

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'observation des séisme 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'autre régions, pourtant adjacentes à celle-ci, des structures similaires arront 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" relies 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, ont été mises en œuvre pour résoudre un certain nombre de problèmes dont les problèmes sismiques. Dans ce domaine, la méthode des éléments finis permet d'étudier la réponse du sol....etc, Cette technique évolue rapidement avec les progrès apportés par les ordinateurs à grande capacité et grande vitesse de calcul et par les techniques d'analyse numérique.

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 une certaine marage admissible de risque, à des secousses sismique probables. Ceci ne peut pas se faire sans une bonne connaissance des caractéristique du mouvement sismique, et une meilleure estimation du maximum probable de ce dernier et son avènement dans le temps et dans l'espace, même s'il dissipe d'outils puissants que sont les nouvelles méthodes de l'évaluation de la réponse sismique du sol.

INTRODUCTION GENERALE

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

Le comportement des sols sous sollicitation sismique est présenté dans le chapitre deux. Ainsi l'étude de la réponse sismique d'un profil de sol et les méthodes de résolutions de l'équation de la discrétisation par élément finis. Dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre est consacré à la description générale de l'outil de calcul "PLAXIS" ainsi la mise on oeuvre des calculs effectués à la l'aide du "code PLAXIS" et études de mouvement sismique dans deux différents cas de des résultats 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.

CHAPITRE I

Introduction

L'action sismique est un mouvement vibratoire du sol de forte amplitude et de caractère aléatoire correspondant à la propagation d'une perturbation ayant pris naissance à l'intérieur de l'écorce terrestre. Elle est caractérisée par un certain nombre de paramètres qui dépendent de nombreux facteurs, en particulier: mécanisme au foyer et profondeur focale, distance du site à la source, direction de propagation, propriétés mécaniques et configuration des milieux traversés, caractéristique géologique, géotechnique et géomorphologiques du site. Dans ce chapitre nous discuterons de certains paramètres caractérisant l'action sismique.

I-1 Séisme

Un séisme ou tremblement de terre traduit en surface par des vibrations du sol plus ou moins violentes et destructrices. Il provient de la fracturation des roches en profondeur. Celle-ci est due à l'accumulation d'une grande énergie qui se libère, en créant ou en faisant rejouer des failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches sont atteint.

Les dégâts observés en surface sont fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée des vibrations. [1]

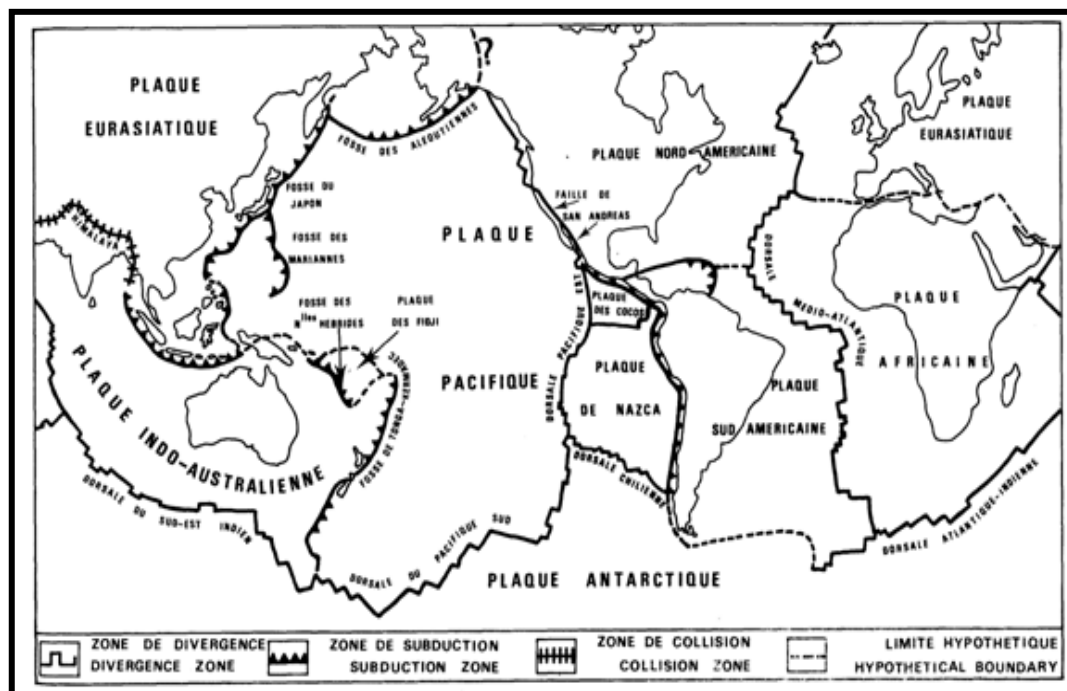


Figure I. 1.Sismicité de la terre(Bruce Bolt 1982).

I-2 Failles et mécanismes de génération

Lors d'un séisme, la rupture s'accompagne d'un déplacement relatif de deux blocs rocheux 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 de la croûte terrestre avec déplacement de blocs rocheux suite au déchargement de contraintes accumulées au cours du temps. Suivant le type de mouvement relatif, on définit trois types de failles :

- ✓ **Failles normales:** dans ce cas, le bloc au-dessus de la faille bouge vers le bas par rapport au bloc en dessous. Ce mouvement est créé par des forces en extension et provoque un allongement.
- ✓ **Failles inverses:** ou chevauchantes, le bloc au-dessus de la faille bouge vers le haut par rapport au bloc en dessous. Ce mouvement est créé par des forces en compression et provoque un raccourcissement.
- ✓ **Failles décrochantes:** marquent un mouvement de coulissage horizontal le long d'un plan de faille vertical.

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.

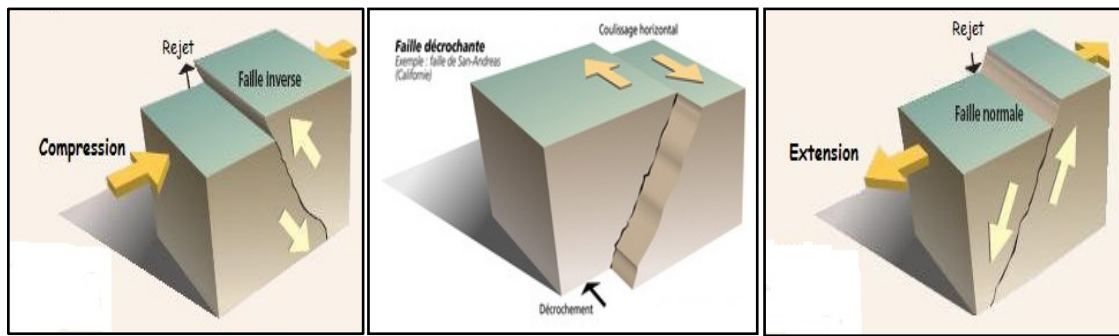


Figure I. 2. principaux type des failles(source: MATE).

I-3 Nature et mode de propagation des ondes sismiques

L'étude des sismographes de tremblement de terre révèle des informations fondamentales pour l'étude de la structure de la Terre. Lors le déclenchement d'un séisme le sol tremble en raison de l'arrivée en surface de vibrations appelées ondes.

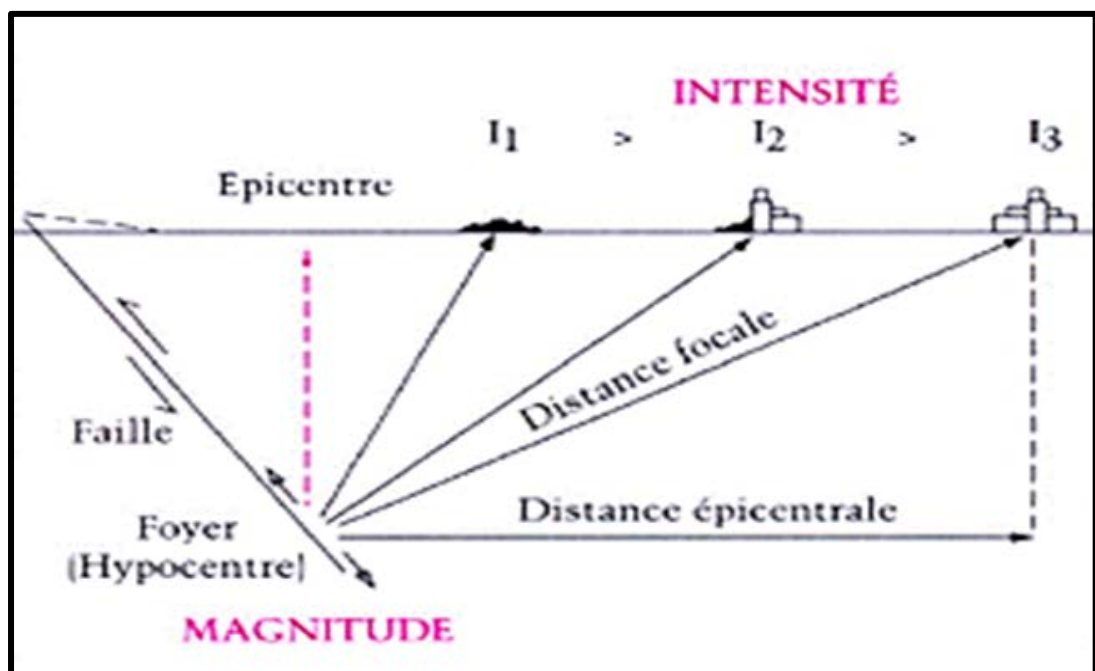


Figure I. 3. Représentation schématique d'un séisme(Magnitude et intensité d'un séisme) (source:MATE).

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent traverser un milieu en le modifiant selon l'intensité du séisme.

Il faut savoir qu'un sismomètre enregistre plusieurs types d'ondes différents. En étudiant la propagation des ondes dans les milieux connus, nous pouvons déterminer qu'un séisme est constitué de deux types différents d'ondes:

- Ondes de volume.
- Ondes de surface.

I-5-1- Ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé, il existe deux types d'ondes de volumes:

I-5-1-a-Ondes longitudinales ou primaires(P): appelées aussi ondes de compression, Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives, Elles se propagent dans tous les milieux, Ces ondes se propagent plus rapidement que les autres et sont généralement peu destructrices.

I-5-1-b-Ondes transversales ou secondaires(S): appelées aussi ondes de cisaillement, À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides.

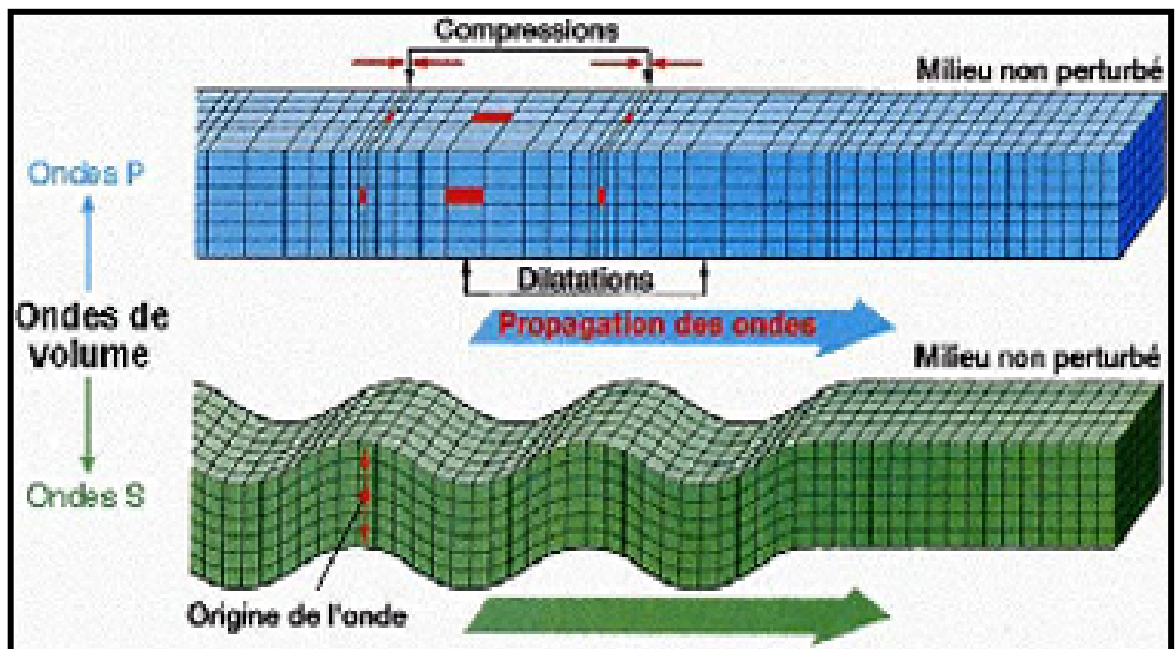


Figure I.3.1. Ondes de volume

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

✓ Pour les ondes P (m/s)

$$V_p = \sqrt{\frac{\sigma + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\vartheta)}{\rho(1-2\vartheta)(1+\vartheta)}} \quad (1.1)$$

✓ Pour les ondes S (m/s)

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\vartheta)}} \quad (1.2)$$

Le rapport des vitesses des ondes P et S est donc :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\vartheta)}{1-2\vartheta}} \quad (1.3)$$

Les ondes P se propagent donc plus vite que les ondes S, pour $\vartheta = 0$, on est à la limite inférieure du rapport de deux vitesses et pour $\vartheta = 0.50$, on touche à la limite théorique supérieure.

Notons par :

ρ : Densité du milieu [N/m^4]

E: Module d'élasticité dynamique [N/m^2]

G: Module de cisaillement dynamique [N/m^2]

ϑ : Coefficient de poisson

σ : Constantes de lamé

On a:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\vartheta E}{(1-2\vartheta)(1+\vartheta)}} \quad G = \frac{E}{2(1+\vartheta)} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \vartheta = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon}$$

Où

ε : déformation dans la même direction

:

ε_I : Déformation dans la direction perpendiculaire

I-5-2-Ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre, Elles sont moins rapides que les ondes de volume. On peut distinguer :

I-5-2-a-L'onde de Love (L): ce sont des ondes de cisaillement qui se produisent quand le massif comporte dans sa partie superficielle une superposition de couches horizontales de caractéristique différentes.

I-5-2-b-L'onde de Rayleigh (R): elles se propagent le long de surface libre limitant un massif semi-infini, ce sont des ondes pour lesquelles les points du sol décrivent des ellipses dans le plan vertical de propagation.

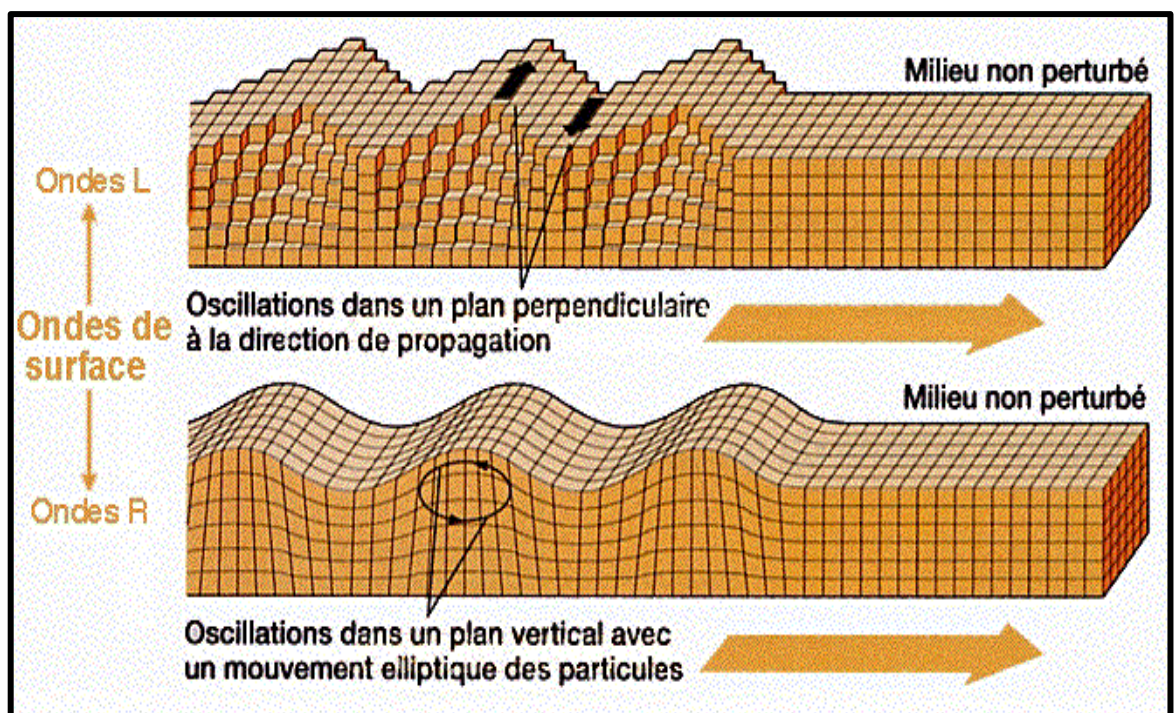


Figure I.3.2. Ondes de surface

Les ondes de cisaillement (S) et (L) sont plus dangereuse pour les constructions que les ondes (P).

I-4 Les risques sismiques

A partir des cartes simplifiées des risques sismiques (Figure I.4) il est possible de dresser des plans d'urbanisme et d'édifier un grand nombre de constructions.

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

Pour cela, il faut faire l'histoire sismique de la région et évaluer la probabilité des mouvements du sol qui pourraient se produire au voisinage du site choisi.

L'étude de ces mouvements se traduit par le calcul des valeurs des accélérations (ou des vitesses) du sol et de la durée des ébranlements sismiques prévisibles, autant de facteurs qui conditionnent la réponse des ouvrages.[2]

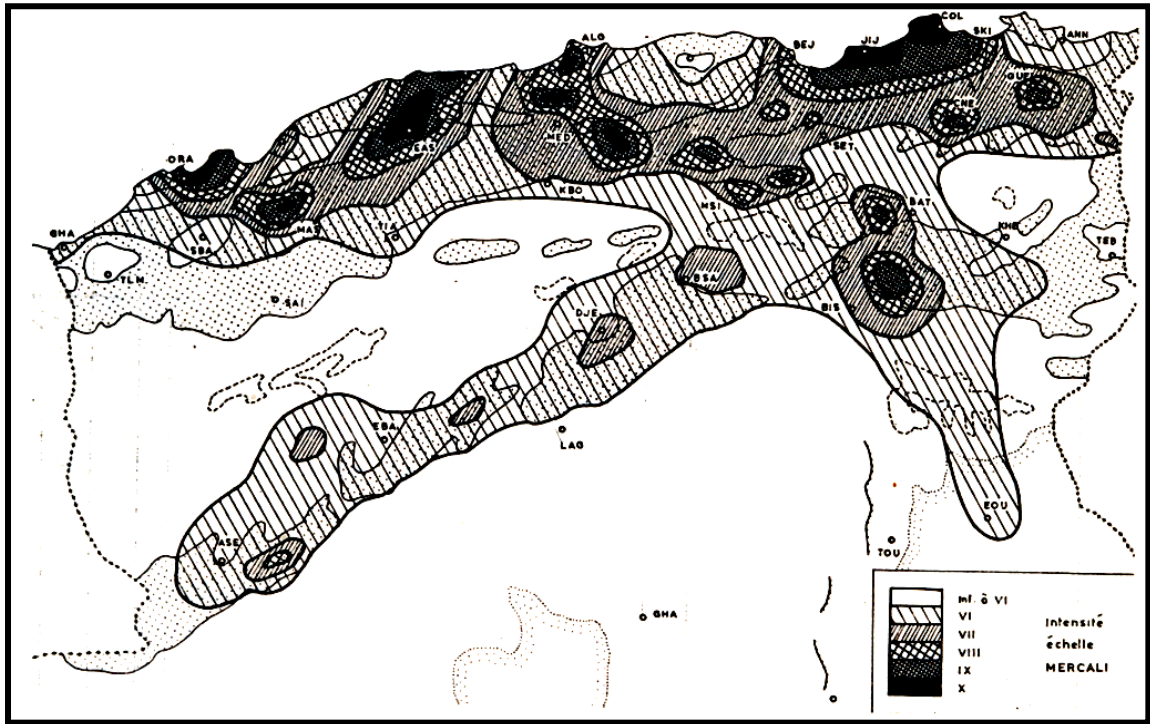
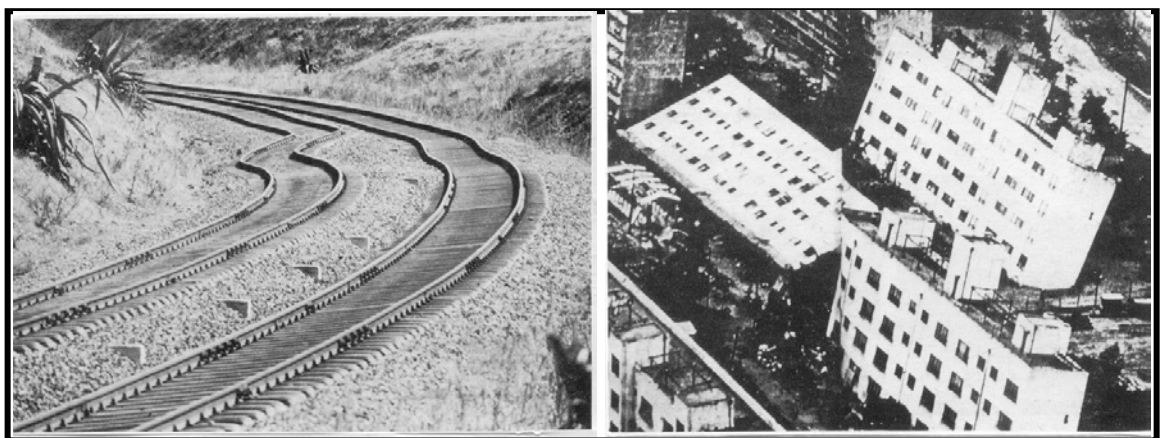


Figure I. 4. Les régions à risques sismiques . Degré d'intensité mesuré d'après les dégâts occasionnés, sur période 1715 à 1998. (D'après carte CNAG, modifiée).

L'Algérie n'est pas à l'abri des catastrophes sismiques toute l'histoire géologique le montre à l'évidence; et pourtant les études d'évaluation du risque sismique restent peu développées, mais elles seraient souhaitables économiquement et pour la protection des vies humaines, des investissements et de l'environnement Clichés 1et 2. [3]



Cliché 1. Torsion de la voie ferrée Alger- Oran Cliché 2. Bâtiment basculé a El Asnam

I-5 foyer et l'épicentre d'un séisme

I-5-1-le foyer

Est le lieu qui constitue l'origine de l'énergie de l'ébranlement des roches. Selon la profondeur des foyers on classe les séismes en :

- Superficiels (normaux).
- Intermédiaires.
- Profonds

I-5-2-L'épicentre

Est le point de la surface du sol le plus proche du foyer. L'épicentre macrosismique est le lieu de plus forte intensité ressentie, il peut être différent de l'épicentre réel. Autrefois, la détermination de l'épicentre se faisant à partir des appréciations des personnes ayant senti le séisme et également les dégâts.

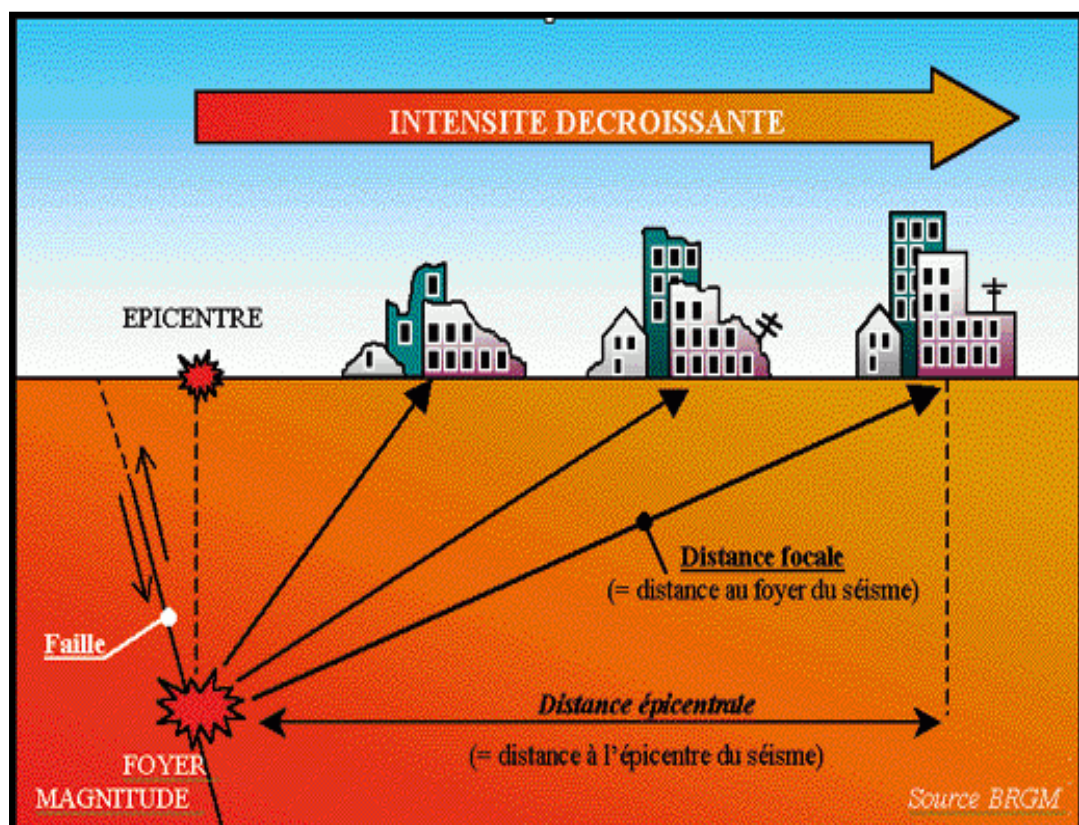


Figure I. 5.Foyer et l'épicentre d'un séisme (source BRGM)

I-6 Paramètres caractéristiques du mouvement sismique[4]

La question qui se pose est de savoir comment comparer les sévérités respectives de divers séismes; Les sismologues savent que l'importance et la taille du séisme se caractérise par différents paramètres:

La magnitude M(échelle de RICHTER) est une évaluation de l'énergie libérée au foyer du tremblement de terre. Comme telle, cette quantité n'est pas utilisable par l'ingénieur des constructions qui s'intéresse à un mouvement en surface et dans une zone géographique donnée. Le foyer peut se trouver à plusieurs kilomètres sous la surface et à plusieurs centaines de kilomètres de la zone donnée.

Locale ML: séismes locaux. Elle est définie à partir de l'amplitude maximale des ondes P. Elle est toujours moyennée sur plusieurs stations en tenant compte des corrélations locales.

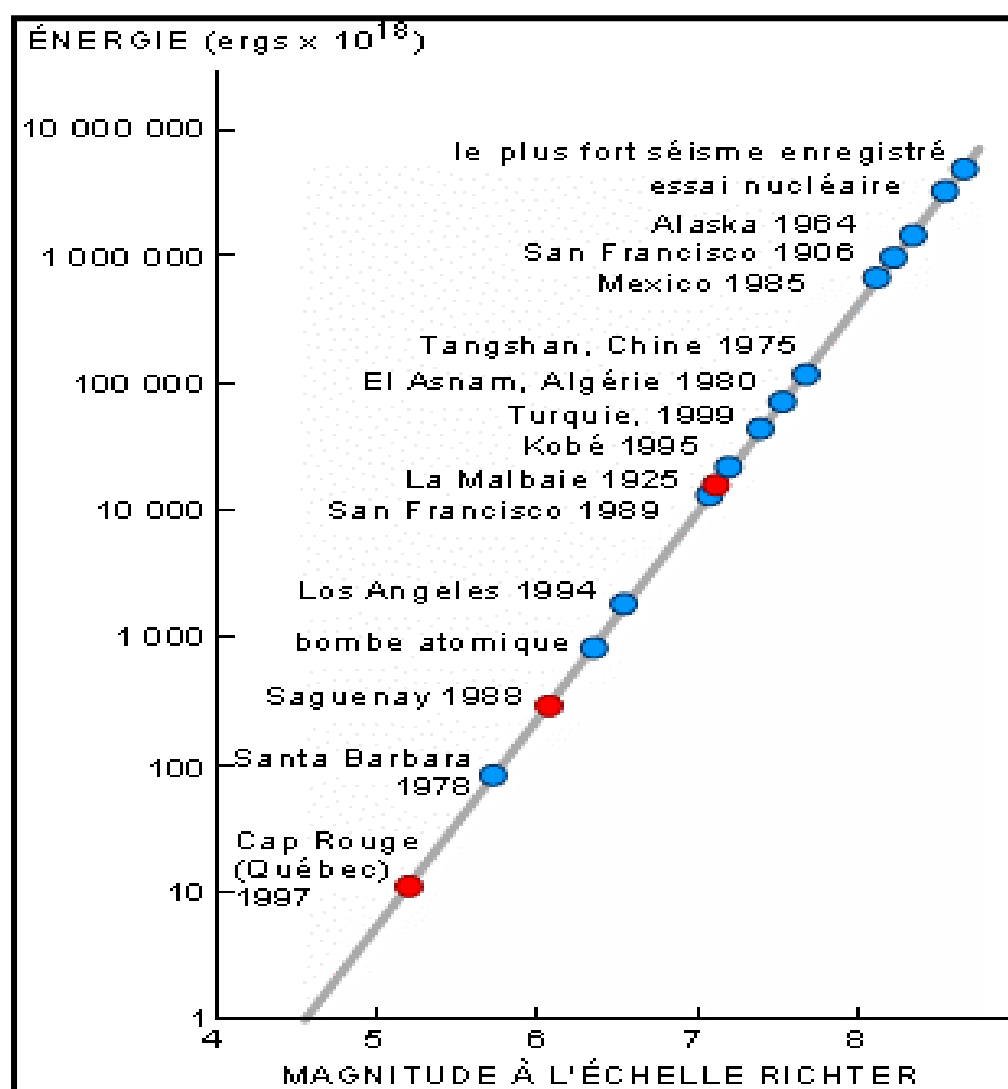


Figure I. 6.1. Relation magnitude (échelle arithmétique) / foyer (échelle logarithmique) (source : Université de Laval)

L'intensité I (échelle de MERCALLI) est une caractérisation de l'importance des effets matériels observés en surface et de la perception par la population. Cette description vaut pour une zone géographique donnée, mais est assez qualitative. L'intensité en un point dépend non seulement de la taille du séisme (magnitude) mais aussi de la distance au foyer, de la géologie locale et de la topographie.

Degré	Observations	Accélération $cm. s^{-2}$ a/g
I	Secousse imperceptible à l'homme	1 0.001g
II	Secousse ressentie par un petit nombre d'observateurs	2 3
III	Secousse ressentie par un certain nombre d'habitants. La durée et la direction peuvent parfois être appréciées	4 5 6 7
IV	Ebranlement constaté par quelques personnes en plein air, vibration de vaisselle	8 9 10 0.01g
V	Ebranlement constaté par toute la population, réveil des dormeurs.	20 30
VI	Des personnes effrayées sortent des habitations. Vaisselle brisée, cloches mises en branle.	40 50 60
VII	Maisons légèrement endommagées, lézardes dans les murs	80 90 100 0.1g
VIII	Fentes béantes dans les murs, chute de cheminées et de clochers, renversement des statues	200 300
IX	Un grand nombre de maisons sont rendues inhabitables	400 500 600 700
X	La plupart des bâtiments sont détruits, dommages aux ponts	800 900 1000 1g
XI	Destruction totale des bâtiments, des ponts, des digues. Larges déchirures et crevasses dans le sol.	2000 3000
XII	Rien ne demeure des œuvres humaines, dislocations horizontales et cisaillement du sol	4000 5000 6000

Tableau I.1 Echelle macrosismique internationale d'intensité (A rapprocher de l'échelle de Mercalli modifiée)

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

Un paramètre important pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est: **l'accélération maximale a_g** du sol ou accélération de point, Son ordre de grandeur est de 0,4g à 0,6g en zone très sismique (Japon, Turquie) et de 0 à 0,1g en zone faiblement sismique (Belgique). L'amplitude de l'accélération maximale du sol permet de se faire une idée de la résultante de force F appliquée à la construction de masse m : $F = ma_g$ si la construction est indéformable et bouge comme le sol (en général $F > ma_g$), C'est en terme de 'accélération maximale a_g au niveau du bedrock qu'on exprime les cartes de zonage sismique quantifiant le niveau sismique à prendre en compte pour l'application des règles de constructions parasismiques. On en donne un exemple au (Figure I.6.1).

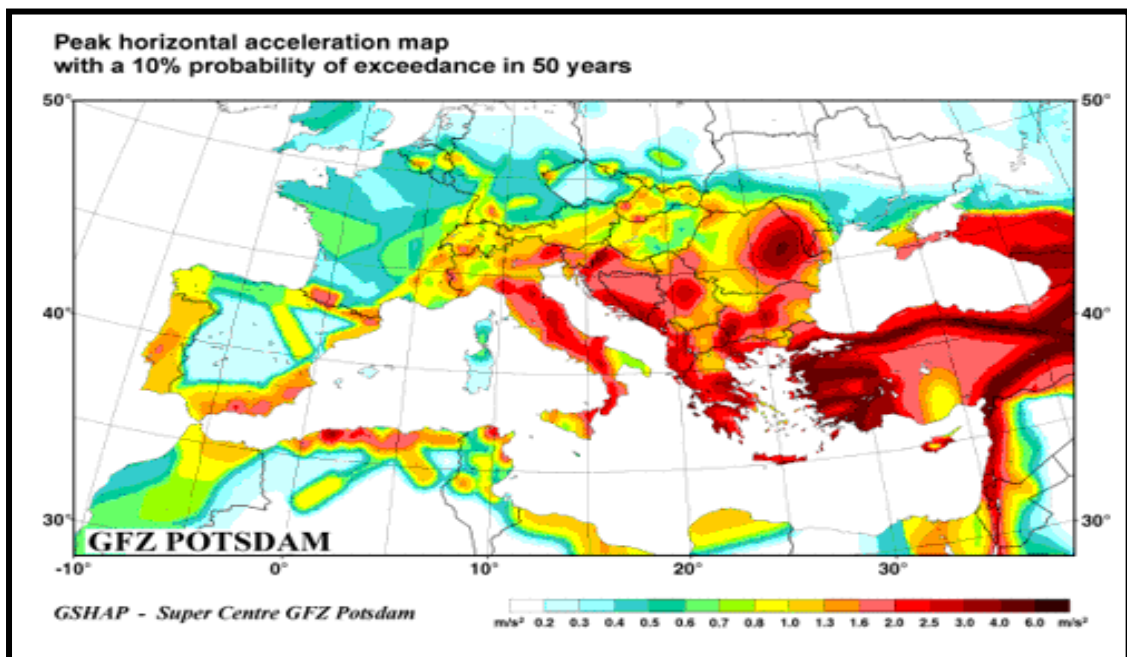


Figure1.6.2. zonage sismique européenne en accélération maximale a_g en (m/s^2).

Un autre paramètre utile pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est **le déplacement maximal d_g** du sol, qui donne une idée de l'ordre de grandeur du déplacement relatif du centre de gravité de la structure par rapport à la base de la structure : quelques **cm** en zone faiblement sismique, jusqu'à un **m** en zone très sismique.

La durée du tremblement de terre est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction. Elle est liée à la magnitude du séisme. Cette durée est au maximum de l'ordre de **60 s** en zone très sismique, mais n'est que de quelques secondes en zone peu sismique.

La caractérisation la plus explicite d'un tremblement de terre est évidemment constituée **d'accélérogrammes** enregistrés dans la zone géographique considérée, qui contiennent à la fois **les aspects accélérations, durée et contenu fréquentiel**. Les accélérogrammes constituent une donnée d'action directement utilisable par la dynamique des structures.

Enfin, **les spectres de réponse** constituent la caractérisation des tremblements de terre la plus couramment utilisée par l'ingénieur des constructions. Ils sont des sous-produits des accélérogrammes et permettent un calcul des efforts internes dans une structure soumise à séisme.

I-7 L'accélérogramme du séisme[6]

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent sous la forme d'une accélérogramme qui représente la variation de l'accélération, la vitesse et le déplacement dans une direction donnée en fonction du temps. Les mouvements lors d'un séisme s'effectuent dans toutes les directions à l'horizontale comme au vertical. C'est-à dire il est enregistré pour un même séisme 03 accélérogrammes:

- Un accélérogramme de direction Nord-Ouest.
- Un accélérogramme de direction Est-Ouest.
- Un accélérogramme à la direction verticale.

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

- **L'amplitude**, qui est généralement définie par la valeur du pic d'accélération
- **La fréquence**, qui est une fréquence moyenne déterminée en comptant le nombre de fois que l'accélérogramme coupe l'axe des abscisses par unité de temps
- **La durée**, définie par le temps qui s'écoule entre le premier et le dernier pic au-dessus d'un certain niveau où l'amplitude des accélérations est notablement plus élevée.

Une même structure pouvant être soumise à plusieurs séismes différents, pour que les résultats de calculs présentent une fiabilité acceptable il faut utiliser au moins quatre accélérogrammes indépendants pour chaque composante du mouvement. D'autant plus que de faibles variations des fréquences propres calculées pour un bâtiment (les incertitudes sur la plupart des paramètres de modélisation rendent nécessaire la considération de telles variations) se traduisent par des variations sensibles de la réponse calculée.

La nature des accélérogrammes dépend d'un certain nombre de facteurs tels que :

- La magnitude du séisme.
- La distance à partir de la source de libération d'énergie.
- Les caractéristiques géologiques le long du trajet de la transmission d'onde.
- Le mécanisme de source.
- Les conditions locales du sol.

Pour des applications lors des analyses linéaires, le choix des accélérogrammes n'est pas trop pertinent, car la base de définition de l'action sismique est alors naturellement représentée par un spectre élastique de réponse de calcul et les accélérogrammes retenus fournissent une approximation satisfaisante du spectre de base.

Dans le cas des analyses non-linéaires, le choix de l'accélérogramme est beaucoup plus difficile, car la réponse non linéaire change en cas de changement d'accélérogramme correspondant à une diminution du spectre élastique.

Les accélérogrammes utilisés dans les calculs peuvent être :

- ✓ Des accélérogrammes naturels enregistrés sur des sites comparables à celui de l'ouvrage.
- ✓ Des accélérogrammes artificiels c'est-à-dire déterminés par le calcul pour que le spectre d'oscillateur soit très voisin du spectre donné.

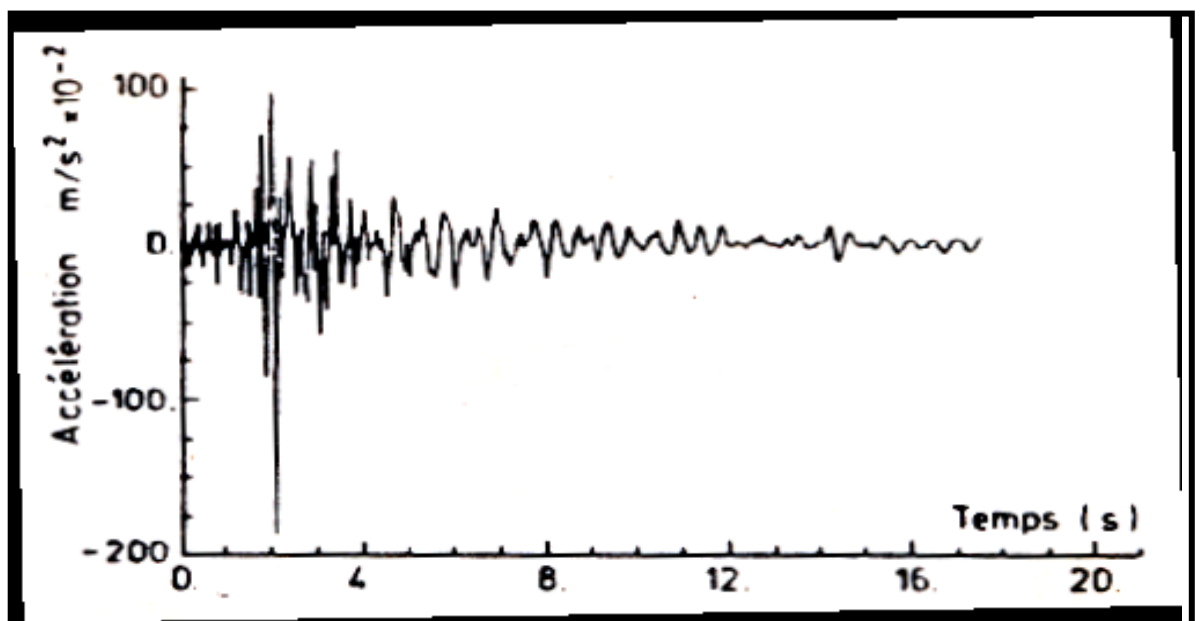


Figure I. 7.Exemple d'accélérogramme (corrigé).

I-8 Accélération maximale [6]

L'accélération maximale du sol est un paramètre caractérisant le mouvement de sols soumis à des ondes sismiques, il est lié à la vitesse du sol se déplaçant lors d'un séisme. Elle se note $a_g R$ et se mesure en $m.s^{-2}$. Ces deux paramètres dépendent de l'intensité de la secousse, mais aussi de la nature géologique du sous-sol. Pour les petits séismes, c'est surtout l'accélération qui est ressentie par la population et rarement les mouvements verticaux. C'est l'un des principaux paramètres utilisés dans la conception de structures parasismiques.

Les accélérations du sol sont fonction non seulement de la magnitude du séisme mais aussi de la distance entre le site de mesure et la source sismique, ainsi que de la rigidité des dernières centaines de mètres de sol. Un séisme de magnitude produit une accélération de $1 m/s^2$ à 20 km et de $0,1 m/s^2$ à 100 km, sur un sol rigide roche dure. Sur un sol mou sédiments, les amplifications peuvent varier d'un facteur 2 à 10. En France métropolitaine, dans les zones les plus sismiques, le seuil d'accélération qui a 10 % de probabilité d'être dépassé dans les cinquante prochaines années est inférieur à $2,4 m/s^2$. Cette même étude d'aléa au Japon donne un seuil allant jusqu'à plus de $4,8 m/s^2$ et on trouve $3 m/s^2$ dans la région de Fukushima.

I-9 Durée du séisme [5]

La durée du tremblement de terre est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction. Elle est liée à la magnitude du séisme. Cette durée est au maximum de l'ordre de 60 s en zone très sismique, mais n'est que de quelques secondes en zone peu sismique. La durée des vibrations sismiques ressentie par les personnes dépend de deux facteurs :

- 1-** la durée d'émission des ondes sismiques par le rejeu de la faille tectonique (en gros longueur de la faille divisée par la vitesse de propagation de la rupture qui est environ de 3 km/s)
- 2-** la durée liée d'une part à l'étalement des arrivées d'ondes sismiques s'étant propagées à des vitesses et d'autre part aux phénomènes de résonance des couches géologiques et des sols situés sous le lieu d'observation qui allongent la durée des vibrations (dans les bassins alluviaux par exemple).

Pour les très gros séismes, la première durée peut devenir importante et son effet se combine avec l'effet de la propagation. Pour les petits séismes, la durée des ondes sismiques à la source est très brève. L'effet d'allongement de la vibration vient de la propagation des ondes sismiques et éventuellement de phénomènes de résonance locale.

I-10 Le spectre de réponse [7]

Les spectres de réponse tirent leur origine et leur intérêt de l'assimilation, en première approximation, du comportement sismique d'un bâtiment à la réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté.

La représentation en spectre de réponse vise à donner accès directement aux mouvements subis par le centre de gravité de la structure.

La représentation graphique d'un spectre de réponse est construite point par point en faisant varier la fréquence d'un oscillateur à un degré de liberté et en reportant cette fréquence en abscisse et le maximum temporel de la réponse à une sollicitation sismique en ordonnée. On obtient ainsi un spectre de réponse pour un amortissement fixé.

On peut tracer les réponses maximales en termes de déplacements $[d(t)]_{max}$, de vitesse $[v(t)]_{max}$ et d'accélération $[a(t)]_{max}$ et de tracer les graphiques correspondants, dits spectres de réponses des déplacements (Figure.I.8.2).

Le déplacement $d(t)$ de la masse étant calculé pour chaque oscillateur, on peut déduire :

- ✓ Le spectre de réponse de déplacement, d'après la formule (1.5) avec

$$a(t)]_{max} / \omega = S_v \quad (1.4)$$

$$S_d = [d(t)]_{max} = S_v / \omega = D_{max} \quad (1.5)$$

- ✓ Le spectre de réponse de vitesse :

$$S_v = [v(t)]_{max} = \omega S_d \quad (1.6)$$

- ✓ Le spectre de réponse de l'accélération: il peut être tracé de la même façon, puisque L'accélération maximale et le déplacement maximal sont liés par la formule :

$$S_a = [a(t)]_{max} = -\omega^2 d(t) = \omega S_v \quad (1.7)$$

Ou encore :

$$a_{max} = \omega S_v = \omega^2 D_{max} \quad (1.8)$$

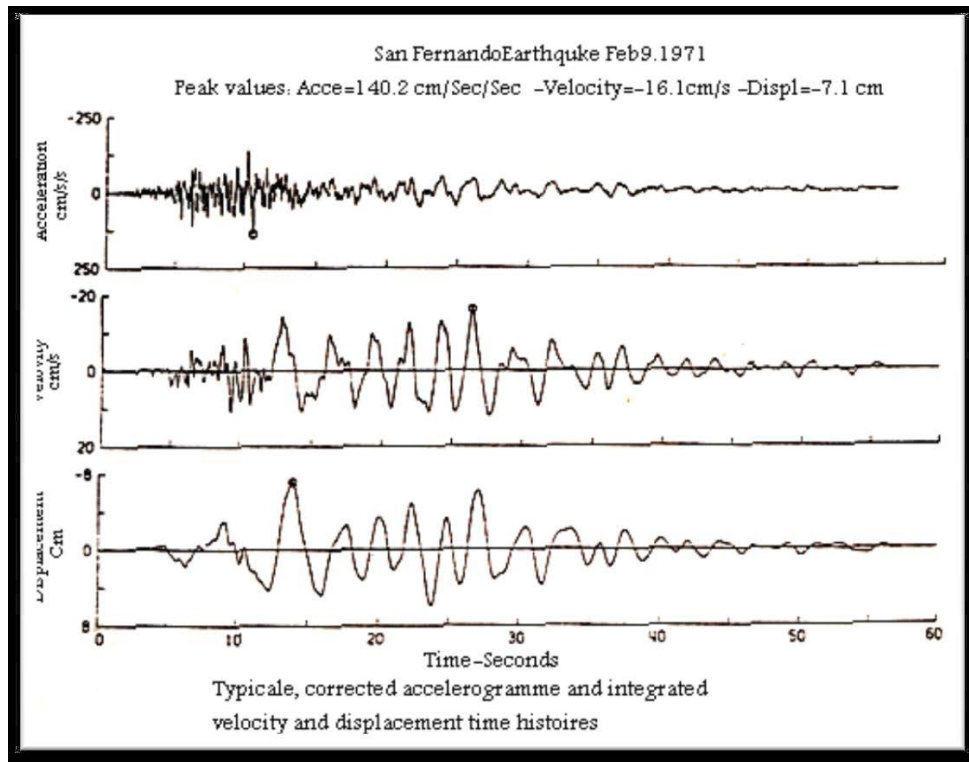


Figure I. 8.1. Les différentes phases d'un accélérogramme(San Fernando)

Les spectres caractérisent ainsi les séismes beaucoup plus clairement que les accélérogrammes (signaux temporels); connaître l'histoire du mouvement à chaque instant t est un problème complexe. Extraire seulement les valeurs maximales est à la fois plus simple et plus significatif puisqu'elles conditionnent les sollicitations maximales.

❖ Utilisation d'un spectre de déplacement :

En fonction de la période T (ou de la fréquence f) et du coefficient d'amortissement ζ de l'oscillateur, le spectre de déplacement relatif donne la valeur U_{max} du déplacement relatif maximale.

Ce déplacement imposé au système fournit directement la valeur de la force:

$$F_{max} = k D_{max} \quad (1.9)$$

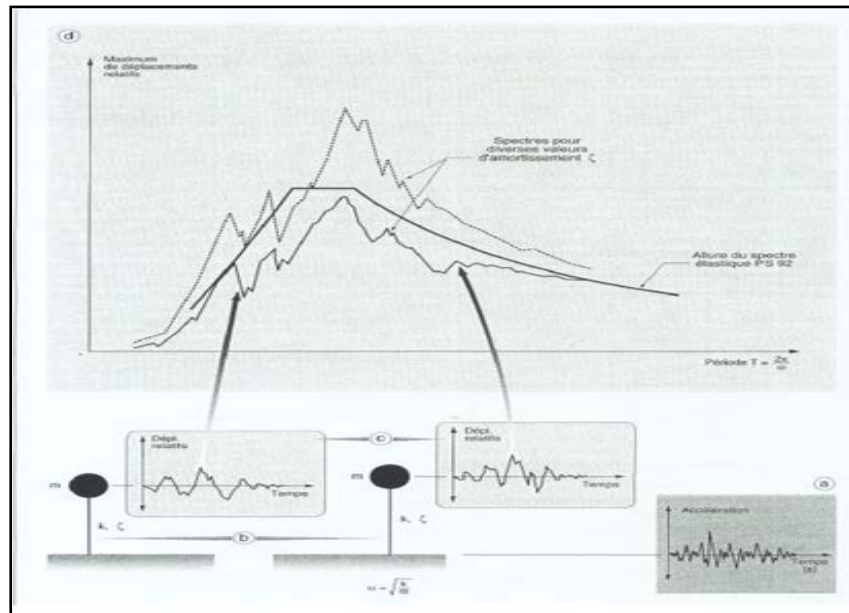


Figure I.8.2. Construction d'un spectre de déplacement

- a-** Accélérogramme enregistré.
- b-** Choix d'oscillateurs simples avec un amortissement ζ et une période T connue.
- c-** Réponses en déplacement des oscillateurs choisis.
- d-** Spectre de réponse en déplacement pour divers valeurs d'amortissement.

❖ Utilisation d'un spectre d'accélération:

En fonction de la période T (ou de la fréquence f) et du coefficient d'amortissement ζ de l'oscillateur, le spectre fournit la valeur maximale a_{max} de l'accélération. On en déduit la valeur de la force statique appliquée à la masse et équilibrée par le système:

$$F' = m a_{max} \quad (1.10)$$

Le spectre d'accélération est le plus employé, car il fournit immédiatement la force d'inertie maximale agissant sur la masse en mouvement, ce maximum s'identifiant à celui de la force élastique développée dans le système. Si les ordonnées du spectre sont exprimées en prenant comme unité l'accélération due à la pesanteur (g), elles fournissent le coefficient sismique propre à l'oscillateur (l'ouvrage), c'est-à-dire le coefficient qui appliqué au poids de la masse (mg), fournit la valeur de la force élastique produisant les mêmes sollicitations que la réponse dynamique.

Les valeurs des forces F_{\max} et F'_{\max} sont identique et les deux méthodes conduisent au même résultat puisque par construction les spectres de réponse sont liés par la relation :

$$a_{\max} = \omega^2 D_{\max} \quad (1.11)$$

Soit : $m a_{\max} = k D_{\max}$

Par ailleurs, on peut remarquer que la définition de l'action sismique par un spectre de réponse est une méthode particulièrement adaptée pour :

- Synthétiser par une enveloppe couvrant tout le domaine des fréquences les effets de plusieurs accélérogrammes aux contenus très différents.
- Prendre en compte la nature du terrain situé sous la construction.
- Tenir compte de l'intensité probable du séisme, du niveau de protection recherché et ceci en fonction de l'importance du bâtiment étudié.
- On aboutit ainsi à des spectres qui ne sont plus déduits mathématiquement d'un accélarogrammes précis mais sont devenus des entités autonomes, artificiellement façonnées en fonction de divers impératifs de protection parasismique.

L'usage du spectre de réponse pour corréler les mouvements du sol à l'intensité est abordé par de nombreux auteurs qui le considèrent globalement comme un bon paramètre. En effet, le spectre de réponse intègre non-seulement l'amplitude des mouvements, mais également leurs fréquences. Ce faisant, et comme exposé précédemment, les relations entre intensité et valeur spectrale (Pseudo-Accélération PSA ou Pseudo-Vitesse PSV) à une fréquence donnée sont applicables à toutes les régions[16]d'autre part, cette approcheest particulièrement intéressante pour les fortes intensités dans la mesure où les valeurs spectrales sont bien corrélées à la réponse des structures à une sollicitation sismique.

I-11 Les facteurs influants sur le mouvement sismique [8]

D'après l'ensemble des études effectuées par Alain Peckeron peut admettre que les principaux facteurs influants sur le mouvement sismique sont:

I-11-1 Facteurs liés à la source

Ces facteurs sont fonction des dimensions de la zone de rupture, des valeurs des contraintes le long de la surface de rupture, du mécanisme de la rupture et de sa propagation le long de la faille

D'un point de vue fondamental, ils sont caractérisés par deux paramètres principaux : le moments sismique M_0 et la chute de contrainte ΔT . L'utilisation de ces deux paramètres est encore limitée aux sismologues. Les ingénieurs préfèrent caractériser un séisme soit par sa magnitude, soit par son intensité à l'épicentre. Une certaine confusion règne dans l'utilisation de ces deux derniers paramètres du fait de la multiplicité des échelles servant à les mesurer ce sont pourtant eux qui servent de base aux évaluations de niveau sismique d'un site.

I-11-2 Facteurs liés au trajet parcouru

Le long de leur parcours, les ondes sismiques rencontrent des hétérogénéités et des surfaces de discontinuité qui influent sur leur type (conversion d'ondes de volume en ondes de surfaces), leur amplitudes (atténuation) et leur directions (réfraction).

Dans les études sismiques on prend compte de l'influence du trajet parcouru à l'aide d'un seul paramètre : La distance entre la source et le site. Il faut ajouter que le terme de distance n'est pas conçu d'une façon unique par divers chercheurs.

I-11-3 Facteurs liés aux conditions locales

Les conditions géologiques locales, les conditions topographiques, les interactions sol-structure modifient la nature du mouvement sismique. On s'est généralement attaché à mettre en évidence l'effet de la géologie locale (nature et caractéristique des terrains). Cependant des études analytiques ont permis de montrer l'influence des autres paramètres.

L'influence de la géologie locale est généralement mise en évidence à l'aide d'une classification sommaire de la nature des sites : sols rocheux, raides, intermédiaires ou très mous. La modification du mouvement sismique, lorsque l'on passe d'un type de sol à un autre, peut être examinée à l'aide des paramètres caractéristiques de ce mouvement (l'accélération ou vitesse maximale, spectre de réponse...etc.).

L'influence de la nature de sol est également mise en évidence de façon très nette en examinant les spectres de réponse à la surface du sol.

En conclusion, les conditions locales d'un site (géologie, topographie) ont une influence fondamentale sur la nature du mouvement à la surface du sol. Cette influence n'a pas toujours reçu, dans les études et dans les règlements, l'attention qu'elle mériterait bien que, au cours de ces dernières années, on assiste à revirement notable de cette tendance.

Conclusion

Ce chapitre a pour but de clarifier comment se produire un séisme et quels sont leur risques sur un ouvrage, ainsi que l'importance de la micro-zonation des zones sujettes à des séismes d'importance moyenne à grande afin de parvenir à une démarche cohérente pour la conception, le calcul et la réalisation de constructions parasismique.

CHAPITRE II

Introduction

L'analyse historique des séismes relève souvent d'une façon très marquée une dispersion régionale de leurs intensités et leurs effet destructifs.

L'examen des enregistrements de mouvement sismique produits à la surface des sols de natures géologiques et géotechniques différentes fait apparaître une forte dépendance de la nature de mouvement sur les caractéristique géotechniques. D'autre part, les enregistrements sismique montrent généralement des particularités distinctes pour chaque localité au niveau des amplitudes et du contenu fréquentiel selon les caractéristiques locales de chaque site.

Lors du séisme de San Francisco(1957), des variations de l'ordre de 100% ont été observées sur les enregistrements des points presque adjacents situés à la même distance de la source de séisme. [9], ont attribué ces variations à celles des conditions locales du site. Le séisme de 1967 au Venezuela, avec ses effet destructifs pour la ville de Caracas, a offert une nouvelle occasion pour réaffirmer l'influence des conditions locales de site.

Ces exemples montrent la nécessité qu'il y a à étudier la comportement des sols sous chargement dynamique pour parvenir, en zone sismique, à une conception fiable des ouvrages importants qui y sont fondés.

II- Comportement des sols sous chargement dynamique [10]**II-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.

II-2 Comportement élasto-plastique du sol:

Une partie de la déformation du sol soumis à un chargement quelconque est due à la déformation élastique des particules du sol le plus souvent cette déformation élastique constitue seulement une petite partie de la déformation totale du sol.

La déformation est souvent accompagnée d'une déformation produite par le glissement, le réarrangement et l'écrasement des particules (déformation plastique).

En réalité, il est difficile, d'appliquer un incrément de contrainte effective quelconque au sol sans quelques glissements entre les particules. Ce fait a été prouvé par MINDLIN, 1949 en utilisant deux sphères élastiques pressées l'une contre l'autre qui sont ensuite soumises à une force tangentielle. Cette expérience nous montre que, si on suppose qu'il n'y a pas de glissements entre les particules, la contrainte de cisaillement à la circonférence de contact est infinie. Donc, le glissement doit se produire même pour la petite force tangentielle. MINDLIN 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.

II-3 Description expérimentale [8]

La deuxième approche, plus pragmatique, relève d'une démarche courante en mécanique des sols, elle consiste à anticiper le mode de chargement auquel va être soumis en place un élément de sols lors de la sollicitation sismique, ce mode de chargement est reproduit au laboratoire de façon aussi fidèle que possible, compte tenu des moyens expérimentaux qu'il est possible de concevoir, le comportement du sol sous ce type de chargement est alors caractérisé par une courbe effort-déformation qui est directement utilisée pour rendre compte du comportement du sol en place, ainsi en se référant à la figure II-1, pour évaluer les tassements d'une couche de sol sous un remblai de grandes dimensions, on utiliserait la courbe expérimentale **B** obtenue en imposant une déformation latérale nulle à l'éprouvette.

A l'échelle de temps dans sollicitations sismiques, la plupart des sols ont au cours de la sollicitation cyclique un comportement non drainé, la perméabilité du sol n'est pas suffisante (par rapport à la vitesse d'application des charges) pour permettre un drainage de celui-ci, en conséquence, dans ce type d'approche, les contraintes cycliques imposées et les résultats sont exprimés en termes de contraintes totales, cette approche constitue un pis-aller, classique en mécanique des sols en effet comme on l'a indiqué, le comportement du sol est régi par les contraintes effectives et la compréhension de son comportement non drainé réside dans la loi de comportement, cette loi de comportement détermine la tendance à la variation de volume du sol qui se traduit, en comportement non drainé ou partiellement drainé, par une variation de pression interstitielle donc de contrainte effective.

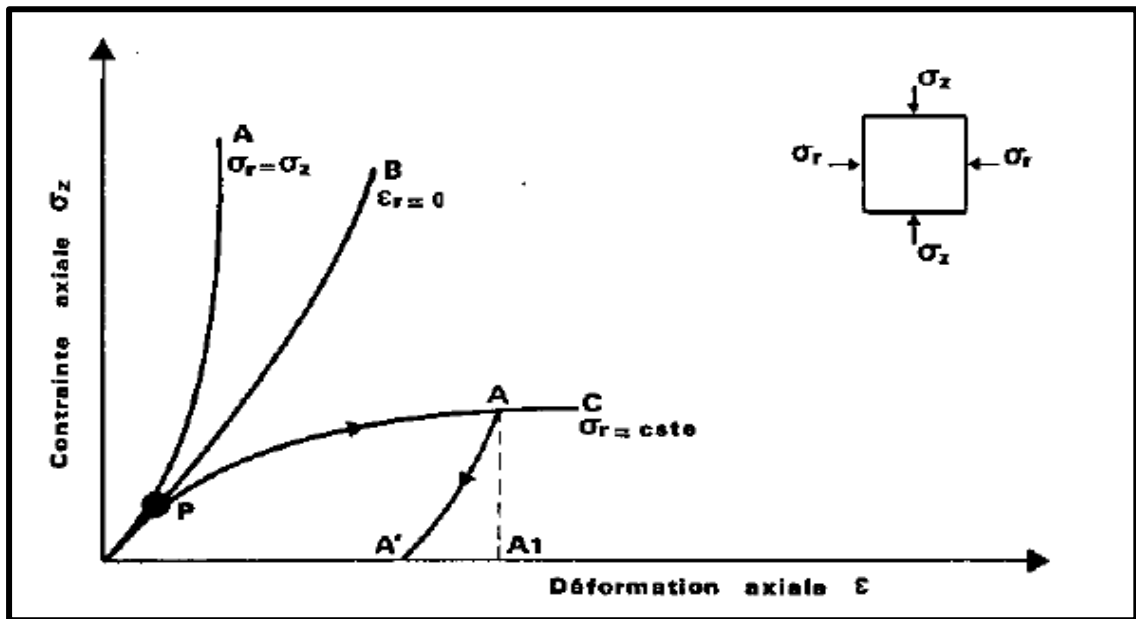


Figure II. 1. courbe effort-déformation.

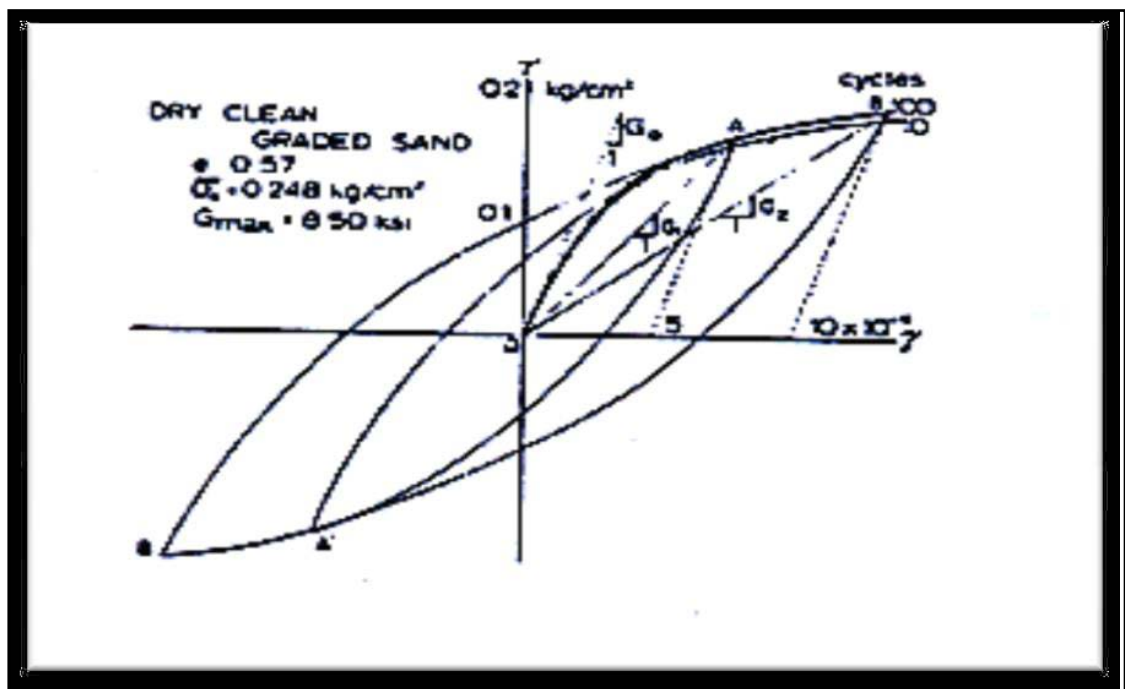


Figure II. 2. Les boucles hystérétiques de contrainte-déformation (Hardin et Drnevich, 1972). Un essai cyclique

La limitation de cette deuxième approche en contraintes totales apparaît clairement des que les conditions de drainage deviennent complexes, Par ailleurs elle reste nécessairement d'applications limitée au chemin de contraintes testée dans les essais, Ceux-ci requièrent souvent des simplifications importantes par rapport aux trajets de chargement réels.

II-4 Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique[10]

La théorie de l'élastoplasticité classique, suppose que les composantes élastiques et plastiques peuvent être séparées en appliquant au sol un chargement et ensuite un déchargement la déformation réversible est élastique. La déformation totale ϵ est la somme de la déformation élastique ϵ_e et la déformation plastique ϵ_p . Cependant, dans le sol, il n'est pratiquement pas possible d'isoler la déformation plastique simplement par le déchargement.

On peut dire que la relation contrainte-déformation pour le sol, est élastique pour les petites amplitudes de chargement cyclique. Théoriquement, cela n'est vrai que lorsque l'amplitude de la déformation tend vers zéro mais, en pratique, on la limite à 0.001%. Puisque toutes les autres déformations incluent le glissement entre les particules, elles peuvent être considérées comme des déformations plastiques. Cela signifie que, en réalité, ces déformations sont quelquefois élasto-plastiques et non purement plastiques. Avec cette définition des déformations plastiques, la plupart des déformations réversibles sont partiellement plastiques.

II-5 Caractéristiques dynamiques des sols [11]**II-5-1 Détermination de τ_{max}**

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

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

Ou:

$\bar{\sigma}_v$ la contrainte verticale effective, ϕ' est l'angle de frottement interne effectif, C' est la cohésion effective et K est le coefficient de pression des terres au repos.

L'équation (2-1) est basée sur la théorie de la rupture de Mohr-Coulomb. Il faut modifier la valeur obtenue par (2-1) afin de tenir compte de l'effet de la vitesse de chargement. Les résultats des expériences faites à l'aide des différents appareils (Triaxial, cisaillement simple, etc...) nous donnent :

$$(\tau_{max})_{dynamique} = (\tau_{max})_{statique} \mathbf{X} \text{ (facteur de taux de déformation)} \quad (2-2)$$

II-5-2 Module de cisaillement maximal [12]

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

On a:
$$\tau = G.\gamma \quad (2-3)$$

Donc le module de cisaillement maximal est défini:

$$G_{\max} = \begin{cases} K \frac{P_a}{F(e)} \left[\frac{\sigma'_m}{P_a} \right] \\ K \frac{(OCR)^k}{F(e)} \left[\frac{\sigma'_m}{P_a} \right] \end{cases} \quad (2-4)$$

Avec:

K: Paramètre fonction de l'indice de plasticité.

P_a : Pression atmosphérique.

σ'_m : contrainte moyenne effective.

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

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

OCR : Rapport de sur consolidation.

❖ **Mesure du module de cisaillement maximal G_{\max}**

Le comportement dit élastique des sols est limité seulement aux très petites déformations ($\gamma < 10^{-5}$). Ce domaine est obtenu en laboratoire à l'aide des appareillages tels que le triaxial de précision, la colonne résonnante, l'essai de torsion cyclique ou des mesures de vitesse de propagation d'ondes.

Un schéma pour la détermination de module de cisaillement initial G_i ou G_{max} et du module de cisaillement sécant G_s , à partir des essais triaxiaux et de cisaillement, pour des chargements monotones ou cycliques est donné dans la Figure II.3.

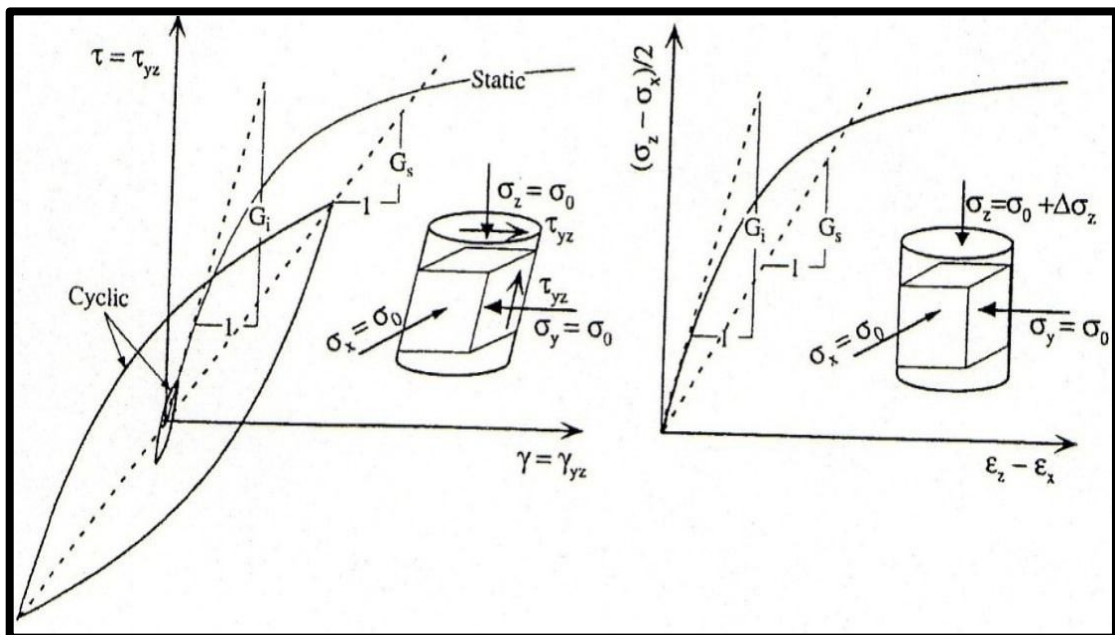


Figure II. 3. procédures pour déterminer les valeurs de G_{max} et G_s dans les essais triaxiaux et de cisaillement d'après Bardet (1997).

II-5-3 Amortissement hystérétique dans le sol[13]

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

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

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

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

La perte d'énergie dans le sol pendant le chargement cyclique peut être significatif par un chargement vibratoire ou transitoire de grande amplitude de déformation, tel que le chargement sismique. Les méthodes in-situ ne sont pas encore assez développées pour pouvoir évaluer l'amortissement du sol dans les cas pratiques. Par conséquent, on n'utilise que les méthodes de laboratoire.

Le coefficient d'amortissement critique β max en fonction du type de sol considéré, du nombre de cycles de chargement N et de sa fréquence f (Tableau II.1).

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

Tableau II. 1. coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).

Avec:

N : Nombre de cycle de chargement.

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

f : Fréquence moyenne du chargement (HZ).

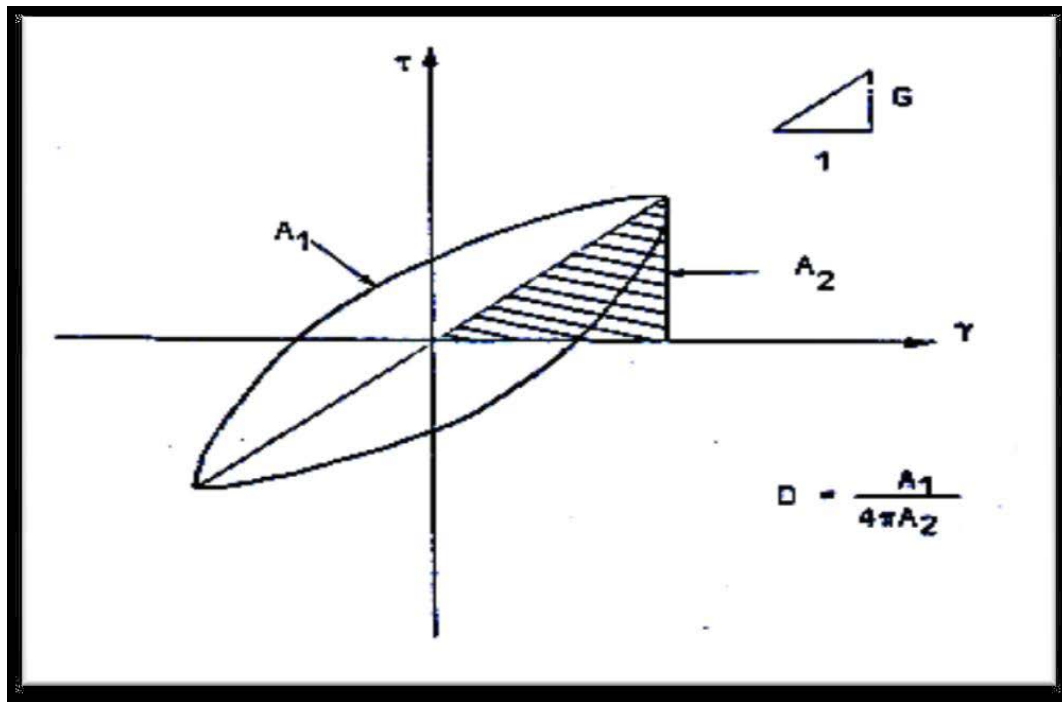


Figure II. 4. Définition du module, de l'amortissement et de l'amplitude de déformation.

II-6 Lois de comportement

Nous allons expliquer sommairement les trois principales lois de comportement :

-loi linéaire.

-méthode équivalente linéaire.

-loi non linéaire.

❖ Le choix de la loi de comportement du sol

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

Le sol est un assemblage de particules discontinues avec des espaces vides qui peuvent être remplis par l'air et l'eau, Il s'agit donc d'un milieu bi ou triphasique l'état de contraintes au sein du sol devrait donc être déterminé en envisageant l'état de contraintes qui règne dans chacun de ces composants. C'est une réalité qu'il ne faut pas oublier, même si, pour des raisons pratiques, on n'envisage que des sols secs ou saturés.

En général, le degré de dissipation de la pression interstitielles et les conditions de drainage au cours du processus de chargement dépendent: de l'état des contraintes, du coefficient de perméabilité du sol de la géométrie et des conditions aux limites du milieu.

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

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

Il faut souligner aussi que les lois de comportement sont établies à partir des essais de laboratoire. Or, il est très difficile, voire impossible de reproduire exactement en laboratoire les états de contraintes et de drainage qui règne dans la nature .Il en va de même en ce qui concerne l'histoire des contraintes. D'ailleurs, les chargements cycliques monodirectionnels ne sont qu'une simplification des sollicitations beaucoup plus complexes que subit un élément de sol lors d'un séisme.

En fin, chaque type d'essais en laboratoire présente des avantages et des inconvénients particuliers. C'est ainsi que par exemple, l'essai triaxial cyclique permet le maintien d'un volume constant et l'utilisation d'échantillons relativement intacts, mais provoque une rotation de 90° des contraintes principales en cours d'essai et une variation de la contrainte principale intermédiaire entre les deux contraintes extrême ainsi qu'une concentration de contraintes au contact des têtes et base de l'échantillon et une striction de l'échantillon pendant la phase d'extension[17] .

En revanche, l'essai de cisaillement simple permet de simuler des conditions de chargement et de déformation plus proches de celles du modèle physique adopté par les calculs, mais le maintien d'un volume constant est pratiquement impossible, le champ de contraintes développé dans l'échantillon n'est pas uniforme, etc...Il en va de même pour les autres essais de laboratoire. Ainsi, toute loi de comportement ne peut être qu'une idéalisation approximative de la

réalité retraçant avec fidélité relative une partie des aspects complexes du comportement de sols dans le cadre des limites de chargement plus ou moins restreintes.

Néanmoins, nous sommes amenés à choisir une loi de comportement adoptable aux calculs parmi les différentes lois proposées. Ceci en rapport avec le type de problème à étudier le niveau de chargement, et nos possibilités pour l'évaluation des paramètres de la loi dans ce qui suit, nous exposerons sommairement les limites et les possibilités des trois principaux groupes de lois de comportement nous discuterons un peu plus l'approche équivalente linéaire qui est couramment utilisée dans les calculs sismiques et qui a été utilisée dans les calculs sismiques et qui a été utilisée dans notre étude.

II-6-1 Loi élastique linéaire

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

Le chargement dynamique des sols peut conduire à des relations efforts déformation différentes de celles du chargement statique. Mais même en chargement statique, le comportement du sol est non linéaire et ses caractéristiques de déformabilité dépendent du chemin de contrainte suivi Figure.II.5.

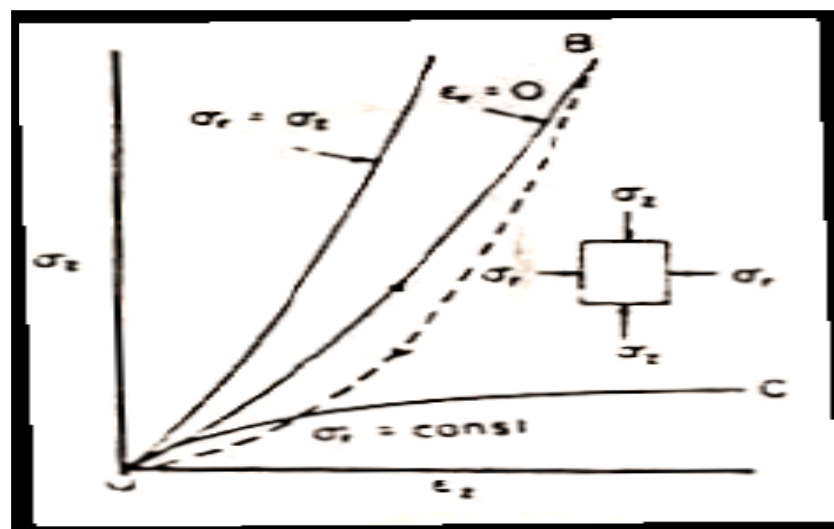


Figure II. 5. Courbes effort-déformation de sable(Richart,1977).

II-6-2 Méthode équivalente linéaire [8]

Selon cette méthode, une solution non linéaire approximative peut être obtenue par une analyse visco-élastiques dans laquelle le module de cisaillement et l'amortissement utilisé sont compatibles avec l'amplitude de déformation de cisaillement dans chaque élément. Les informations concernant la variation des propriétés du sol avec la déformation sont donnés pour la première fois par Seed et Idriss et Hardin et Drnevich. La Figure II.6 montre les courbes typiques donnant les informations. Dans la méthode équivalente linéaire, on utilise ces informations de la manière suivante :

On fait un calcul visco-élastiques avec des valeurs du module et de l'amortissement estimé pour chaque élément. Les résultats de ce calcul fournissent une estimation pour l'amplitude moyenne de déformation pour chaque élément. On consulte la Figure II.6 pour voir si le niveau de déformation est compatible avec les valeurs des modules de cisaillement et les valeurs des amortissements utilisées dans le premier calcul. Si les propriétés du sol ne sont pas compatibles avec le niveau de déformation, la Figure II.6 permet d'obtenir des valeurs améliorées du module de cisaillement et de l'amortissement pour un nouveau calcul.

L'opération se répète jusqu'à ce qu'on arrive à une convergence normalement entre 3 à 5 itérations, La réponse de la dernière itération est considérée comme la réponse non linéaire.

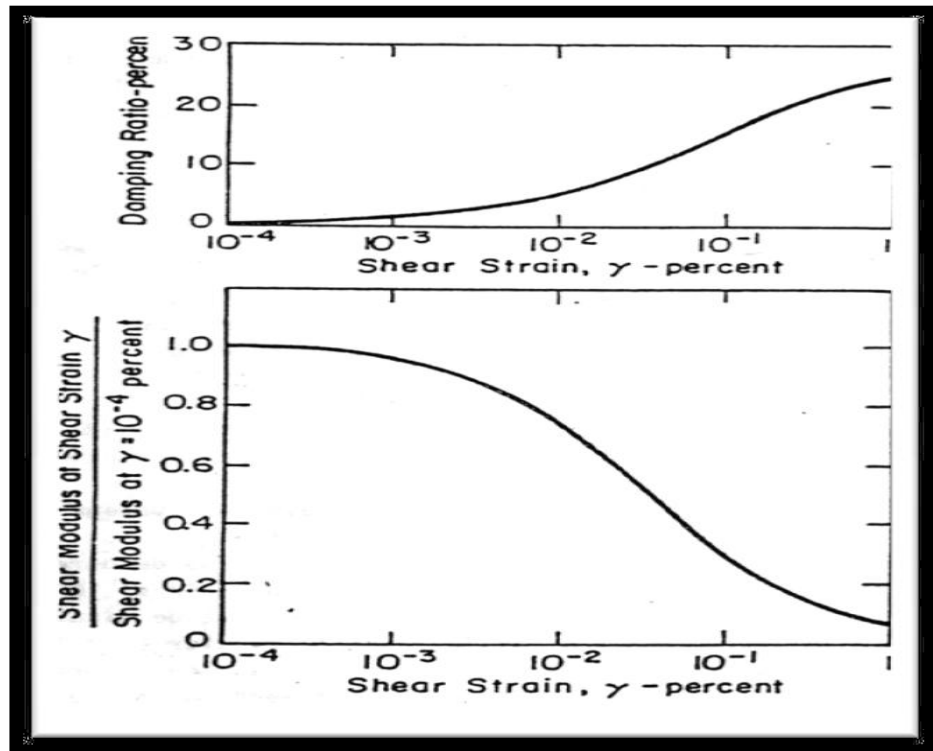


Figure II. 6. courbes moyennes des modules de cisaillement et des coefficients d'amortissement

II-6-3 Les lois non linéaires [12]

On peut diviser les lois non linéaires en deux catégories:

a)- Les lois empiriques fondées sur des essais relativement simples de laboratoire, qui sont pour l'instant les lois hyperboliques et la loi de Ramberg-Osgood. Les lois contrainte déformation sont normalement faciles à introduire dans le programme et les paramètres peuvent être convenablement ajustées à l'aide des résultats des essais. La méthode d'intégration directe est convenable pour cette catégorie de loi.

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

Conclusion

La description réelle du comportement des sols sous chargement dynamique nécessite la détermination d'une loi de comportement qui prend en compte le caractère non linéaire et les déformations irréversibles du sol. Une telle loi permet de décrire le comportement d'un sol avant et après rupture ce qui permet donc d'aborder aussi bien les problèmes de déformations liés à l'interaction sol-structure.

CHAPITRE III

Introduction

La réponse sismique en un site donné est principalement affectée par des facteurs liés à la source, au trajet parcouru et par des facteurs liés aux conditions locales propres au site.

Etant donné leur complexité et leur interaction, il est difficile de déterminer les limites de la prédominance de chacun de ces facteurs liés à la source ont une influence significative sur les caractéristiques du mouvement sismique.

La distinction entre les effets du chemin de parcours et ceux des conditions locales ont créé un sujet de désaccord entre les spécialistes, tels que Housner (1973), Course (1978), Trifunac (1980), de tels discordances, ne doivent pas mettre en cause l'influence établie des conditions locales du sol sur les caractéristiques du mouvement sismique, ce qui est corroboré par de très nombreuses observations et études analytiques.

En vue d'une meilleure compréhension de l'influence des conditions locales du site, nous citerons brièvement quelques exemples concrets.

Lors du séisme de San Francisco de 1906, Wood attribuait la variation de l'ampleur des dégâts du séisme aux caractéristiques locales du sol.

La Figure III.1 montre le potentiel d'influence des conditions locales du site sur les caractéristiques du mouvement sismique durant le séisme d'El Centro de 1940, Schnabel et al (1972).

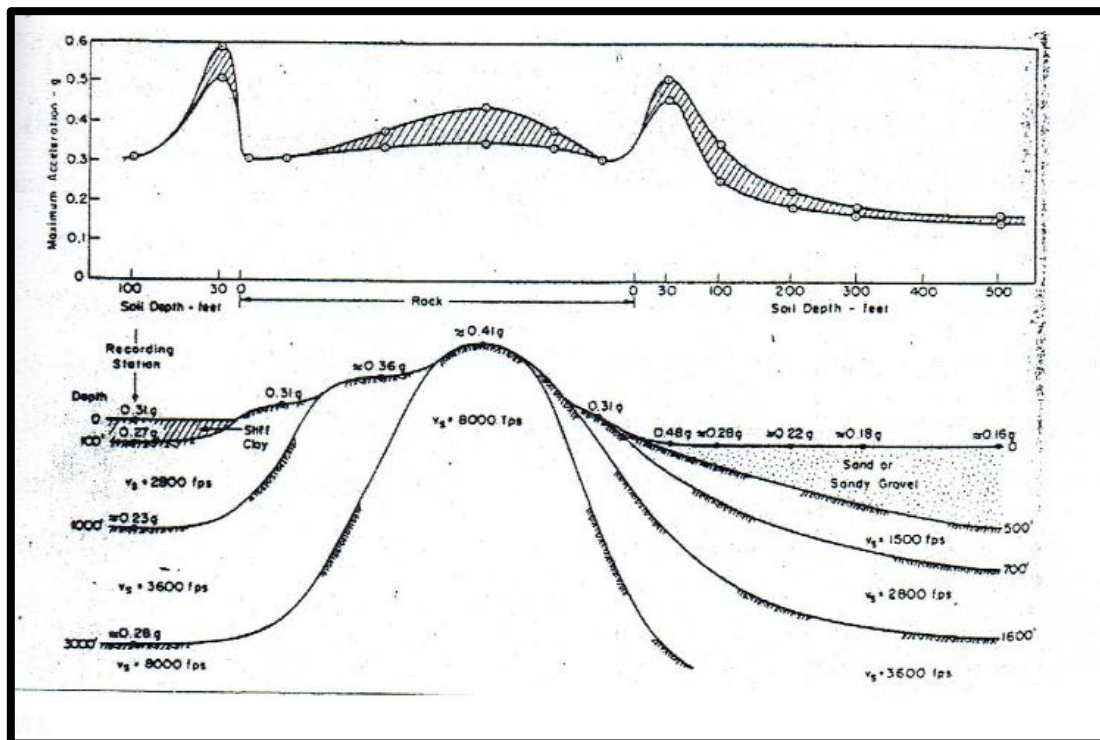


Figure III.1. Potentiel d'influence des conditions locales du site, Schnabel et al (1972).

Lors du séisme de Tonan Kai de 1944 au Japon, le pourcentage des structures endommagées, présentait une allure décroissante avec l'accroissement de la raideur du sol sous-jacent, (terrain argileux 26.1%, terrain sableux 3.5%, sable graveleux 1.4%, sol dur 0.2%).

Seed et Idriss (1971) ont attribué la variation des dégats lors du séisme de San Francisco (1957) à la variation des conditions locales du site.

Plusieurs études ont été effectuées sur le séisme de Caracas du 29 juillet de 1967 au Venezuela. Les dégats de ce séisme étaient concentrés sur certaines zones bien précises de la ville et cela chaque fois pour une catégorie particulière de structures. L'étude détaillée menée par Seed, Withman et al, (1972) a pu montrer que la profondeur du sol sous-jacent avait une grande influence sur la réponse du site et sur la distinction des dégats.

Les enregistrements réalisés par Tsai (1969) à différentes profondeurs au site Union Bay (Seattle, U.S.A), montrent une amplification pour la couche d'argile et une forte atténuation pour la couche de tourbe.

Tous ces exemples montrent clairement que les paramètres de la réponse sismique en surface de sol sont fortement influencés par les caractéristiques de ce dernier. Cette influence est traduite par une amplification ou une atténuation du mouvement, et une variation du contenu fréquentiel des vibrations. Dans le but de déterminer cette influence, des études analytiques avec des méthodes évoluées ont été menées par un certain nombre de chercheurs, Idriss et Seed (1968), Seed et Idriss (1969), Tsai (1970) ect...

III-1 Methodes d'étude de la réponse sismique

La complexité du mouvement sismique a incité des efforts considérable pour le développement des procédures analytiques qui seront capables d'une évaluation relativement fidèle de la réponse des sols sous des chargement sismiques, en faisant intervenir les caractéristique du comportement du sol. Ces méthodes d'étude sont confrontées aux difficultés suivantes:

- a- L'évaluation et le choix de l'excitation sismique de référence.
- b- Lamodélisation du milieu. Cette modélisation comprend le choix du comportement du sol (viscoélastique linéaire équivalent, non linéaire) ainsi qu'une représentation de la géométrie du modele (milieu continu ou discrétisé).
- c- Détermination des conditions aux limites et utilisation des techniques numériques fiables.

Dans la pratique actuelle, la plupart des méthodes de calculs sismiques utilisent l'hypothèse de Kanai, (1951) de la propagation verticale des ondes de cisaillement.

Ces méthodes sont basées sur le fait que les ondes de cisaillement sont la cause essentielle des dégats dans la plupart des cas et que pour des sites qui ne sont pas très proches de

la source du séisme, les ondes sismique au voisinage de la surface du sol ont une propagation verticale à la suite des réfractions successives sur les interfaces entre les différentes couches du sol de raideur décroissantes. Si le profil de sol est stratifié horizontalement, le problème devient unidimensionnel.

Cette hypothèse couramment utilisée ne reflète pas la complexité du mouvement sismique. Mais elle permet d'évaluer avec moins de difficultés les caractéristiques importantes de la réponse sismique pour une gamme de conditions locales du site.

III-1-1 Modélisation et choix de la loi de comportement

a- La modélisation du profil de sol peut être représentée par deux formes différentes:

- ✓ Le modèle continu où le profil est défini par N couches sous-jacentes surmontant une base rocheuse considérée comme rigide, d'où partiront les ondes, ou surmontant un demi-espace élastique.
- ✓ Le modèle discrétisé qui consiste à concentrer les masses aux limites des couches et à les relier entre elles par des ressorts. L'utilisation de tel modèle n'est pas indispensable (géométrie régulière) dans la mesure où une solution continue peut être obtenue.

b- Le comportement non linéaire du sol peut être approché par un modèle viscoélastique linéaire équivalent, [9]. L'équivalence est fonction des caractéristiques du matériau et également de la sollicitation. L'utilisation de cette loi de comportement dans les études sismiques a été discutée dans le chapitre II. Dans le cas unidimensionnel envisagé, la loi de comportement sous sollicitation harmonique de cisaillement s'écrit:

$$\tau = G^* \cdot \gamma \quad (3-1)$$

Où $G^* = G' (1 + 2i\beta)$ est le module de cisaillement complexe.

III-1-2 Etude théorique de la réponse sismique[14]

a- Sollicitation harmonique

La propagation verticale des ondes de cisaillement à travers un profil de sol cause des déplacements horizontaux et l'équation d'onde s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho_j = \frac{\partial^2}{\partial t^2} = G_i \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta_j \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} \quad (3-2)$$

Avec

$u = u(z, t)$ déplacement horizontal.

z la profondeur de la $j^{ème}$ couche.

ρ_j, G_j, η_j , sont respectivement la masse volumique, le module de cisaillement et la viscosité de la $j^{\text{ème}}$ couche.

La substitution de l'équation différentielle (3-2) a pour forme générale:

$$u(z,t)=U(z)e^{i\omega t} \quad (3-3)$$

La substitution de l'équation (3-3) dans l'équation (3-2) donne une équation différentielle ordinaire:

$$(G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} = \rho\omega^2 U(z) \quad (3-4)$$

Qui a pour solution générale

$$U_j(z) = E_j e^{iK_j z} + F_j e^{-iK_j z} \quad (3-5)$$

Ou

$$K_j^2 = \frac{\rho_j \omega^2}{G_j + i\omega\eta_j} = \frac{\rho_j \omega^2}{G^*}$$

$G^* = G_j + i\omega\eta_j = G_j (1 + 2\beta_j)$: Le module complexe de cisaillement indépendant.

β_j : le taux d'amortissement critique de la $j^{\text{ème}}$ couche.

Les équations (3-3) et (3-5) donnent la solution de l'équation d'onde pour un mouvement harmonique de fréquence ω :

$$u_j(z, t) = E_j e^{i(K_j z + \omega t)} + F_j e^{-i(K_j z - \omega t)} \quad (3-6)$$

Ou le premier terme représente le déplacement de l'onde incidente dans la direction négative à z et le second terme représente le déplacement de l'onde réfléchie dans la direction positive.

La contrainte de cisaillement sur un plan horizontal est:

$$\tau(z, t) = G \frac{\partial u}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3-7)$$

Les conditions de continuité du déplacement et de la contrainte à chaque interface permettent d'écrire les relations de récurrence reliant les amplitudes des ondes incidentes et réfléchies dans la couche $j+1$ aux memes amplitudes dans la couche j . On obtient alors les équations:

$$E_{j+1} = \frac{1}{2} E_j [(1 + r_j) e^{iK_j h_j} + (1 - r_j) e^{-iK_j h_j}] \quad (3-8)$$

$$F_{j+1} = \frac{1}{2} E_j [(1 - r_j) e^{iK_j h_j} + (1 + r_j) e^{-iK_j h_j}] \quad (3-9)$$

Ou $r_j, j = 1, \dots, n$, est le taux d'impédance.

$$r_j = \frac{K_j G_j^*}{K_{j+1} G_{j+1}^*} = \left(\frac{\rho_j G_j^*}{\rho_{j+1} G_{j+1}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-10)$$

En tenant compte de la condition de la surface libre ($E_1 = F_1$), on peut exprimer à l'aide des équations de récurrence (3-8) et (3-10) les amplitudes des ondes incidentes et réfléchies de la $j^{ème}$ couche en fonction de celle de la couche de surface.

$$E_j = e_j(\omega) \quad (3-11)$$

$$F_j = f_j(\omega)E_1 \quad (3-12)$$

Connaissant l'amplitude de l'onde incidente E_{n+1} dans le demi espace ($j=n+1$), les relations précédentes permettent de calculer les amplitudes E et F pour toutes les couches du système, les déplacements, contraintes, déformations sont alors connus en tous points du milieu.

Le rapport entre les amplitudes des déplacements au toit des deux couches j et i est donné par l'expression :

$$A_{i,j}(\omega) = \frac{E_j(\omega) + F_j(\omega)}{E_i(\omega) + F_i(\omega)} \quad (3-13)$$

Ou $A_{i,j}(\omega)$: fonction de transfert.

Cette expression analytique est extrêmement compliquée (cas d'un multicouche) mais se prête facilement à un traitement numérique sur ordinateur. La fonction de transfert entre le semi-espace et la couche de surface est:

$$A_{n+1,1}(\omega) = \frac{2E_1(\omega)}{E_{n+1}(\omega) + F_{n+1}(\omega)} \quad (3-14)$$

Les amplitudes E et F peuvent être ainsi calculées pour toutes les autres couches de système. La fonction déplacement permet de calculer les accélérations et les déformations qui sont exprimées respectivement par:

$$\ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (E_j e^{iK_j z} + F_j e^{-iK_j z}) e^{i\omega t} \quad (3-15)$$

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial z} = iK_j (E_j e^{iK_j z} - F_j e^{-iK_j z}) \quad (3-16)$$

b-Sollicitation transitoire

les expressions développées en haut sont valables pour étudier la réponse du sol à des sollicitations harmoniques. La théorie peut être étendue aux mouvements transitoires par l'utilisation des techniques de transformée de Fourier (domaine fréquentiel). Pour cela, on décompose l'onde incidente en ondes harmoniques à l'aide d'une transformée de Fourier.

L'accélérogramme numérique avec M valeurs équidistantes de l'accélération, $\ddot{u}_j(j, \Delta t)$, $j = 0, \dots, M - 1$ peut être représenté par une somme finie de mouvement harmonique:

$$\ddot{u}(t) = \sum_{s=0}^{M/2} (a_s e^{i\omega_s t} + b_s e^{-i\omega_s t}) \quad (3-17)$$

Ou ω_s , $s=0, \dots, M/2$ sont les fréquences équidistantes:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{M\Delta t} s \quad (3-18)$$

a_s et b_s désignent les coefficients complexes de Fourier

$$a_s = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \ddot{u}(t) e^{-i\omega_s t} \quad , \quad b_s = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \ddot{u}(t) e^{i\omega_s t} \quad (3-19)$$

Etant donné que les séries de l'équation (3-17) représentent le mouvement dans la couche de base, il est possible de représenter le mouvement dans une couche j , par l'application du facteur d'amplification de l'équation (3-13), ce qui donne:

$$\ddot{u}_j(t) = \sum_{s=0}^{M/2} A_{n+1,j}(\omega_s) (a_s e^{i\omega_s t} + b_s e^{-i\omega_s t}) \quad (3-20)$$

Numériquement, la transformée de Fourier est obtenue sous la forme d'une série de Fourier tronquée. Implicitement ceci revient à rendre la fonction $\ddot{u}(t)$ périodique. On obtient cependant une bonne approximation de la réponse si l'accélérogramme est prolongé par une zone de zéros pour que, compte tenu de l'amortissement du système, les vibrations libres puissent s'amortir. L'expérience montre qu'une durée de zéros de **4** à **5** secondes est généralement suffisante [8]

L'équation (3-20) ne représente que la partie entre tenue de la réponse. En analyse sismique, compte tenu de l'amortissement matériel, la phase transitoire s'amortit rapidement et est négligée.

La transformée de Fourier a été réalisée à l'aide de l'algorithme de la transformée rapide de Fourier (FFT) développée par Cooley et Tukey (1965), qui est plus rapide que la méthode conventionnelle par un facteur $M/\log M$. Cet algorithme exige que le nombre M de terme soit de la forme 2^n . Dans la pratique, cela ne constitue pas une limitation car il est toujours possible d'augmenter la zone de blancs pour satisfaire cette restriction.

L'équation (3-19) permet de connaître en tout point du profil l'accélération, la vitesse et le déplacement par intégration (division par ω_s et ω_s^2), la déformation de cisaillement et à l'aide de la loi de comportement, la contrainte de cisaillement.

Cette méthode permet de prendre en compte de façon satisfaisante les non linéarités du sol. Ces dernières peuvent être approchées par la processus itératif et le caractère dissipatif correctement représenté à l'aide du module complexe. C'est-à-dire en ajustant les caractéristiques G et β de chaque couche au niveau de déformation moyen est défini arbitrairement égale à une fraction de la déformations maximale engendrée dans la couche pendant la sollicitation,

Généralement on retient une fraction comprise entre **0.5** et **0.7** . Dans la pratique cette valeur n'influe pas de façon sensible sur les résultats [8].

La méthode décrite ci-dessus procède de la façon suivante:

- 1-**Détermination des données du problème tel que l'acélérogramme de projet, la hauteur et la densité de chaque couche du profil.
- 2-**Estimation, pour chaque couche du profil, des caractéristique G et β et formation des modules complexes G^* .
- 3-** Résolution du problème de la propagation montante des ondes de cisaillement comme indiqué précédemment.
- 4-** Evaluation dans chaque couche de la déformation maximale et de la déformation moyenne.
- 5-** Détermination, à partir des courbes $G(\gamma)$ et $\beta(\gamma)$, (Figure III.2 et III.3) des valeurs associées à la déformations moyenne. Si ces valeurs sont différentes de celles estimées, le calcul est repris avec ces nouvelles valeurs et ce jusqu'à ce que la convergence est obtenue dans chaque couche. L'expérience montre que généralement cette convergence est obtenue au moins de cinq itérations.
- 6-** Détermination des autres paramètres comme la contrainte, les spectres de réponse etc....

Il est à noter qu'à la dernière itération les propriétés des soles sont comparables avec la déformation induite, les non linéarités du sol ont été approchées en résolvant une suite des problèmes linéaires de façon itérative. Il ne s'agit cependant pas d'une véritable solution non linéaire, les modules G restent constant au cours de la sollicitation. [8]

Cette méthode que nous venons de décrire est actuellement la plus utilisée pour calculs de la réponse d'un profil de sol à une excitation sismique.

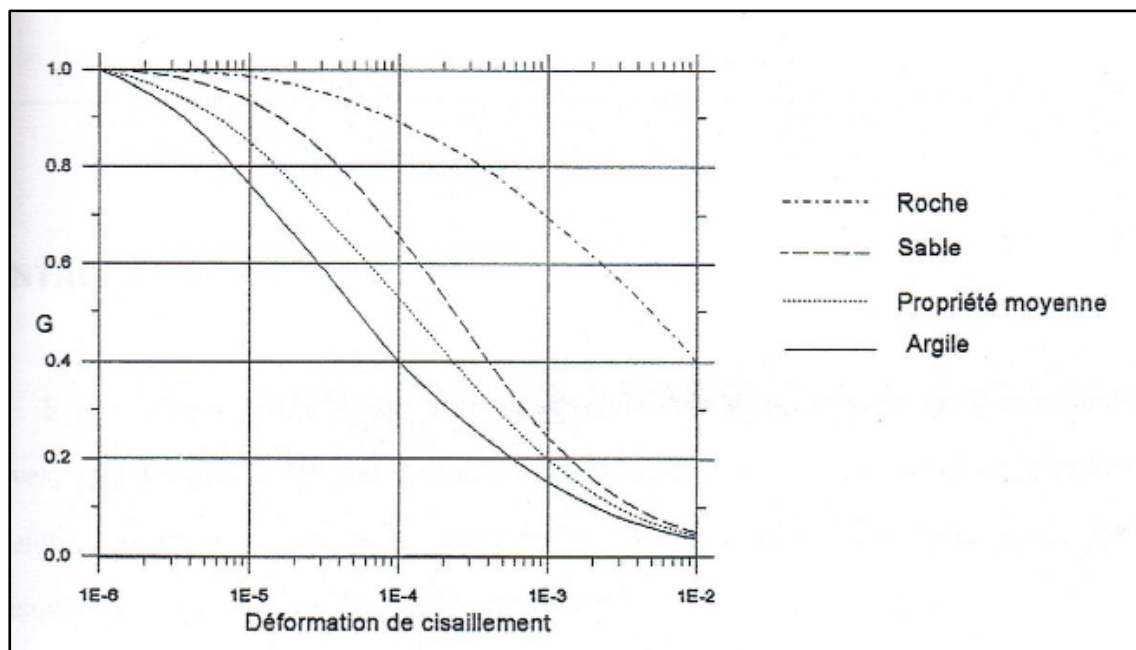


Figure III. 1. Courbe moyenne des modules de cisaillement en fonction de la déformation [14].

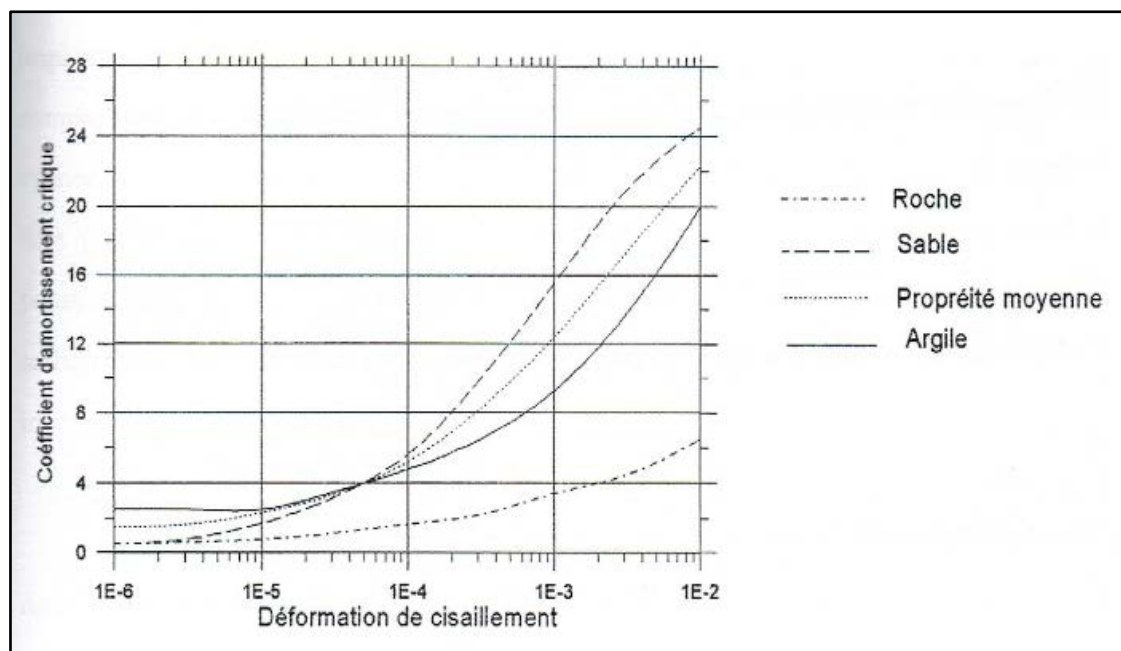


Figure III. 2. Courbe moyenne des coefficients d'amortissement en fonction de la déformation [14]

CHAPITRE IV

Introduction [16]

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux code éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers.

IV- Concepts de base

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés noeuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre,des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées.

Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

IV-1- Calculs par la MEF

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

❖ Elle nécessite :

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influence pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Duncan, CamClay, ... etc.

- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des éléments structuraux.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

❖ **Elle permet :**

- d'effectuer les calculs d'écoulement.
- de simuler toutes les phases de travaux.
- de prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches.
- de calculer un coefficient de sécurité.

❖ **Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :**

- les déplacements des ouvrages et les sollicitations internes des ouvrages.

Et pour le sol :

- les déplacements du sol.
- les déformations du sol.
- les contraintes totales et effectives dans le sol.
- les pressions interstitielles.
- de calculer un coefficient de sécurité.

✓ **Les principaux logiciels utilisés en géotechnique sont :**

1-CESAR (LCPC) : Logiciel 2D ou 3D, spécialement utilisé pour les tunnels.

2-PLAXIS 2D & 3D : (logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr.Vermeer) : Logiciel dédié à la géotechnique et est basé sur la méthode des éléments finis.

3-FLAC : Logiciel très efficace pour le domaine du géotechnique et est basé sur la méthode des différences finis.

Pour notre étude, on utilise PLAXIS 2D.

IV-2 PRÉSENTATION DE 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 pseudostatique 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 noeuds), 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.

IV-2-1 Description de l'interface graphique (Annex I)

PLAXIS V8 est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des ouvrages géotechniques. Les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement avancées pour la simulation du comportement des sols et/ou des roches, non linéaire, dépendant du temps et anisotropie. De même, le sol étant un matériau polyphasique, des procédures spéciales sont nécessaires pour prendre en compte les pressions interstitielles, que celles-ci soient ou non hydrostatiques. Bien que la modélisation du sol lui-même soit un problème important, beaucoup de projets géotechniques impliquent également la modélisation des structures et de leur interaction avec le sol. "PLAXIS" est doté de fonctionnalités tout à fait remarquables pour traiter tous les aspects des structures géotechniques complexes. Un résumé des fonctions essentielles (**Annex I**)

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent (Figure VI.1). Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une

tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

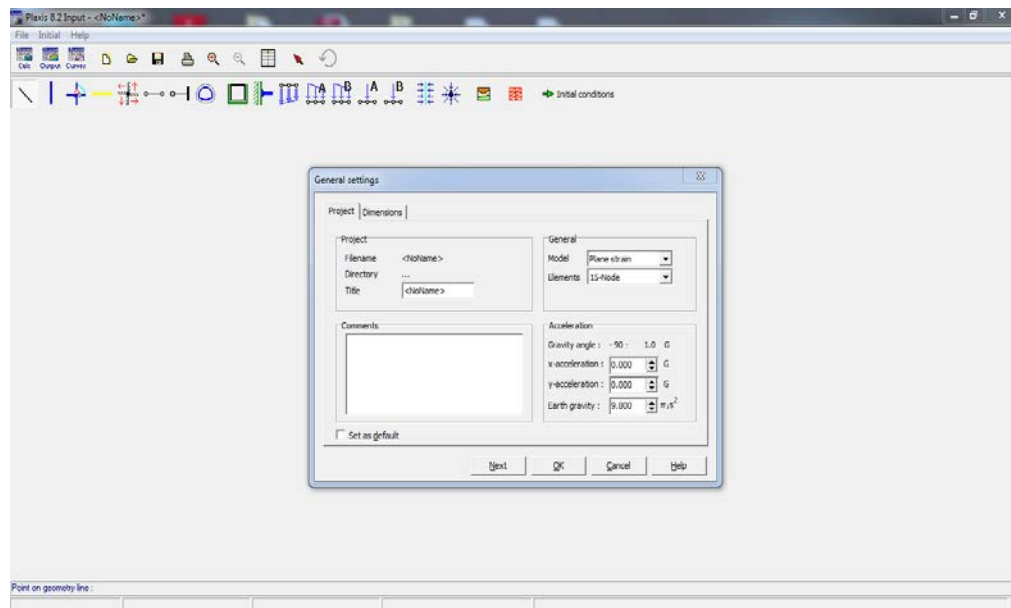


Figure IV. 1. interface utilisateur pour l'entrée des données.

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

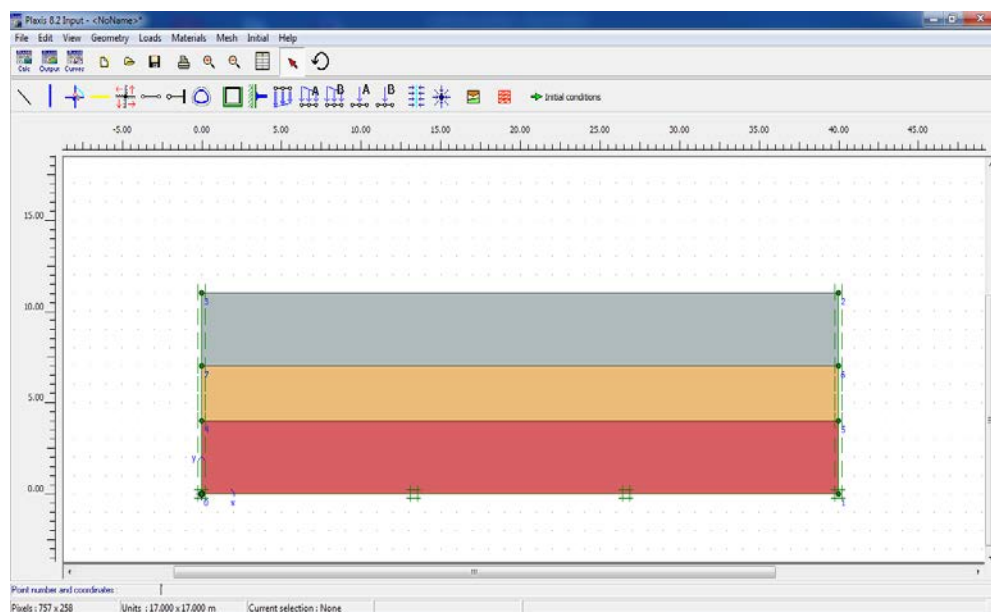


Figure IV. 2. condition aux limites.

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

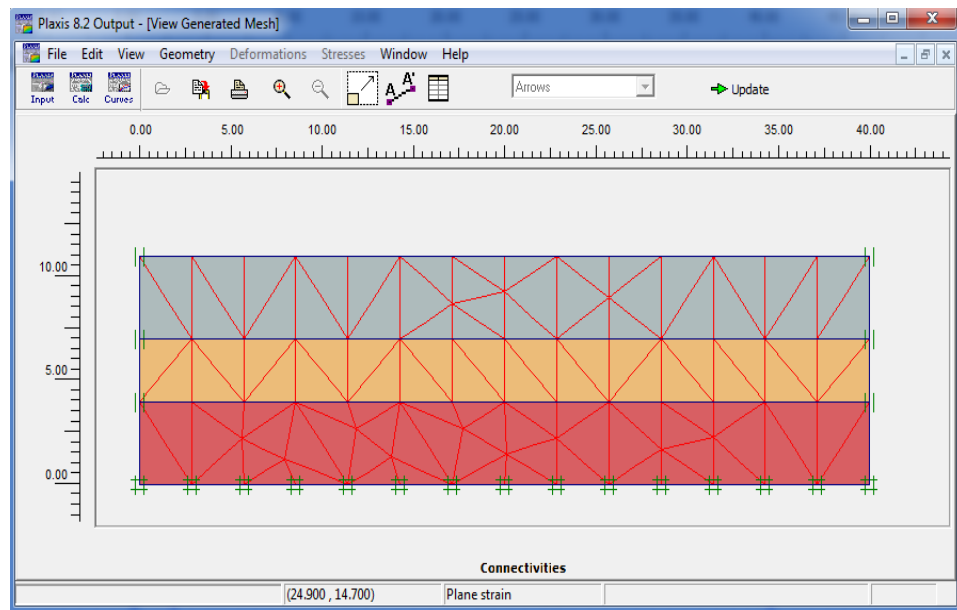


Figure IV. 3. exemple de maillage.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état K_0 donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre K_0 et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un changement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option K_0 est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale (paroi moulée dans un sol mou par exemple) (Figure IV.4).

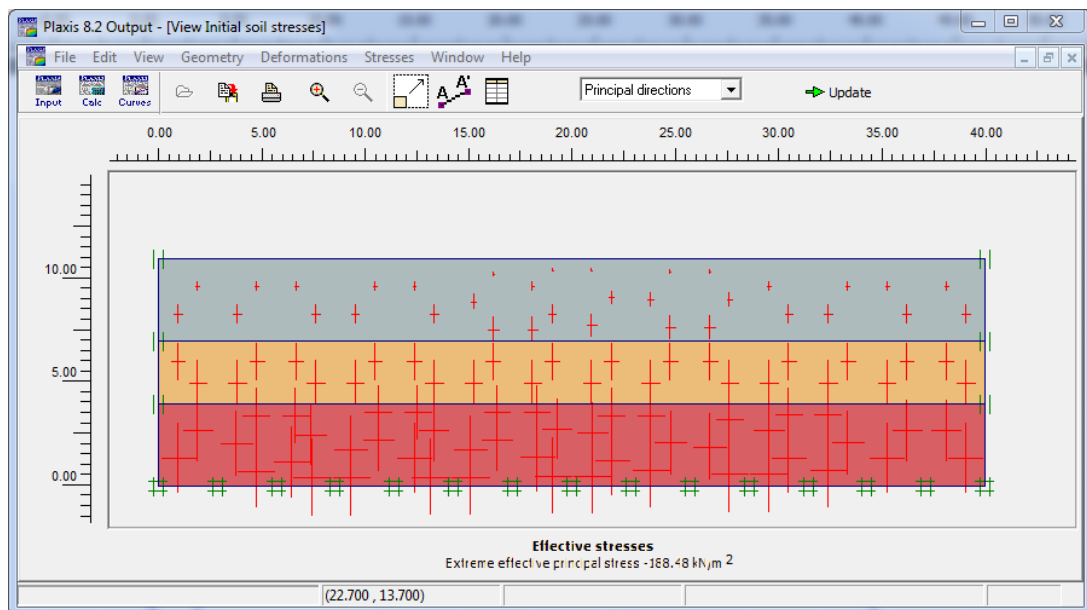


Figure IV. 4. Définition des contraintes initiales : condition « k_0 ».

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel : L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... etc (Figure IV.5). S'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière.

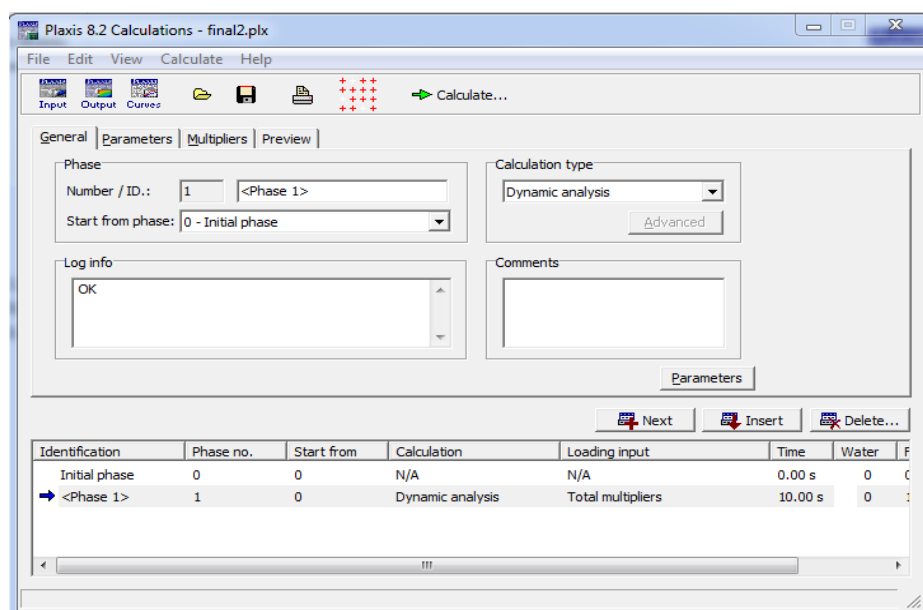


Figure IV. 5. Interface utilisateur pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.

Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats (Figure IV.6). Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit (Figure IV.7). L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées.

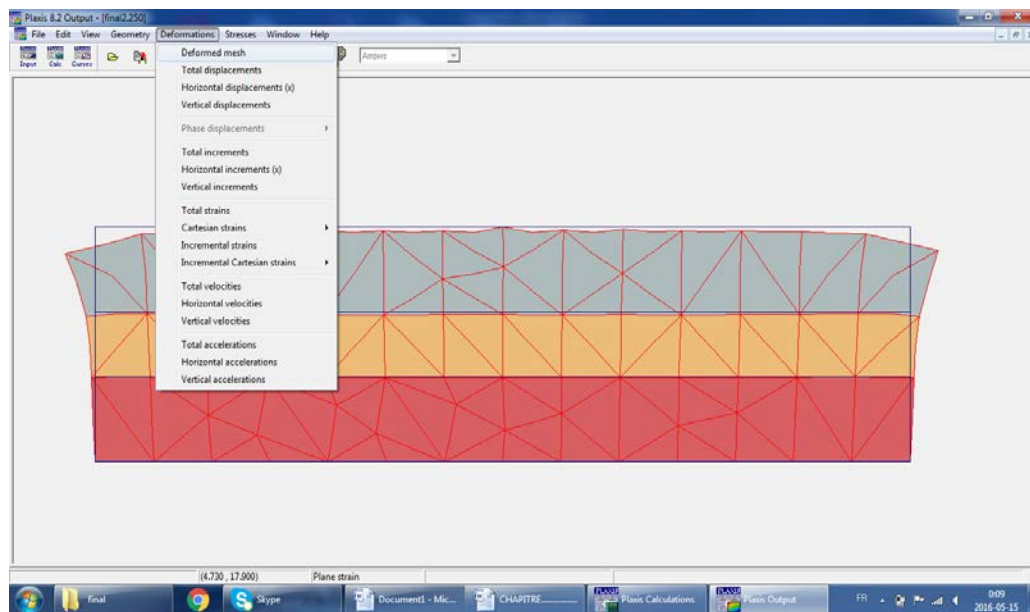


Figure IV. 6. Menu « output ».

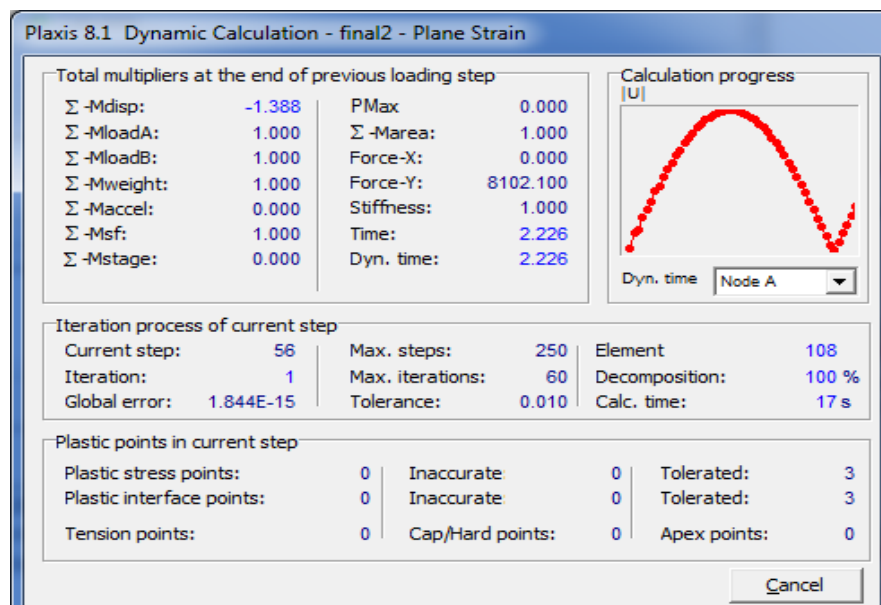


Figure IV. 7. view calculations results.

VI-2-2 Les modèles de comportement utilisés dans *PLAXIS*

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux: depuis le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Dans ce schéma, la modélisation par éléments finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans des codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important

La démarche suivie dans le développement du code *PLAXIS* est différente. Un des objectifs de *PLAXIS* est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délais raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale. En ce sens, *PLAXIS* peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle. C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans *PLAXIS* sont des modèles qui peuvent apparaître simple, voire simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

On se restreint ici à décrire uniquement les comportements élastique linéaire et élastoplastique.

VI-2-2-a Comportement élastoplastique

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

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la Figure IV.8

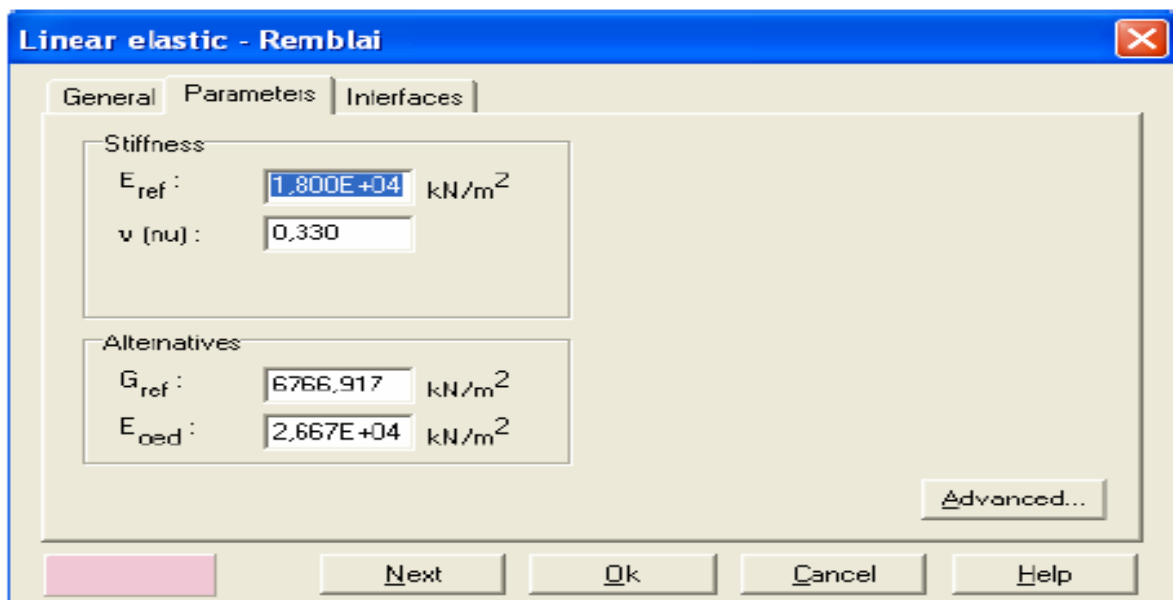


Figure IV. 8. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

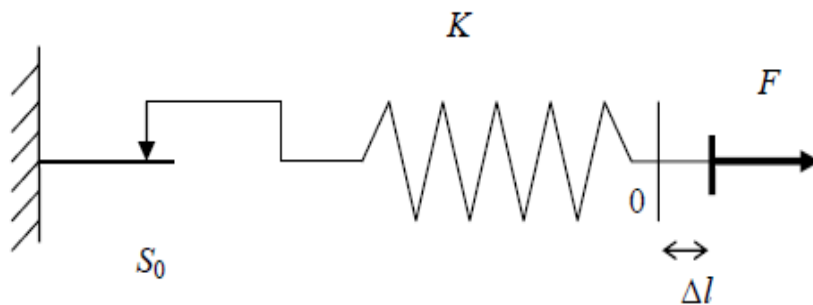


Figure IV. 9. Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la Figure IV.10 pour le modèle élastique parfaitement plastique et dans la Figure VI.11 pour le modèle élastoplastique avec écrouissage.

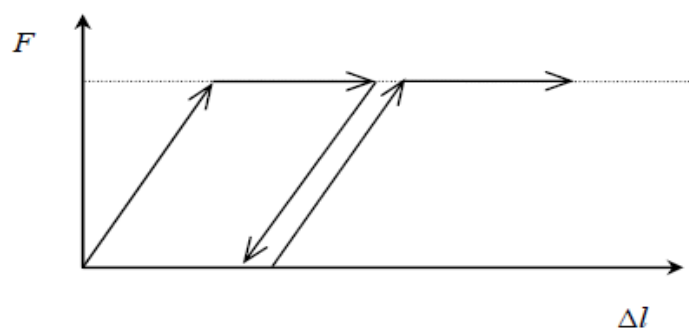


Figure IV. 10. Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

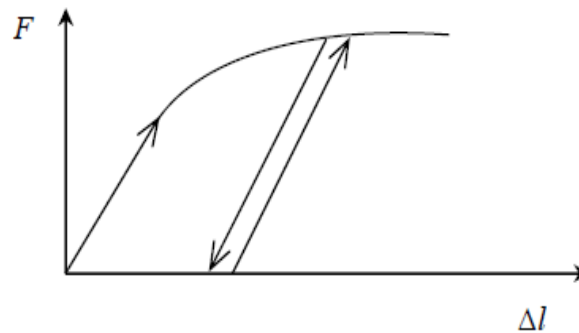


Figure IV. 11. Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.

VI-2-2-b Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire utilisé dans *PLAXIS* est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν . l'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé.

Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu_u = 0.5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques

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

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

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

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

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

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la Figure IV. 12 :

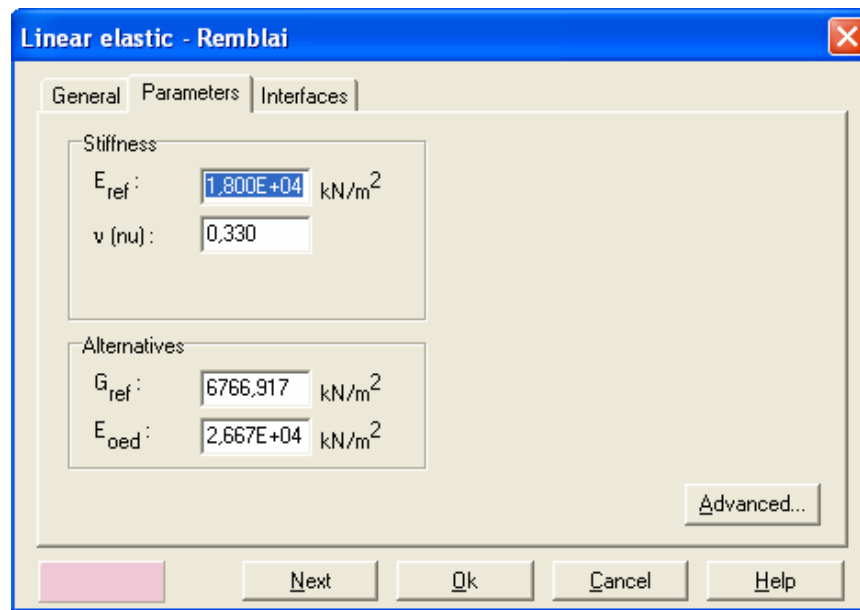


Figure IV. 13 . Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire..

Et les paramètres avancés sur la Figure IV. 14:

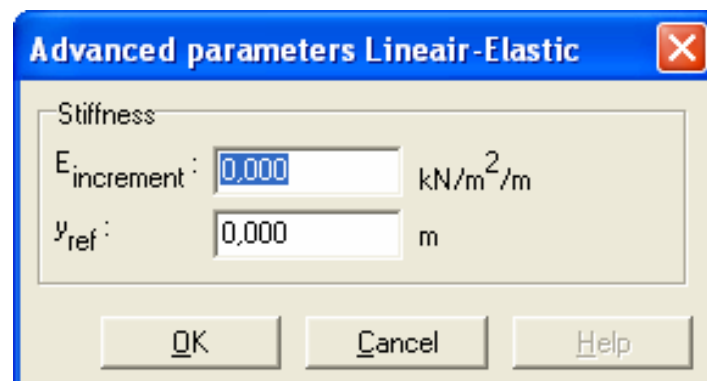


Figure IV. 14. Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{actuel} = E_{ref} + (y_{ref} - y) E_{increment} \text{ avec } y < y_{ref} \quad (4-4)$$

$E_{increment}$: Augmentation de la rigidité [kN/m²/m].

y_{ref} : Unité de profondeur [m].

IV-2-2-c Modèle de Mohr-Coulomb

Le comportement 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 demande la détermination de cinq paramètres (Figure IV.15). Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c_{ref} , φ et Ψ , respectivement. 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.

The screenshot shows a software window titled "Mohr-Coulomb - Argile molle". It has three tabs: "General", "Parameters", and "Interfaces". The "Parameters" tab is selected. Inside, there are two main sections: "Stiffness" and "Strength". Under "Stiffness", there are input fields for E_{ref} (7995,000 kN/m²) and ν (0,300). Under "Strength", there are input fields for c_{ref} (1,000 kN/m²), φ (26,000 °), and ψ (0,000 °). There is also an "Advanced..." button. At the bottom, there are buttons for "Next", "Ok", "Cancel", and "Help".

Figure IV. 14 . Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.

a) Module d'Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture (Figure IV. 15).

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

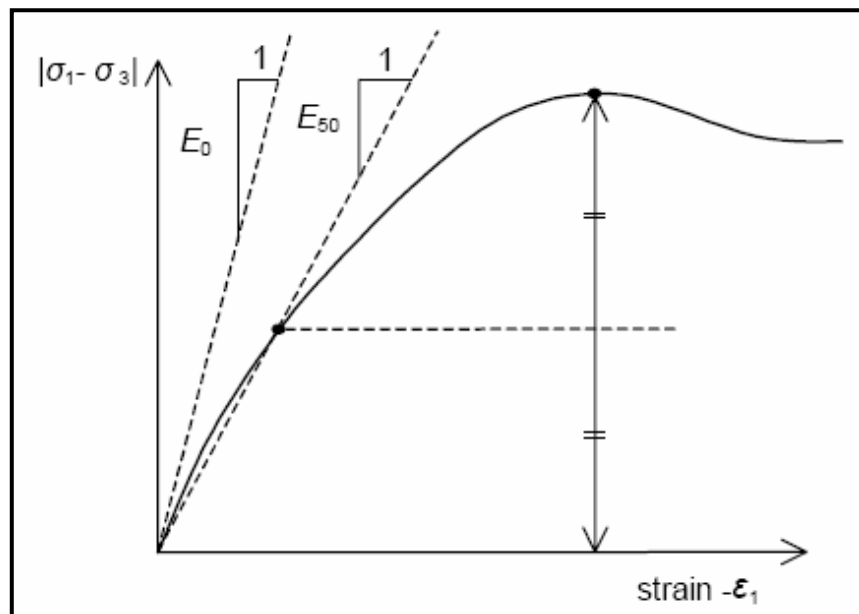


Figure IV. 15 . Définition du module à 50 % de la rupture.

b) Coefficient de Poisson

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) Angle de frottement

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement φ_{cv} (à volume constant, au palier).

d) Cohésion

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottants, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques. Pour les analyses en non drainé avec $\varphi_u = 0$, *PLAXIS* offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur: ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée

avec le paramètre c -depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problèmes (typiquement en kPa/m).

e) Angle de dilatance

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

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

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

f) Les paramètres avancés :

Pour tenir compte des variations avec la profondeur, on utilise les paramètres avancés (Figure IV. 16).

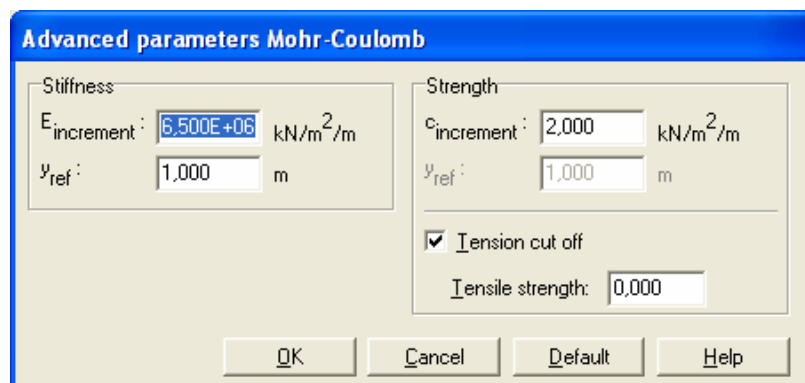


Figure IV. 16 . Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.

IV-2-2-d Module dynamique du 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 dynamicload system).

dans le programme de calcul, on peut considérer soit une sollicitation harmonique (Figure IV.17) soit une sollicitation sismique (Figure IV.18).

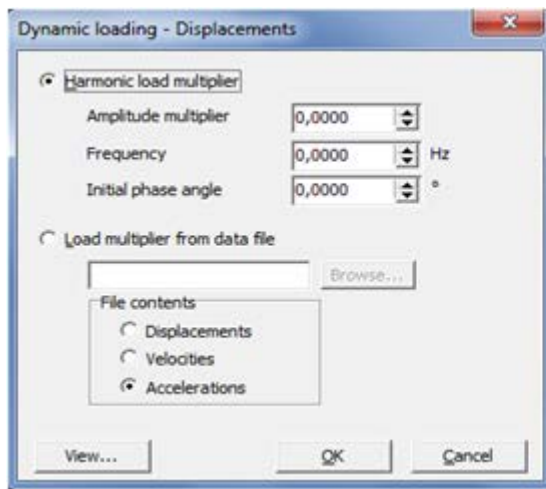


Figure IV.17. Sollicitation Harmonic.

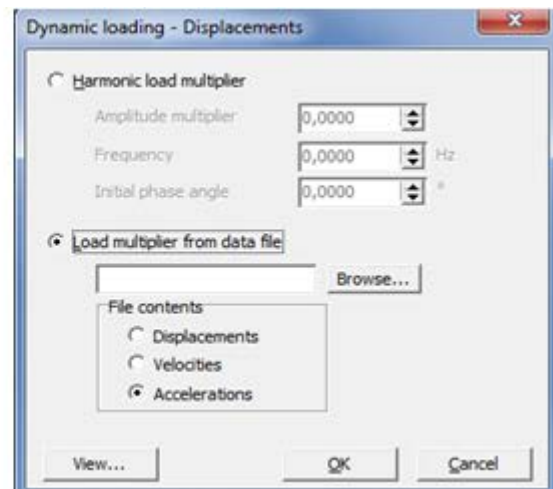


Figure IV.18. Sollicitation sismique.

CHAPITRE V

Introduction

Cette application numérique a pour but d'étudier la réponse sismique d'un profil de sol de 3 couche (Remblai, Sable UC et Argile) soumis à une excitation sinusoïdale, sans présence d'ouvrages. Les calculs ont été effectués à l'aide du code PLAXIS décrit dans le chapitre précédent. On s'est restreint au comportement du sol de type élastique linéaire de type drainé on que les sollicitations sismiques sont très brèves et que les déformations permanentes n'auront pas le temps nécessaire pour s'y développer.

V-1 Définition des données

Pour que le logiciel PLAXIS puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit saisir toutes les données du profil suivantes :

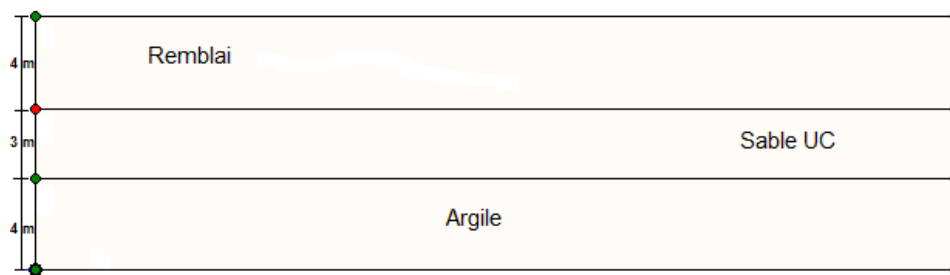


Figure V. 1. profil de sol étudié.

V-2-1 Configuration du modèle géométrique retenu

a) Hypothèses générales :

- Les déformations sont considérées planes (analyse en 2D).
- Domaine d'analyse .

b) Géométrie du modèle :

Le profil est symétrique (Figure.V.1). Il est modélisé par un massif homogène sans eau de 40m de largeur et de 11 m de profondeur.

Les Conditions aux limites choisies correspondent aux conditions 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 face verticales ne sont modélisées par des frontières absorbantes.(Figure V. 2).

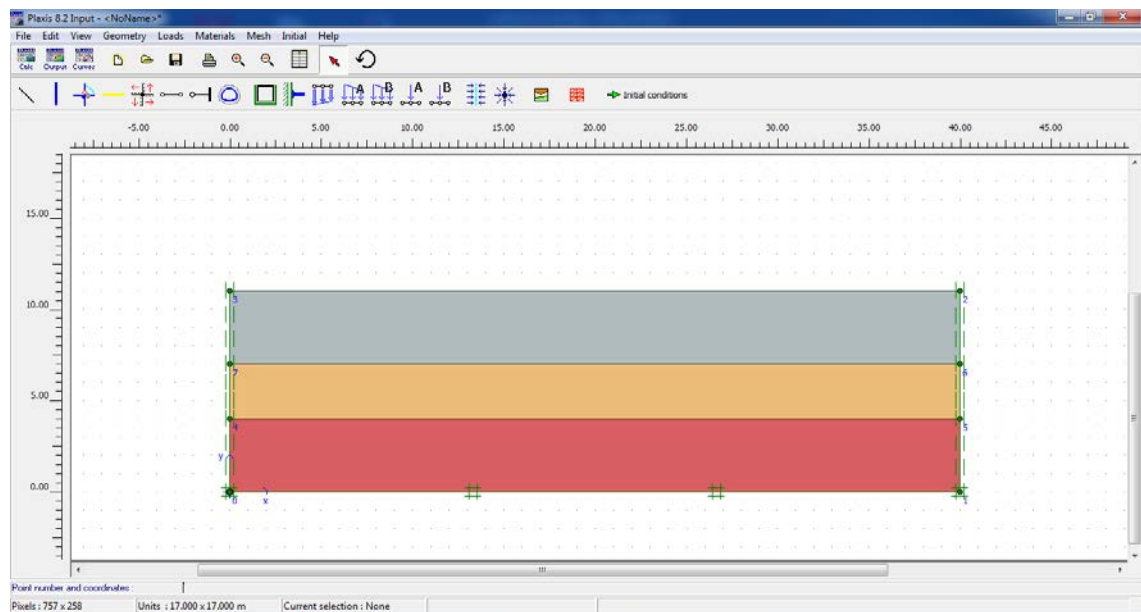


Figure V.2 . Modèle géométrique de profil retenu.

V-2-2 Caractéristiques des sols

- **Propriétés des couches des sols**

Les propriétés des couches des sols sont résumées dans le tableau V.1 :

	Symb	Unité	Remblai	Sable UC	Argile
Profondeur	h	m	4	3	4
Poids volumique sec	γ_{unsat}	KN/m^3	17.5	18	17
Poids volumique humide	γ_{sat}	KN/m^3	19	19	18
Module d'Young	E_{re}	Mpa	300	142	175
Coefficient de poisson	ϑ		0.4	0.3	0.45
Cohésion	C_{re}	Kpas	0.2	0.2	7
Angle de frottement	φ		32	35	30
Angle de dilatation	ψ		2	5	0
Facteur de rigidité	R_{inter}		1	1	1

Tableau V. 1. Propriétés du sol constituant le massif.

V-2-3 Génération du maillage

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de 108 éléments et le nombre de nœuds est de 251. On règle la finesse du maillage (global Coarseness) sur « very fine », (Figure.V.3).

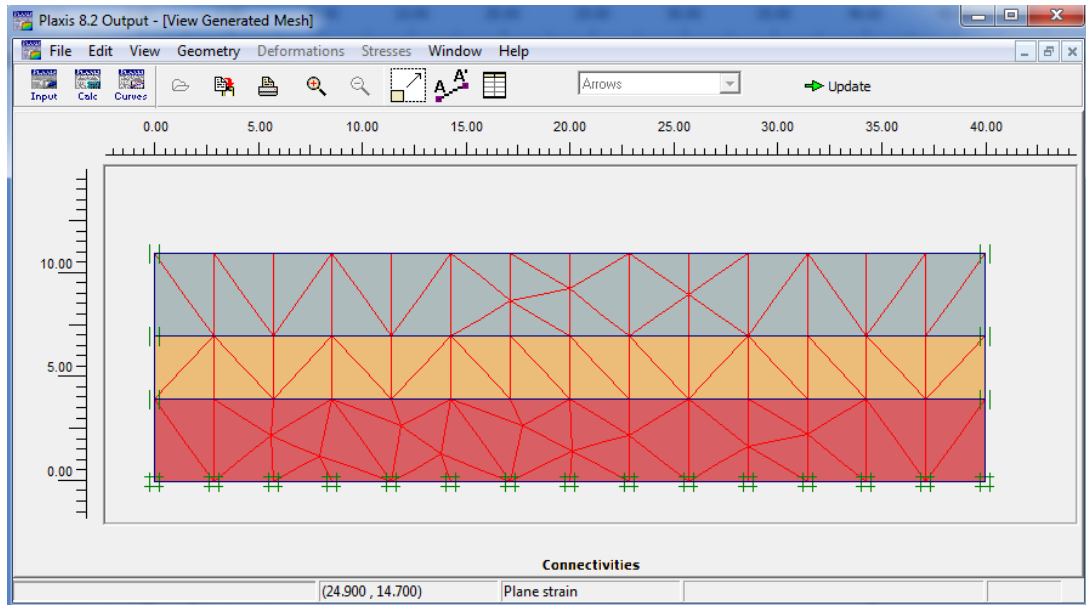


Figure V. 3. Maillage du modèle.

V-2-4 Conditions initiales

Les conditions initiales fixées correspondent à un état de type $K_0 = 1$ (contraintes de type géostatique) (Figure.V.4).

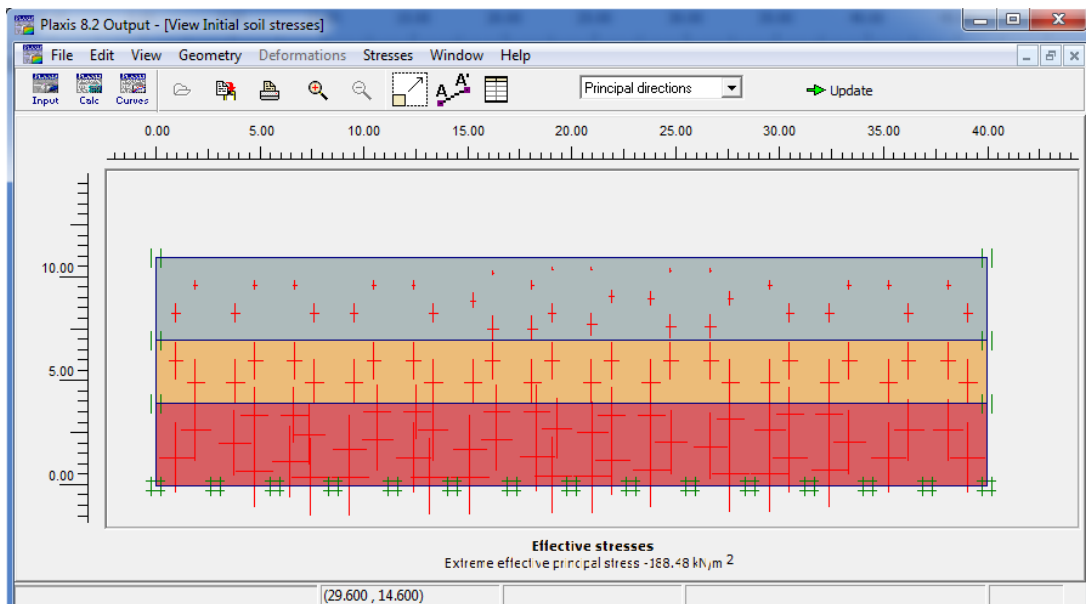


Figure V. 4. Génération des contraintes initiales.

V-3 Sollicitations sismiques

Dans cette application numérique, deux types de sollicitations sismiques sous forme de déplacements imposés à la base du modèle de calcul ont été considérées :

- ✓ Une sollicitation verticale simulant le mouvement vertical.
- ✓ Une sollicitation inclinée simulation les combinaisons des deux mouvements (horizontal et vertical).

La Figure V.5 présente les deux sollicitations imposées à la base du modèle de calcul.

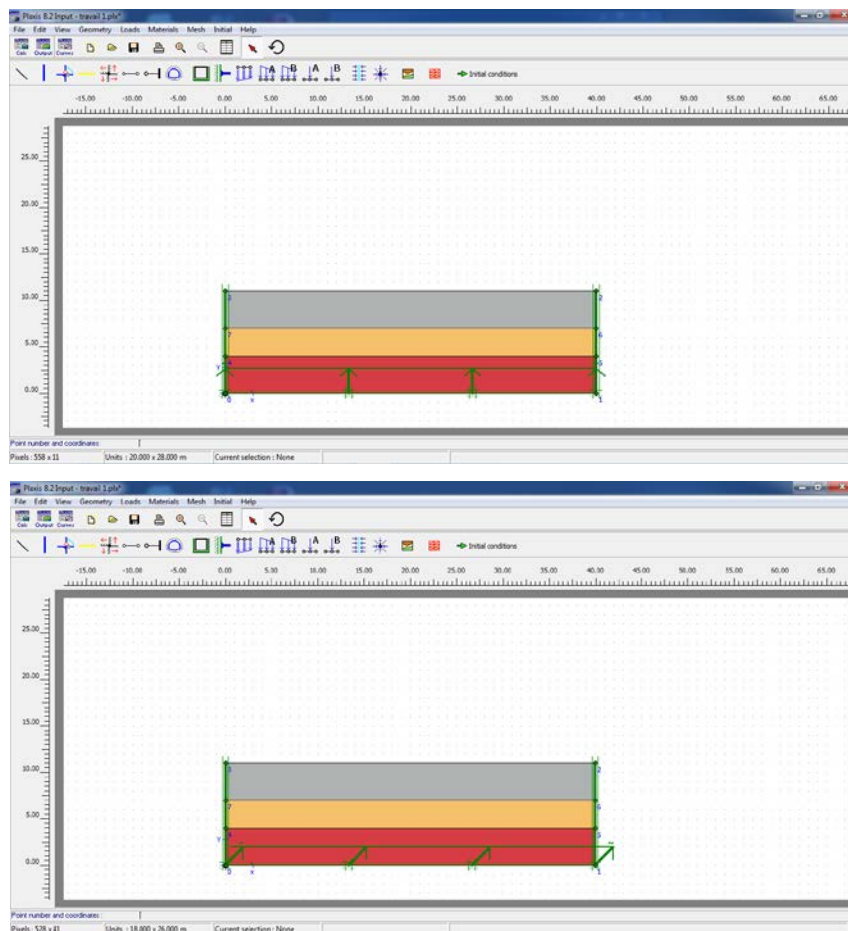


Figure V. 5. sollicitations sismiques imposées.

V-4 Procédure de calcul

Le calcul se fait deux phase : une phase initiale (phase 0) pour initier les contraintes initiales suite d'une seconde phase (phase 1) pour l'analyse dynamique (Figure V.6) . Il est analyse dynamique dans laquelle le tremblement de terre est simulé. Pour analyser les effets du tremblement de terre en détail des déplacements sont remis à zéro au début de cette phase.

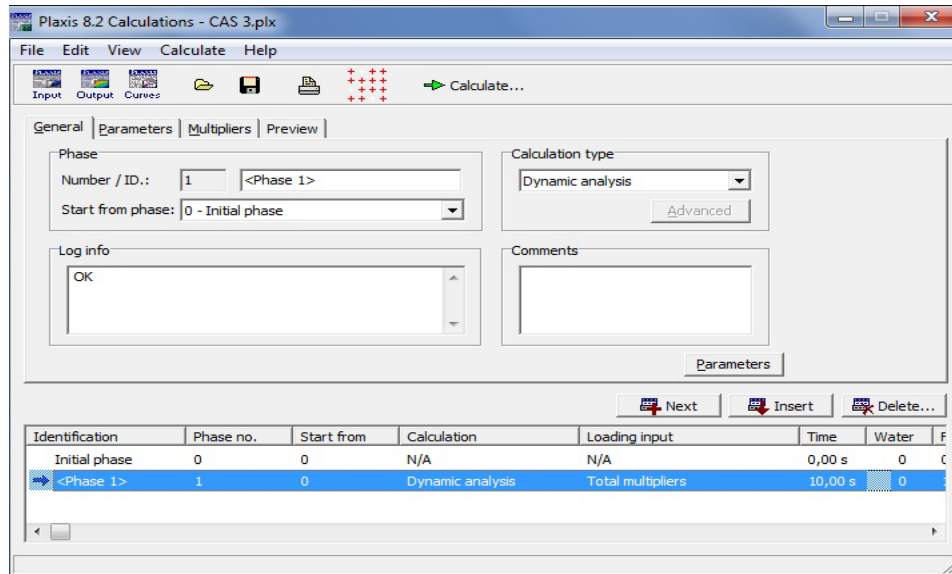



Figure V. 6. déclarations des phases (PLAXIS).

On procède comme suit :

– **Phase 0** : initiation des contraintes (procédure K_0) ; on détermine les contraintes effectives initiales. Cette phase est choisie par le programme par défaut.

– **Phase 1** :

1. Sélectionner : Analyse dynamique pour le type de calcul dans **General** tab set.
2. entrer le nombre de pas additionnels Étapes à 250, dans **Paramètres** tab-sheet.
3. Sélectionner : **reset the déplacement to zéro**.
4. entrer : Intervalle de temps dans 10 sec dans le chargement **ainput**.
5. sélectionner **Manual setting** pour le procédé itératif.
6. Cliquer **Défine**.
7. sélectionner : **multiplier**.
8. Cliquer  à côté du Σ -Mdisp **multiplier**.
9. Sélectionner l'option **harmonicloadmultiplier**.

10. Saisir les paramètres d'accélérogramme de séisme :

Amplitude multiplier	4
Frequency	0.25 Hz
Initial phase angle	0

Tableau V. 2. les paramètres d'accélérogramme de séisme

11. Cliquer OK

12. Sélectionner les points A, B, C et D pour tracer les courbes de déplacements, vitesses et accélérations (Figure V.7), puis appuyer sur **calcul**, la fenêtre des calculs affichée sur (la Figure V.8) va l'afficher tout au long des calculs.

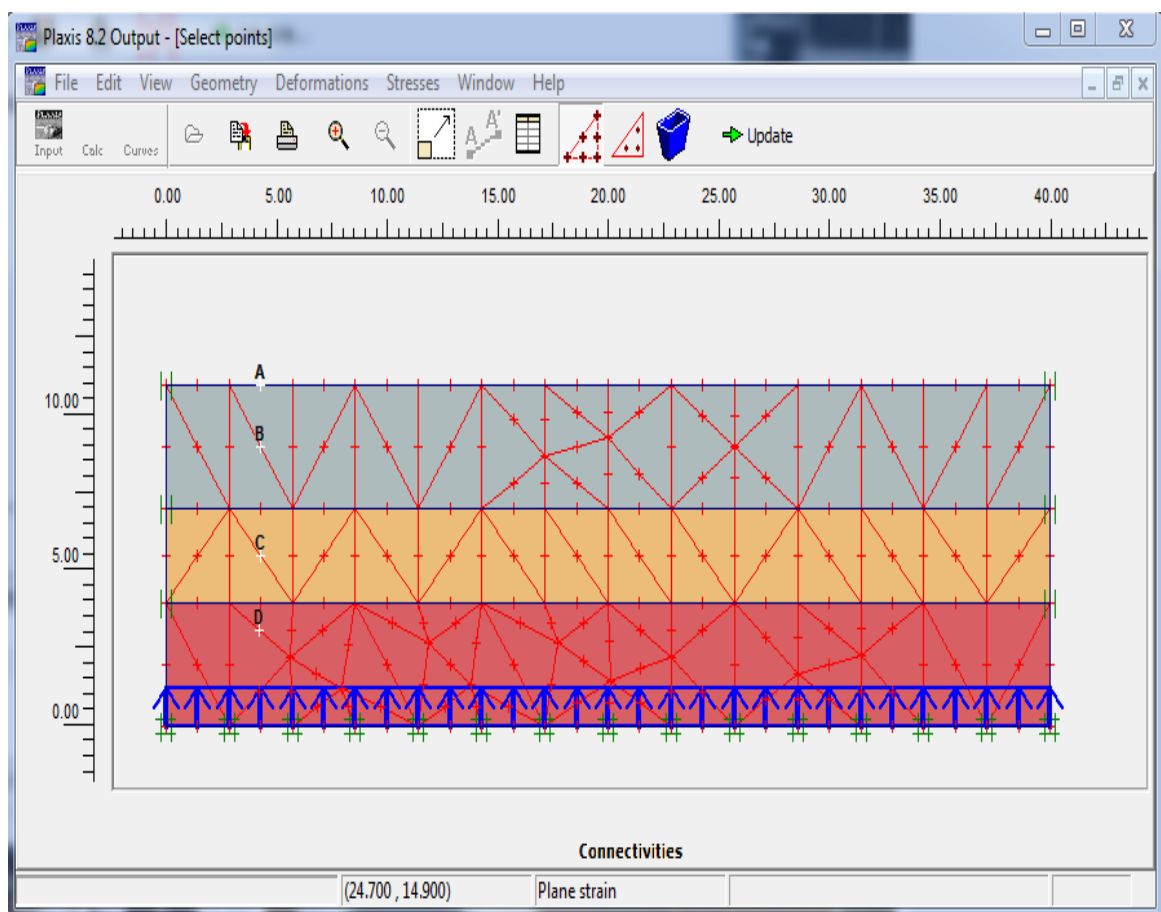


Figure V. 7. trace des points dans le profil.

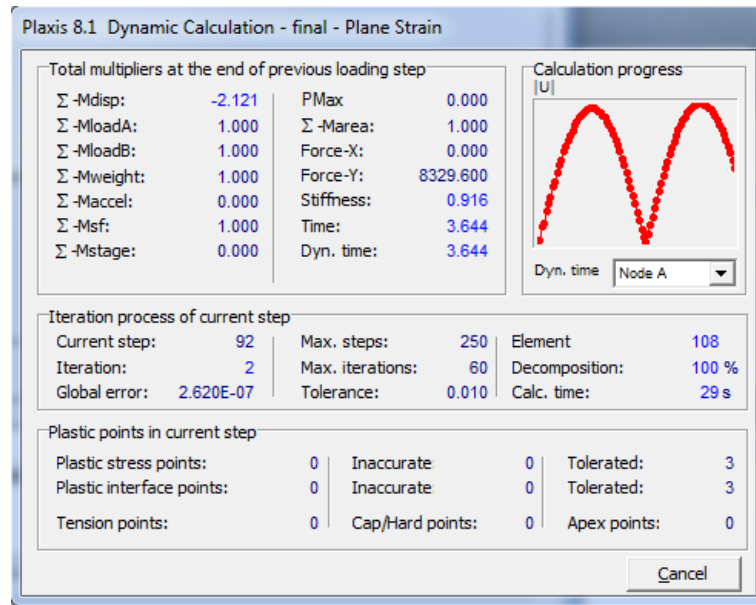


Figure V. 8. Procédure de calcul (PLAXIS).

On trace les points A, B, C, D dans le profile pour obtenir les courbes, Les coordonnées des points présentés dans le tableau V.3.

points	A	B	C	D
X (m)	4.29	4.29	4.29	4.24
Y(m)	11.00	9.00	5.50	3.10

Tableau V. 3.Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.

VI-RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION

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

VI-1-Résultats des calculs

1-1-Cas d'un sième vertical imposé à la base (1^{er} cas)

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

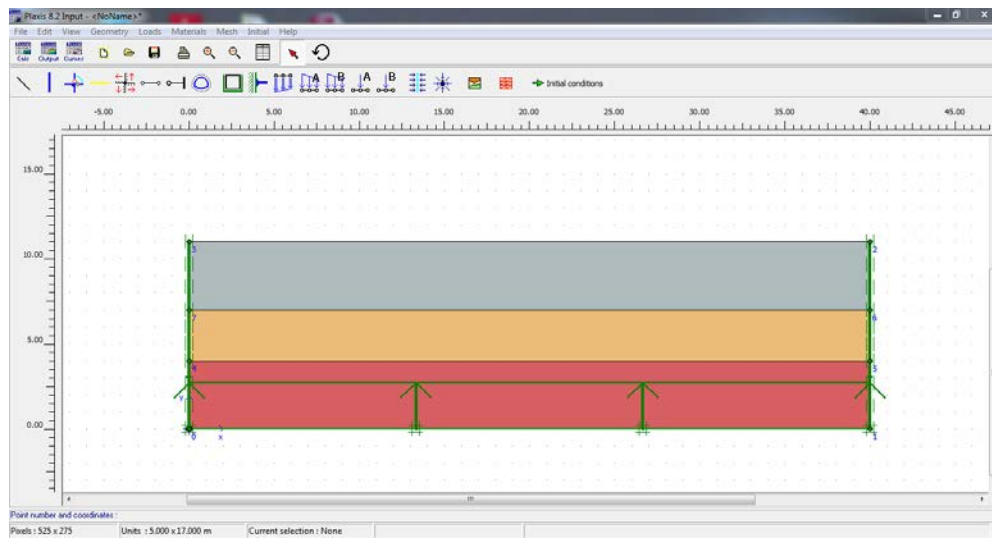


Figure V. 9. Onde sismique verticale(1^{er} cas).

a) maillage déformé

la maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la Figure.V.10.

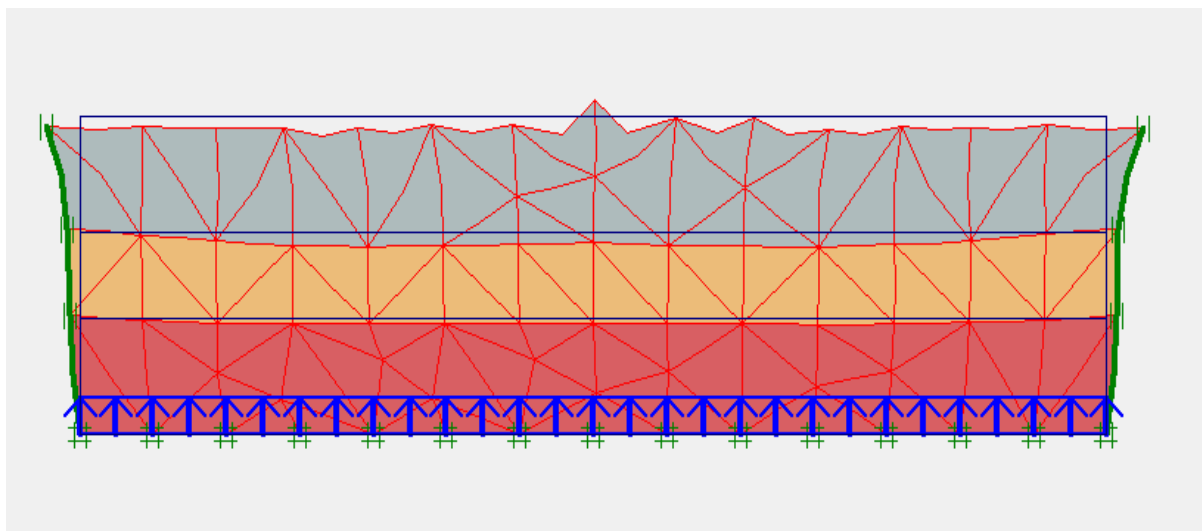


Figure V. 10. maillage Déformé du profil (1^{er} cas).

b) contraintes

Les isovaleurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la Figure.V.11, On note une contrainte initiale égale à : -202.16 KN/m^2

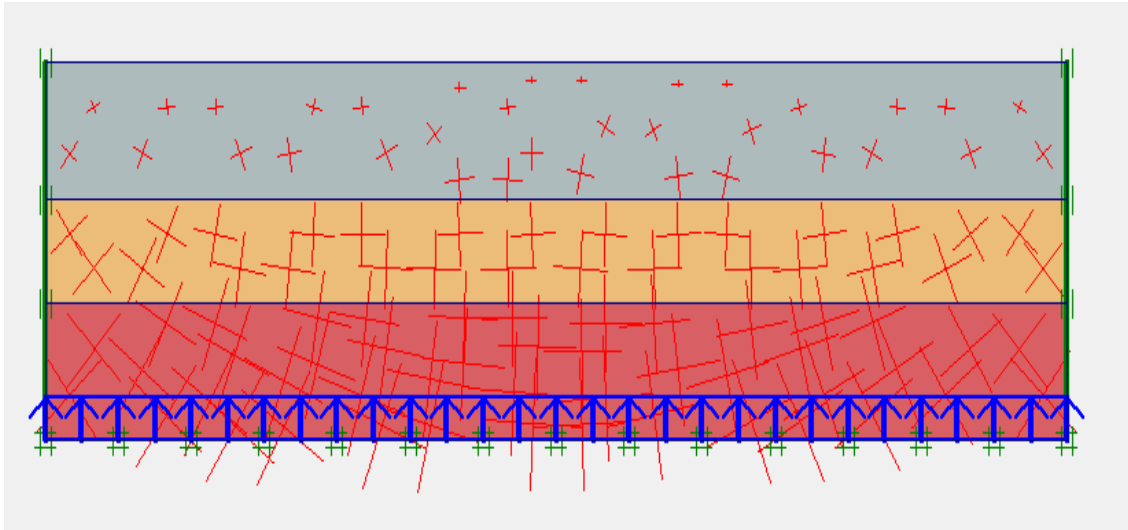


Figure V. 11. isovaleurs des Contraintes (1^{er} cas).

c) déplacements

les vecteurs déplacements sont représentés sur la Figure.V.12. on note un déplacement maximal égal à : $735.32 * 10^{-6} \text{ m}$

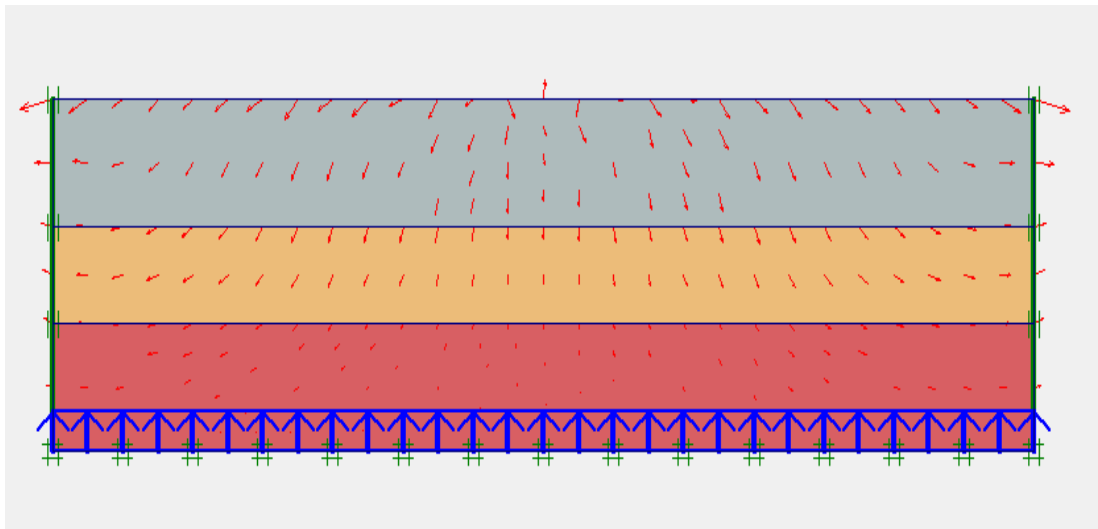
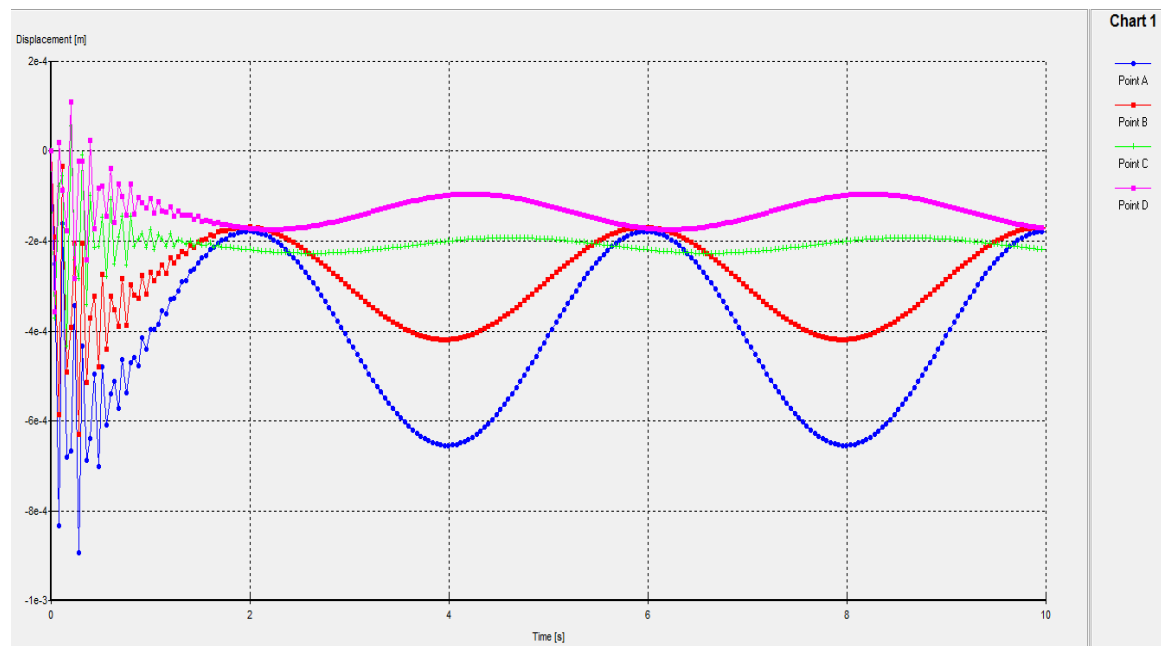
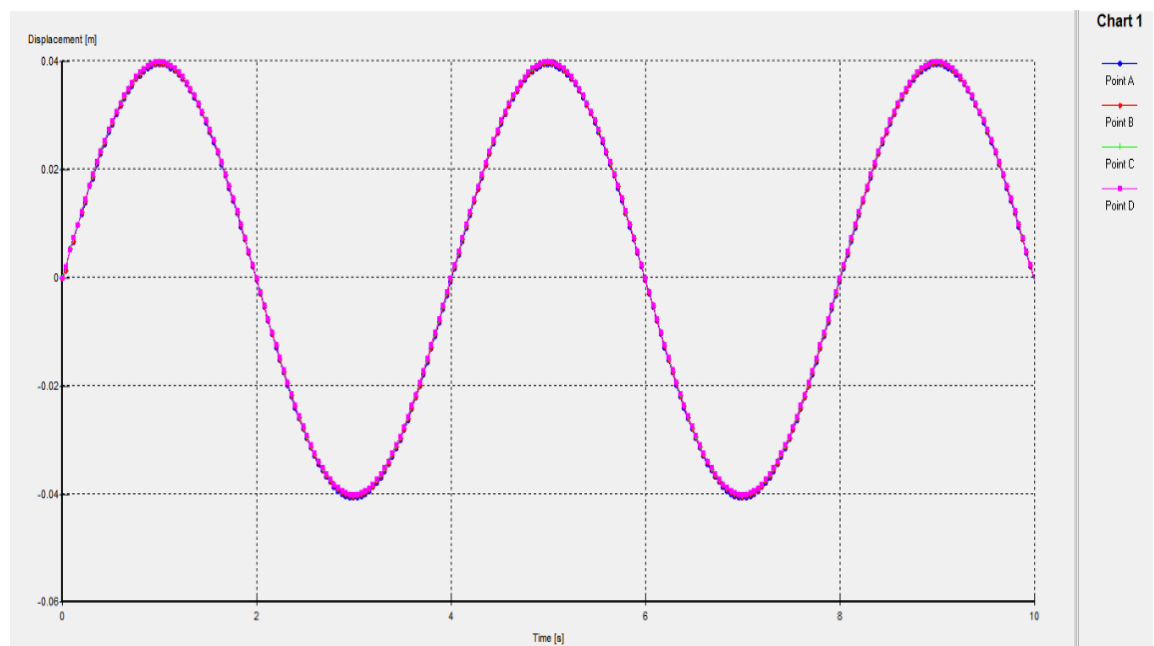
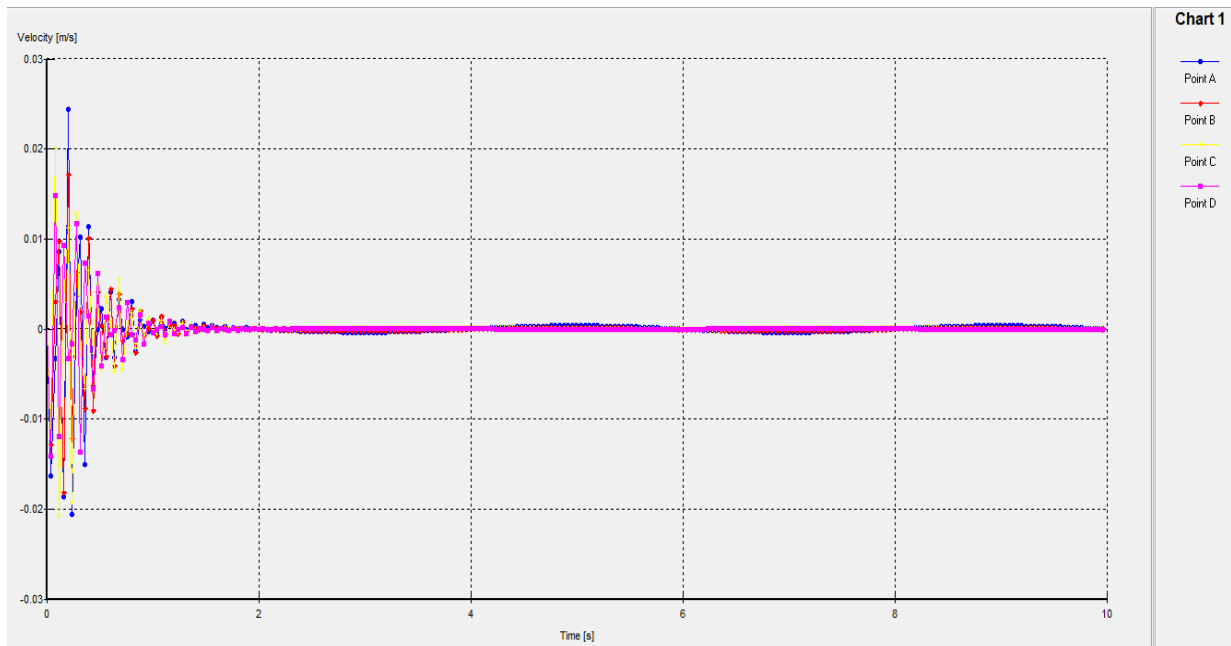
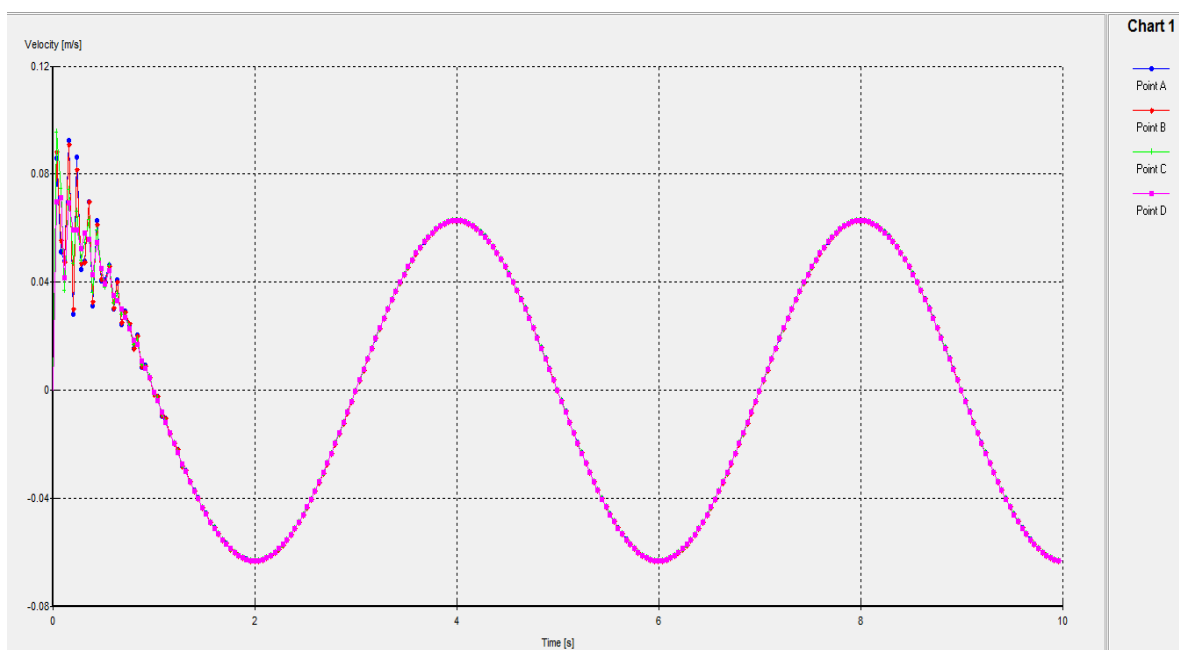


Figure V. 12. vecteurs déplacements (1^{er} cas).

d) courbes déplacements-temps

1-Axe XX : (Figure.V.13).Figure V. 13. Déplacements – temps-axe XX, (1^{er} cas).2-L'axe YY : (Figure V.14).Figure V. 14. Déplacements – temps-axe YY, (1^{er} cas).

e) courbes vitesses-temps

1-L'axe XX :(Figure V.15).**Figure V. 15. Vitesses – temps-axe XX,(1^{er} cas) .****2-L'axe YY :** (Figure V.16).**Figure V. 16. Vitesses – temps-axe YY, (1^{er} cas).**

f) courbes accélérations-temps

1-L'axe XX : (Figure V.17).

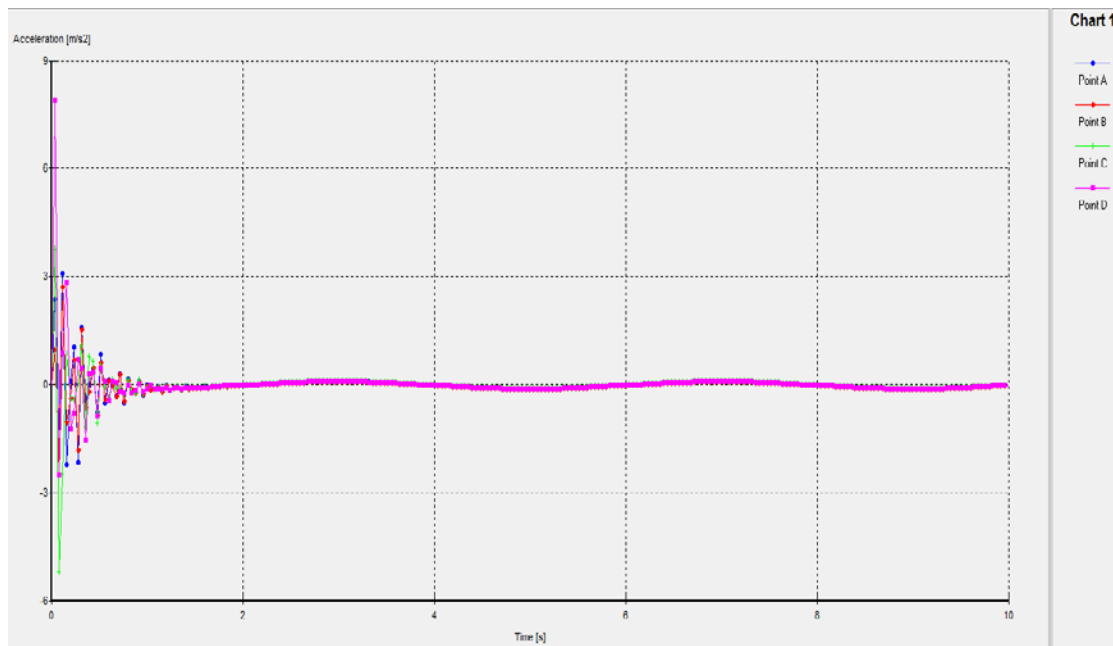


Figure V. 17. Accélérations – temps-axe XX,(1^{er} cas).

2-L'axe YY : (Figure V.18).

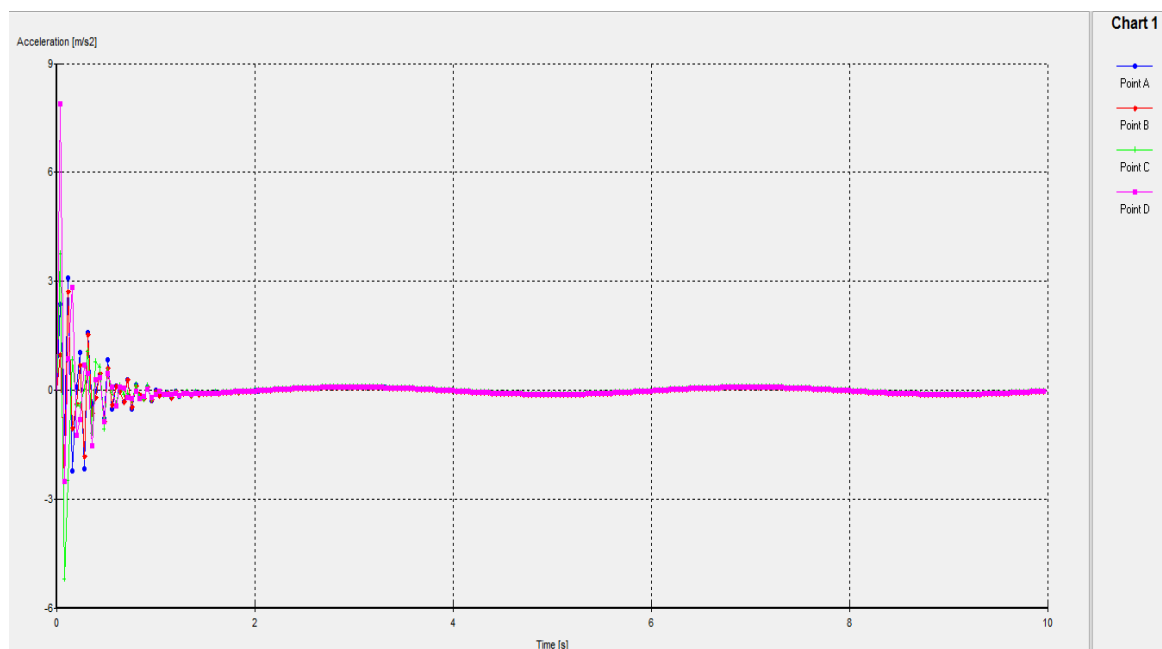


Figure V. 18. Accélérations – temps-axe YY,(1^{er} cas).

g) courbe force-temps (Figure V.19).

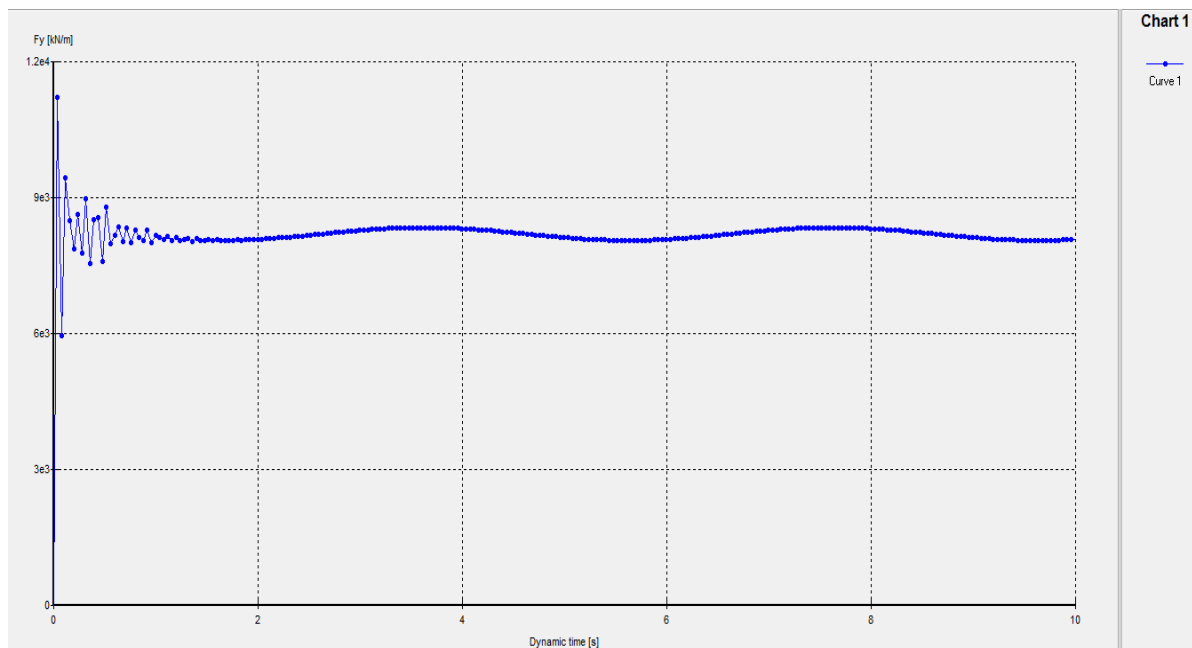


Figure V. 19. la force - temps (1^{er} cas).

h) synthèse

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau V.4. considérés

points		A	B	C	D
Déplacement (m)	XX	$8.923 \cdot 10^{-4}$	$6.306 \cdot 10^{-4}$	$5.625 \cdot 10^{-5}$	$3.573 \cdot 10^{-4}$
	YY	0.04	0.04	0.04	0.04
Vitesse (m/s)	XX	0.24	0.018	0.021	0.015
	YY	0.093	0.091	0.096	0.072
Accélération (m/s ²)	XX	3.101	2.74	5.183	7.895
	YY	3.101	2.74	5.183	7.895

Tableau V. 4. valeurs maximal aux points considérés(1^{er} cas).

1-2-Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (2^{ème} cas)

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

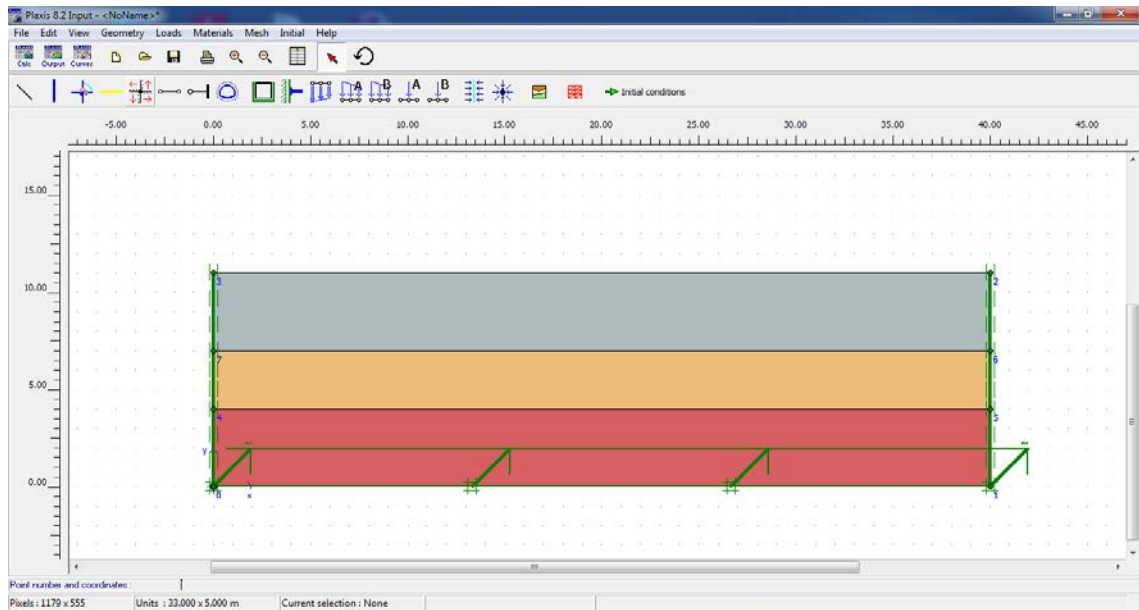


Figure V.20. L'onde sismique inclinée (2^{ème} cas).

a) maillage déformé

la maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la Figure V.21.

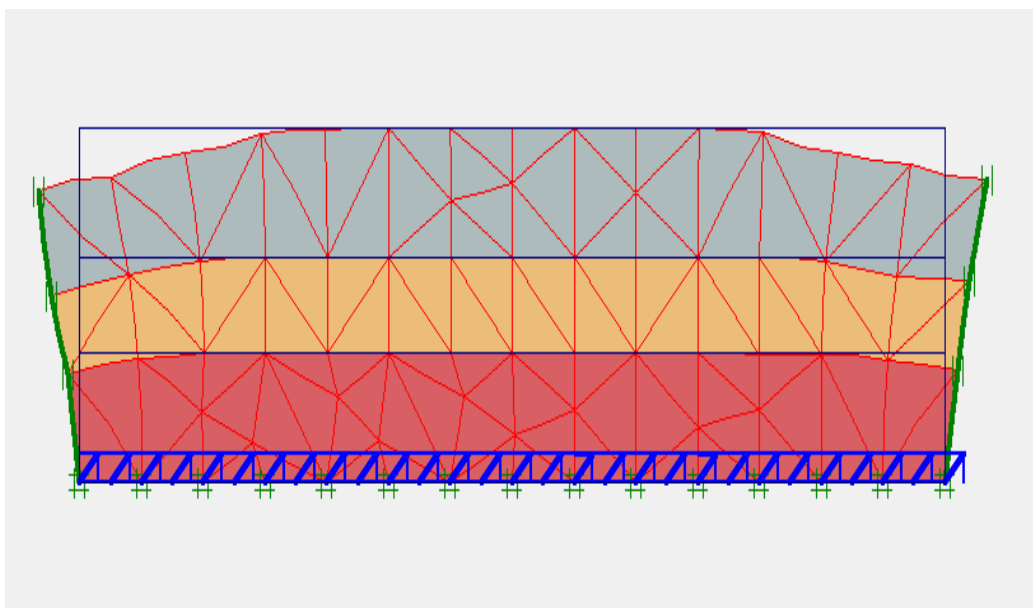


Figure V. 21. maillage Déformé du profil

b) contraintes

Les isovaleurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la Figure V.22, On note une contrainte initiale égale à : -352.72 KN/m^2

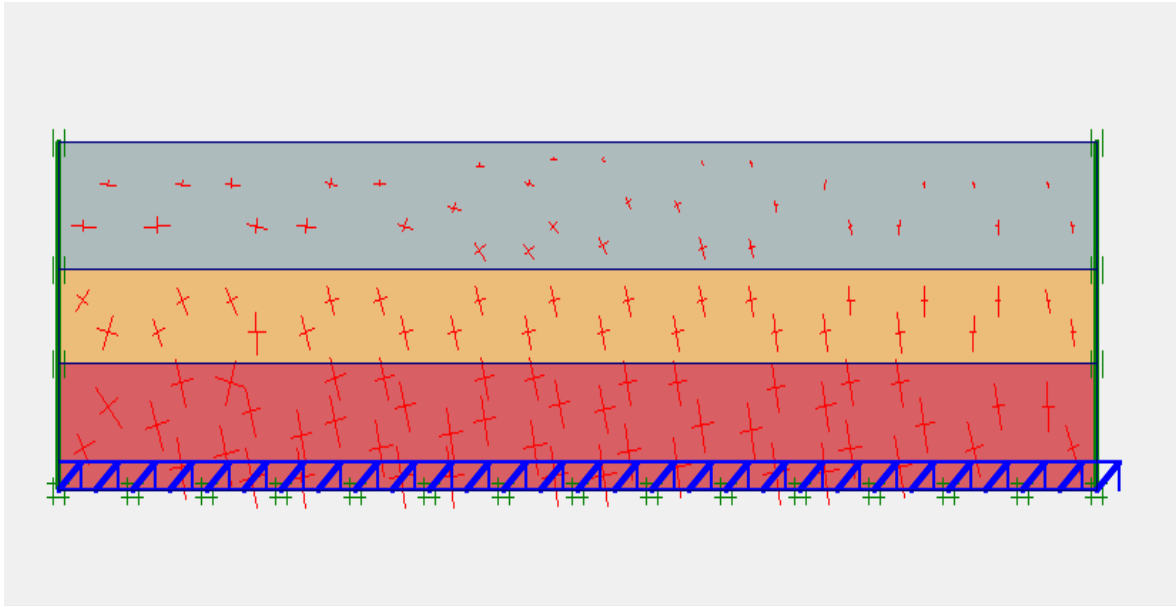


Figure V. 22. isovaleurs des Contraintes (2^{ème} cas).

c) déplacements

les vecteurs déplacements sont représentés sur la Figure V.23 .on note un déplacement maximal égal à : $271.73 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

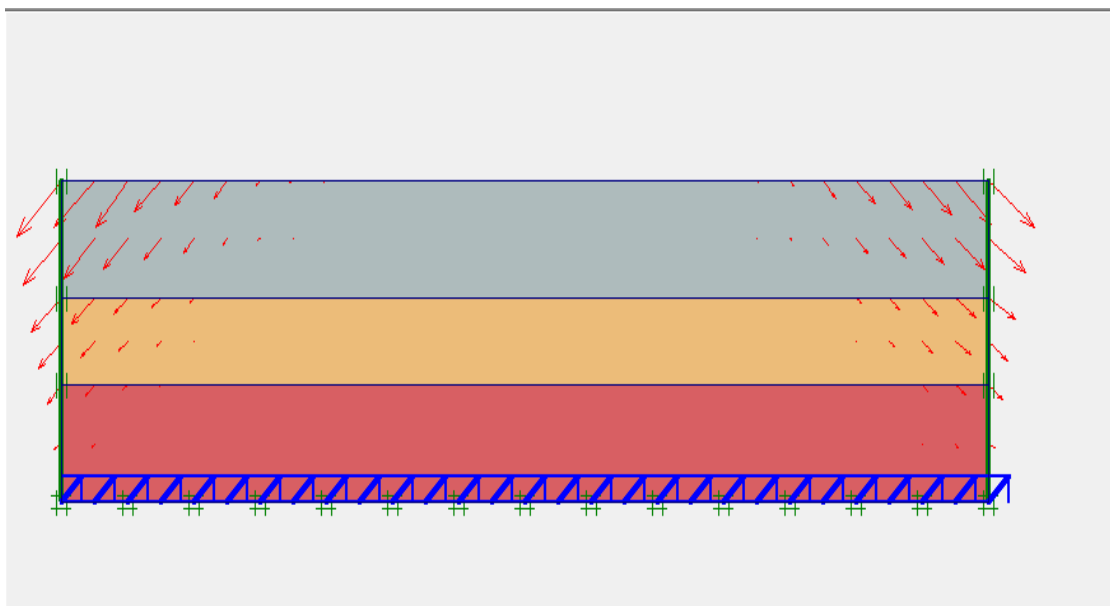
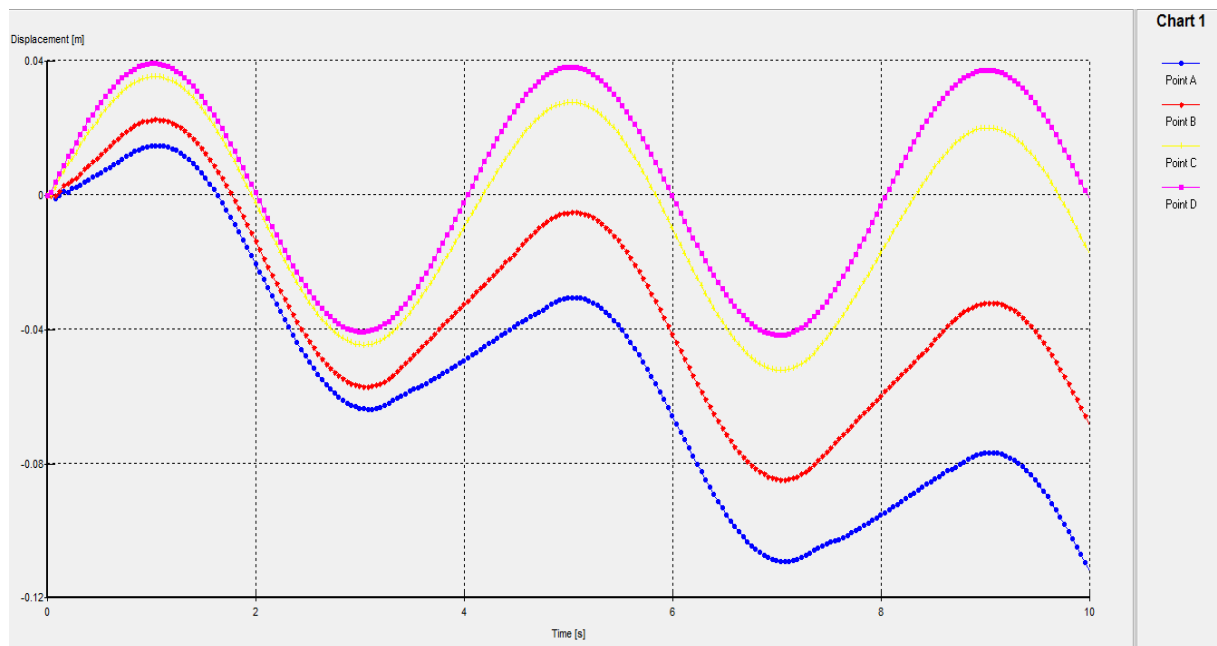
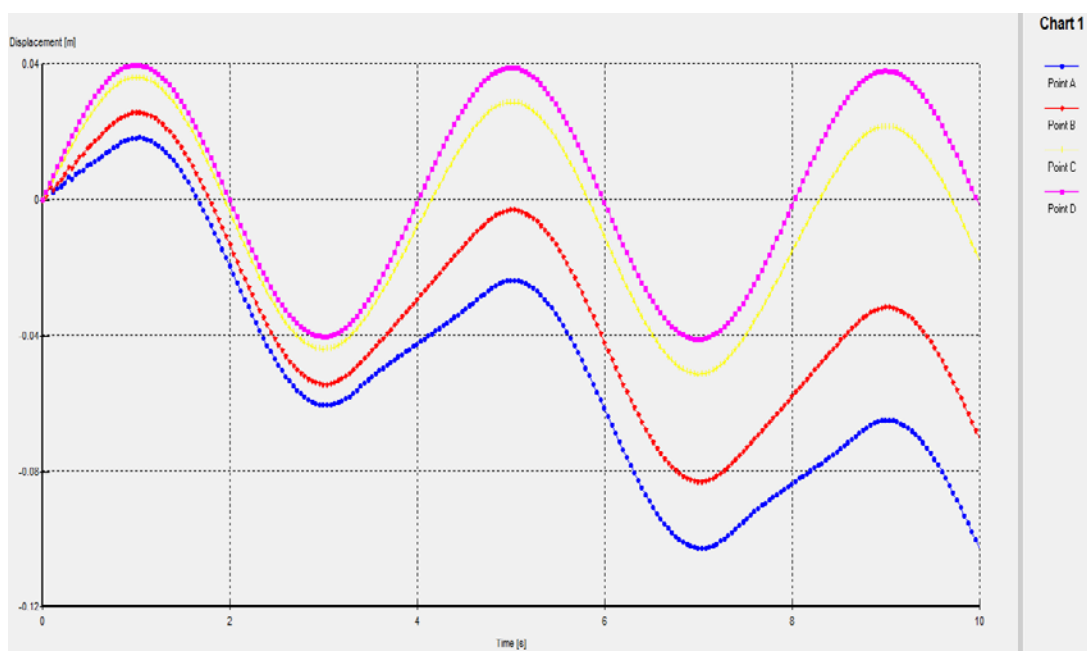


Figure V. 23. vecteurs déplacements (2^{ème} cas).

d) courbes déplacements-temps

1-Axe xx :(Figure V.24).Figure V. 24. Déplacements – temps-axe XX, (2^{ème} cas).**2-L'axe YY :**(Figure V.25).Figure V. 25. Déplacements – temps-axe yy, (2^{ème} cas).

e) courbes vitesses-temps

1-L'axe XX : (Figure V.26).

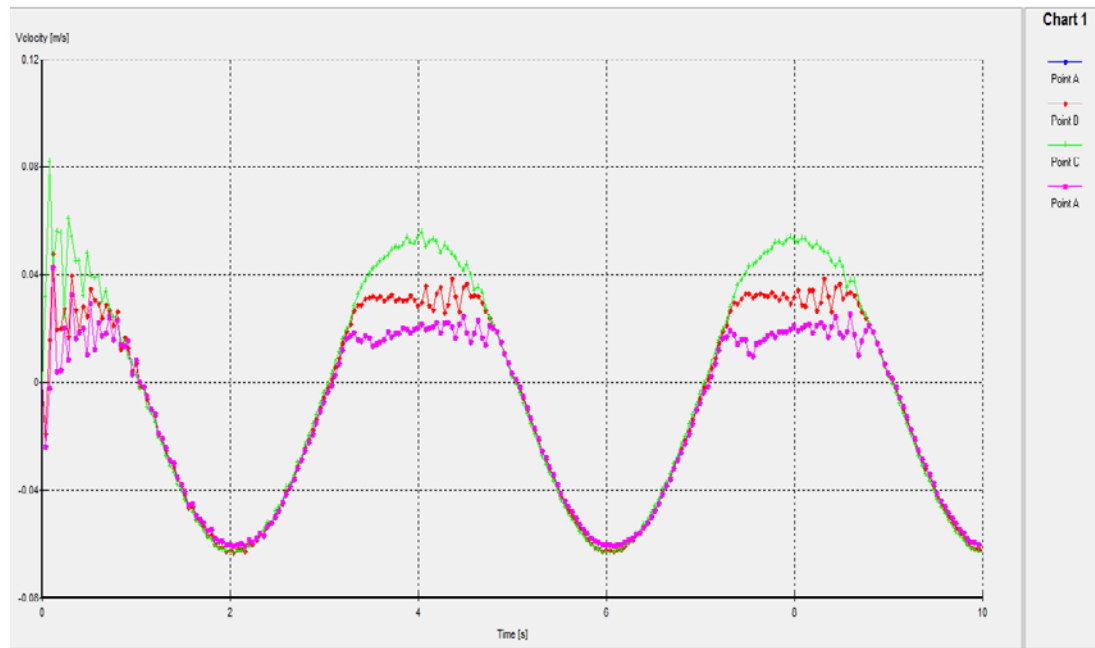


Figure V.26. Vitesses – temps-axe XX, (2^{ème} cas).

2-L'axe YY : (Figure V.27).

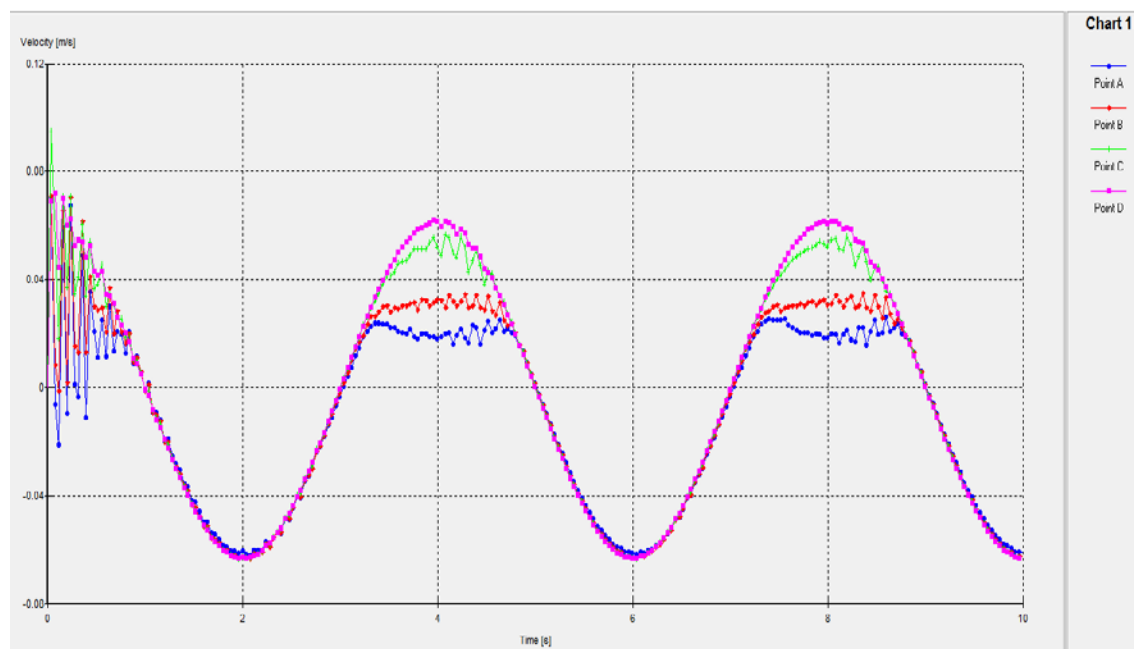
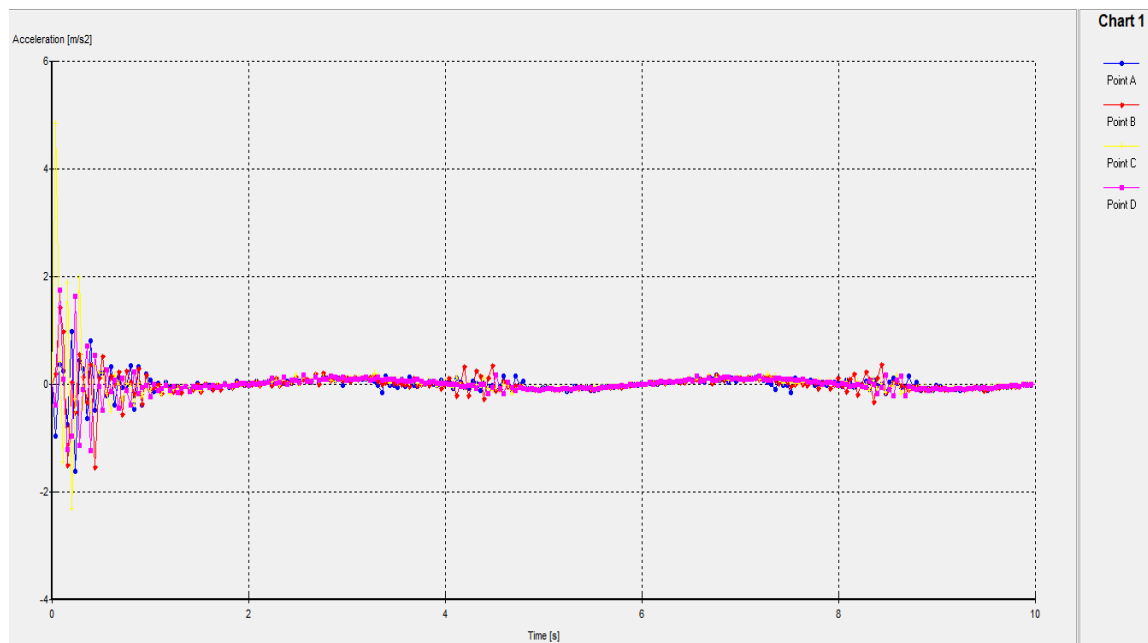
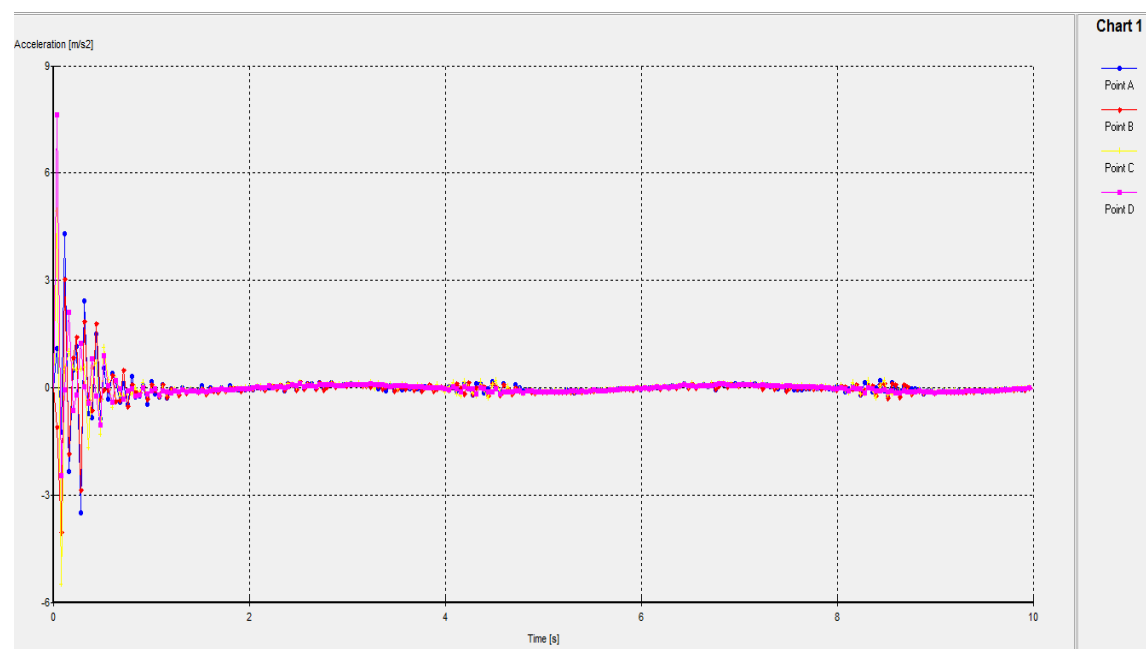


Figure V. 27. Vitesses – temps-axe YY, (2^{ème} cas).

F) courbes accélérations-temps

1-L'axe XX :(Figure V.28).Figure V. 28. Accélérations – temps-axe XX, (2^{ème} cas).1-L'axe YY :(Figure V.29).Figure V. 29. Accélérations – temps-axe YY(2^{ème} cas).

g) courbe force-temps

1-L'axe XX :(Figure V.30).

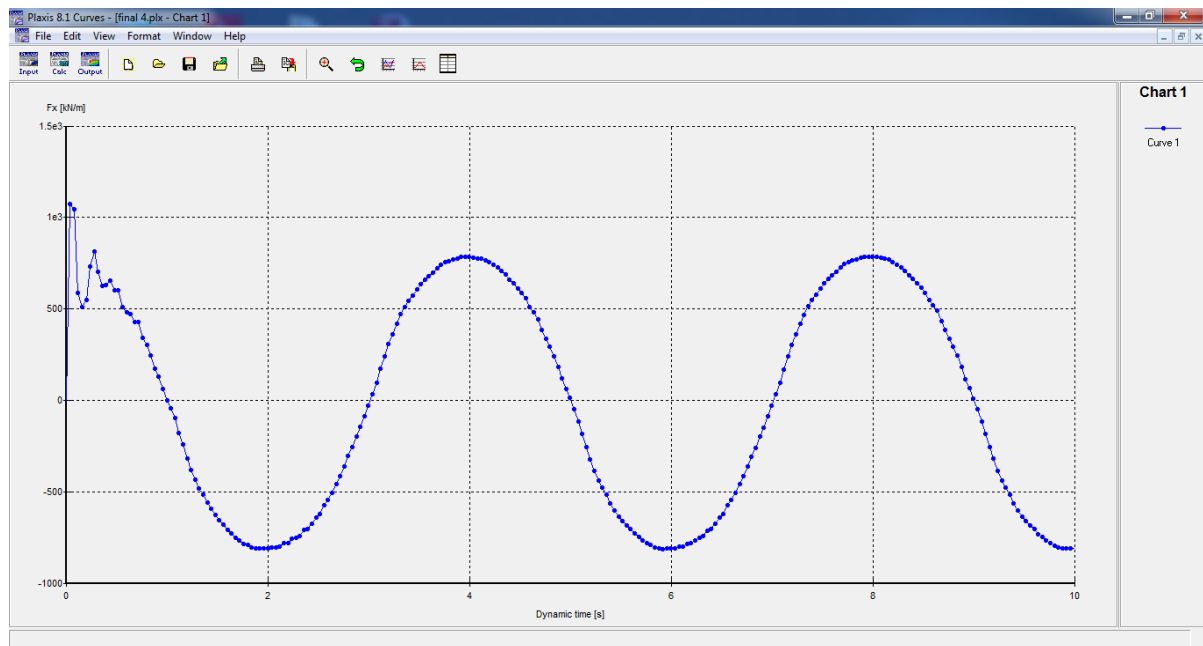


Figure V. 30. la force - temps(2^{ème} cas).

h) synthèse

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau V.5 considérés

points		A	B	C	D
Déplacement (m)	XX	0.109	0.085	0.052	0.042
	YY	0.103	0.083	0.051	0.041
Vitesse (m/s)	XX	0.061	0.063	0.082	0.082
	YY	0.071	0.071	0.095	0.072
Accélération (m/s ²)	XX	1.632	1.554	4.837	1.738
	YY	4.317	4.031	5.476	7.621

Tableau V. 5. valeurs maximal aux points considérés(2^{ème} cas)

1-3 Comparaison des calculs

La comparaison des calculs pour les deux cas est résumée dans le tableau V.6

Sollicitations sismique	Vertical(1 ^{er} cas)	Incliné(2 ^{ème} cas)
Déplacement (m)	$735.32 \cdot 10^{-6}$	$271.73 \cdot 10^{-3}$
Vitesse (m/s)	$62.89 \cdot 10^{-3}$	$116.07 \cdot 10^{-3}$
Accélération (m/s ²)	$1.65 \cdot 10^{-3}$	$296.96 \cdot 10^{-3}$

Tableau V. 6 .Comparaison entre les deux cas.

Les valeurs de : déplacement, vitesse et l'accélération dans le 2^{ème} cas supérieur à le 1^{er} cas.

Les résultats montrent que :

- l'influence des ondes qui trouve dans le sens incliné sur le profil de sol est supérieure à celle des ondes dans les sens vertical.

1-4 Effet des ondes verticales

On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau V.7 :

points		A	B	C	D	E
X(m)		4.29	4.29	4.29	4.24	4.29
Y(m)		11.00	9.00	5.50	3.10	0
Déplacement (m)	XX	$8.923 \cdot 10^{-4}$	$6.306 \cdot 10^{-4}$	$5.625 \cdot 10^{-5}$	$3.573 \cdot 10^{-5}$	$1.573 \cdot 10^{-5}$
	YY	0.04	0.042	0.043	0.045	0.045

Tableau V. 7 . Déplacement des points (1^{er} cas).

L'évaluation des déplacements en fonction de la profondeur dans les sens vertical et horizontal est représentée sur les Figures (V.31) et (V.32) respectivement.

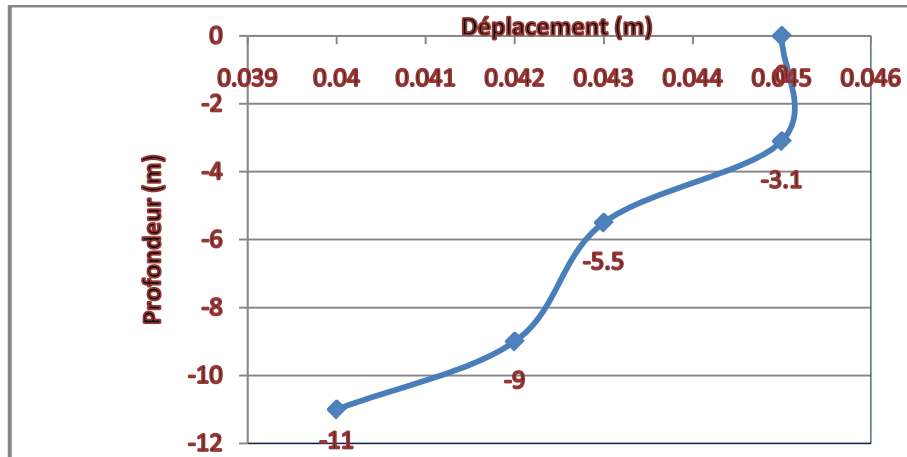


Figure V .31. déplacement vertical.

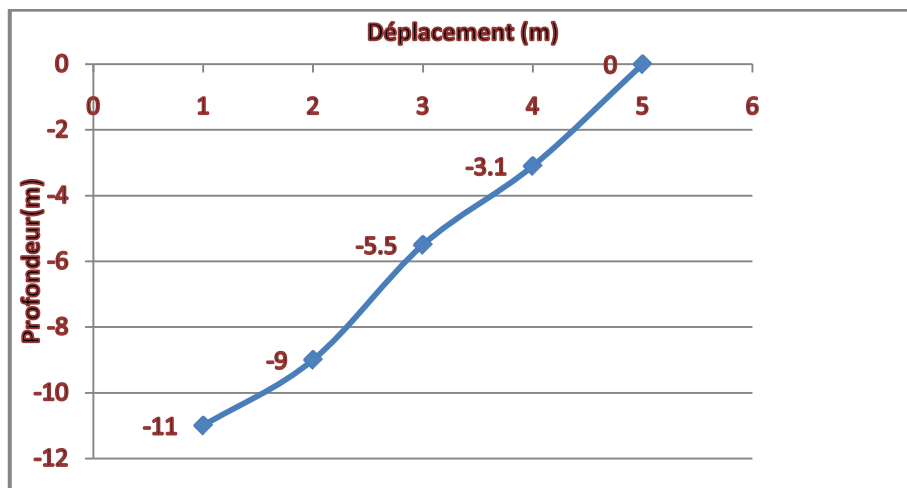


Figure V .32. déplacement horizontale.

b) Synthèse

D'après les résultats des calculs on peut conclure que le mouvement sismique influé dans le champ libre avec un excitation sinusoïdale par plusieurs facteurs, notamment le facteur de profondeur. On peut dire que :

-L'augmentation de distance entre les points qui sont installées verticalement dans les trois couches de sol et source de séisme résulte une augmentation du déplacement. Donc l'augmentation de la profondeur conduit à une diminution du déplacement.

Conclusion générale

A l'issue de notre étude bibliographique sur le phénomène sismique qui à toujours exercé une grande fascination sur l'humanité, on peut retirer plusieurs enseignements sur la caractérisation du mouvement sismique, l'évaluation des caractéristique dynamique des sols, le comportement de ces derniers sous chargement dynamique et l'évaluation de la réponse sismique.

L'étude bibliographique, paramétrique et les diverses illustrations numériques notamment l'étude de notre cas ont permis de formuler les principales conclusions et importants résultats suivants:

1-La synthèse des études faites sur la caractérisation des sèismes a montré qu'il existe beaucoup d'imperfection dans le choix et la définition des différents paramètres qui servent à décrire le mouvement sismique.

2-Le choix du modèle de comportement du sol d est important dans les études de la réponse sismique de sol. L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix: l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

Certains des paramètres sont différents dans leur expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques, les modèles développés distinguent surtout par le nombre et le type de paramètres qui les caractérisent.

3-L'analyse de la réponse sismique d'une couche de sol consiste à déterminer les caractéristiques du mouvement sismique à la surface du sol en ayant connaissance de l'accélérogramme. Mathématiquement, elle se rapproche de l'étude de la propagation d'ondes en milieu continu mais le problème se complexifie considérablement si l'on tient compte des hétérogénéités du sol et de ses non linéarités.

4-Dans la deuxième partie de mémoire nous avons décrit le code de calcul utilisé pour simuler une excitation sinusoidale (solicitation sismique harmonique) pour lesquels on s'est concentré sur la représentation du comportement du massif de sol. Il s'agit le code de calcul "*PLAXIS*" en éléments finis 2D.

Les lois de comportement disponibles dans le code "*PLAXIS*" ont été brièvement décrites:

- Comportement élastoplastique.
- Modèle élastique linéaire.
- Modèle de Mohr-Coulomb.
- Module dynamique du PLAXIS.

CONCLUSION GENERALE

5-Le mouvement sismique est un phénomène très complexe et il est affecté par un nombre élevé de facteurs qui peuvent intervenir sur le mouvement sismique en un point donné. Mais, d'après l'étude effectuée on peut admettre que parmi plusieurs facteurs c'est le facteur de profondeur ou de distance entre la source et le point étudié qui domine.

L'éloignement de la source affecte le mouvement en diminuant son amplitude et modifiant son contenu spectral: les hautes fréquences sont filtrées et la fréquence fondamentale du mouvement abaissée. Par ailleurs, une partie de l'énergie libérée à la source transportée par ces ondes est absorbée dans les milieux qu'elles traversent du fait de l'amortissement propre, ou amortissement matériel, lié à l'hystérésis des matériaux.

D'autre part, le sens de propagation des ondes sismiques influe sur le site. Les ondes se propageant dans le sens incliné influent beaucoup plus que celles qui se propagent dans le sens vertical et horizontal.

Références bibliographie

- [1]-Sismicité de la terre, Bruce Bolt, 1982.
- [2]-Milan. Zacek; « Construire parasismique (Risque sismique ; conception parasismique des bâtiments, réglementation) ».
- [3]-Règles parasismique algériennes «RPA99/ Version 2003 ».
- [4]- Mémoire du magister en génie civil, Mécanique des sols, AGRI Yasmina, 2007.
- [5]-MARC BADAUX et PILRINO LESTUZZI, « GENIEPARASISMIQUE », Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
- [6]Davidovici, « Génie parasismique », Presses de l'ENPC, Paris, 1985.
- [7]Mémoire du magister de génie civil, SACI Lila , étude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols a partir d'essais géophysiques.
- [8]-Alain Pecker, « Dynamique des sols », Presse l'Ecole Nationale des Ponts e chaussées, Paris, France, 1984.
- [9]-Seed et Idriss, "l'influence of soil conditions on building damage potential during earthquakes" .J.S.Div.ASCE, Calif, Berkeley, Rep.N°EERC, 1971.
- [10]-Mémoire du magister en génie civil "géotechnique", étude des sols, MENASRI Abdelrazak, influence des caractéristique du mouvement sismique et de l'hétérogénéité du sol sur la réponse sismique, C.U.M'sila, 1993.
- [11]-Hamou Kada, Ramdane Kheir Eddine, « Etablissement de la courbe de fragilité par La méthode PUSH OVER ».
- [12]- Mémoire du magister en génie civil, BALI-Frank bali, France.
- [13]- Mémoire du magister en génie civil, Géotechnique et Environnement, SACI Lila, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, étude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols a partir d'essais géophysiques, 2011.
- [14]-Mémoire du magister en génie civil, Mécanique des sols, Mr KERMICHE Abdelatif Fouzi, RAHMOUNI Zine El Abidine, université de M'sila, 9/10/2001.
- [15]-PLAXIS Finite Element Code for soil and rock analyses, professional version Balkema/Rotterdam/Brookfield mm, 2002.
- [16]-Mémoire de magister en génie civil, Mécanique des sols, LAHMADI Azzeddine, Université El Hadj Lahkdar Batna, 2006.
- [17]-R. Oods, 1978.
- [18]-Atkinson et Sonley, 2000.

Site Internet:

<http://www.afps-s%a9isme.org/>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Sismologie>
<http://www.plaxis.nl/plaxis2d/>
<http://www.google.dz>

PLAXIS Version 8 Professionnelle pour Windows

FINITE ELEMENT CODE FOR SOIL AND ROCK ANALYSES

SAISIE DES DONNEES :



définition graphique de la géométrie : La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques pratiques, ce qui permet une description précise de la coupe. Le maillage 2D est généré automatiquement à partir de ce modèle géométrique.



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

Éléments de degré élevé : Des éléments triangulaires quadratiques à 6 noeuds et du 4^{ème} ordre à 15 noeuds sont disponibles pour modéliser les déformations et les contraintes dans le sol.

LOIS DE COMPORTEMENT DU SOL :



Base de données des matériaux : Les propriétés des matériaux sont regroupées dans une base de données du projet. Toutes les données figurant dans les bases de données de différents projets peuvent être partagées via une base de données globale.

Modèle de Mohr-Coulomb : Ce modèle non-linéaire simple et robuste n'utilise que des paramètres qui sont connus habituellement. Tous les facteurs de non-linéarité ne sont cependant pas couverts par ce modèle. Le modèle de Mohr-Coulomb permet d'estimer de manière réaliste la charge de rupture de fondations circulaires, de pieux courts, ... etc. Il peut également servir à calculer un coefficient de sécurité par une approche de phi-c réduction.

Modèles avancés de sol : *PLAXIS* offre d'autres modèles de comportement de sol : le *Hardening Soil Model* (modèle hyperbolique en élastoplasticité) pour les sols raides, comme les argiles surconsolidées et les sables ; le *Soft Soil Creep Model* (modèle de type Cam-Clay) pour l'analyse du comportement des sols compressibles normalement consolidés. En complément, *PLAXIS* inclut un modèle pour l'analyse des roches en comportement anisotropique : le *Jointed Rock model*.

Modèles définis par l'utilisateur : dans *PLAXIS 8*, l'utilisateur a la possibilité de définir ses propres lois de comportement. Cette option, particulièrement utile en premier lieu pour les chercheurs, dans les universités et les instituts de recherche, peut également se révéler intéressante dans les milieux professionnels. Dans les années à venir, les modèles validés et documentés fournis par les utilisateurs seront mis à disposition sur Internet.



Régime d'écoulement permanent : Des réseaux complexes de pressions interstitielles peuvent être générés par combinaison de lignes phréatiques et de saisie directe de pressions. Les pressions interstitielles peuvent également être générées par un calcul d'écoulement permanent.



Calcul du réseau d'écoulement : Les distributions de pressions interstitielles complexes peuvent être générées à partir d'un calcul d'écoulement à deux dimensions. Des drains et des puits peuvent être modélisés grâce à des éléments spécifiques. Les potentiels aux limites du modèle sont définis comme des niveaux phréatiques.

Surpressions interstitielles : *PLAXIS* distingue les comportements drainés ou non drainés des sols, pour modéliser les sables perméables comme les argiles quasi-imperméables. Les surpressions interstitielles sont calculées lorsque des couches de sol non drainé sont soumises à des chargements. Les conditions de chargement non drainé conditionnent souvent la stabilité des ouvrages géotechniques.

FONCTIONS DE CALCUL :



Le programme de calcul permet de conduire des analyses en déformation menées par un calcul plastique, un calcul de Consolidation ou un calcul en Grandes déformations. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant le lancement du calcul.

Incrémentation automatique du pas de chargement : Ce mode évite à l'utilisateur d'avoir à choisir par lui-même les pas de chargement adaptés au calcul plastique incrémental, tout en garantissant une procédure de calcul fiable et efficace.

Contrôle de la longueur d'arc : Cette fonction permet un calcul correct des charges et mécanismes de rupture. Dans les calculs à charge contrôlée, la procédure itérative échoue dès que la charge imposée dépasse la valeur de pic. Avec le contrôle de la longueur d'arc, la charge appliquée est automatiquement réduite pour pouvoir examiner le phénomène de pic ainsi que toute évolution éventuelle après ce pic.

Annexes

Construction par étapes : Il est possible de simuler les phases de construction ou d'excavation, par activation/désactivation de groupes d'éléments, application de chargements ou changement des conditions hydrauliques. Cette procédure permet une estimation réaliste des contraintes et déplacements provoqués par exemple par la construction d'un barrage en terre ou une excavation profonde.

Consolidation : La dissipation des surpressions interstitielles avec le temps peut être simulée par un calcul de consolidation. Une analyse de consolidation nécessite la définition des perméabilités de chacune des couches de sol. Des procédures d'incrémentation automatique du pas de temps rendent l'analyse performante et facile à utiliser. L'option "Construction par étapes" peut être combinée avec une analyse en consolidation.

Analyse en variables de Lagrange actualisées : Avec cette option, le maillage est actualisé en permanence durant le calcul. Dans certaines situations, une analyse classique en petites déformations peut révéler des modifications importantes de la géométrie. Dans ces situations, il est recommandé de procéder à un calcul plus précis par actualisation des variables de Lagrange. Cette option est disponible pour tous les types de calcul.

Coefficients de sécurité : Le coefficient de sécurité est généralement défini comme le rapport de la charge de rupture à la charge de service. Cette définition est adaptée aux fondations, mais non aux remblais ou aux ouvrages de soutènement en palplanches. Dans ces derniers cas, il est plus approprié d'utiliser la définition du coefficient de sécurité de la mécanique des sols, c'est à dire le rapport entre la résistance au cisaillement mobilisable et la résistance au cisaillement mobilisée à l'équilibre. Dans *PLAXIS*, le coefficient de sécurité est calculé par une procédure de réduction de c et ϕ .

Gestionnaire de calculs : Dans le gestionnaire de calculs, plusieurs projets peuvent être sélectionnés pour un calcul différé. Cette option permet une utilisation optimale de l'ordinateur en arrière-plan, et est utile dans le cas d'études paramétriques.

ANALYSE DES RESULTATS :

Le post-processeur **PLAXIS** a des fonctions avancées pour restituer les résultats du calcul, sous forme de graphiques et tableaux. Ceux-ci peuvent être envoyés sur n'importe quel imprimante ou copiés dans le presse-papier de Windows pour être exportés vers un autre logiciel.

Annexes

Déformations : La visualisation des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, de déplacements ou déformations totaux ou incrémentaux. Tous les graphiques de déplacement ou de déformation peuvent être présentés avec flèches, lignes isovaleurs ou domaines isovaleurs.

Contraintes : La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles. Ces contraintes peuvent être figurées en lignes isovaleurs comme en domaines isovaleurs.

Efforts et déplacements dans les éléments de structure : Des graphiques et tableaux fournissent directement les déplacements, efforts normaux, tranchants, circonférentiels et les moments fléchissant de tous les éléments de structure. Les efforts et déplacements peuvent être tracés par phase, ou sous forme d'enveloppe de toutes les phases précédentes.



Coupes : Cette option très commode est offerte par *PLAXIS* pour créer des graphiques des sollicitations ou des déplacements selon des coupes sélectionnées dans le modèle.



Générateur de rapports : Un générateur de rapport a été développé pour permettre l'édition d'un rapport des données saisies et des résultats obtenus pour un modèle. Ce rapport peut être édité dans Word.

Animations : Il est possible de générer des animations vidéo pour toutes les sorties graphiques, notamment les déplacements et efforts dans les éléments de structure.



Courbes : Un outil spécifique permet de représenter les courbes charge-déplacement, les chemins de contraintes, les courbes effort-déformation, ou encore l'évolution de tassements avec le temps.

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
NOTATION ET ABREVIATIONS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	1
<i>CHAPITRE I : CARACTERISATION DE MOUVEMENT SISMIQUE</i>	
Introduction.....	4
I-1 Séisme	4
I-2 Failles et mécanismes de génération.....	5
I-3 Nature et mode de propagation des ondes sismiques	6
I-3-1- Ondes de volume.....	7
I-3-2-Ondes de surface.....	9
I-4 Les risques sismiques	10
I-5 foyer et l'épicentre d'un séisme.....	11
I-5-1-Le foyer.....	12
I-5-2-L'épicentre	12
I-6 Paramètres caractéristiques du mouvement sismique	13
I-7 L'accélérogramme du séisme	17
I-8 Accélération maximale	19
I-9 Durée du séisme.....	19
I-10 Le spectre de réponse.....	20
❖ Utilisation d'un spectre de déplacement	21
❖ Utilisation d'un spectre d'accélération	22
I-11 Les facteurs influants sur le mouvement sismique	24
I-11-1 Facteurs liés à la source.....	24
I-11-2 Facteurs liés au trajet parcouru	24
I-11-3 Facteurs liés aux conditions locales.....	24
Conclusion	25
<i>CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES SOLS</i>	
Introduction.....	27
II- Comportement des sols sous chargement dynamique.....	27
II-1 Comportement élastique du sol.....	27
II-2 Comportement élasto-plastique du sol	27
II-3 Description expérimentale	28
II-4 Définition de la déformation élastique et de la déformation plastique.....	30
II-5 Caractéristiques dynamiques des sols	30
II-5-1 Détermination de τ_{max}	30
II-5-2 Module de cisaillement maximal.....	31
II-5-3 Amortissement hystérétique dans le sol	32
II-6 Lois de comportement.....	34

SOMMAIRE

❖ Le choix de la loi de comportement du sol	34
II-6-1 Loi élastique linéaire	36
II-6-2 Méthode équivalente linéaire	37
II-6-3 Les lois non linéaires	38
Conclusion	38
CHAPITRE III : ETUDE DE LA REPONSE SISMIQUE D'UN PROFIL DE SOL	
Introduction.....	40
III-1 Methodes d'étude de la réponse sismique.....	41
III-1-1 Modélisation et choix de la loi de comportement.....	42
III-1-2 Etude théorique de la réponse sismique	42
a- Sollicitation harmonique.....	42
b- Sollicitation transitoire.....	46
CHAPITRE IV : OUTIL DE CALCUL "le code" PLAXIS"	
IV- Concepts de base	49
IV-1- Calculs par la MEF.....	49
IV-2 PRÉSENTATION DE PLAXIS.....	51
IV-2-1 Description de l'interface graphique (Annex I)	51
IV-2-2 Les modèles de comportement utilisés dans <i>PLAXIS</i>	56
IV-2-2-a Comportement élastoplastique.....	56
IV-2-2-b Modèle élastique linéaire	58
IV-2-2-c Modèle de Mohr-Coulomb.....	59
IV-2-2-d Module dynamique du PLAXIS	62
CHAPITRE V : APPLICATION NUMERIQUE	
Introduction.....	64
V-1 Définition des données	64
V-2-1 Configuration du modèle géométrique retenu	64
a) Hypothèses générales	64
b) Géométrie du modèle	64
V-2-2 Caractéristiques des sols	65
• Propriétés des couches des sols.....	65
V-2-3 Génération du maillage	66
V-2-4 Conditions initiales	66
V-3 Sollicitations sismiques	67
V-4 Procédure de calcul	67
VI-RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATION	71
VI-1-Résultats des calculs	71
1-1-Cas d'un sième vertical imposé à la base (1 ^{er} cas)	71
1-2-Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (1 ^{er} cas).....	77
1-3-Comparaison des calculs.....	83
1-4 Effet des ondes verticales	83
CONCLUSION GENERAL.....	83
BIBLIOGRAPHIE.....	87
ANNEXES Annex I.....	88

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I. 1.Sismicité de la terre(Bruce Bolt 1982).	4
Figure I. 2. principaux type des failles(source: MATE).....	6
Figure I. 3. Représentation schématisée d'un séisme(Magnitude et intensité d'un séisme) (source:MATE).	6
Figure I.3.1. Ondes de volume.....	7
Figure I.3.2. Ondes de surface.....	9
Figure I. 4. Les régions à risques sismiques. Degré d'intensité mesuré d'après les dégâts occasionnés, sur période 1715 à 1998. (D'après carte CNAG, modifiée).....	11
Cliché 1. Torsion de la voie ferrée Alger- Oran.....	11
Cliché 2. Bâtiment basculé a El Asnam	11
Figure I. 5. foyer et l'épicentre d'un séisme (source BRGM)	12
Figure I. 6.1.Relation magnitude (échelle arithmétique)/foyer (échelle logarithmique) (source : Université de Laval)	14
Figure I.6.2. zonage sismique européenne en accélération maximale a_g en (m/s^2).	15
Figure I. 7.Exemple d'accélérogramme (corrigé).	18
Figure I. 8.1. Les différentes phases d'un accélérogramme(San Fernando).....	21
Figure I.8.2. Construction d'un spectre de déplacement	21

CHAPITRE II

Figure II. 1. courbe effort-déformation.	29
Figure II. 2. Les boucles hystérétiques de contrainte-déformation (Hardin et Drnevich, 1972). Un essai cyclique	29
Figure II. 3. procédures pour déterminer les valeurs de G_{max} et G_s dans les essais triaxiaux et de cisaillement d'après Bardet (1997).....	32
Figure II. 4. Définition du module, de l'amortissement et de l'amplitude de déformation.....	34
Figure II. 5. Courbes effort-déformation de sable(Richart,1977).	36
Figure II. 6 . courbes moyennes des modules de cisaillement et des coefficients d'amortissement ..	37

CHAPITRE III

Figure III.1. Potentiel d'influence des conditions locales du site, Schnabel et al (1972).	40
Figure III.2.Courbe moyenne des modules de cisaillement en fonction de la déformation.	47
Figure III.3.Courbe moyenne des coefficients d'amortissement en fonction de la déformation	47

CHAPITRE IV

Figure IV. 1. interface utilisateur pour l'entrée des données.	52
Figure IV. 2. condition aux limites.....	52
Figure IV. 3. exemple de maillage.....	53
Figure IV. 4. Définition des contraintes initiales : condition « k_0 ».....	54
Figure IV. 5. Interface utilisateur pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.	54
Figure IV. 6. Menu « output ».	55
Figure IV. 7. view calculations results.	55
Figure IV. 8. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	57
Figure IV. 9. Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.	57
Figure IV. 10. Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.	57

LISTE DES FIGURES

Figure IV. 11. Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.....	58
Figure IV. 12. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.....	59
Figure IV. 13. Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire..	59
Figure IV. 14 . Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.	60
Figure IV. 15. Définition du module à 50 % de la rupture.....	60
Figure IV. 16. Fenêtre des paramètres avancés du module Mohr-Coulomb.	61
Figure IV. 17. Sollicitation Harmonic.....	62
Figure IV. 18. Sollicitation Sismique.	62

CHAPITRE V

Figure V. 1. profil de sol étudié.	64
Figure V. 2 . Modèle géométrique de profil retenu.	65
Figure V. 3. Maillage du modèle.	66
Figure V. 4. Génération des contraintes initiales.....	66
Figure V. 5. sollicitations sismiques imposées.....	67
Figure V. 6. déclarations des phases (PLAXIS).....	68
Figure V. 7. trace des points dans le profil.....	69
Figure V. 8. Procédure de calcul (PLAXIS).....	70
Figure V. 9. Onde sismique verticale(1 ^{er} cas).....	71
Figure V. 10. maillage Déformé du profil (1 ^{er} cas).	71
Figure V. 11. isovaleurs des Contraintes (1 ^{er} cas).....	72
Figure V. 12. vecteurs déplacements (1 ^{er} cas).	72
Figure V. 13. Déplacements – temps-axe XX, (1 ^{er} cas).....	73
Figure V. 14. Déplacements – temps-axe YY, (1 ^{er} cas).....	73
Figure V. 15. Vitesses – temps-axe XX,(1 ^{er} cas)	74
Figure V. 16. Vitesses – temps-axe YY, (1 ^{er} cas).....	74
Figure V. 17. Accélérations – temps-axe XX,(1 ^{er} cas).....	75
Figure V. 18. Accélérations – temps-axe XX,(1 ^{er} cas).....	75
Figure V. 19. la force - temps (1 ^{er} cas).	76
Figure V. 20. L'onde sismique inclinée (2 ^{ème} cas).	77
Figure V. 21. maillage Déformé du profil.....	77
Figure V. 22. isovaleurs des Contraintes (2 ^{ème} cas).....	78
Figure V. 23. vecteurs déplacements (2 ^{ème} cas).	78
Figure V. 24. Déplacements – temps-axe XX, (2 ^{ème} cas).....	79
Figure V. 25. Déplacements – temps-axe XX, (2 ^{ème} cas).....	79
Figure V. 26. Vitesses – temps-axe XX, (2 ^{ème} cas).....	80
Figure V. 27. Vitesses – temps-axe YY, (2 ^{ème} cas).....	80
Figure V. 28. Accélérations – temps-axe XX, (2 ^{ème} cas).	81
Figure V. 29. Accélérations – temps-axe YY(2 ^{ème} cas).	81
Figure V. 30. la force - temps(2 ^{ème} cas).	82
Figure V. 30. Déplacement horizontal. (1 ^{er} cas).....	84
Figure V. 30. Déplacement vertical (1 ^{er} cas).....	82

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I .1 Echelle macrosismique internationale d'intensité (A rapprocher de l'échelle de Mercalli modifiée)	15
--	----

CHAPITRE II

Tableau II. 1. coefficient d'amortissement critique β max. (Black.1984).....	33
--	----

CHAPITRE V

Tableau V. 1.Propriétés du sol constituant le massif.....	65
Tableau V. 2. les paramètres d'accélérogramme de siésme	69
Tableau V. 3.Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.	70
Tableau V. 4. valeurs maximal aux points considérés(1 ^{er} cas).	76
Tableau V. 5. valeurs maximal aux points considérés(2 ^{ème} cas)	82
Tableau V. 6 .Comparaison entre les deux cas.	83
Tableau V. 7 . Déplacement des points (1 ^{er} cas).....	83