	135000	300000	2200000
Coefficient de poisson	$\nu$	–	0,2	0,4	0,1
Cohésion	$C_{ref}$	KN/m <sup>3</sup>	0,2	0,2	–
Angle de frottement	$\Phi$	°	34	32	–
Angle de dilatation	$\psi$	°	4	2	–
Facteur de rigidité de l'interface	$R_{INTER}$	–	Rigide	Rigide	Rigide

Tableau (IV-1) : Propriétés du sol constituant le massif.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

$R_{int}$  Facteur de rigidité de l'interface

$g = 9,8m/s^2$  (L'accélération de la pesanteur)

### 2) fondation :

Elle constituée en béton armée dont les propriétés sont de l'élément structural. Les propriétés de l'élément structural sont résumées dans le tableau (IV-2) :

Paramètres	Nome	Unité	Valeur
Type de comportement	Matériel type	-	Elastique
Rigidité de normale	EA	KN/m	$1,4*10^7$
Rigidité de flexion	EI	KN/m <sup>3</sup>	$2,4*10^5$
Epaisseur équivalente	D	m	0,454
Poids	W	KN/m/m	35
Coefficient de poisson	$\nu$	-	0,2
Rayleigh damping	$\alpha, \beta$	-	0

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

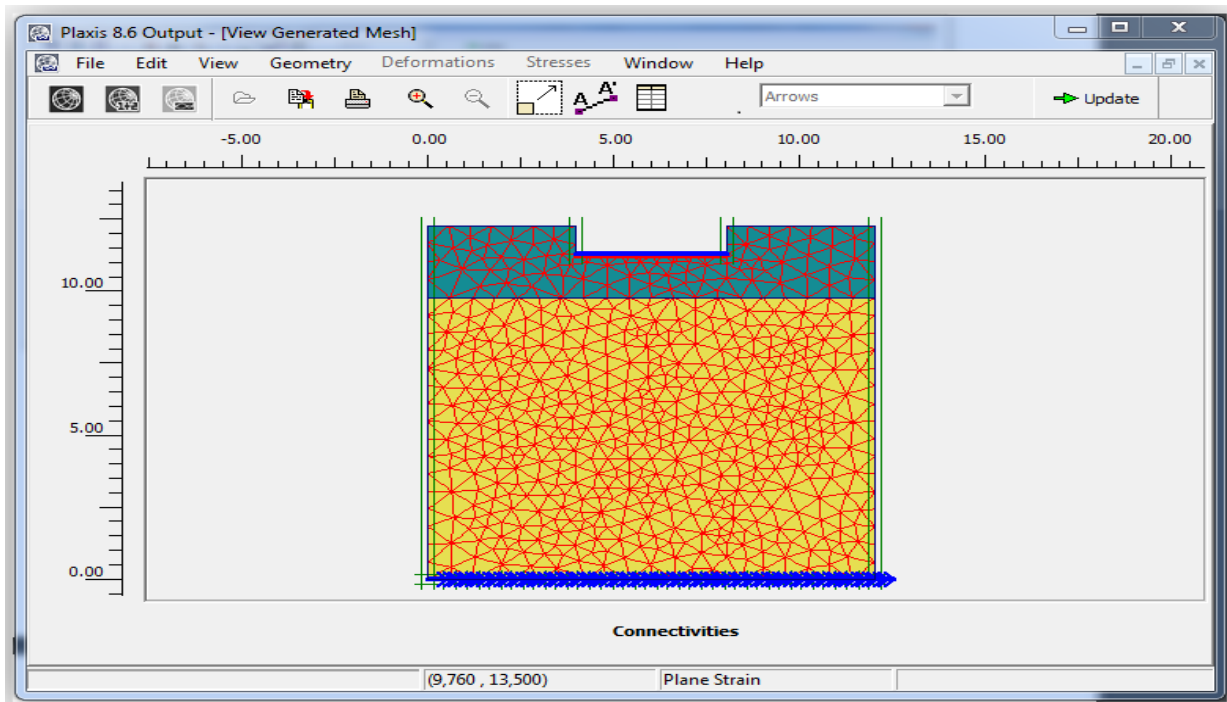
A=950KN (la charge statique sur fondation).

### IV-7.3. Génération du maillage :

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires à 15noeds, On règle la finesse du maillage (global Coarseness) sur « fine ».

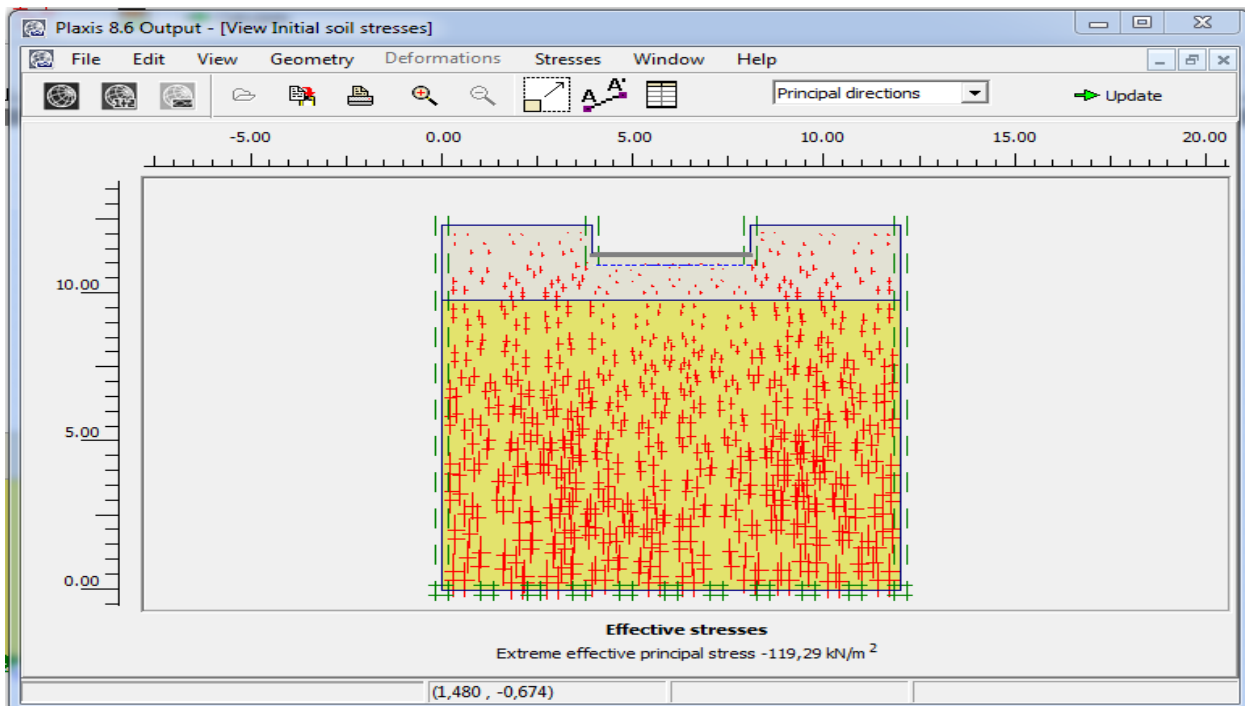
La figure (IV- 10) présenté le maillage effectué du modèle.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »



### IV-7.4. Conditions initiales :

Les conditions initiales fixées correspondent à un état de type  $K_0 = 1$  (contraintes de type géotechnique) représenté sur la (figure IV-11).

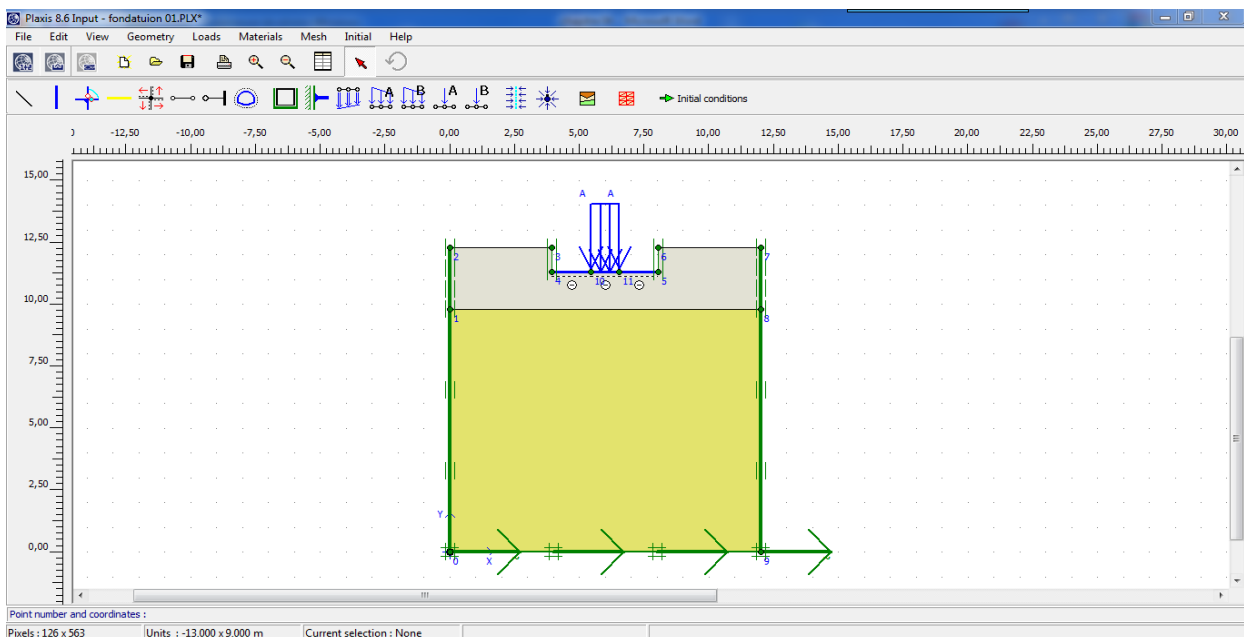


### IV-7.5. Sollicitation sismique :

Dans cette application numérique, un type de sollicitation sismique sous forme de déplacements imposé à la base du modèle de calcul ont été considérées :

- Une accélération horizontale simulant le mouvement horizontal.

La figure (IV-12) présente la sollicitation imposée à la base du modèle de calcul.



**Figure (IV -12) : Sollicitation sismiques horizontal.**

### IV-7.6. Procédure de calcul :

Est faite en trois phases dans l'ordre suivant

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

2-Phase (1) : Calcul plastique avec le procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system A=950 KN/m<sup>2</sup> ».

3-Phase (2) : Calcul plastique avec le procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system A=950KN », « Négative interface ».

4-Phase (3) : Chargement dynamique<< dynamique analyses >> et << load multiplier>>

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

En calcul dynamique, nous avons utilisé 'le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA99 V2003' « Mr. Hamitouche Amar » (Figure IV-13). 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.

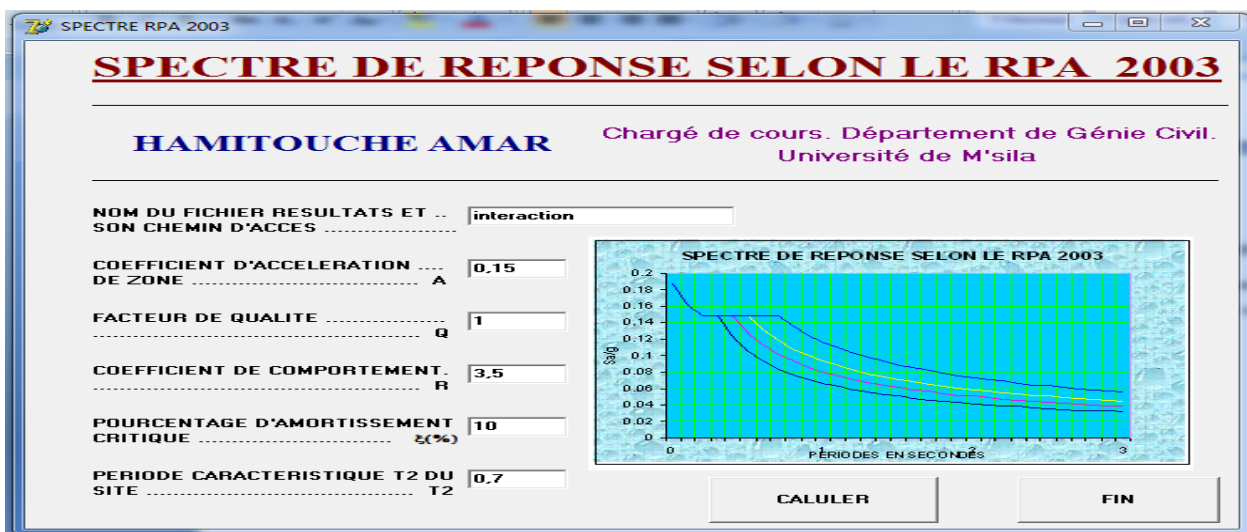


Figure (IV-13) : Le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA 99 V 2003

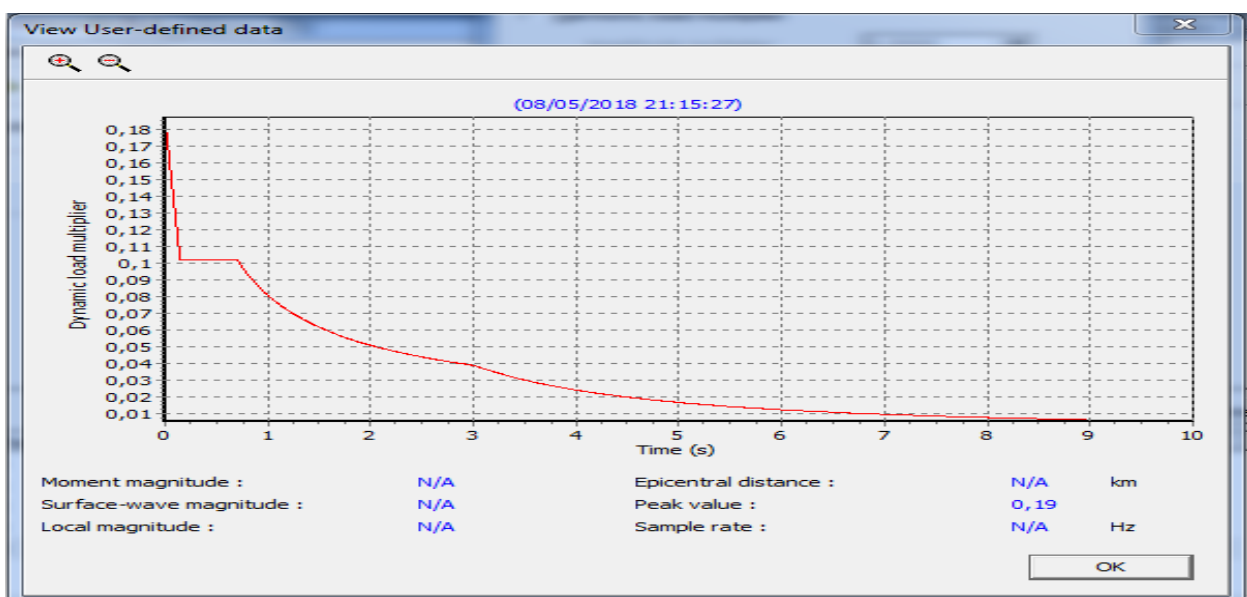


Figure (IV-14) : Spectre réponse selon RPA99 version 2003.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

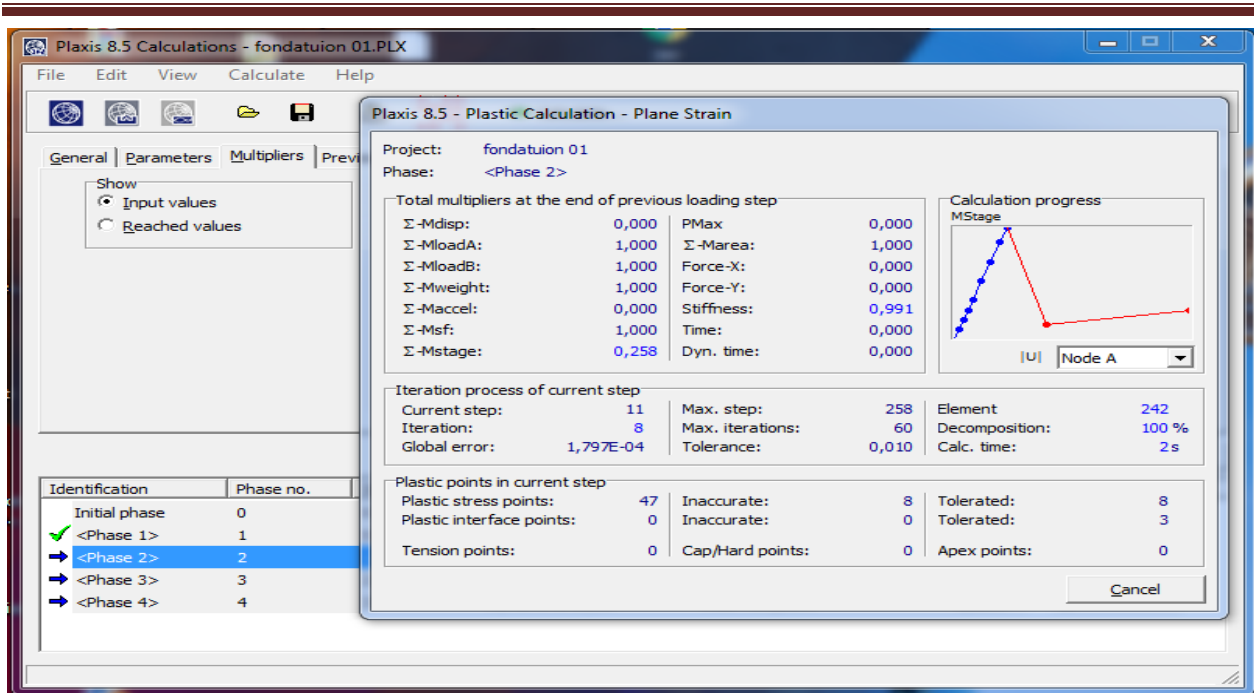


Figure (IV-15) : Fenêtre pour calcul les déférentes phases.

La figure (IV-14) présenté de calcul lancé après avoir choisi les points de la structure (point A, B et C dans notre cas). Sur le modèle pour tracer les courbes de déplacement, vitesse et l'accélération.

### ❖ Coordonnées des points :

N° de point	Point A	Point B	Point C
X	6,16	6,18	6,30
Y	11,15	8,22	0,22

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

### Chapitre IV : Outil numérique de calcul « code Plaxis »

#### IV-1. Présentation de Plaxis :

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et des divers aspects de la loi de comportement des sols. Le logiciel de calcul PLAXIS est utilisé dans cette étude, il est fondé sur ces principes et il est connu pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants [16].

#### IV-2. Aperçu historique :

Le développement du logiciel PLAXIS a commencé en 1987 à l'université technique de Delft à l'initiative du département allemand des travaux publics et gestion des eaux. L'objectif initial était réservé à développer un code d'éléments finis en 2D facile à manier permettant l'analyse des talus en sols mous implantés aux bords des rivières situées dans les plaines Hollandaises. Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir d'autres domaines de la géotechnique. Avec l'extension des différentes activités géotechniques, une compagnie nommée PLAXIS b. v. a vu le jour en 1993. En 1998, la première version PLAXIS pour Windows a été lancée. En même temps le module kernel pour le calcul en 3D a commencé de connaître son développement. Plusieurs années de développement, il y a eu le lancement en 2001 du programme tunnel PLAXIS 3D.

Le but principal de PLAXIS est de pourvoir un outil adéquat pour une analyse pratique dans le domaine de la géotechnique pour des utilisateurs qui ne soient nécessairement des spécialistes en calcul numérique. Souvent, les ingénieurs considèrent les calculs non-linéaires par éléments finis sont laborieux et consomment beaucoup de temps. Le groupe de recherche et de développement de PLAXIS ont, à cet effet, recherché à mettre à la disposition des utilisateurs un logiciel facile à utiliser, basé sur des procédures théoriques robustes [16].

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

---

### IV-3. Le code éléments finis PLAXIS :

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (condition aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné. [17].

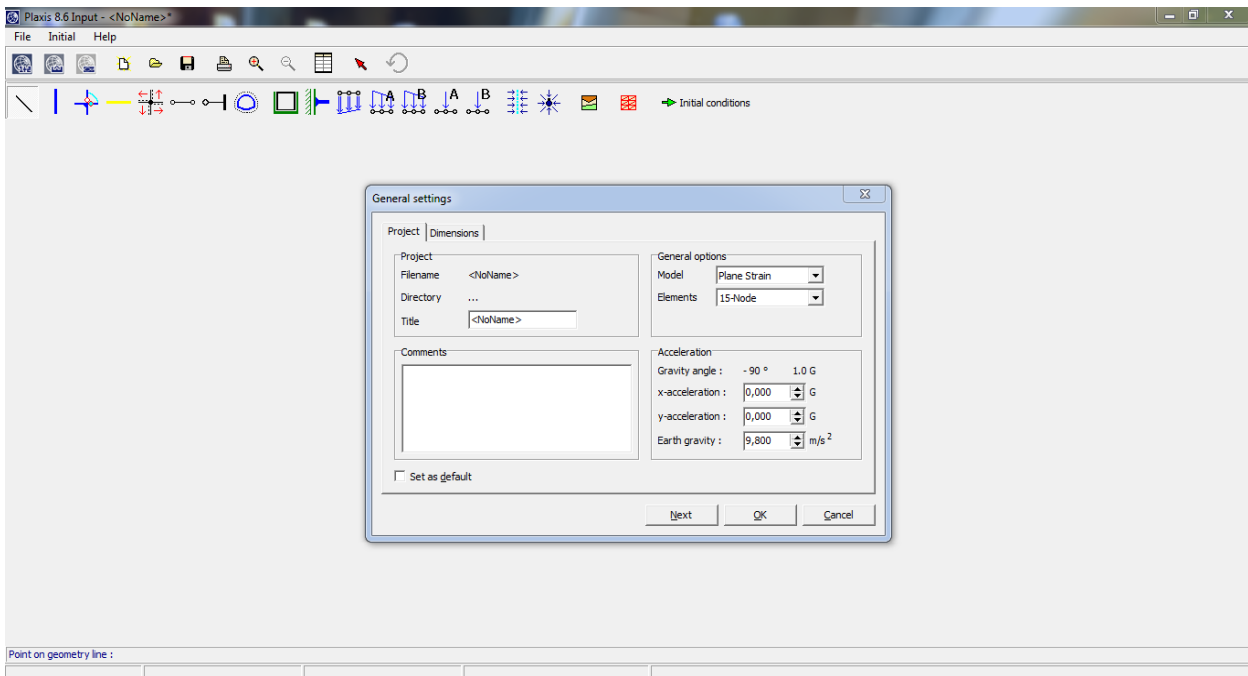
### IV-4. Paramètres du calcul dans le code d'éléments finis Plaxis :

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 sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes d'éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels.

La démarche suivie dans le développement de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code élément 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.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implantés dans Plaxis : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèle de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc. [18].



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

### ▪ **Modèle de Mohr-Coulomb :**

Le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs.

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres.

- Deux paramètres élastiques : le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ .
- Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion  $C$  et l'angle de frottement  $\varphi$ .
- Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance  $\psi$ .

Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité [18].

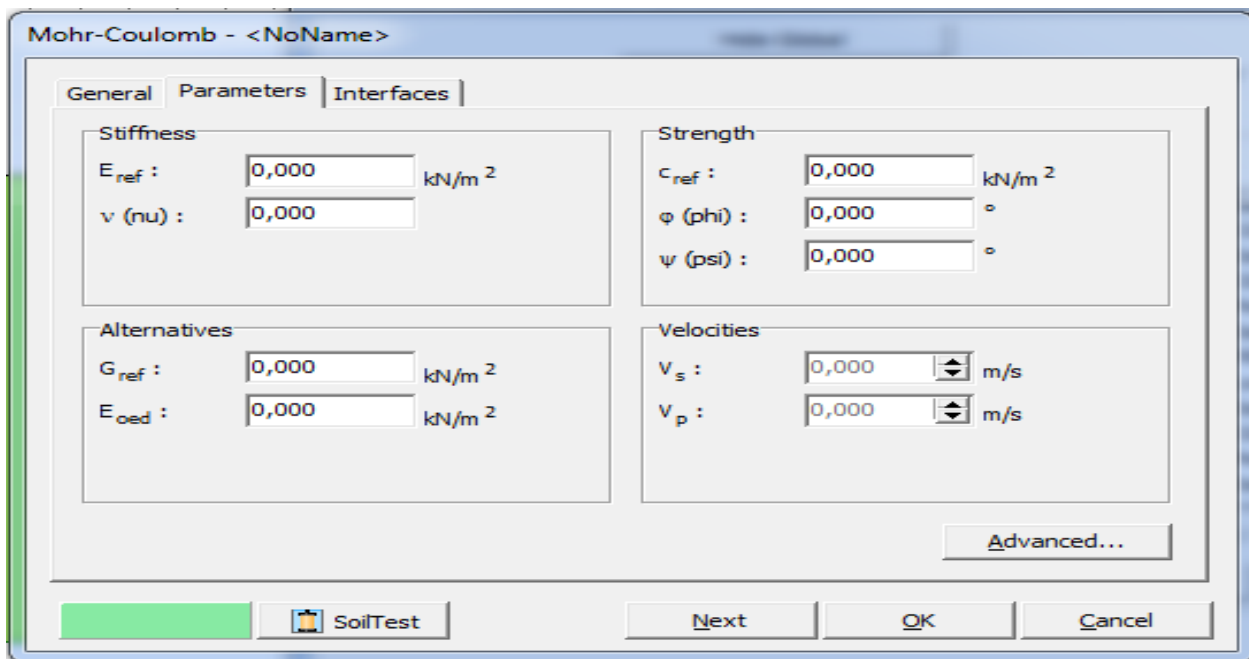


Figure (IV-2) : fenêtre au modèle Mohr-Coulomb

### \*Le 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 [16].

Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{max}$  mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module « moyen », par exemple celui correspondant à un niveau de 50% du déviateur de rupture (Figure IV-3).

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple. Dans les boîtes de dialogues, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

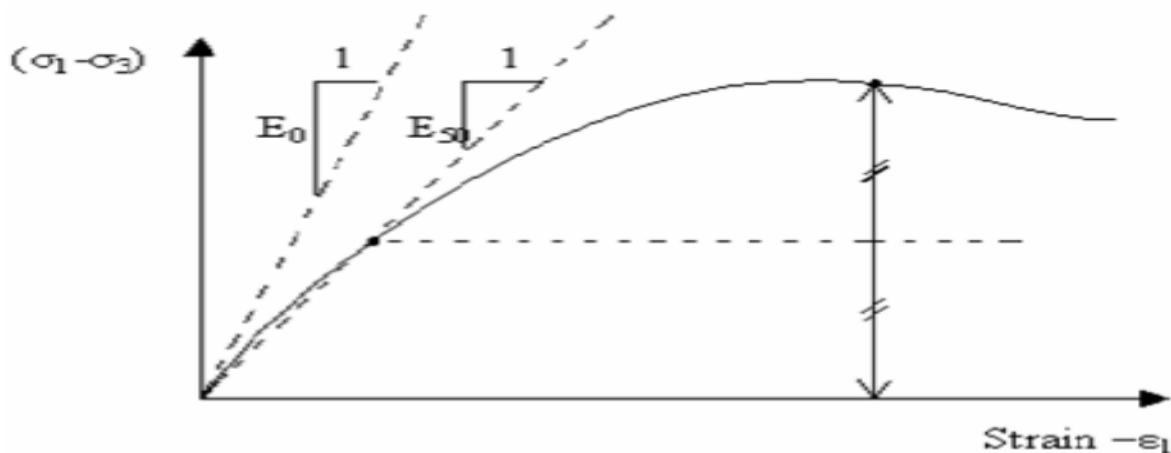


Figure (IV-3) : Définition du module à 50% de la rupture.

### \*Module de cisaillement :

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module d'Young  $E$  et le coefficient de poisson  $\nu$  et par défaut il calcul  $G$ .

L'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G'$ ), si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique [18].

### \*L'angle de frottement :

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à  $35^\circ$  peuvent considérablement allonger les temps de calcul.

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr- Coulomb [18].

### \*La cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0.2 à 1kPa). Pour les analyses en non drainé avec  $\phi_u = 0$ , Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur ou résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre  $c$ -depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans les problèmes (typiquement en kPa) [18].

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### \*L'angle de dilatance :

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

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ$$

$$\Psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ$$

Les cas où  $\Psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (liquéfaction statique).

La valeur  $\Psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes [18].

### IV-5. Le système d'options du code Plaxis :

#### \* Les conditions aux limites en déplacement :

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

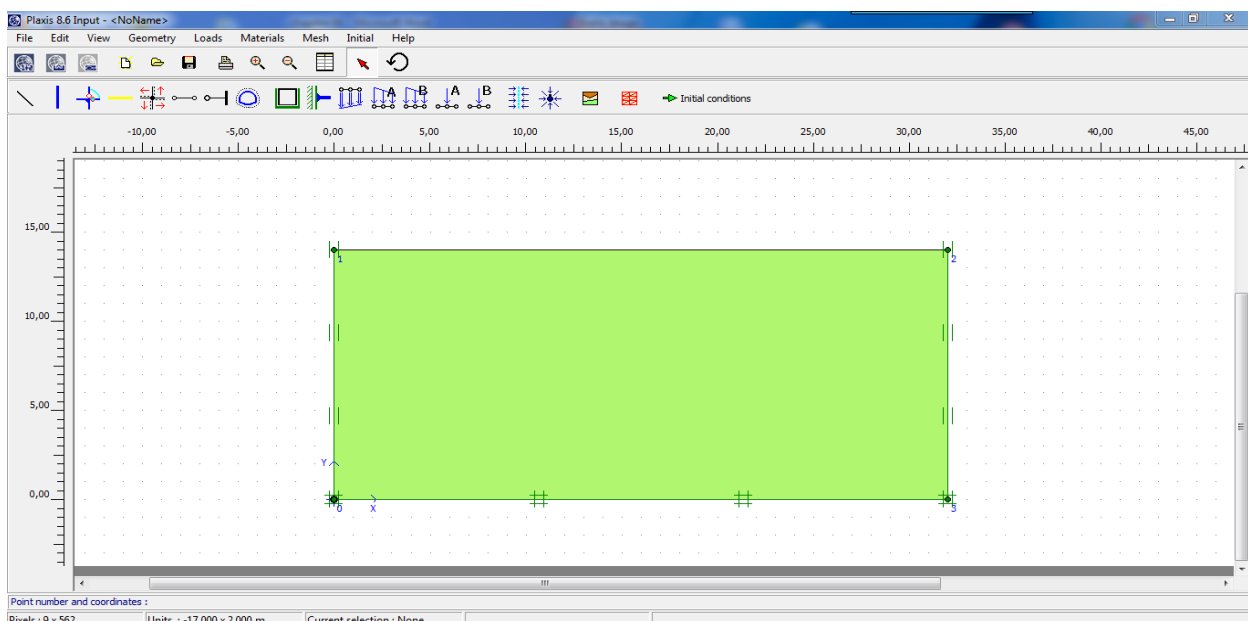


Figure (IV-4) : Condition aux limites.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### \* Le Maillage :

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

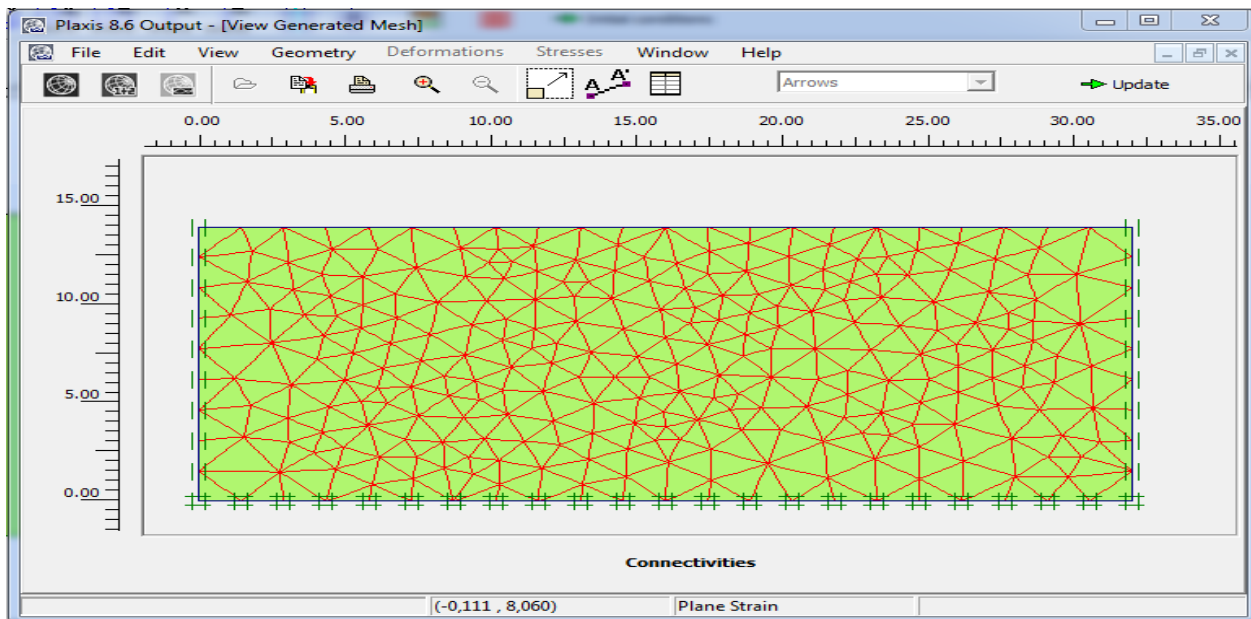


Figure (IV-5) : Maillage.

### \* Les contraintes initiales dues au poids des terres :

Peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

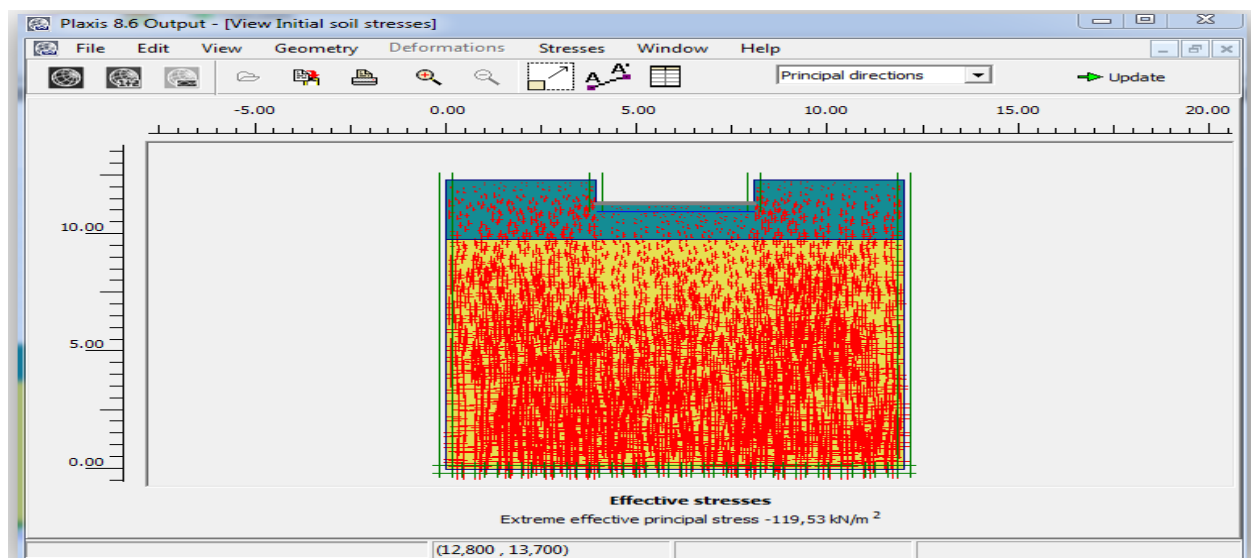


Figure (IV-6) : Contraintes initiales (condition  $K_0$ ).

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

---

### \* **Chargement :**

Deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, les charges réparties à n'importe quelle ligne de la géométrie, sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.

### \* **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).

### \* **Le coefficient de sécurité :**

C'est une notation très importante en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une qualité considérable de données, supposant une réduction proportionnelle de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue pas un état réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élastoplastiques, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans Plaxis.

### **IV-6. 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-7) soit une sollicitation sismique (Figure IV-8).

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

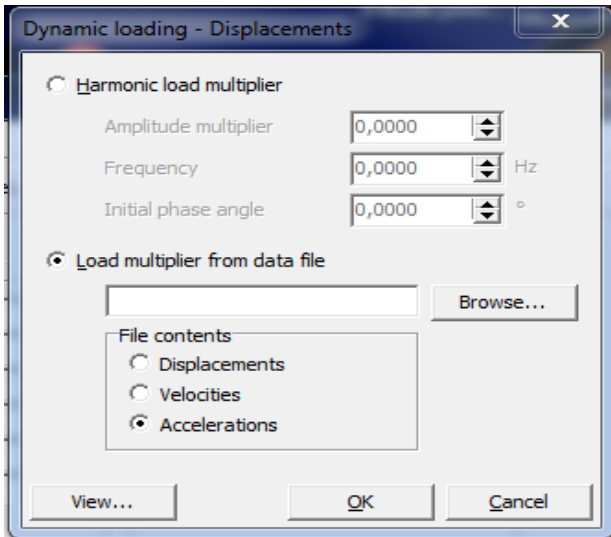


Figure (IV-7) : Sollicitation sismique.

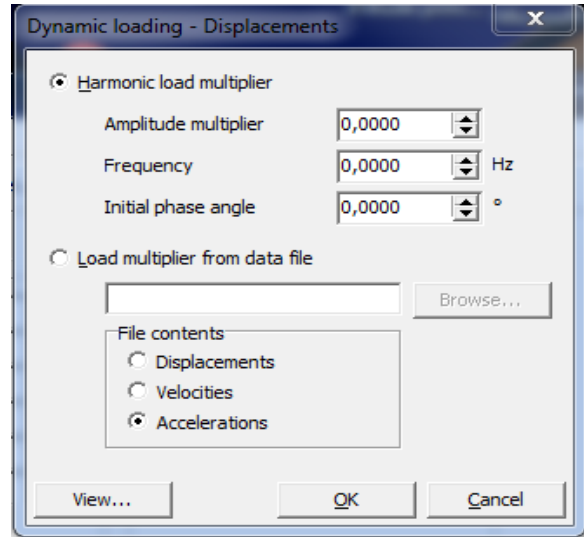


Figure (IV-8) : Sollicitation harmonique.

### IV-7. Modèle géométrique retenu :

Le profil géométrique retenu pour le calcul est présentée sur la figure (IV-8). Il est constitué d'une fondation de largeur  $L=4,1$  m proposant sur deux couches de sol composent la géologie du site : une couche '01' de 2,5 m de profondeur et une couche '2' de 9,8 m de profondeur. Et de longueur  $l=12$  m. pour des raisons de système seule les moitiés du modèle est représentée ici :

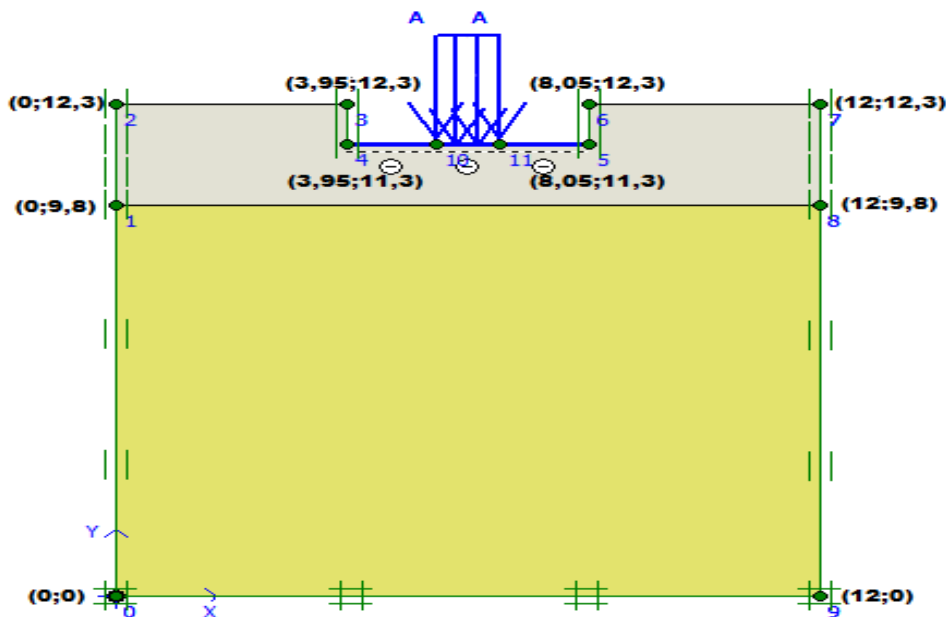


Figure (IV-9) : Profil géométrique retenu

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

### IV-7.1. 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-7.2. Caractéristiques des matériaux :

#### 1) Propriétés des couches de sols :

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

Paramètres	symbole	unité	S2	S1	Béton
Modèle type	Mel	–	Mohr-Colomb	Mohr-Colomb	Linear -elastic
Profondeur h	h	m	5	2,5	1
Poids volumique sec	$\gamma_{dry}$	KN/m <sup>3</sup>	17	18	25
Poids volumique humide	$\gamma_{wet}$	KN/m <sup>3</sup>	19	19	25
Perméabilité horizontale	$K_x$	m/s	0	0	0
Perméabilité verticale	$K_y$	m/s	0	0	0
Module d'Young	$E_{ref}$	KN/m <sup>2</sup>	135000	300000	22000000
Coefficient de poisson	$\nu$	–	0,2	0,4	0,1
Cohésion	$C_{ref}$	KN/m <sup>3</sup>	0,2	0,2	–
Angle de frottement	$\Phi$	°	34	32	–
Angle de dilatation	$\psi$	°	4	2	–
Facteur de rigidité de l'interface	$R_{INTER}$	–	Rigide	Rigide	Rigide

Tableau (IV-1) : Propriétés du sol constituant le massif.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

$R_{int}$  Facteur de rigidité de l'interface

$g = 9,8m/s^2$  (L'accélération de la pesanteur)

### 2) fondation :

Elle constituée en béton armée dont les propriétés sont de l'élément structural. Les propriétés de l'élément structural sont résumées dans le tableau (IV-2) :

Paramètres	Nome	Unité	Valeur
Type de comportement	Matériel type	-	Elastique
Rigidité de normale	EA	KN/m	$1,4*10^7$
Rigidité de flexion	EI	KN/m <sup>3</sup>	$2,4*10^5$
Epaisseur équivalente	D	m	0,454
Poids	W	KN/m/m	35
Coefficient de poisson	$\nu$	-	0,2
Rayleigh damping	$\alpha, \beta$	-	0

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

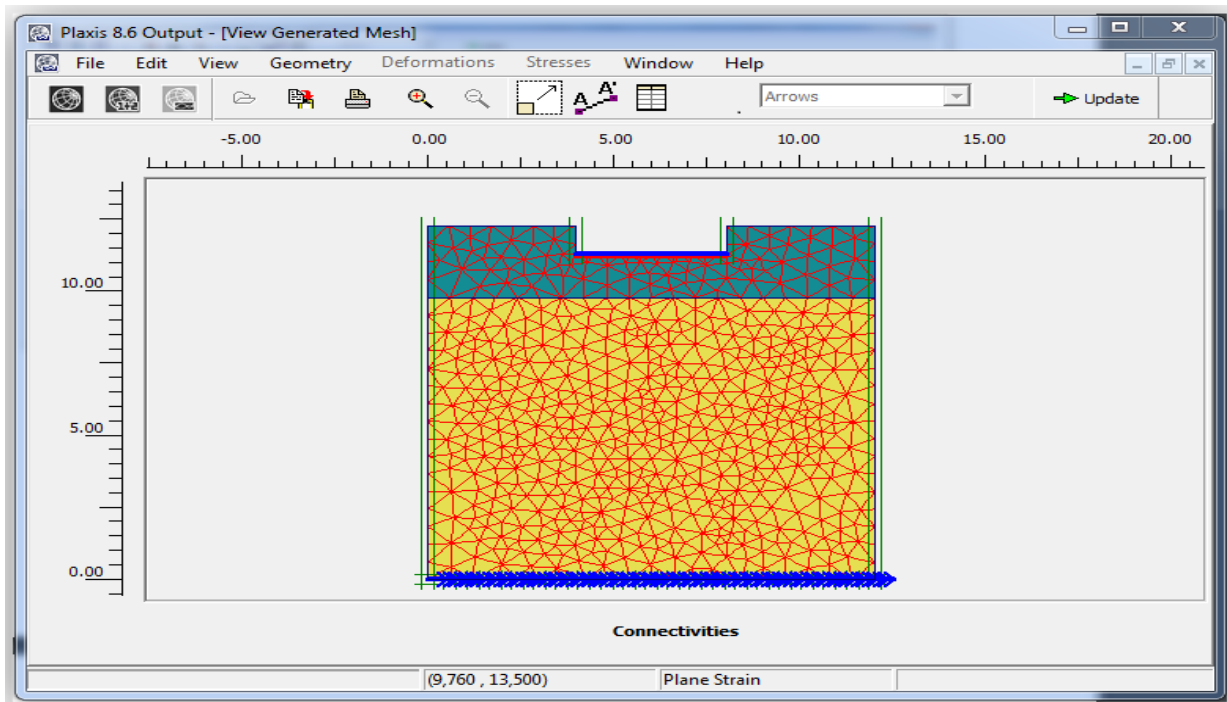
A=950KN (la charge statique sur fondation).

### IV-7.3. Génération du maillage :

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires à 15noeds, On règle la finesse du maillage (global Coarseness) sur « fine ».

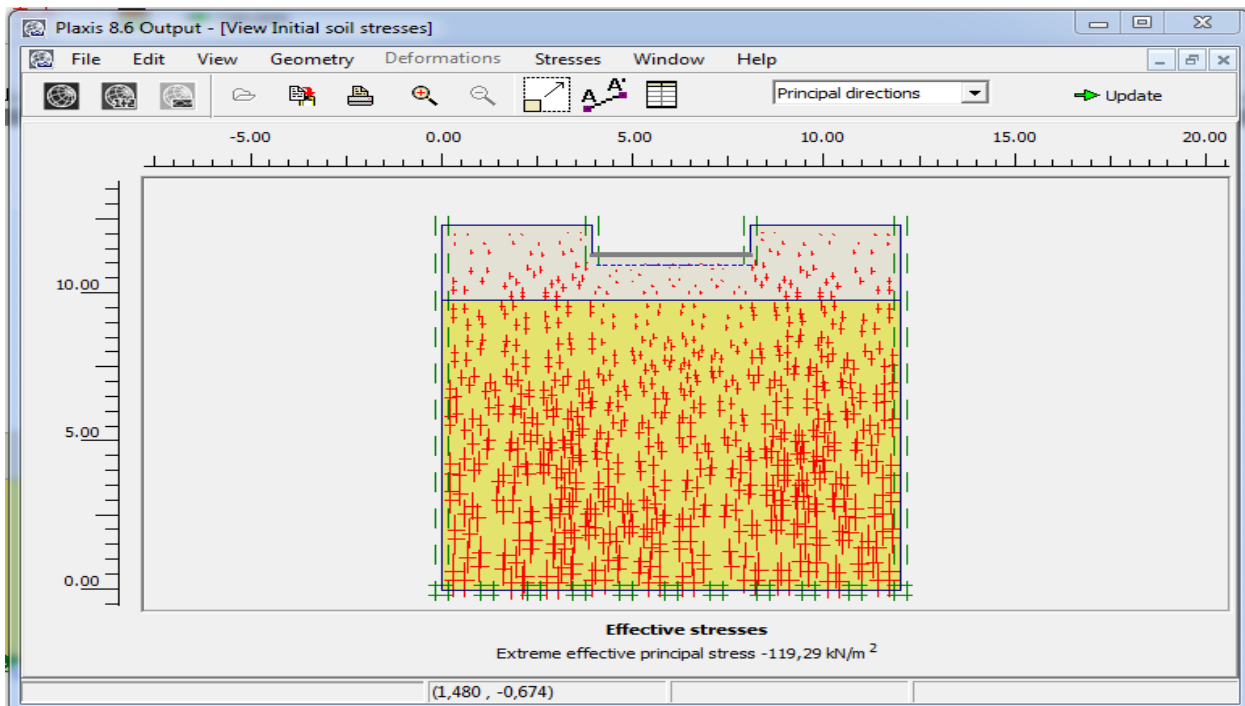
La figure (IV- 10) présenté le maillage effectué du modèle.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »



### IV-7.4. Conditions initiales :

Les conditions initiales fixées correspondent à un état de type  $K_0 = 1$  (contraintes de type géotechnique) représenté sur la (figure IV-11).

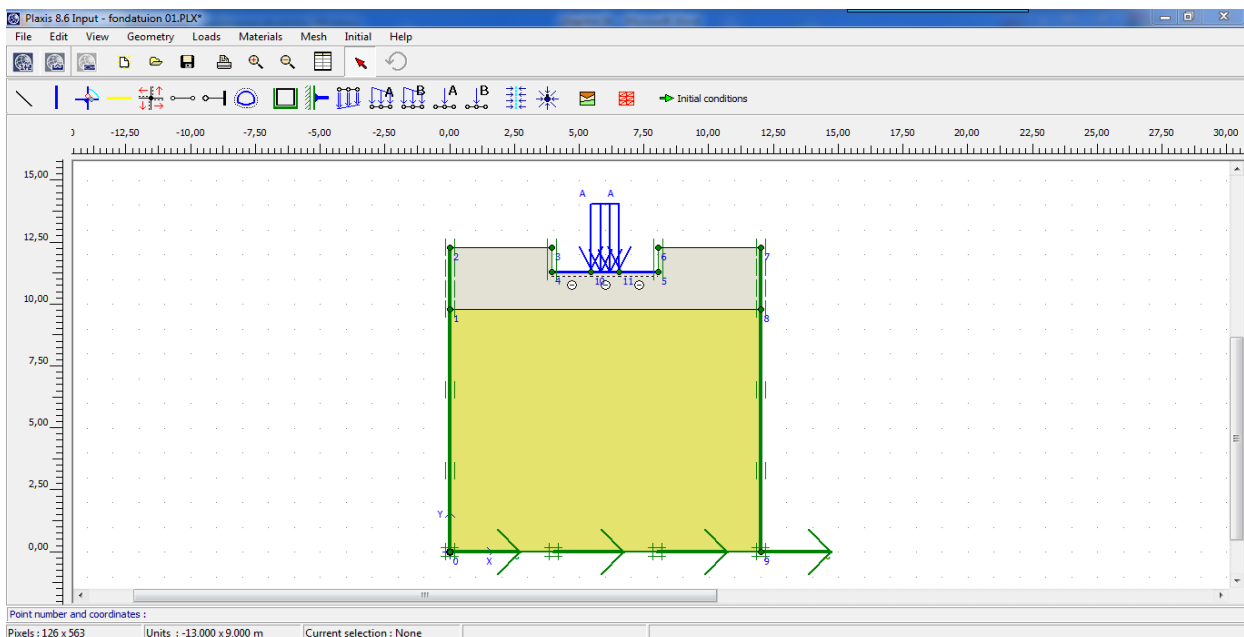


### IV-7.5. Sollicitation sismique :

Dans cette application numérique, un type de sollicitation sismique sous forme de déplacements imposé à la base du modèle de calcul ont été considérées :

- Une accélération horizontale simulant le mouvement horizontal.

La figure (IV-12) présente la sollicitation imposée à la base du modèle de calcul.



**Figure (IV -12) : Sollicitation sismiques horizontal.**

### IV-7.6. Procédure de calcul :

Est faite en trois phases dans l'ordre suivant

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

2-Phase (1) : Calcul plastique avec le procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system A=950 KN/m<sup>2</sup> ».

3-Phase (2) : Calcul plastique avec le procédure « stage construction », en condition drainées avec activation de l'élément « plate of building », et de la charge statique « statique load system A=950KN », « Négative interface ».

4-Phase (3) : Chargement dynamique<< dynamique analyses >> et << load multiplier>>

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

En calcul dynamique, nous avons utilisé 'le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA99 V2003' « Mr. Hamitouche Amar » (Figure IV-13). 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.

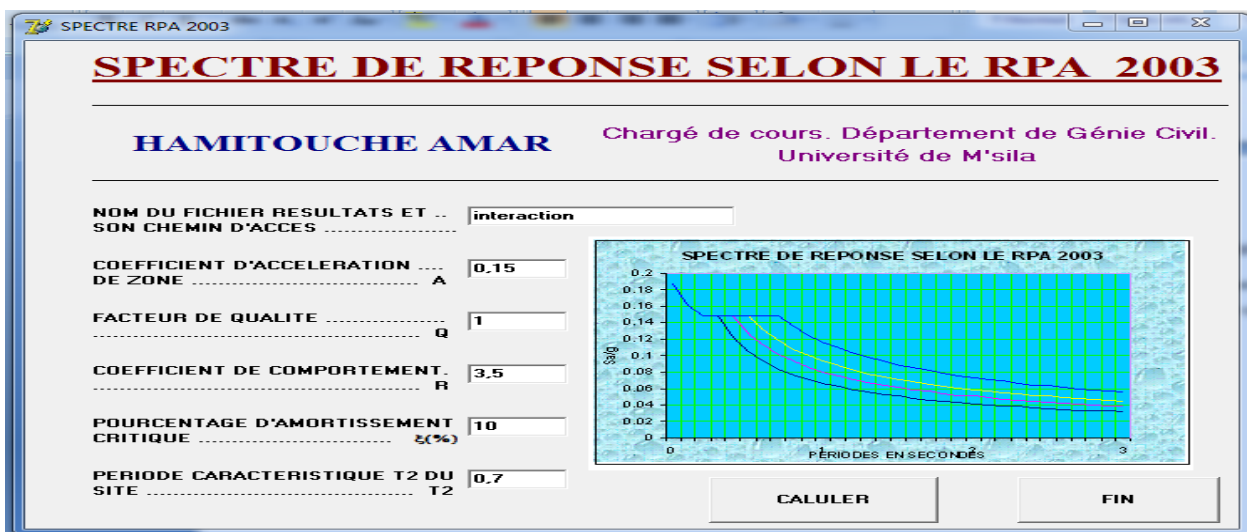


Figure (IV-13) : Le spectre de réponse introduit dans les calculs selon le RPA 99 V 2003

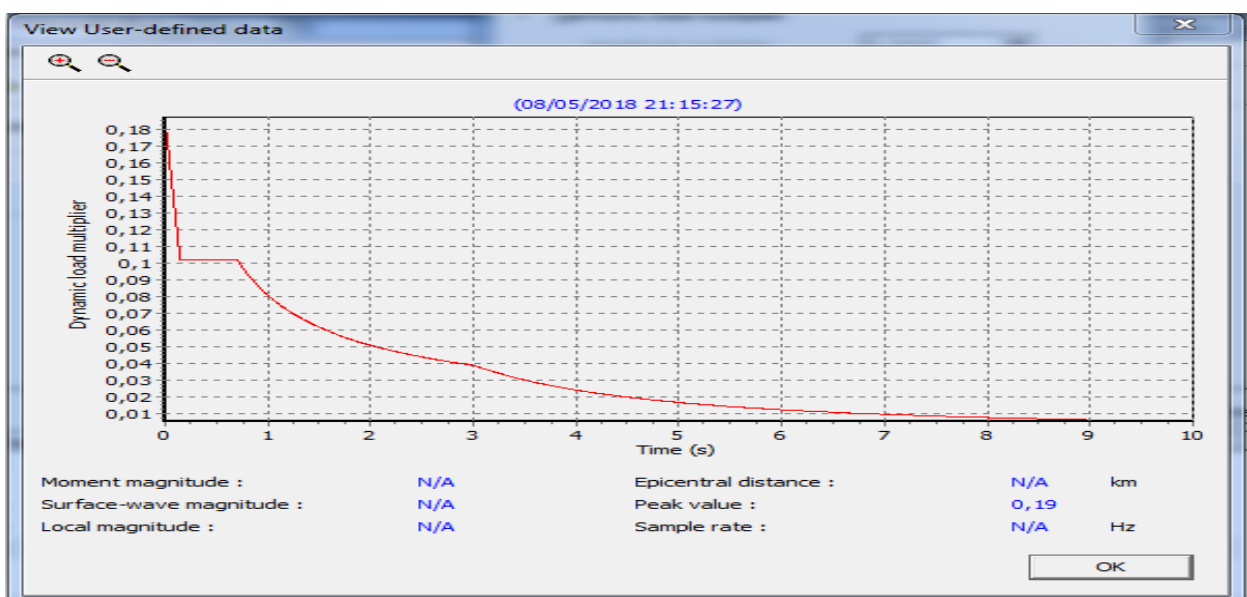


Figure (IV-14) : Spectre réponse selon RPA99 version 2003.

## Chapitre IV :Outil numérique de calcul « code Plaxis »

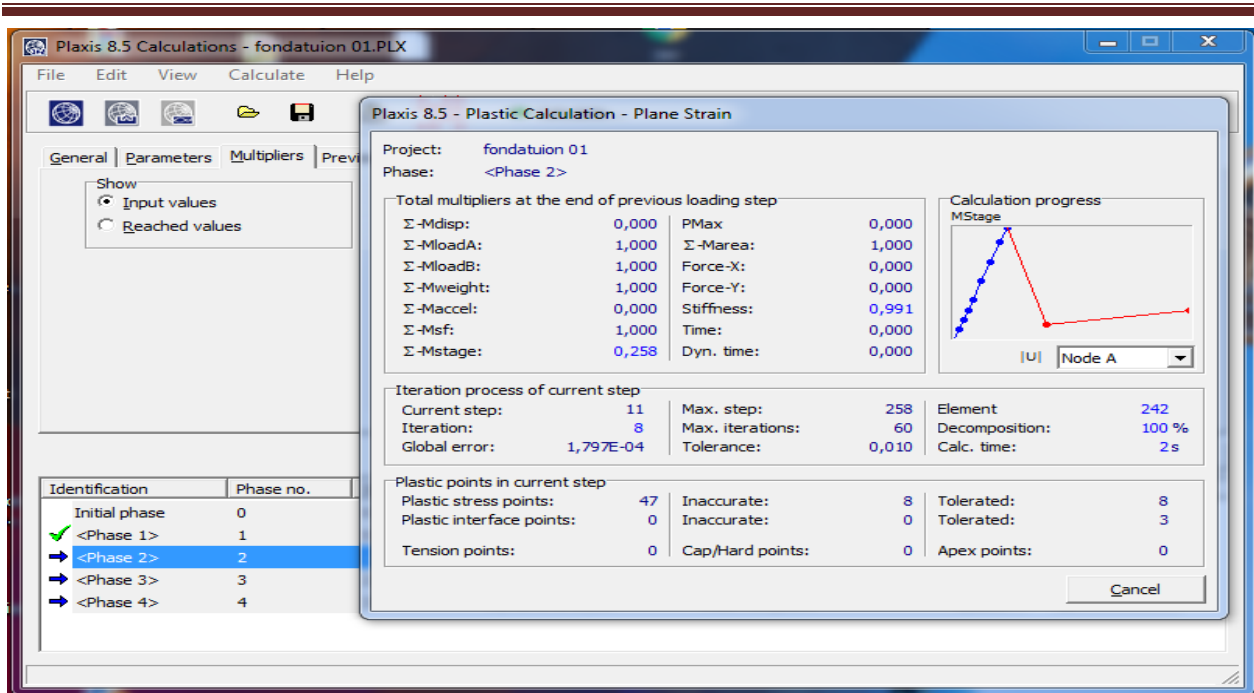


Figure (IV-15) : Fenêtre pour calcul les déférentes phases.

La figure (IV-14) présenté de calcul lancé après avoir choisi les points de la structure (point A, B et C dans notre cas). Sur le modèle pour tracer les courbes de déplacement, vitesse et l'accélération.

### ❖ Coordonnées des points :

N° de point	Point A	Point B	Point C
X	6,16	6,18	6,30
Y	11,15	8,22	0,22

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

# CONCLUSION GENERALE

---

## CONCLUSION GENERALE

Le présent travail comporte une analyse de l'influence de l'interaction sol- fondation d'un pont poutre préfabriqué et son comportement. L'étude est réalisée en utilisant une modélisation numérique par élément finis dans la même analyse les différentes composantes du système, à savoir le sol, la fondation et la structure de pont.

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

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

L'application numérique qu'on a utilisé a montré que la prise en compte de l'interaction sol structure de pont sous son aspect général nécessite une maîtrise du code de calcul.

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

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

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

## Les références bibliographiques

---

- [1] : Cours géologie de l'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des travaux publics Dr A.Benamghar.
- [2] : Règles parasismique algériennes « RPA99/ Version 2003 »
- [3] : Guide de conception, Ponts-dalles, SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES.
- [4] : MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, DES TRANSPORTS ET DU TOURISME, Instructions relatives aux programmes de surcharges et aux épreuves des ponts-routes.
- [6] : V. Davidovici, La construction en zone sismique, Editions Le Moniteur, Paris, 1999.
- [7] : V. Davidovici, Eurocode 8, Pratique du calcul sismique, Guide d'application, afnor éditions-Eyrolles, 2013.
- [8] : Guide technique AFPS et CMFS, Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques, Presse des Ponts, 2012.
- [9] : AFNOR, Eurocode 8 NF EN 1995-5.
- [10] : A. Pecket, dynamique des sols, presse de l'école des nationales des ponts et Chaussées
- [11]: Wolf, J. (1988). Soil-Structure-Interaction Analysis in time domain. Prentice Hall International Series, Englewood Clis, New Jersey.
- [12]: Crémer, C. (2001). Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes. Thèse de doctorat, LMT Cachan - ENS, Cachan, France.
- [13]: Kausel, E., Whitman, A., Murray, J. et Elsabee, F. (1978). The spring method for embedded foundations. Nuclear Engng. and Design, 48.
- [14]: Mindlin, R.D., (1949) - "Il Compliance of Electric Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, Transaction, ASME, vol. 71, pp. A-259-268.
- [15] : Damien, D. (2010). Interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux. THÈSE N°4880, École Polytechnique Fédérale De Lausanne.
- [16] : Lefriki souad, Juin 2015, Effet de la variation de la cohésion sur le comportement des pentes, Mémoire de master 2ème année Conception et Calcul des Structures.
- [17] : Brinkgereve et Vermeer, 2003.
- [18] : Abderrahim Z, juin 2014, Thème : Les sources d'erreurs en modélisation numérique : Application aux ouvrages géotechniques, Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil Infrastructures de Base et Géotechnique Option : Travaux Publics.

## Résumé

Les séismes sont des phénomènes naturels les plus dangereux, avec des effets différents en raison de plusieurs paramètres (ex : l'intensité et la magnitude ...etc.).

Le travail présenté dans ce mémoire traite des déformations résultant d'ondes sismiques de type sinusoïdale donnés en fonction de la direction sismique sur le système (sol-culé de pont), à travers l'observation des déformations résultant de quelques points répartis dans cette surface.

Le mémoire supporte deux parties, synthèse bibliographique et une simulation ou application numérique :

- ✓ La synthèse bibliographique contenue de la caractéristique du mouvement sismique et du comportement des sols, ainsi que la réponse résultant de l'ISS.
- ✓ La simulation numérique contient, premièrement une description détaillée de l'outil de calcul numérique utilisé "PLAXIS", puis la mise en œuvre des calculs effectués, et finalement la présentation de résultats obtenus et leur interprétation.

### Mots-clés

Séisme, mouvement sismique, champ libre, sollicitation sinusoïdale, onde sismique, accélération sismique, pont poutre, simulation numérique, PLAXIS 2d.

## **Abstract**

The quakes are the most dangerous natural phenomena, with different effects due to several parameters ( e.g. the intensity and magnitude etc...).

The work presented in this thesis deals with deformations resulting from sinusoidal type seismic waves given as a function of the seismic direction on the system (ground-abutting beam bridge), through the observation of the deformation resulting from a few points distributed in this surface .

The memory supported both parties, bibliographical synthesis simulation and a digital application :

- ✓ Bibliographic synthesis of characterization of the seismic movement and the behavior of the soil, as well as the seismic response of a layer of soil.
- ✓ Digital simulation contains, firstly a detailed description of the numerical calculation tool used "PLAXIS ", then the implementation of calculations, and finally the presentation of results obtained and their interpretation.

## **Keywords**

Earthquake, seismic movement, free fields, solicitation sine, seismic wave, seismic acceleration, beam bridge, numerical simulation, PLAXIS 2d.

## ملخص

الزلازل هي الظواهر الطبيعية الأكثر خطورة، مع تأثيرات مختلفة بسبب عدة معاملات (مثلا الكثافة والضخامة... الخ). يتناول العمل المقدم في هذه الرسالة التشوهات الناتجة عن موجات زلزالية من النوع الجيبي تعطى كدالة في الاتجاه الزلزالي على النظام (تربة, دعامة الجسر) ، من خلال ملاحظة التشوه الناتج عن بضع نقاط موزعة في هذا السطح.

الذاكرة مدعومة من الطرفين , التوليف الببلوجرافي , والمحاكاة او التطبيق العددي:

التوليفة البيليوغرافية لوصف الحركة الزلزالية وسلوك التربة, وكذلك الاستجابة الزلزالية لطبقة من التربة . المحاكاة الرقمية يحتوي على الوصف تفصيلي لاداة حساب العددي المستخدمة "بلاكسيس", ثم تنفيذ العمليات الحسابية, واخيرا عرض النتائج التي تم الحصول عليها وتفسيرها.

### الكلمات المفتاحية :

الزلازل , الحركة الزلزالية , الحقول الحرة , شرط التماس, الموجات الزلزالية , التسارع الزلزالي, جسر شعاع, المحاكات العددي, بلاكسيس ثنائي الابعاد.

## Chapitre V : Résulta des calculs et interprétation

### V-1. Le déplacement horizontal imposé à la base :

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

#### 1) Maillage déformation :

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

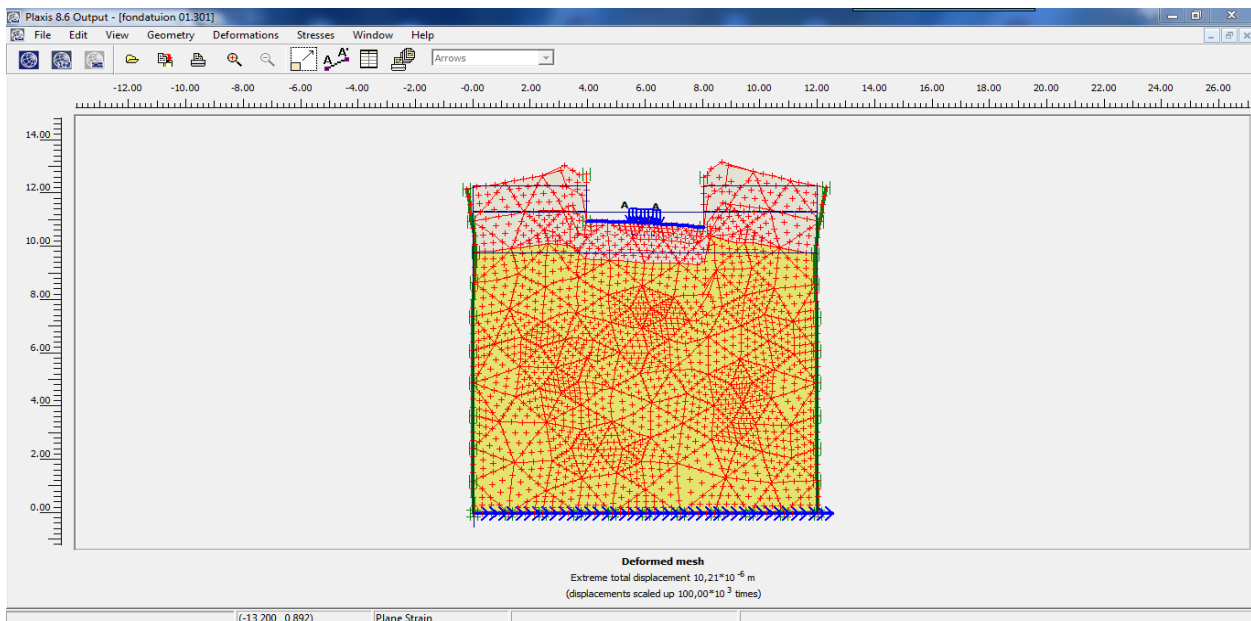


Figure (V-1) : Maillage déformé du profile.

#### 2) Contraintes :

Les iso valeurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure (V-2).

La valeur de contrainte est :  $A = 371,16 \text{ KN/m}^2$ .

## Chapitre V : Résulta des calculs et interprétation

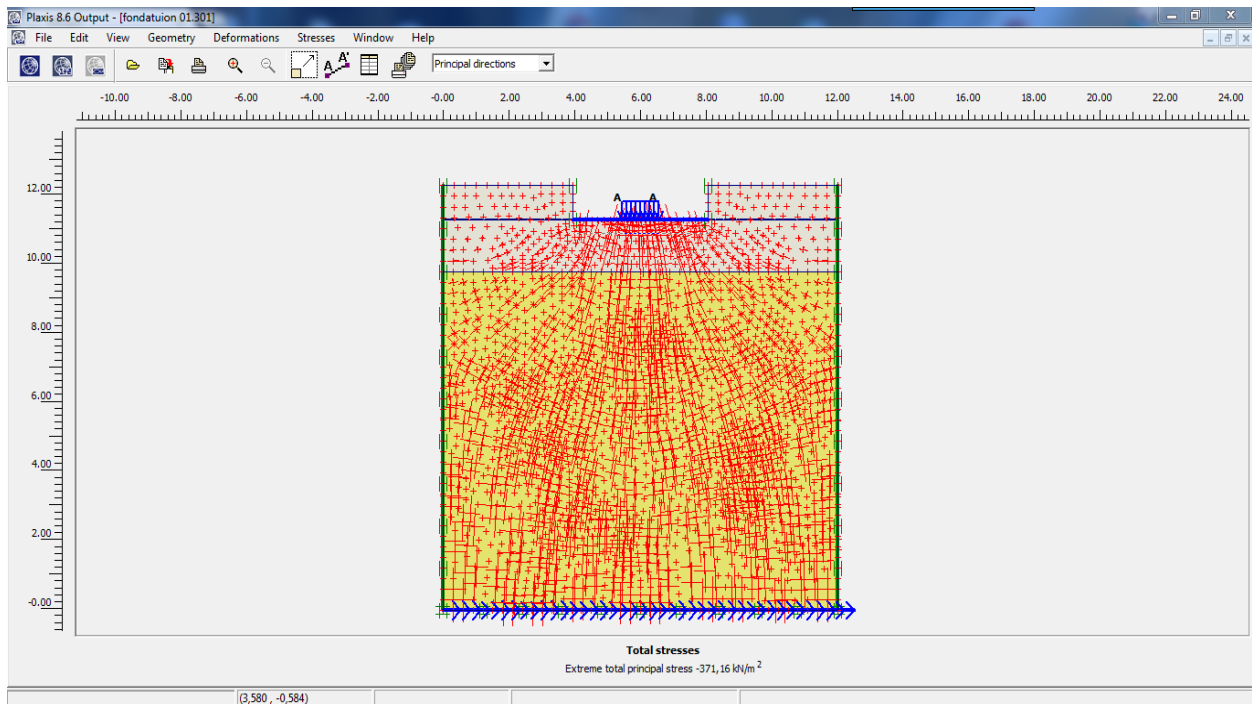


Figure (V-2) : Iso-valeurs des Contraintes

### 3) Déplacements :

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure V-3. On note un déplacement maximal égal à :  $10,21 \cdot 10^{-6}$  m.

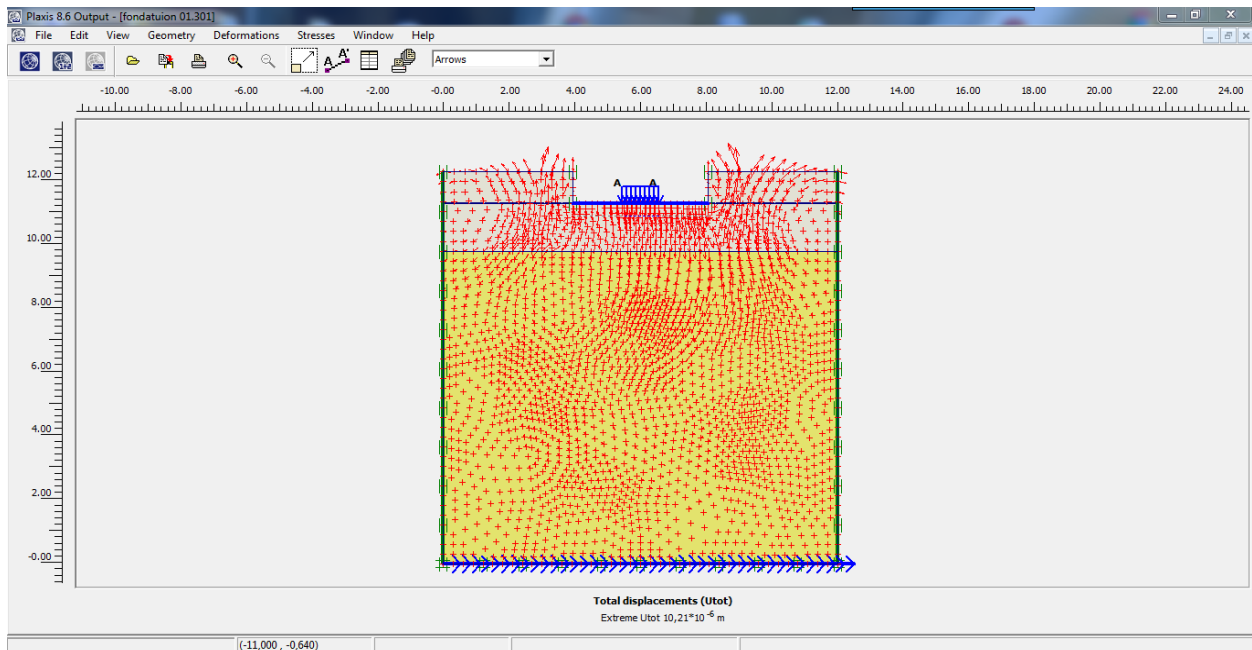


Figure (V-3) les vecteurs de déplacements

## 4) Courbes déplacements-temps :

### • L'axe XX' :

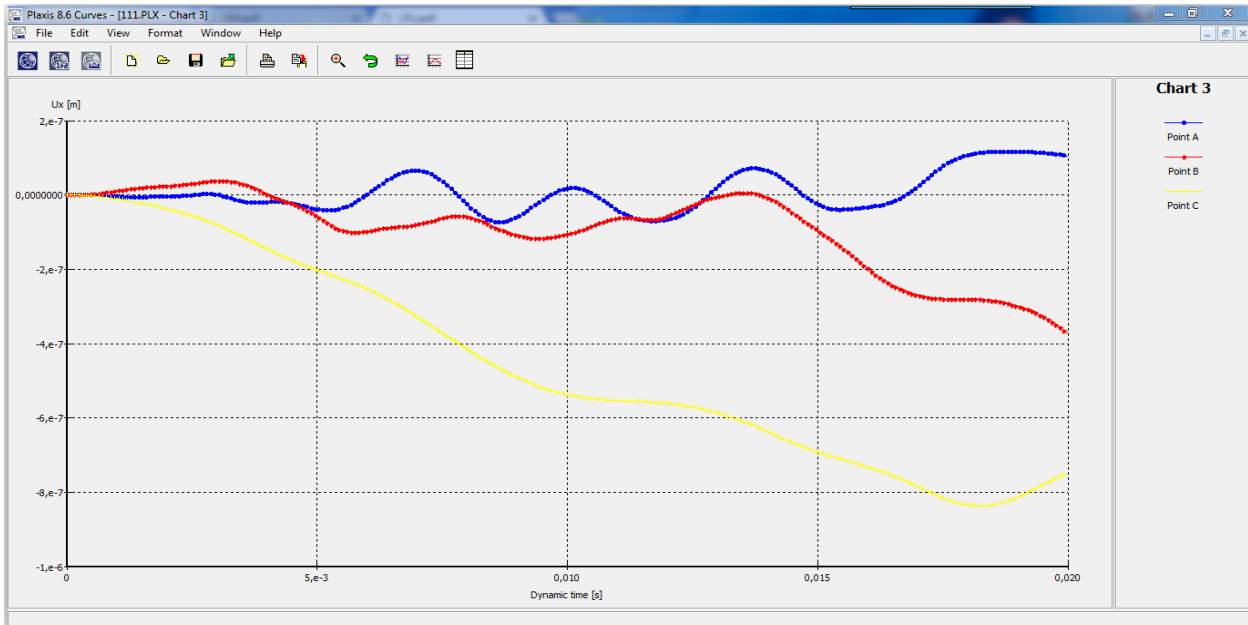


Figure (V-4) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX'

### • L'axe YY' :

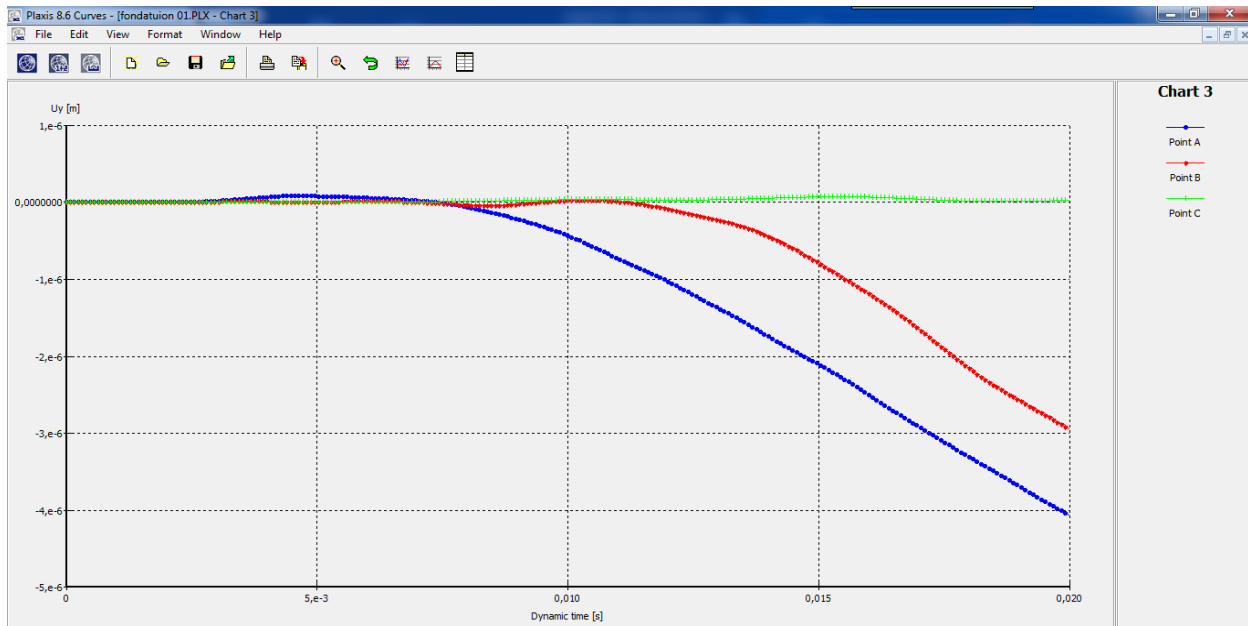


Figure (V-5) : Déplacement des points en fonction de temps l'axe YY'

## 5) Courbes vitesses-temps :

### • L'axe XX' :

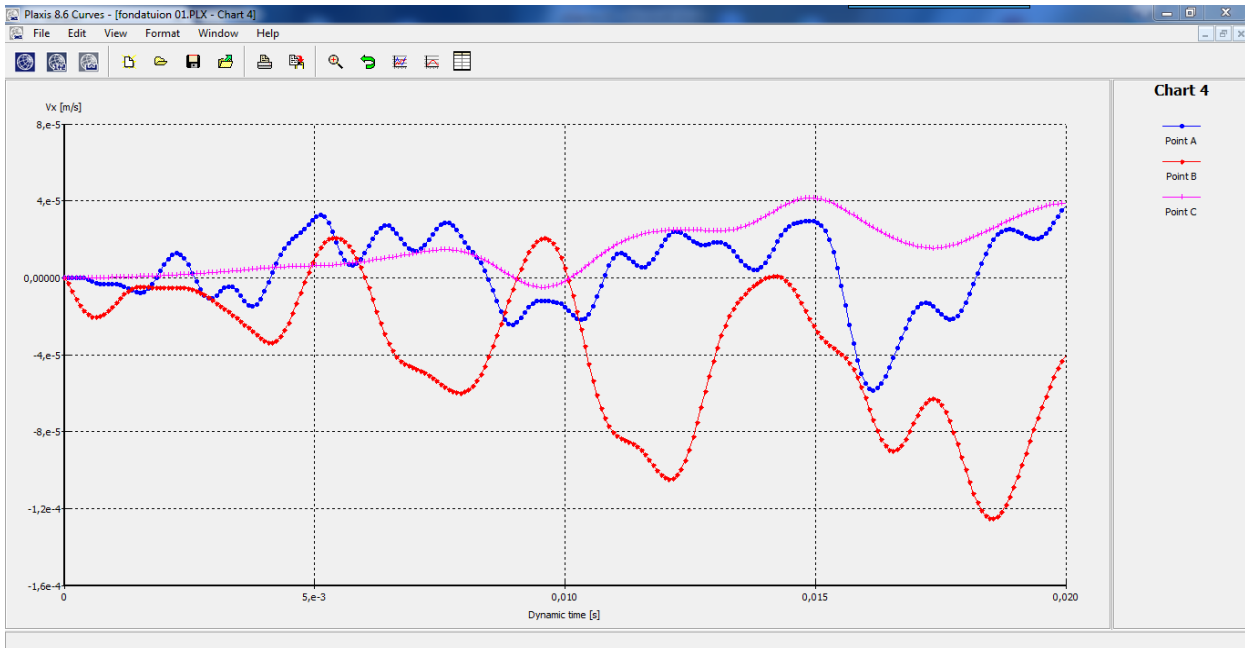


Figure (V-6) : Vitesses des points en fonction de temps l'axe XX'

### • L'axe YY' :

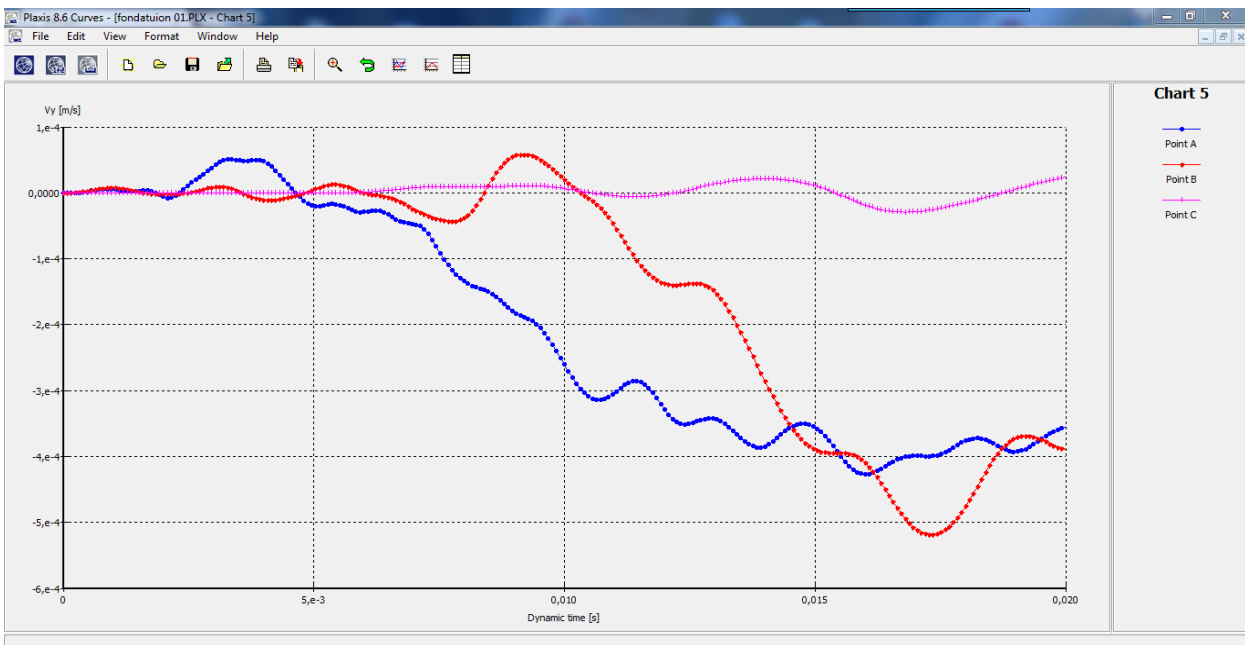


Figure (V-7) : Vitesses des points en fonction de temps l'axe YY'

## 6) Courbes accélérations-temps :

### • L'axe XX' :

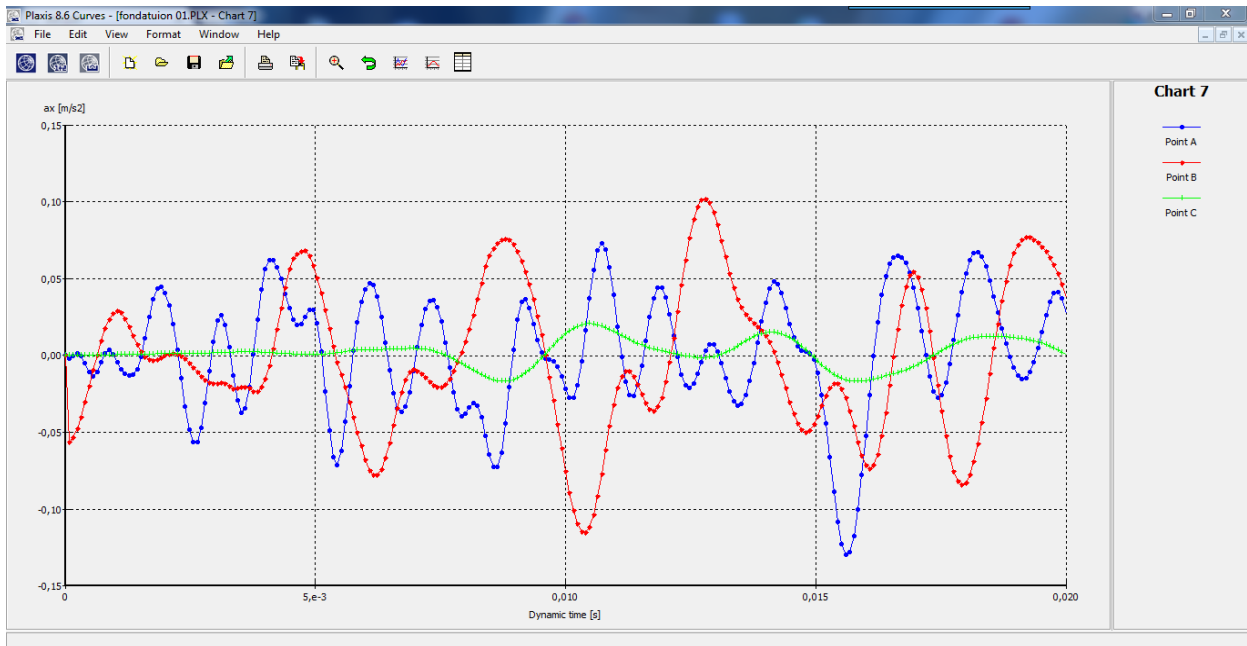


Figure (V-8) : Accélérations des points en fonction de temps l'axe XX'

### • L'axe YY' :

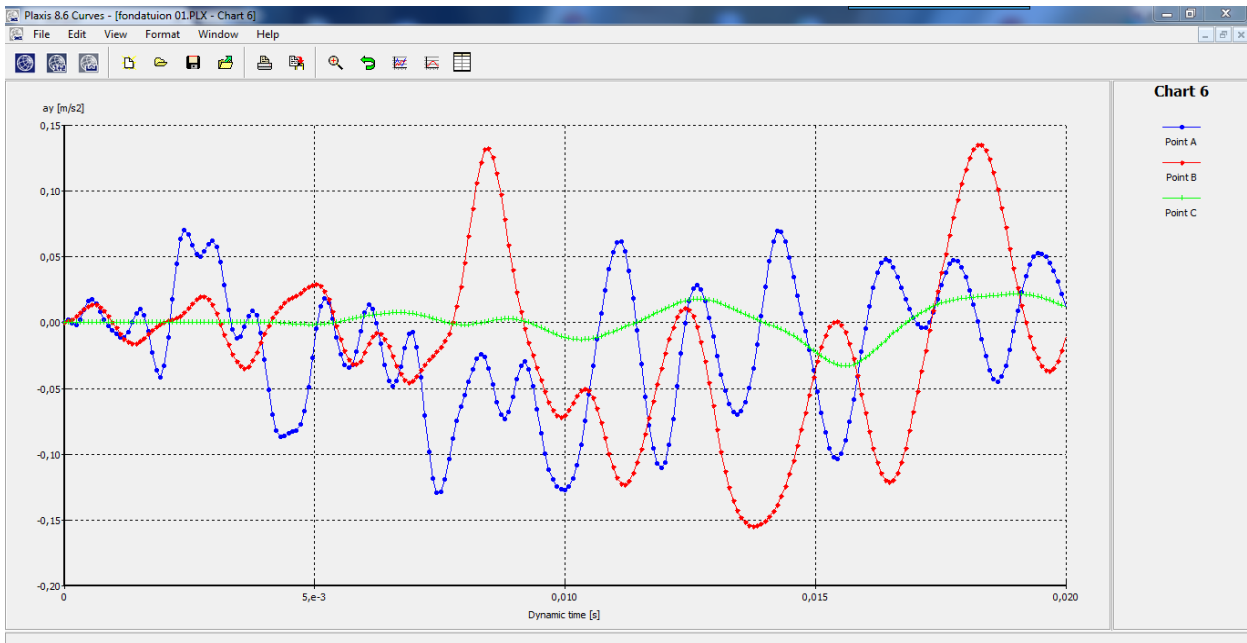
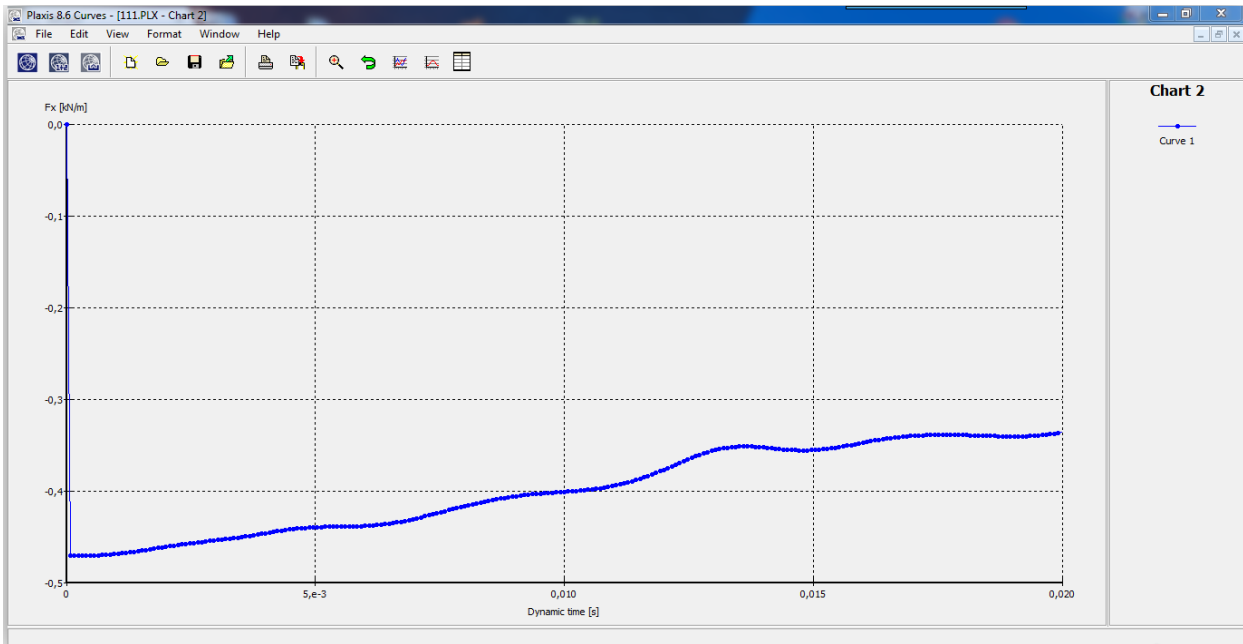


Figure (V-9) : Accélérations des points en fonction de temps l'axe YY'

## 7) Courbe force-temps :



**Figure (V-10) : La force en fonction de temps**

## 8) Synthèse :

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

Point		Point A	Point B	Point C
Déplacement (m)	XX	$1,093 \cdot 10^{-7}$	$7,839 \cdot 10^{-7}$	$3,012 \cdot 10^{-7}$
	YY	$4,062 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$7,146 \cdot 10^{-8}$
Vitesse (m/s)	XX	$5,85 \cdot 10^{-5}$	$1,252 \cdot 10^{-5}$	$4,143 \cdot 10^{-5}$
	YY	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$5,187 \cdot 10^{-4}$	$2,925 \cdot 10^{-4}$
Accélération (m/s <sup>2</sup> )	XX	-0,129	-0,115	0,021
	YY	-0,129	-0,154	-0,033
Force(KN)	XX	2,930		

**Tableau (V-1) : Valeurs maximal aux points considérés**

## Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

### V-2. Effet des ondes horizontales :

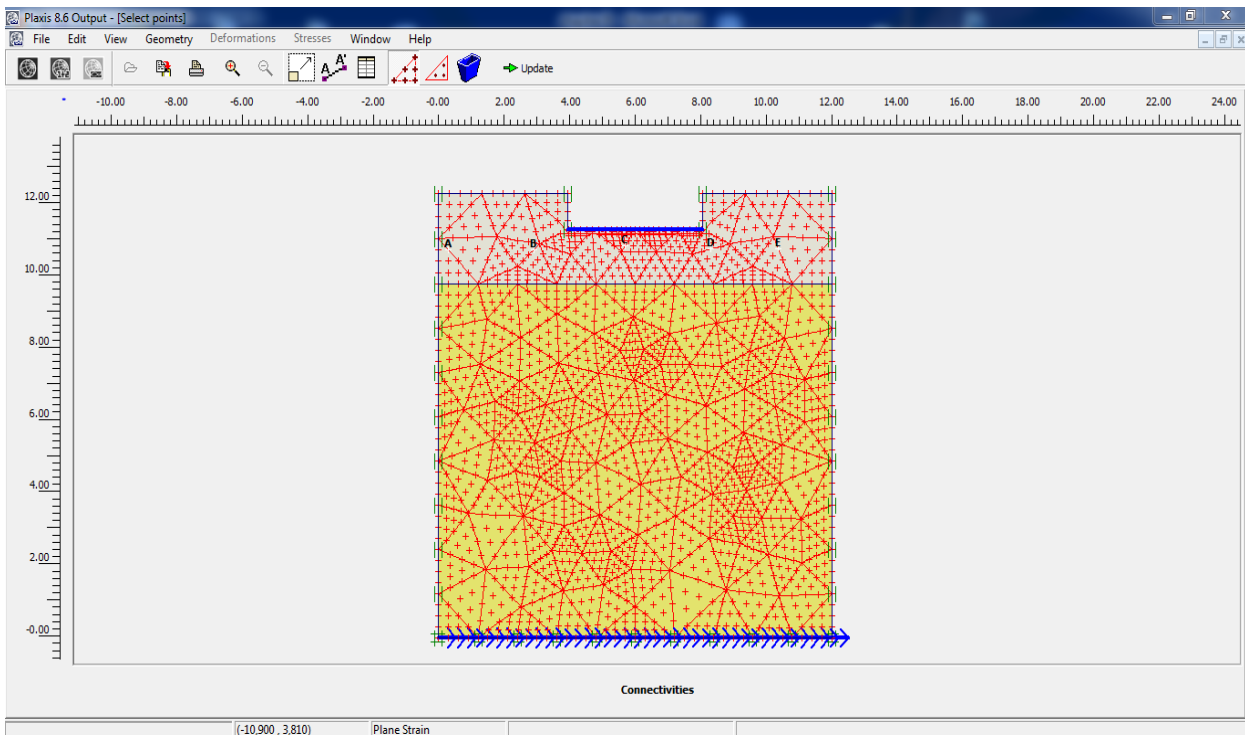
Influence de distance sur les paramètres des points (déplacement, vitesse et l'accélération), à lors des ondes sismiques de sens horizontal.

Influence de distance sur les déplacements des points selon les deux axes (XX', YY'). On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau suivant :

	N° de point	A	B	C	D	E
	X(m)	0,30	2,90	5,70	8,32	10,37
Déplacement (m)	XX'	$1,352 \cdot 10^{-7}$	$1,454 \cdot 10^{-7}$	$1,097 \cdot 10^{-7}$	$1,603 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-7}$
	YY'	$1,361 \cdot 10^{-6}$	$8,914 \cdot 10^{-7}$	$9,901 \cdot 10^{-8}$	$7,314 \cdot 10^{-7}$	$1,152 \cdot 10^{-6}$

**Tableau (V-2) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas horizontal**

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la figure (V-11).



**Figure (V-11) : Schématisation des points de l'axe XX'**

## Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

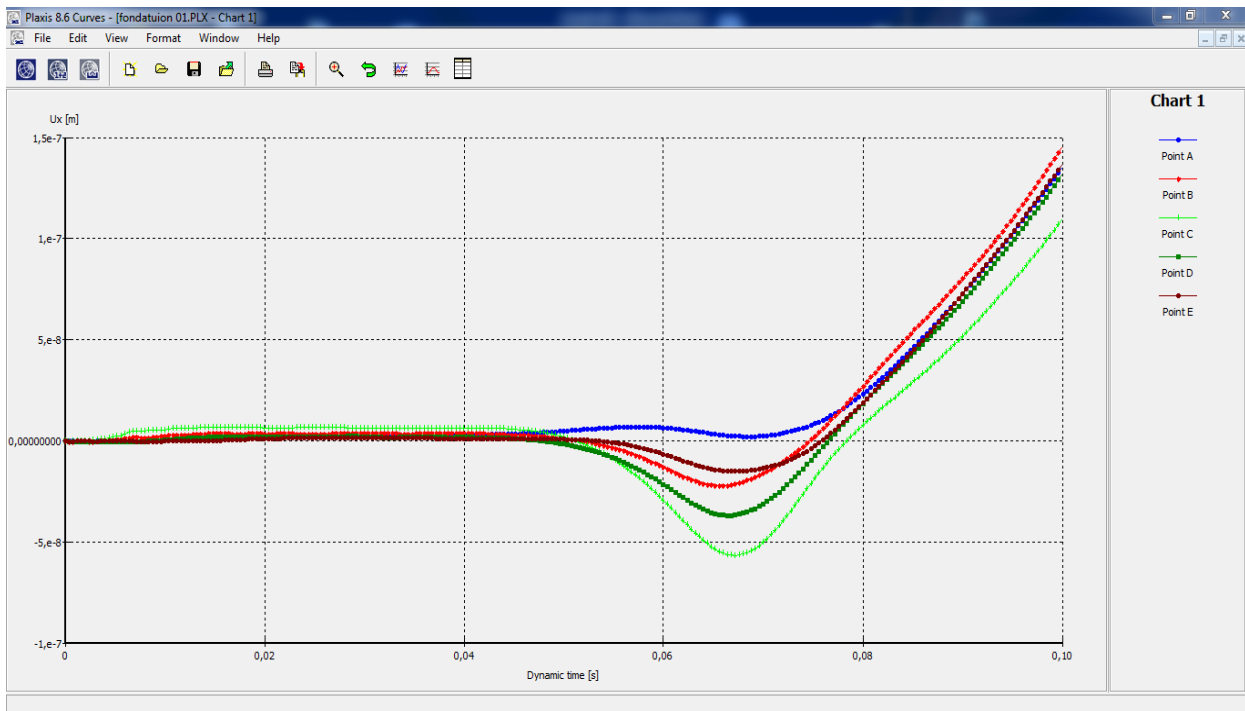


Figure (V-12) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX'

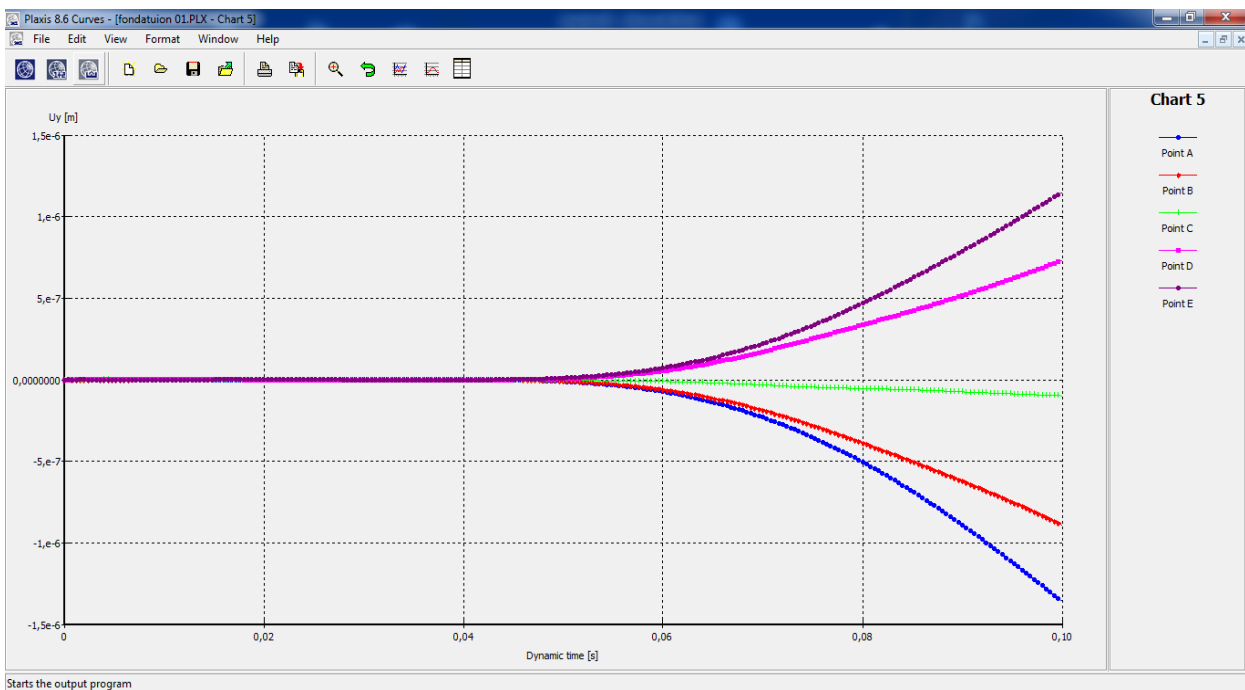


Figure (V-13) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe YY'

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivantes figure (V-14) et (V-15).

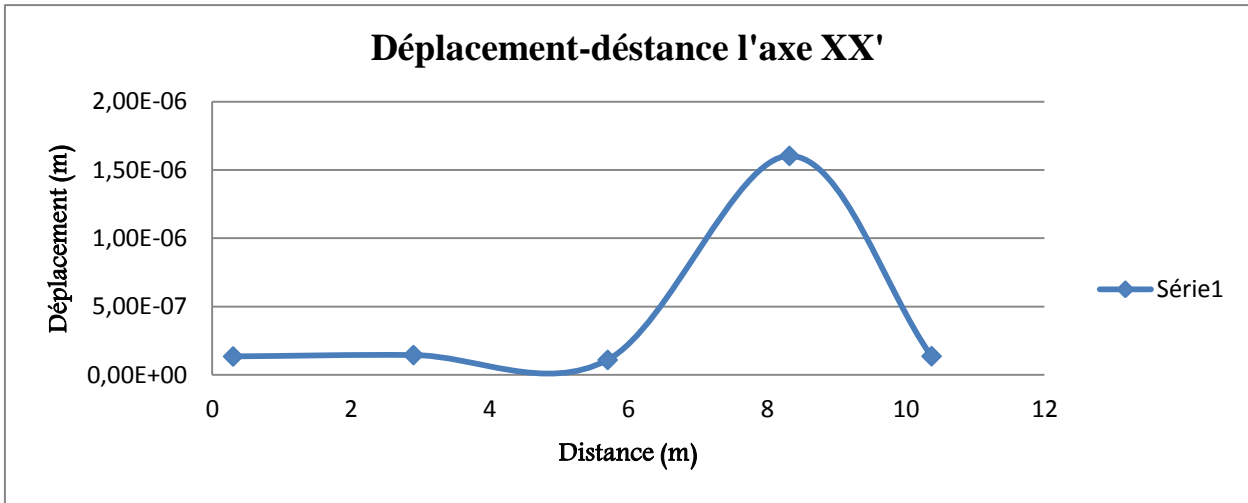


Figure (V-14) : Déplacement-distance XX'

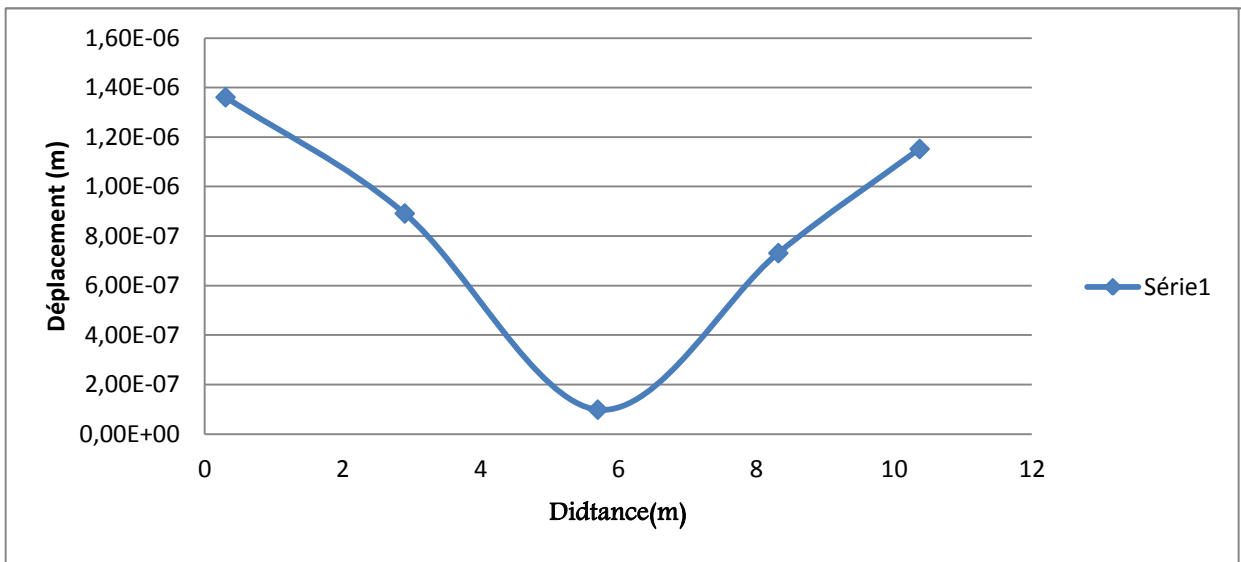


Figure (V-15) : Déplacement-distance YY'

- **Commentaire de cas horizontal :**

D'après la figure (V-12) et (V-13) nous pouvons conclure ce qui sont :

**Déplacement-distance dans le sens XX' :** l'analyse de cette courbe montre trois phases distinctes :

- La première phase [0-6m] : le déplacement est presque constant.
- La deuxième phase [6 à 8m] : le déplacement varie d'une façon exponentielle croissante.
- La troisième phase une variation exponentielle décroissante.

**Déplacement-distance dans le sens YY'** : l'analyse de cette courbe montre deux phases distinctes :

La première phase [0-6m] où le déplacement décroît et la deuxième phase [6-12m] le déplacement reprend mais dans un sens croissant.

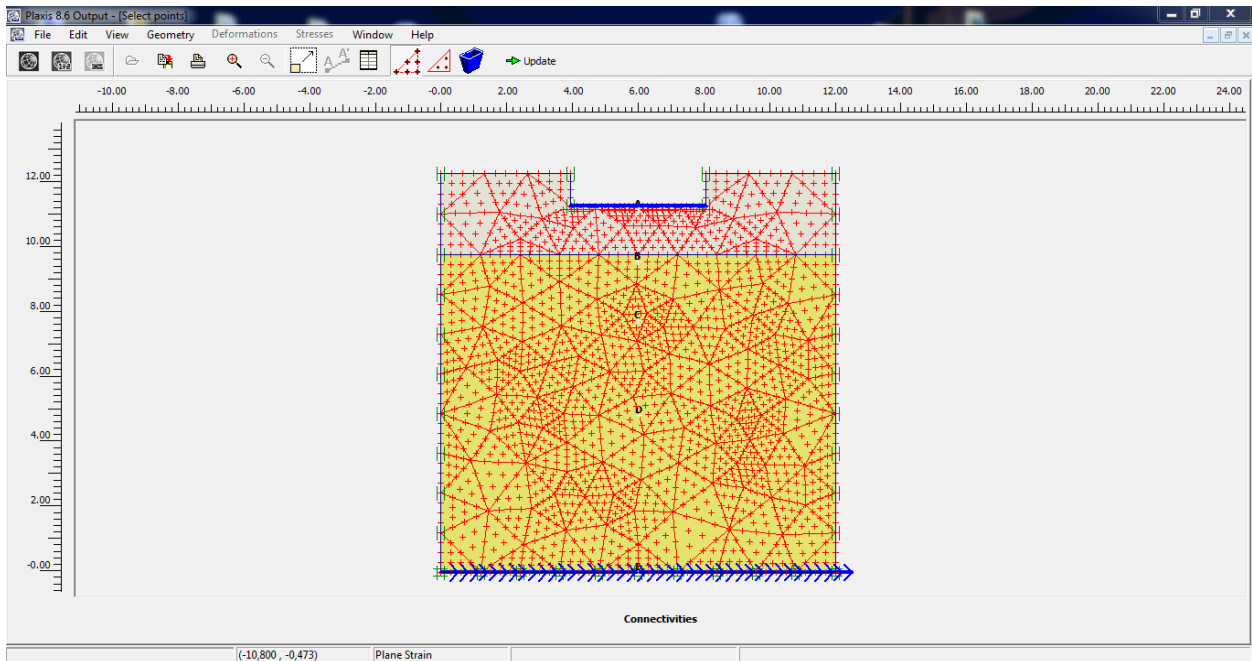
### V-3. Effet des ondes verticales :

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

	N° de point	A	B	C	D	E
	Y(m)	11,3	9,80	7,77	6,67	5,80
Déplacement (m)	XX'	$8,864 \cdot 10^{-8}$	$5,113 \cdot 10^{-7}$	$1,221 \cdot 10^{-6}$	$3,083 \cdot 10^{-6}$	$8,413 \cdot 10^{-6}$
	YY'	$7,506 \cdot 10^{-6}$	$7,203 \cdot 10^{-6}$	$5,747 \cdot 10^{-6}$	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$4,303 \cdot 10^{-6}$

**Tableau (V-3) : Résultats des paramètres de mouvement dans le cas vertical**

Le calcul dans notre simulation est modélisé selon la figure suivante :



**Figure (V-16) : Schématisation des points de l'axe YY'**

## Chapitre V : Résultats des calculs et interprétation

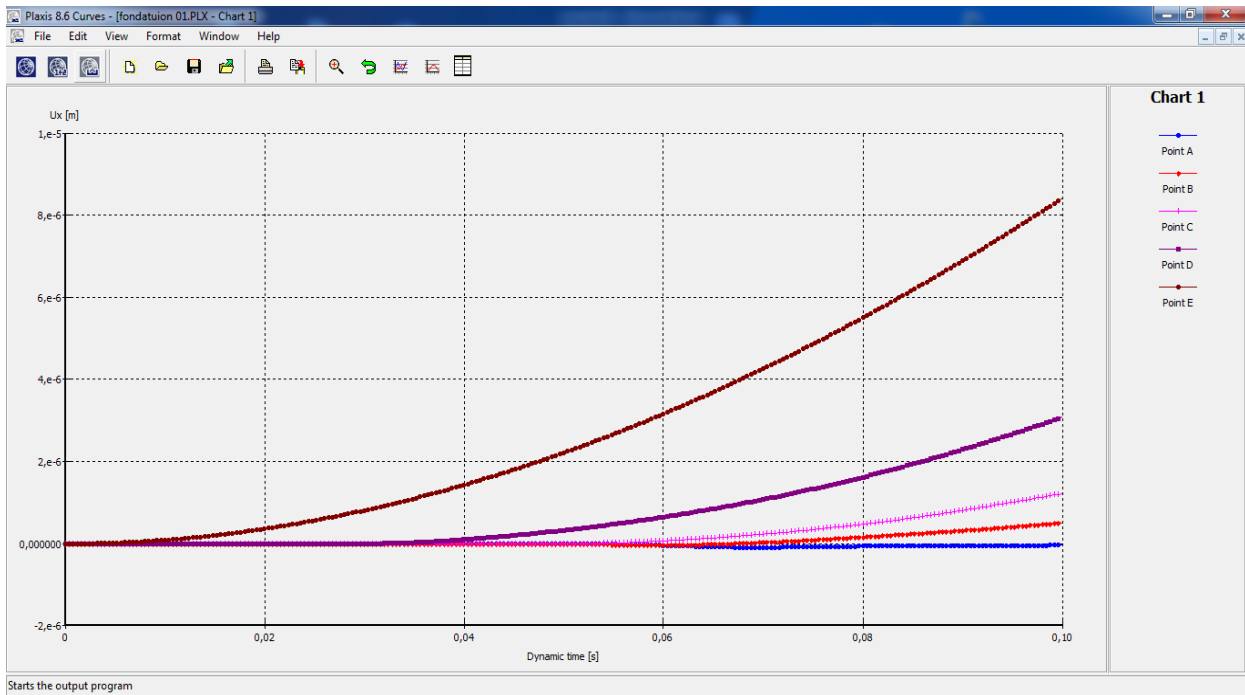


Figure (V-17) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe XX'

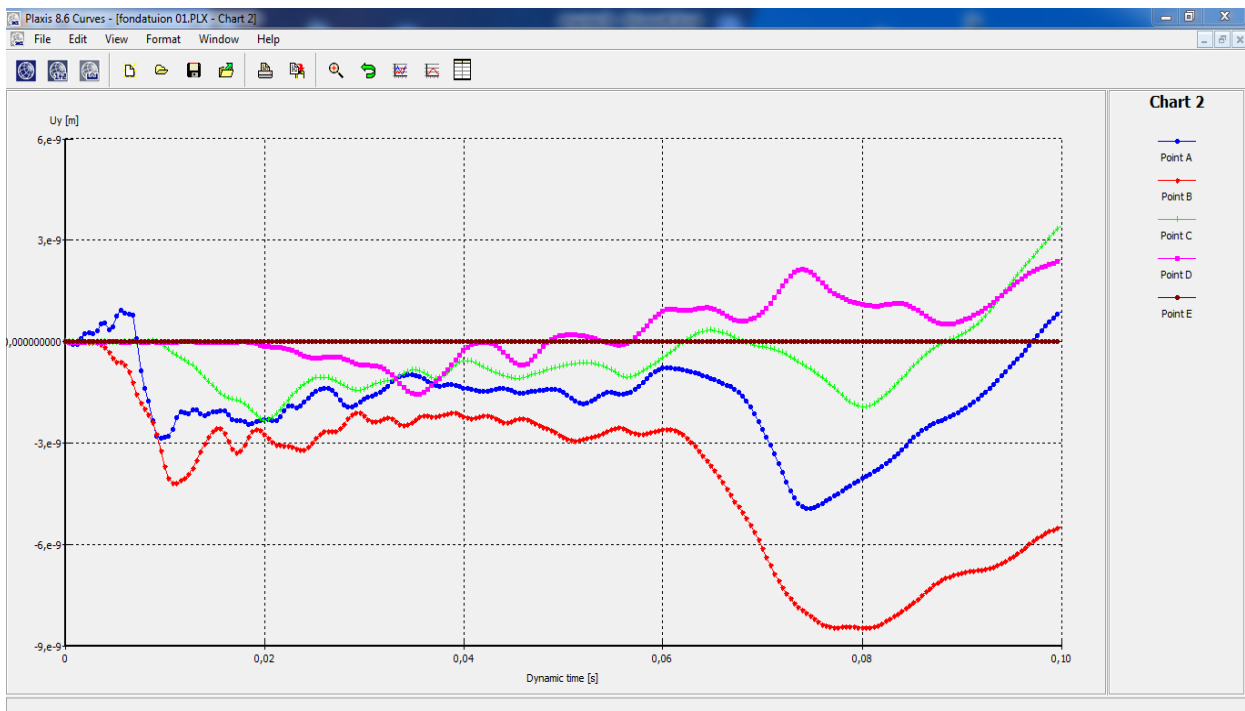


Figure (V-18) : Déplacements des points en fonction de temps l'axe YY'

## Chapitre V : Résulta des calculs et interprétation

La comparaison des résultats est présentée par les courbes suivantes figure (V-19) et (V-20).

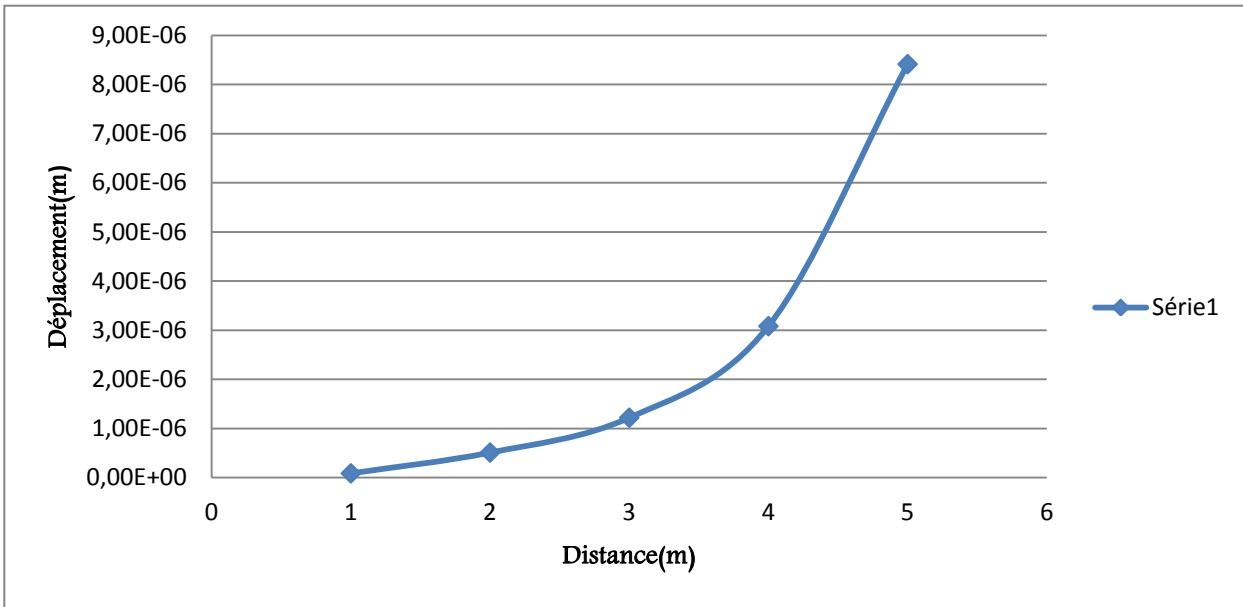


Figure (V-19) : Déplacement-distance XX'

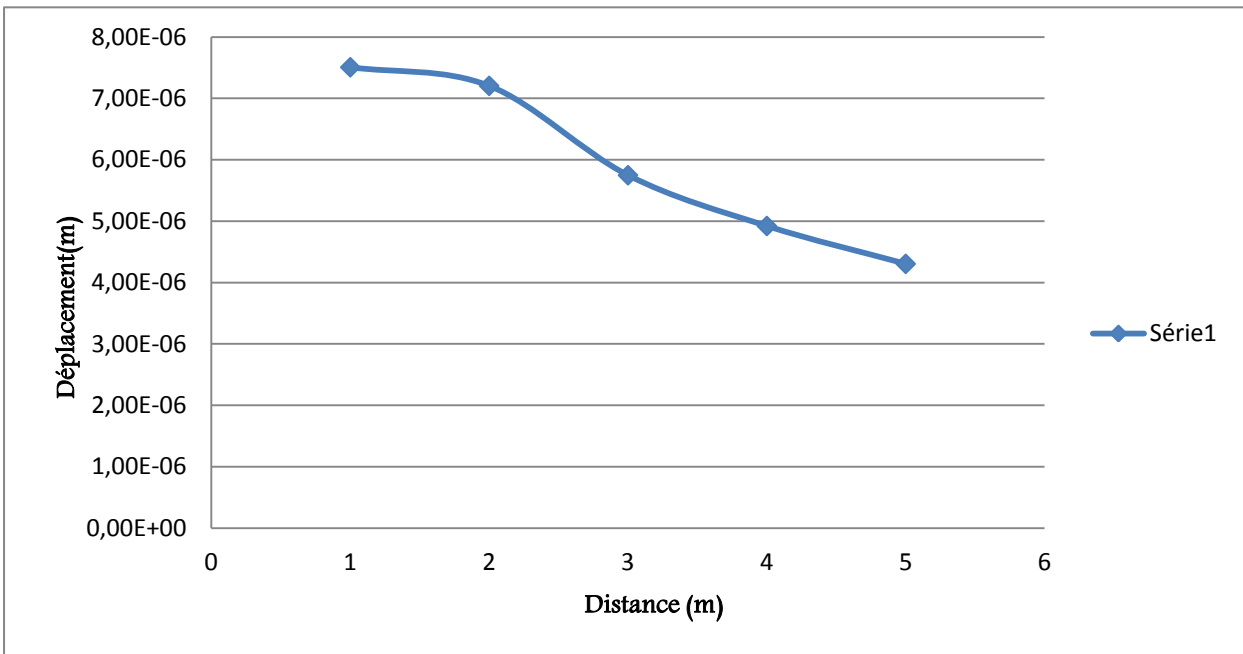


Figure (V-20) : Déplacement-distance YY'

- **Commentaire de cas vertical :**

D'après la figure (V-19) et (V-20) nous pouvons conclure ce qui sont :

**Déplacement-distance dans le sens XX' :** la figure ci-dessus est une fonction croissante, mais la pente de cette courbe augmente rapidement au de la du pont  $x=4\text{m}$ .

**Déplacement-distance dans le sens YY'** : l'analyse de cette courbe montre deux phases distinctes :

La première phase [0-3m] montre une variation décroissante du déplacement et la deuxième au-delà de 3m la variation est linéaire décroissante.

#### V-4. Synthèses :

- La charge sismique élastique et permanente appliquées sur la structure de pont poutre engendrent des déplacements, vitesses et accélérations.
- La surface, dont on trouve la valeur maximum de déplacement au niveau de la surface de contact (sol-structure).
- 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 vers le plan de la source.
- La valeur du déplacement est augmentée au voisinage de la structure « la plus proche de la zone de contact ». Et diminue en s'éloignant du plan de contact vers le plan de source.

**CONCLUTION GENERALE**