



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

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



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

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : STRUCTURE

THEME

SIMULATION SISMIQUE DANS
LES PROFILES DE SOL EN
CHAMP LIBRE

Dirigé par :
Mr. MENASRI ABDERRAZAK

Présenté par :
TOUMI MESSAOUD

Promotion : 2015/2016.

Dédicaces

*Je dédie se modeste travail à la personne la plus appréciée pour moi et
la plus proche à mon cœur : Ma Mère, Mes frère et mes sœurs et à toute
la famille Messaoud.*

Tous mes amis, mes collègues surtout :

Benbelkheir Mohamed ; Lagoune Mounir ; Tebani Takieddine

et

Boukraa Reguia ; khider Ahlam ; Zemouri Djihad et Serghuine Abir

Tous qui mon bien aider pour réaliser ce travail.

Remerciements

Avant tout, tenons à remercier DIEU le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail.

Je remercie également mon familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que je terminé mon études.

Je remercie vivement :

*Mon encadreur : **Mr. MENASRI ABDERRAZAK***

Docteur à l'université de M'sila.

Je remercie également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce projet.

J'exprime ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Je remercie, ainsi, les membres des jurys pour l'effort qu'ils feront pour examiner ce modeste travail.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTS DES NOTIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Caractérisation Du Mouvement Sismique

I.1 Introduction.....	4
I.2. Séisme	4
I.2.1. Tectonique des plaques	5
I.3. Risque sismique	6
I.3.1. Risque sismique en Algérie	6
I.3.2. Effet et conséquences des séismes	6
I.3.3. Zonage du risque sismique	8
I.3.4. La sismicité du passé	10
I.4. Faille	11
I.5. Nature et mode de propagation des ondes sismiques.....	13
I.5.1. Ondes de volume	13
I.5.2. Ondes de surface	14
I.5.3. L'enregistrement des ondes sismiques	15
I.5.3.1. Les sismographes.....	15
I.5.3.2. Le sismogramme.....	16
I.6. Foyer et épicentre.....	16
I.7. Paramètres caractéristiques du mouvement sismique.....	16
I.7.1. Intensité.....	17
I.7.2. Magnitude	17
I.8. Mouvement du sol.....	18
I.9. Enregistrement du signal sismique	18
I.9.1. L'accélérogramme du séisme	18
I.9.2. Le spectre de réponse.....	20

I.10. L'accélération maximale.....	21
I.11. Durée du séisme.....	22
I.12. Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique.....	22
I.13. Mouvement du sol en champ libre.....	23
I.14. Conclusion.....	24

Chapitre II : Comportement Dynamique Des Sols

II.1. Introduction.....	26
II.2. Comportement des sols sous sollicitation sismique.....	26
II.2.1. Comportement élastique du sol.....	26
II.2.2. Comportement élasto-plastique du sol.....	27
II.3. Description expérimentale.....	29
II.4. Caractéristiques dynamique des sols.....	31
II.4.1. Détermination de τ_{max}	31
II.4.2. Module de cisaillement maximum.....	32
II.4.3. Amortissement hystérétique.....	33
II.5. Lois de comportement.....	34
II.5.1. Loi de comportement élastique linéaire.....	34
II.5.2. Modèle viscoélastique linéaire équivalent.....	35
II.5.3. Lois de comportement non linéaire.....	36
III.5.3.1. Modèle élastique non linéaire de Ramberg-Osgood.....	36
II.6. Réponse sismique d'une couche de sol.....	37

Chapitre III : Outil Numérique De Calcul « le code Plaxis »

III.1. Introduction.....	40
III.2. Description de l'interface graphique.....	40
III.3. Modèles de comportement implémenté dans PLAXIS.....	45
III.3.1. Modèle élastique linéaire.....	45
III.3.2. Comportement élastoplastique.....	49
III.4. Module dynamique du code PLAXIS.....	51

Chapitre IV : Mise En œuvre Des Calculs

IV.1. Introduction.....	54
IV.2. Définition des données.....	54
IV.2.1. Configuration du modèle géométrique retenu.....	54
IV.2.2. Caractéristiques des sols.....	55
IV.2.3. Génération du maillage.....	56
IV.2.4 Conditions initiales.....	56

IV.3. Sollicitations sismiques.....	57
IV.4. Procédure de calcul	58
IV.5. Résultats des calculs.....	61
IV.5.1. Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base (1 ^{er} cas).....	61
IV.5.2. Cas d'un déplacement vertical imposé à la base (2 ^{ème} cas)	67
IV.5.3. Cas d'un déplacement incliné imposé à la base (3 ^{ème} cas	73
IV.6. Interprétation des résultats des calculs.....	80
IV.6.1. Comparaison des calculs.....	80
IV.6. 2. Effet des ondes horizontal.....	81
IV.6.3. Effet des ondes verticales.....	82
IV.6.4. Synthèse	84
Conclusion Générale	85
Bibliographie	86
Annexes	88

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

1.1. Coefficient d'accélération (RPA-version 2003)	8
1.2. Classification des sites (RPA/version 2003)	10

Chapitre I

2.1. Coefficient d'amortissement critique β_{\max} (Black.1984)	33
-----------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre IV

4.1. Propriétés du sol constituant le massif	55
4.2. Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.....	60
4.3. Valeurs maximal aux points considérés (1 ^{er} cas)	66
4.4. Valeurs maximal aux points considérés (2 ^{ème} cas)	72
4.5. Valeurs maximal aux points considérés (3 ^{ème} cas)	79
4.6. Comparaison entre les trois cas	80
4.7. Déplacement des points (1 ^{ere} cas)	81
4.8. Déplacement des points (2 ^{ème} cas)	82

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

1.1. Localisation des épacentres de séismes recensés en 1973 (source : UNESCO)	5
1.2. Contour des plaques (Le Pichon et al, 1973)	5
1.3. Tassements (Mexico 1985)	7
1.4. Zone sismique du territoire national	9
1.5. Le séismes majeurs en ALGERIE	11
1.6. Failles Normales.....	12
1.7. Failles inverses	12
1.8. Failles décrochantes	13
1.9. Les ondes sismiques P et S.....	14
1.10. Les ondes sismiques Love (L) et Rayleigh(R)	15
1.11. Fonctionnement d'un sismographe.....	15
1.12. Caractéristiques du mouvement sismique	16
1.13. Exemple Lambesc 1909 Intensité XI	17
1.14. Exemple d'accélérogramme (en cm/s^2).....	19
1.15. Accélérogramme du séisme de Mexico.....	20
1.16. Allures des spectres d'accélération moyenne pour différents sols	21
1.17. Les différentes phases d'un accélérogramme.....	21
1.18. Accélération en champ libre	23
1.19. Comparaison dos spectres du champ libre et au sein du bâtiment d'après Crouse (1978)	23

Chapitre II

2.1. Comportement élastoplastique avec écrouissage	28
2.2. Courbe effort déformation Chargement quasi statique monotone.....	30
2.3. Courbe effort – déformation	31
2.4. Chargement cyclique quelconque.....	31
2.5. Variations de β et G en fonction de la distorsion. (Pecker, 1984)	31
2.6. Modèle viscoélastique linéaire (Modèle de KELVIN – VOIGT)	36
2.7. Exemple numérique du modèle de R-O	37

Chapitre III

3.1. Interface utilisateur pour l'entrée des données.....	41
3.2. Condition aux limites	41

3.3. Exemple de maillage	42
3.4. Définition des contraintes initiales : condition « k_0 »	43
3.5. Interface utilisateur pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs	43
3.6. Menu « output »	44
3.7. View calculations results	44
3.8. Fenêtre au modèle Mohr-Coulomb	46
3.9. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire	47
3.10. Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.....	47
3.11. Définition du module à 50 % de la rupture	48
3.12. Résultats d'essais triaxiaux CD sur un sable dense.....	49
3.13. Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique	50
3.14. Représentation du comportement élastique parfaitement plastique	50
3.15. Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage	50
3.16. Sollicitation harmonique	51
3.17. Sollicitation sismique	51
3.18. Accélérogramme de l'U.S (géological seurvey)	52

Chapitre IV

4.1. Modèle géométrique de profil retenu	55
4.2. Maillage du modèle	56
4.3. Génération des contraintes initiales.....	56
4.4. Sollicitations sismiques imposées	57
4.5. Déclarations des phases (Plaxis)	57
4.6. Position des points choisis sur le profil.....	58
4.7. Procédure de calcul (Plaxis)	58
4.8. Maillage Déformé du profil (1 ^{ère} cas)	59
4.9. Isovaleurs des Contraintes (1 ^{ère} cas)	60
4.10. Vecteurs déplacements (1 ^{ère} cas)	61
4.11. Déplacements des points en fonction de temps, (1 ^{er} cas)	61
4.12. Déplacements des points en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	62
4.13. Vitesses des points en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	63
4.14. Vitesses des points en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	63
4.15. Accélérations des points en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	64
4.16. Accélérations des points en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	64
4.17. La force en fonction de temps, (1 ^{ère} cas)	65

4.18. Maillage Déformé du profil (2 ^{ème} cas)	67
4.19. Isovaleurs des Contraintes (2 ^{ème} cas)	67
4.20. Vecteurs déplacements (2 ^{ème} cas)	68
4.21. Déplacements – temps-axe xx, (2 ^{ème} cas)	69
4.22. Déplacements – temps-axe yy, (2 ^{ème} cas)	69
4.23. Vitesses – temps-axe xx (2 ^{ème} cas)	70
4.24. Vitesses – temps-axe yy (2 ^{ème} cas)	70
4.25. Accélérations – temps-axe xx (2 ^{ème} cas)	71
4.26. Accélérations – temps-axe yy (2 ^{ème} cas)	71
4.27. La force - temps (2 ^{ème} cas)	72
4.28. Maillage Déformé du profil (3 ^{ème} cas)	73
4.29. Isovaleurs des Contraintes (3 ^{ème} cas)	73
4.30. Vecteurs déplacements (3 ^{ème} cas)	74
4.31. Déplacements – temps-axe xx, (3 ^{ème} cas)	75
4.32. Déplacements – temps-axe yy (3 ^{ème} cas)	75
4.33. Vitesses – temps-axe xx (3 ^{ème} cas)	76
4.34. Vitesses – temps-axe yy (3 ^{ème} cas)	76
4.35. Accélérations – temps-axe xx (3 ^{ème} cas)	77
4.36. Accélérations – temps-axe yy (3 ^{ème} cas)	77
4.37. La force - temps (3 ^{ème} cas)	78
4.38. La force - temps (3 ^{ème} cas)	78
4.39. Déplacement horizontal.....	81
4.40. Déplacement vertical.....	82
4.41. Déplacement horizontal.....	83
4.42. Déplacement vertical.....	83

NOTATION ET ABBREVIATIONS

Lettres Grecques :

- ν : Le coefficient de poisson.
- φ : Angle de frottement effectif.
- ψ : Angle de dilatance.
- E : Le module de Yong.
- F : Force due au renforcement.
- R : Force de réaction.
- θ : Angle du plan de rupture.
- σ : Contrainte.
- τ : Contrainte de cisaillement (tangentielle).
- C : Cohésion (effective).

Lettres Latines :

- τ_c : Respectivement la contrainte.
- γ_c : La déformation de cisaillement.
- G : Le module de cisaillement.
- G' : Le module de cisaillement effectif.
- k : Le module de compressibilité volumique.
- γ_{dry} : Poids volumique sec.
- γ_{wet} : Poids volumique humide.
- R_{inter} : Facteur de rigidité de l'interface.
- K_0 : Coefficient des terres au repos.
- K_x : Perméabilité horizontale.
- K_y : Perméabilité verticale.
- L : Longueur.
- OCR : Over-Consolidation (degré de surconsolidation).
- p : Pression.
- U : Déplacement.
- V_p : vitesse des ondes P.
- V_s : vitesse des ondes S.
- M : Magnitude.

Abréviations :

- MEF : Méthode des éléments finis.
- ISS : Interaction sol-structure.

INTRODUCTION GENERALE

Les séismes sont sans doute parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices dans les zones urbanisées. Ils entraînent la destruction des villes entières et la mort de milliers d'hommes, ainsi que d'immenses pertes économiques.

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

L'énergie libérée par les séismes est transportée du foyer à la surface par des ondes sismiques et le mouvement induit en surface est alors gouverné non seulement par la source mais aussi par le trajet parcouru par ces ondes. Ainsi, les conditions géotechniques et topographiques locales d'un site peuvent modifier le mouvement de celui-ci. Cette modification correspond souvent à une amplification importante et à une prolongation notable de la durée du séisme. Cela signifie que les effets de site sont souvent défavorables et peuvent accroître considérablement l'impact d'un séisme.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objet d'analyser le mouvement sismique dans un champ libre, à partir de l'analyse d'un profil de sol homogène soumis à un chargement sismique de différentes directions, et d'étudier la déformation des différents points distribués dans le profil.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres :

- ❖ **le premier chapitre** traite de la caractérisation du mouvement sismique. Il décrit le mécanisme générateur des séismes et de leur classification, définit les ondes sismiques et les paramètres caractéristiques du mouvement sismique, ainsi que le risque sismique.
- ❖ **le deuxième chapitre** traite du comportement dynamique des sols. Il décrit les lois de comportement type, des méthodes expérimentales utilisées, de la formulation mathématique de ces lois, ainsi que de la réponse sismique d'une couche de sol.
- ❖ **le troisième chapitre** décrit sommairement l'outil numérique de calcul utilisé ; le code Plaxis. Il décrit l'interface utilisatrice de ce logiciel, le modèle de comportement qui y sont implémentés, ainsi que le module dynamique dédié aux calculs des ouvrages sous sollicitations cycliques.

❖ le quatrième chapitre

Première partie: décrit les mises en œuvre des calculs effectués, il décrit la configuration géométrique du modèle de calcul retenue, les sollicitations sismiques considérées et la procédure de calcul suivie.

Deuxième partie: présente et analyse les principaux résultats des calculs obtenus, Il présente pour chaque mouvement (horizontal, vertical et incliné) considéré comme le maillage déformé, les isovaleurs des contraintes générées dans le massif et les vecteurs déplacements correspondants.

L'interprétation de ces résultats porte essentiellement, sur l'évolution de la réponse sismique, le plan horizontal (effet de la distance) et sur le plan vertical (effet de la profondeur).

Chapitre I

Caractérisation du mouvement sismique

I.1 Introduction

La sismologie est la science des tremblements de terre qui consiste à détecter et à analyser les vibrations naturelles du sol et par extension, les signaux sismiques générés artificiellement. Elle a contribué de manière vitale à la prévision des tremblements de terre, et à la compréhension de la tectonique des plaques. Les tremblements de terre font partie des cataclysmes naturels qui ont toujours exercé une grande fascination sur l'humanité.

Notre connaissance actuelle des phénomènes est telle que s'il n'est pas possible de prédire l'instant où un séisme se produira en un lieu donné, il est possible d'identifier les zones à haut risque sismique, et d'y construire en conséquence. Pour cela, il faut comprendre le mécanisme par un certain nombre de grandeurs directement utilisables par l'ingénieur.

I.2. SEISME

Un séisme provient du cisaillement brutal d'une faille en profondeur. Ce déplacement est provoqué par la libération d'une grande accumulation d'énergie, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint. Il se traduit en surface par des mouvements brusques du sol qui peuvent présenter des amplitudes de plusieurs décimètres, de fortes accélérations et des durées variant de quelques secondes à quelques minutes.

On peut distinguer trois sortes de phénomènes communément appelés tremblements de terre ou séismes :

- **le tremblement d'origine tectonique** caractérisé par les coulissements horizontaux les uns par rapport aux autres des plaques le long des failles,
- **le tremblement d'origine volcanique** dû aux mouvements des magmas dans les chambres magmatiques des volcans,
- **les secousses d'origine humaine** par remplissage de retenues de barrages, injection ou exploitation de fluides dans le sous-sol, explosions dans les carrières...

Les séismes tectoniques sont les plus nombreux et les plus destructifs, ils font l'objet de notre étude.

I.2.1. Tectonique des plaques

L'observation de la carte du monde donnant la localisation des séismes ressentis (figure 1.1), montre que ceux-ci sont, en majeure partie, concentrés le long des lignes relativement bien définies. D'une année à l'autre, les épicentres des séismes restent localisés le long des mêmes lignes, indiquant que ceux-ci ne sont pas distribués à la surface de la terre, mais ils sont liés à la structure du globe. Il est actuellement admis que la tectonique des plaques permet de rendre compte correctement de ce phénomène.

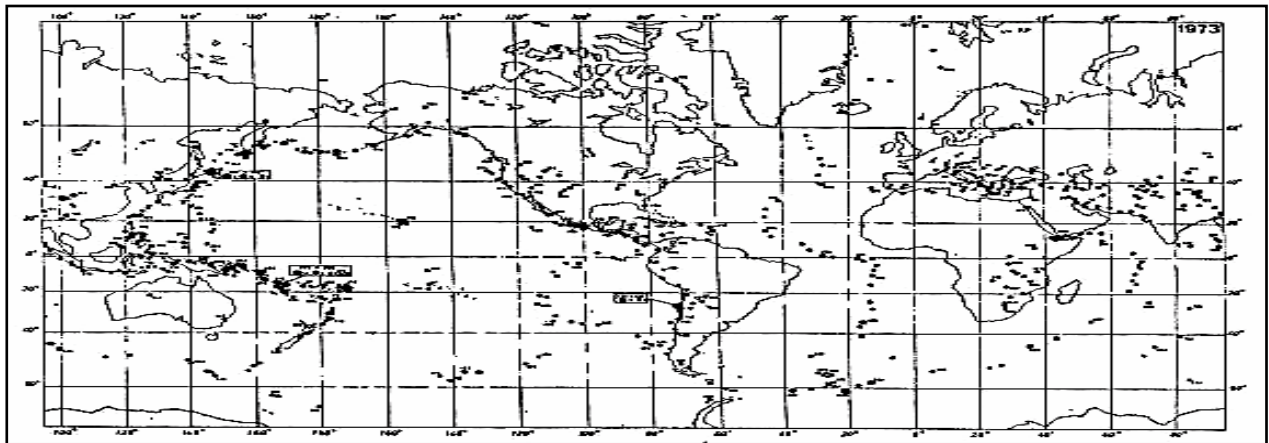


Figure (1-1): Localisation des épicentres de séismes recensés en 1973 (source : UNESCO).

La lithosphère est constituée d'une mosaïque de six grandes plaques rigides : les plaques Eurasie, Amérique, Pacifique, Nasca et Antarctique (figure 1.2). Entre ces plaques, il existe un certain nombre de plaques de dimensions plus réduites telles que la plaque Coco (entre l'Amérique centrale et les Iles Galápagos), la plaque des Caraïbes, la plaque Inde Australie...etc. La lithosphère, épaisse d'environ 70km, repose sur une couche visqueuse, l'asthénosphère. La lithosphère est rigide alors que l'asthénosphère est visqueuse en condition de température et de pression auxquelles elle est soumise par sa situation profonde.

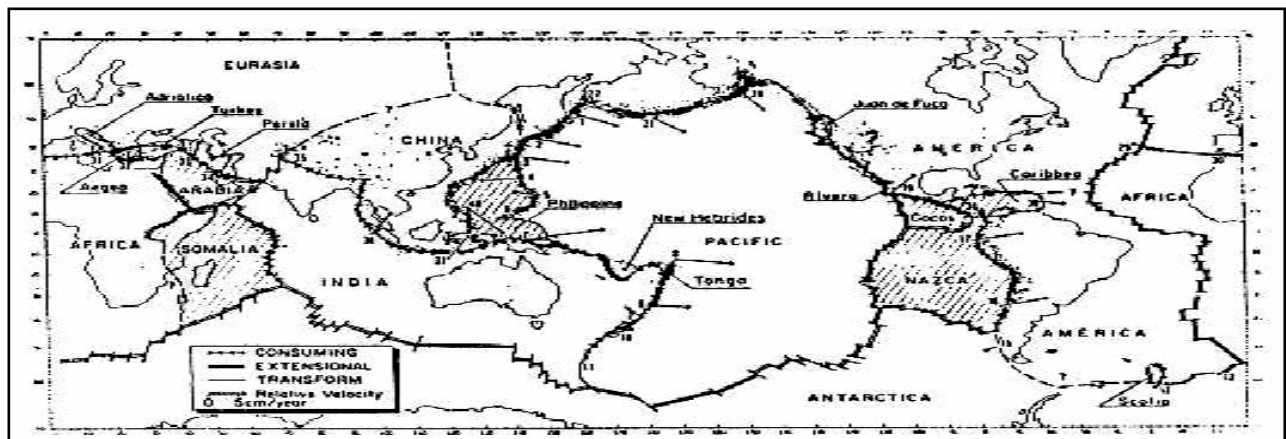


Figure (1-2): Contour des plaques (Le Pichon et al, 1973).

Les séismes, dans leur quasi-totalité, sont dus aux mouvements de ces plaques rigides à la surface de l'asthénosphère sous l'influence des courants de convection. Il existe donc des zones de divergence (dorsale ou rift), des zones de convergence (l'une des plaques disparaît sous l'autre dans une zone de subduction) qui sont à l'origine d'un grand nombre de séismes, et des zones de coulissement le long des failles.

I.3. Risque sismique

I.3.1. Risque sismique en Algérie

La partie nord de l'Algérie est située le long de la frontière de convergence des plaques africaine et eurasienne. Elle représente l'une des régions sismiques les plus actives de l'ouest de la méditerranée.

Plus de 800 événements sismiques de magnitude supérieure ou égale à 4, ont permis de dresser une carte de sismicité pour le nord de l'Algérie et les régions limitrophes pour la période 1790-2000. Cette carte fait ressortir le caractère hautement sismique des chaînes littorales de l'Algérie, et est assortie d'une représentation des solutions focales de vingt séismes les plus significatifs, associés à la période 1954-2000.

Parmi les séismes les plus destructeurs, nous pouvons citer celui d'Alger en 1716 d'intensité épiscopentrale I_0 de 10, celui d'Oran en 1790 avec $I_0 = 11$, celui de Mascara en 1889 avec $I_0 = 9$, et plus récent, en 1980 El-Asnam ($M_s = 6.0$), Tipaza en 1989 ($M_s = 6.0$), Mascara en 1994 ($M_s = 6.0$), Alger en 1996 ($M_s = 5.7$), Ain Timouchent en 1999 ($M_s = 5.9$), et le plus récent en 2003 de Boumerdes. Tous ces événements sont localisés sur l'Atlas Tellien.

L'analyse tectonique des bassins sismogènes des secteurs d'Alger, de l'Oranie et du Constantinois a permis de retrouver une histoire géodynamique caractérisée par trois événements néogènes importants, ayant conditionné l'activité sismique du nord de l'Algérie.

I.3.2. Effet et conséquences des séismes

Les tremblements de terre font peser des graves menaces sur la population vivant dans des régions sismiques. Ils peuvent semer la mort en détruisant des habitations, des édifices publics, des ponts, des barrages ou en déclenchant de catastrophiques glissements de terrains. Les mouvements sismiques excitent les ouvrages par déplacement de leurs appuis et sont plus ou moins amplifiés dans la structure. Les séismes engendrent également assez souvent, des effets spectaculaires et particulièrement dangereux :

❖ *Tassements (Mexico 1985) ;*

Des sables secs soumis à vibration peuvent subir des tassements importants, qui peuvent être estimés par des mesures des vides du sable. Ces tassements peuvent atteindre quelques dizaines de cm.

Différentiels ou non, ils peuvent être suffisants pour rendre une construction inutilisable.

❖ *Liquéfaction des sols :*

Les sols meubles, en particulier les sols remblayés, sont menacés par la liquéfaction, autre danger sismique. En effet, lorsqu'ils sont soumis aux ondes de choc d'un tremblement de terre, ils peuvent perdre toute cohérence et se comporter comme des sables mouvants. Des immeubles reposant sur ce type de matériaux ont été littéralement avalés, lors du tremblement de San Francisco en 1906, et le cas du séisme de Chlef en 1980.

❖ *Les raz de marée ou tsunami :*

En cas de secousses sous-marines, les rivages peuvent être affectés par un autre risque : la formation de raz-de-marée ; ceux-ci sont provoqués par l'onde de choc qui se propage à la surface des eaux marines. De véritables murs d'eau sont projetés le long des côtes avec une telle violence que des villes entières peuvent être détruites comme ce fut le cas en 1896, à Sanriku, ville de 20 000 habitants, au Japon ainsi qu'en 1960 avec une vitesse de 750 Km/h, Nicaragua 1992, et le tsunami de Sumatra 2005.

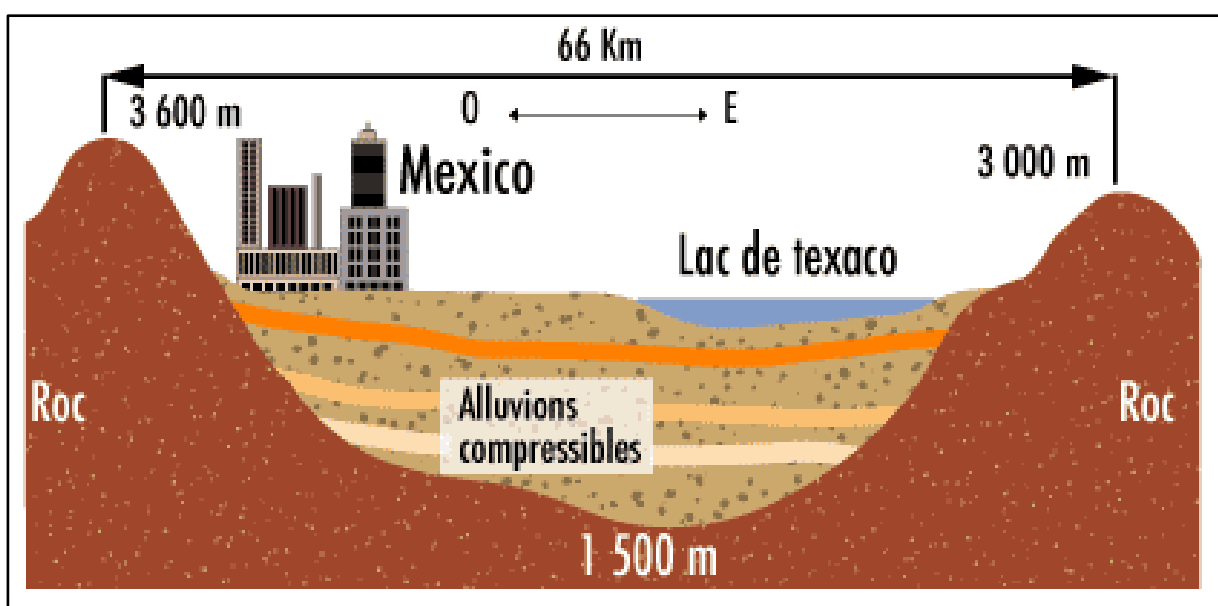


Figure (1-3): Tassements (Mexico 1985).

I.3.3. Zonage du risque sismique

Le zonage du risque sismique. C'est-à-dire la division du territoire en «Zones de sismicité» à l'intérieur desquelles l'aléa sismique peut être considéré comme uniforme. Constitue une base essentielle pour la définition de règles régissant les constructions résistantes aux séismes ; l'aléa sismique étant défini en site donné par la probabilité qu'au cours d'une période de référence (par exemple : probabilité annuelle), une secousse sismique atterrigue ou intensité.

Critères de classification selon le « RPA99 »

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

Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante et dont la figure ci-dessous représente la carte des zones sismiques de l'Algérie et le zonage global des différentes wilayas. L'annexe I du « RPA 99, version 2003 » donne la classification sismique par wilaya et par commune lorsque la wilaya est partagée entre deux zones sismiques différentes ou plus.

- ✚ Zone0: Sismicité négligeable.
- ✚ Zone1: Sismicité faible.
- ✚ Zone2 :«a» et «b»: Sismicité moyenne.
- ✚ Zone3: Sismicité élevée.

		Anciennes valeurs			Nouvelles valeurs				
		ZONE			ZONE				
Grp e		I	II	III	Grpe	I	II a	II b	III
1A		0.12	0.25	0.35	1A	0.15	0.25	0.30	0.40
1B		0.10	0.20	0.30	1B	0.12	0.20	0.25	0.30
2		0.08	0.15	0.25	2	0.10	0.15	0.20	0.25
3		0.05	0.10	0.15	3	0.07	0.10	0.14	0.18

Tableau (1-1): Coefficient d'accélération (RPA-version 2003).

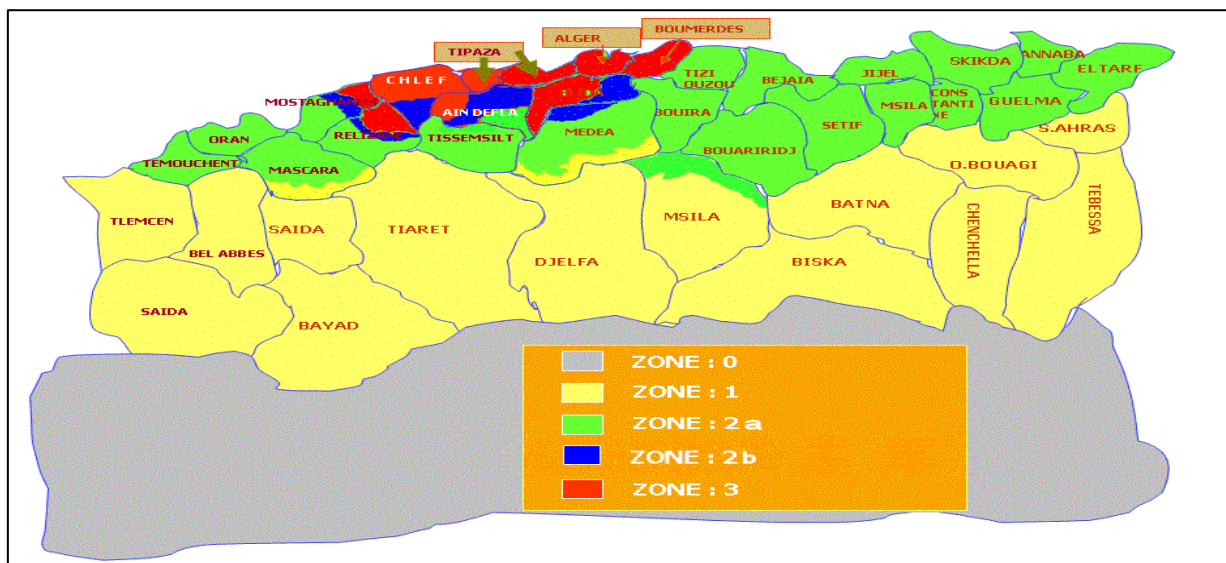


Figure (1-4): Zone sismique du territoire national.

Classification des ouvrages selon leur importance

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa destination et de son importance vis à vis des objectifs de protection fixés par la collectivité, le « RPA 99 Version 2003 » préconise 4 groupes :

Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale : Sécurité-Hôpitaux.

Groupe 1B : Ouvrages de grande importance : Scolaire et Culte.

Groupe 2 : Ouvrages courants : Habitation-Bureaux.

Groupe 3 : Ouvrages de faible importance : Hangars.

Classification des sites

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent.

Catégorie S1 (site rocheux) : Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement (VS) à 800m/s.

Catégorie S2 (site ferme) : Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur consolidée sur 10 m à 20 m d'épaisseur avec VS 400 m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S3 (site meuble) : Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec VS 200 m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S4 (site très meuble) :

Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec VS < 200 m/s dans les 20 premiers mètres.

Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_S < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres.

Site	Type de sol	q_c (MPa)	N	P_L (MPa)	E_p (MPa)	q_u (MPa)	V_s (m/s)
S ₁	Rocheux(a)	-	-	>5	>100-	>10	ε800
S ₂	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	ε400- < 800
S ₃	Meuble	1.5 ~ 15	10 ~ 50	1 ~ 2	5 ~ 20	01 ~ 0.4	ε200- < 400
S ₄	Très Meube	<1.5	<10	<1	<5	< 0.1	ε100 <200

Tableau (1-2): Classification des sites (RPA/version 2003).

Avec

- ✓ q_c : résistance de pointe pénitrométrique.
- ✓ P_L : pression limite pressiométrique.
- ✓ E_p : module pressiométrique.
- ✓ q_u : contrainte ultime.
- ✓ V_s : vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

I.3.4. La sismicité du passé

La connaissance de la sismicité historique permet de répéter et d'évaluer les zones et les régions à risque et l'effet des mouvements du sol sur les personnes et les biens (figure1.5).

Cependant, ceci doit être affiné par l'étude des failles actives. En effet, à partir de ces données historiques, on peut déterminer la fréquence, la période des événements sismiques.

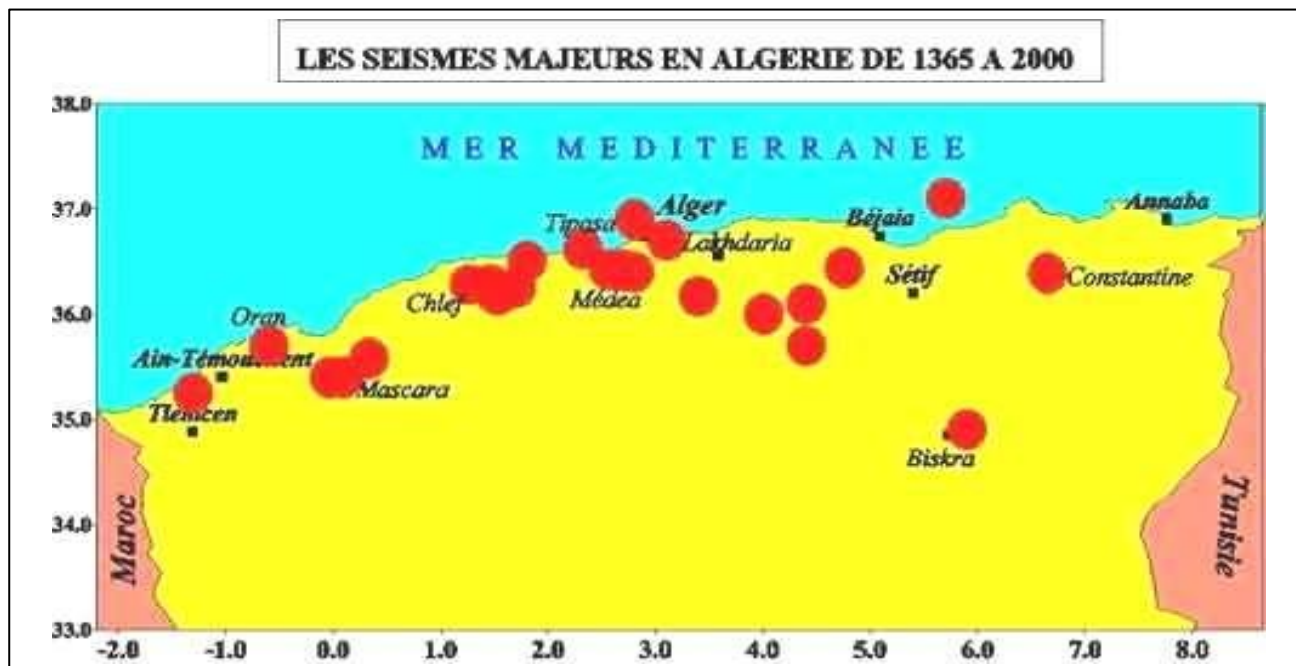


Figure (1-5): Les séismes majeurs en ALGERIE.

I.4. Faille

Une faille est une cassure de la roche ayant entraîné un déplacement relatif des deux blocs situés de part et d'autre de la cassure. La longueur d'une faille peut varier de quelques mètres à plusieurs centaines de km et l'ampleur du déplacement relatif des deux blocs ; le rejet, peut lui aussi être très variable.

Ou bien est une déformation consistant en un plan ou une zone de rupture le long du quel deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre.

Glissement d'un ou de plusieurs étages de roches résultant de la tectonique ayant pour effet de séparer les couches géologiques dans le sens vertical ou horizontal avec des amplitudes variables. Cette rupture et ce glissement peuvent s'accompagner de mouvements sismiques d'amplitudes variables.

Il existe trois grands types de faille que le géologue est susceptible de rencontrer sur le terrain. Ce sont les failles normales, inverses et décrochantes. Les deux premiers types sont des plans inclinés sur lesquels le glissement est à l'origine de la formation de reliefs. Le troisième type de faille correspond à un plan vertical sur lequel se produit un glissement horizontal.

Failles normales:

Aussi failles de *distension*, le *plan de faille* est incliné dans le sens du compartiment affaissé. Elles découpent souvent des gradins.

La composante horizontale du glissement correspond à un écartement (figure 1.6) qui s'accompagne de l'affaissement d'un des blocs par rapport à l'autre.

Ces failles se rencontrent dans les régions étirées et amincies comme les dorsales médio-océaniques et les rifts continentaux.

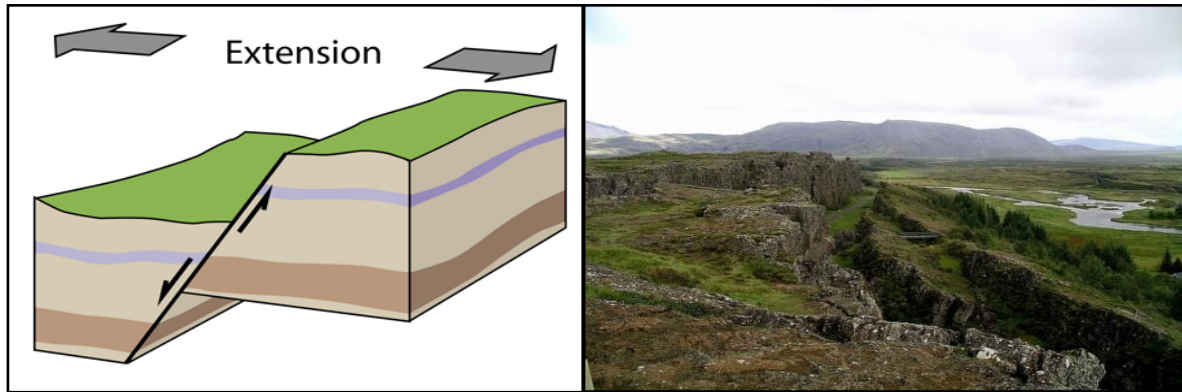


Figure (1-6): Failles Normales.

Failles inverses :

Ou failles de *compression*. Le plan de faille est incliné dans le sens du compartiment soulevé.

La composante horizontale du glissement correspond cette fois à un rapprochement (figure 1.7) qui s'accompagne du chevauchement d'un des blocs sur l'autre.

Ces failles se rencontrent dans les régions raccourcies et épaissies comme au front des chaînes de montagne.

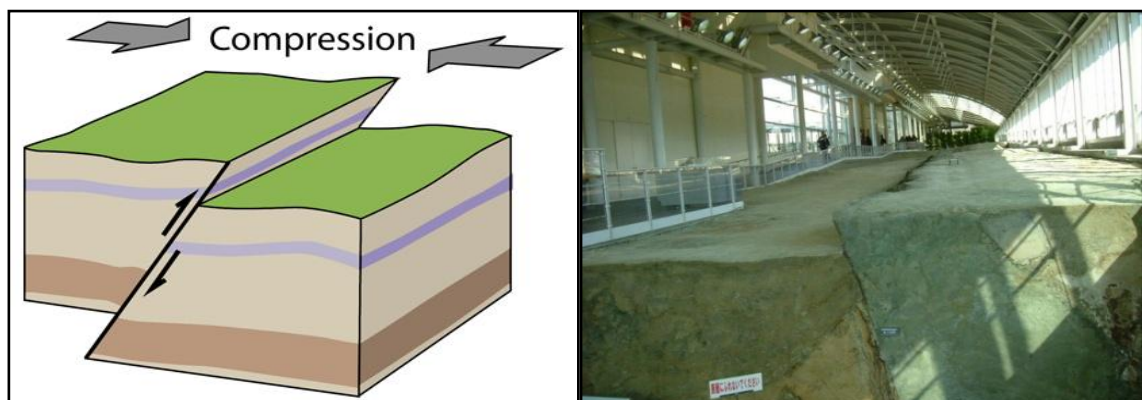


Figure (1-7): Failles inverses.

Failles décrochantes :

Ce sont des failles à déplacement horizontal (m à km) provoquant le coulissement des deux compartiments le long du plan de faille. (figure 1.8)

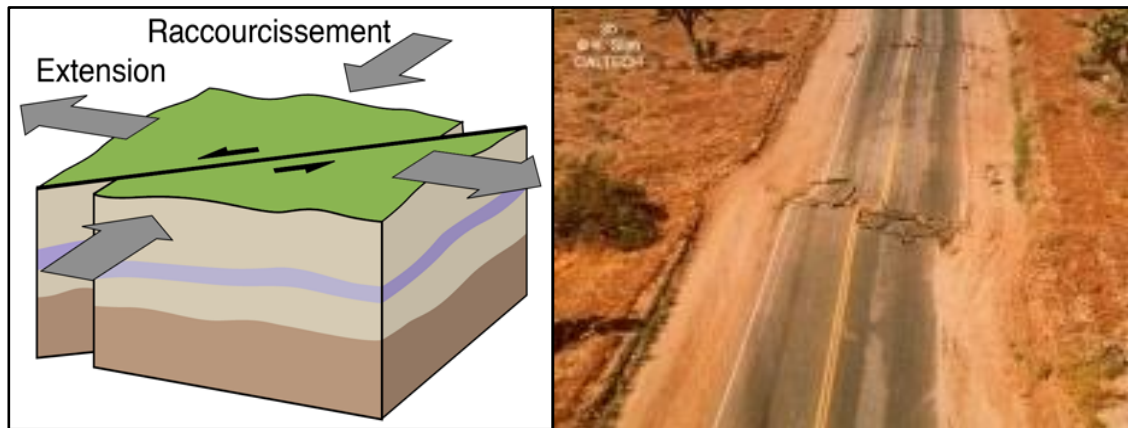


Figure (1-8): Failles décrochantes.

I.5. Nature et mode de propagation des ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques dégagés lors d'un séisme et pouvant traverser un milieu sans le modifier durablement. L'impulsion créée lors du séisme va pousser des particules élémentaires qui vont pousser d'autres particules et reprendre leur place. Les vibrations (ondes sismiques) engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions.

On peut distinguer deux principaux types d'ondes sismiques :

I.5.1. Ondes de volume :

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense.

Elles prennent naissance dans le foyer et se propagent à l'intérieure de la terre sous deux forme :

- **Ondes primaires ou ondes longitudinales (P)**

Ce type d'ondes fait osciller les ouvrages d'avant en arrière dans la même direction que leur propagation, elles induisent donc, un mouvement vertical dans les ouvrages. Ce mouvement sera d'autant plus important que l'ouvrage se trouve à proximité de l'épicentre ; Elles se propagent dans la croûte terrestre avec une vitesse de 6 à 8 km/s et s'accompagnent d'un changement de volume (compression et dilatation alternées).

- **Ondes secondaires ou ondes de cisaillements (S)**

Elles se propagent dans la croûte terrestre, à une vitesse d'environ 3 à 5 km/s et s'accompagnent d'une distorsion dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation,

provoquant un cisaillement sans changement de volume. C'est bien ce type d'ondes qui produit un mouvement horizontal dans les ouvrages.

Les vitesses des ondes sont données par les formules suivantes:

- Pour les ondes P (m/s):
$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \dots (1.1)$$

- Pour les ondes S (m/s):
$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \dots (1.2)$$

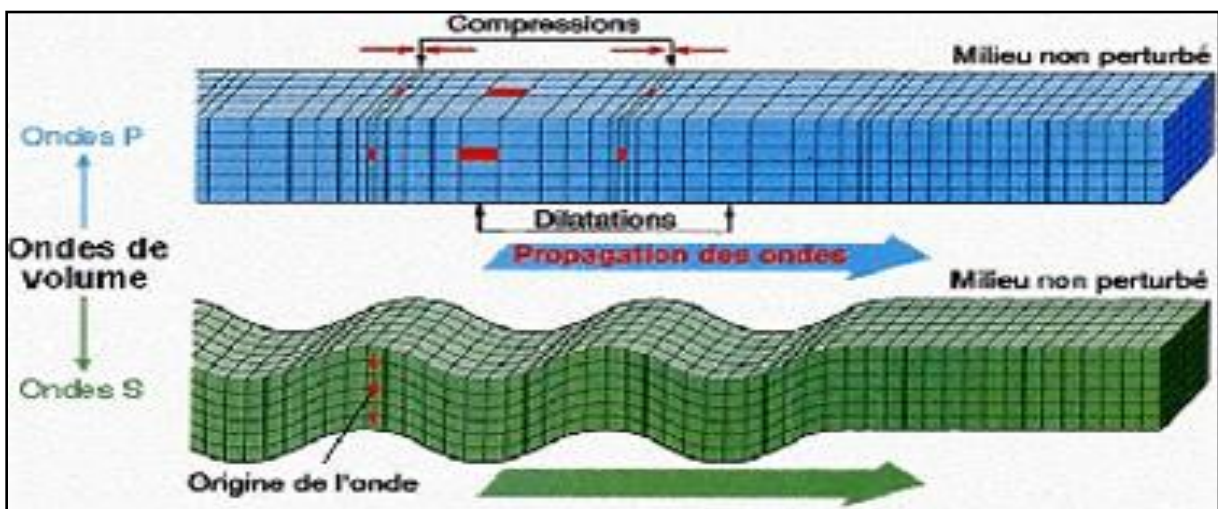


Figure (1-9): Les ondes sismique P et S.

I.5.2. Ondes de surface

Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre donnant naissance à des ondes de surface de deux types:

- **Ondes de Rayleigh(R)**

Ce sont des ondes pour lesquelles les points du sol décrivent des ellipses dans le plan vertical et dans le sens rétrograde. Ce mouvement entraîne des compressions ou des tractions, ainsi que des cisaillements dans le sol.

- **Ondes de Love (L)**

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

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

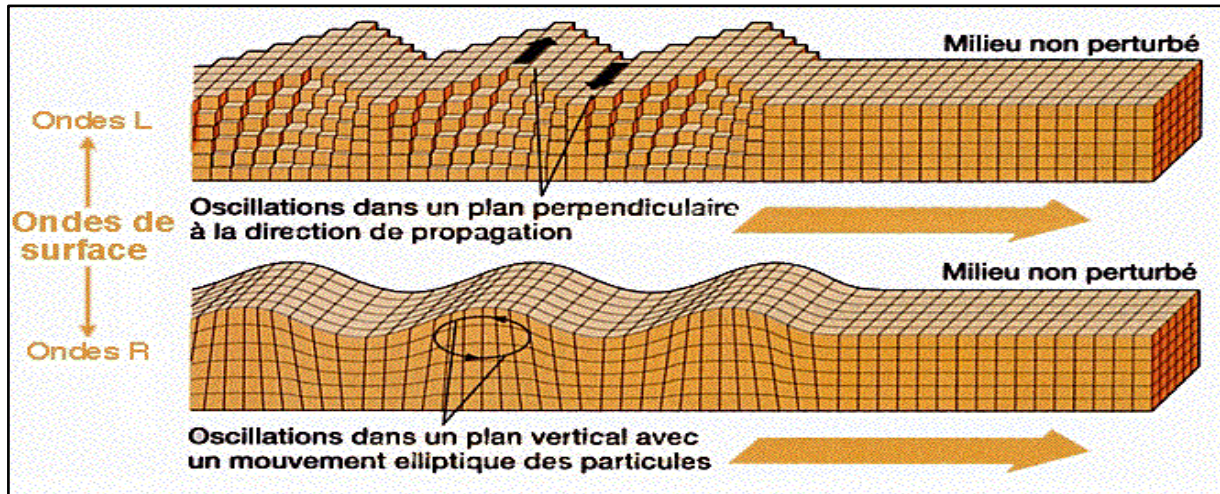


Figure (1-10) : Les ondes sismique Love(L) et Rayleigh(R).

I.5.3. L'enregistrement des ondes sismiques

I.5.3.1. Les sismographes

Les sismographes sont des appareils très sensibles. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est très simplifié par rapport au mouvement réel du sol. Pour connaître le mouvement sismique il faut enregistrer ses deux composantes horizontales et sa composante verticale. Pour cela on utilise des sismographes à inertie dits « horizontaux » et des sismographes à inertie dits « verticaux » (figure 1.11).

Le sismographe horizontal est construit de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement du sol que dans une seule direction horizontale. Le sismographe vertical est conçu de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement que dans la direction vertical. Dans des stations d'observation sismographiques il faut, au minimum, trois sismographes : 2 horizontaux et 1 vertical.

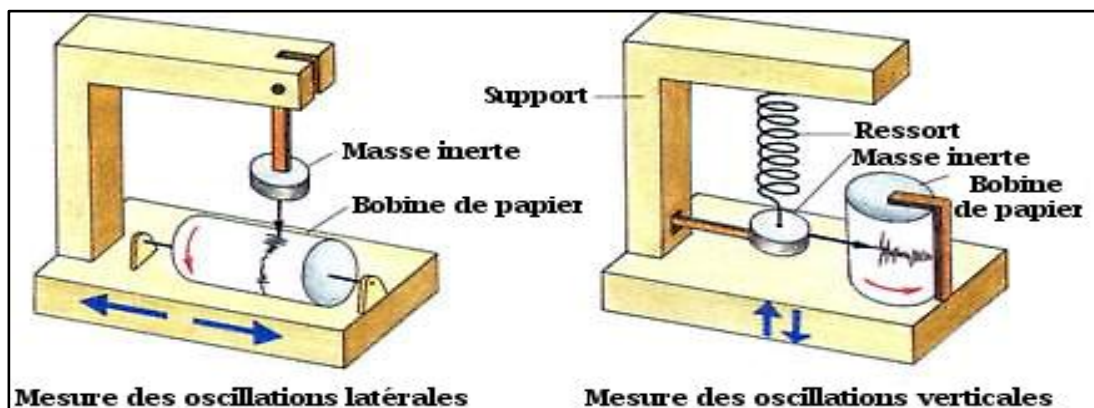


Figure (1-11): Fonctionnement d'un sismographe.

I.5.3.2 Le sismogramme

Un sismogramme est l'enregistrement obtenu à partir des sismographes. C'est une courbe qui varie en fonction de l'énergie libérée au foyer sous la forme d'ondes sismiques, de la distance foyer station sismographique, de la nature et la structure du milieu traversé par les ondes et enfin, du type de sismographe utilisé.

Le fait que les ondes sismiques arrivent aux stations d'enregistrement comprend non seulement les ondes qui ont suivi le chemin le plus direct entre le foyer et la station mais aussi des ondes qui n'y sont parvenues qu'après une série de réflexions et/ ou réfractions.

I.6. Foyer et épicentre

Les ondes sismiques semblent provenir d'une région déterminée appelée foyer ou hypocentre du séisme. Le point de la surface du sol situé à la verticale du foyer est son épicentre. La distance entre ce point et l'endroit d'enregistrement de l'accélérogramme est appelée distance épacentrale (figure 1.12).

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

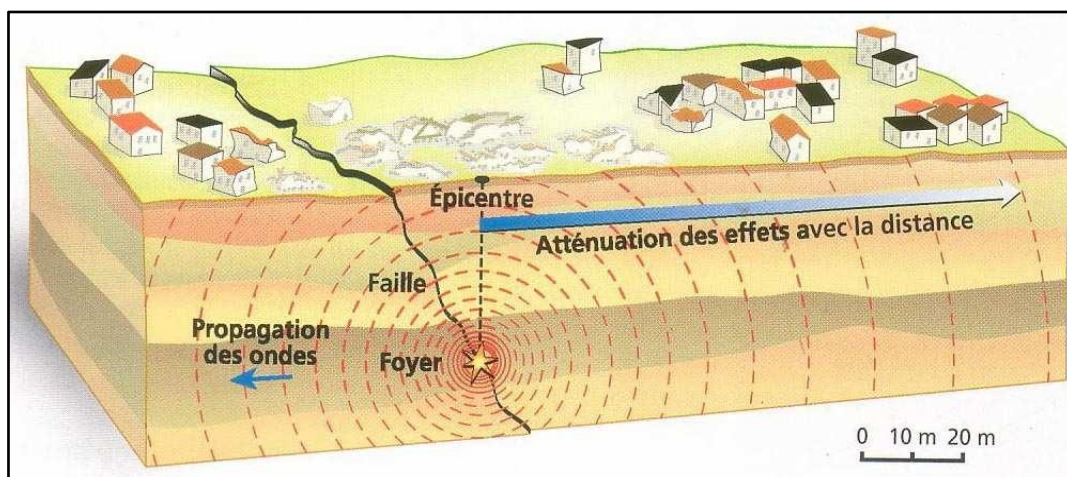


Figure (1-12): Caractéristiques du mouvement sismique.

I.7. Paramètres caractéristiques du mouvement sismique

La question qui se pose est de savoir comment comparer les sévérités respectives des divers tremblements de terre. Vers la fin du *XIX* siècle, les sismologues ont cherché à décrire les séismes en définissant des caractéristiques physiques chiffrables applicables à tous les tremblements de terres : l'intensité et la magnitude sismique.

I.7.1. Intensité

L'intensité est déterminée suivant les réactions humaines et les conséquences dommageables ou non sur les constructions et sur l'environnement en un endroit donné. Elle est donc variable d'un lieu à l'autre, maximale dans les régions de l'épicentre, elle décroît régulièrement sauf singularité, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point. Une décroissance rapide sera l'indice d'un foyer proche de la surface. Elle est évaluée en comparant les effets constatés avec ceux décrits dans les échelles macrosismiques.

Une échelle d'intensité (I à XII) de *Mercalli* a été adaptée internationalement sous le nom d'échelle macrosismique internationale d'intensité. En 1964, une échelle a été proposée : l'échelle *MSK*. Elle tient mieux compte des indicateurs qui peuvent être rassemblés lors des enquêtes sismiques. Une autre échelle, a été adoptée en 1992 : c'est l'échelle *EMS* (échelle macrosismique européenne).

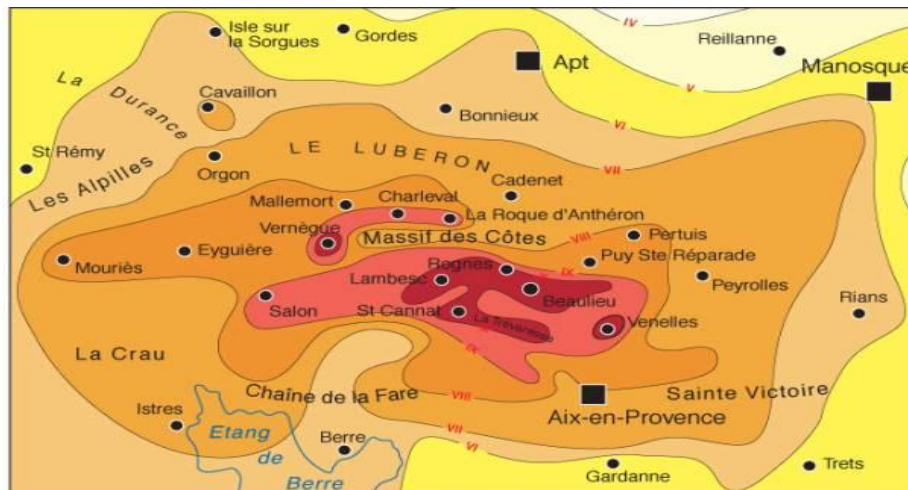


Figure (1-13): Exemple Lambesc 1909 Intensité XI.

I.7.2. Magnitude

La notion de magnitude a été introduite en 1935 par le sismologue Américain Richter. Elle caractérise l'énergie libérée par la rupture de la faille au point de déclenchement du tremblement de terre ou foyer (dans la zone épiscopentrale). Contrairement à l'intensité qui apparaît comme limitée supérieurement par définition au degré XII, la magnitude peut atteindre théoriquement n'importe quelle valeur. La magnitude locale d'un séisme est

définie par :

$$M = \log A - \log A_0 \dots (1.3)$$

A : amplitude maximale mesurée sur un sismogramme enregistré par un sismographe Wood Anderson en millimètre.

logA₀ : est une valeur standard fonction de la distance épiscopentrale.

On ne doit pas confondre magnitude et intensité :

- A l'inverse de la magnitude qui se calcule, l'intensité d'un séisme ne peut donner lieu qu'à une estimation.
- La magnitude est une valeur associée uniquement au séisme.
- L'intensité est associée au lieu d'observation.
- Il n'existe pas de véritable relation entre magnitude et intensité. Ainsi deux séismes de même magnitude peuvent donner en surface des intensités différentes.

Inversement deux séismes de même intensité en un lieu peuvent avoir des magnitudes différentes.

I.8. Mouvement du sol

La connaissance de la nature des sources sismiques ainsi que les lois de propagation des ondes peut être fournie par des enregistrements sismographiques de l'accélération du sol.

C'est à partir de ces accélérogrammes que l'on peut évaluer la réponse d'un édifice aux sollicitations d'un séisme.

Pour un même séisme, les accélérogrammes sont au nombre de trois, se rapprochant de la direction Nord-sud, à la direction Est-ouest et à la direction verticale. Il a été constaté d'après les enregistrements effectués à ce jour, que les mouvements suivant ces trois directions de l'espace sont indépendants et on ne peut par conséquent déduire le mouvement dans une direction donnée du mouvement dans les deux autres directions mais en général, la composante verticale de l'accélération est inférieure à la composante horizontale et le rapport entre ces amplitudes a été estimé à 2/3.

L'expérience a montré que les mouvements horizontaux du sol étaient souvent à l'origine de la ruine des bâtiments : La plupart des constructions ne peut pas supporter le dixième de l'accélération de la pesanteur dans la direction horizontale.

I.9. Enregistrement du signal sismique

Le signal sismique peut être introduit de deux manières différentes dans le calcul des structures :

- Accélérogrammes.
- Spectres de réponse.

I.9.1. Les accélérogrammes

Notre compréhension des forces ou déformations induites par les séismes s'est développée de manière considérable conséquemment à des mouvements de sol dus aux séismes, ou à la

réponse des structures enregistrée sous forme d'accélérogrammes.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme s'écrivent principalement sous la forme d'accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps (figure 1.14) ; nous pouvons de même enregistrer la vitesse ou le déplacement des particules du sol.

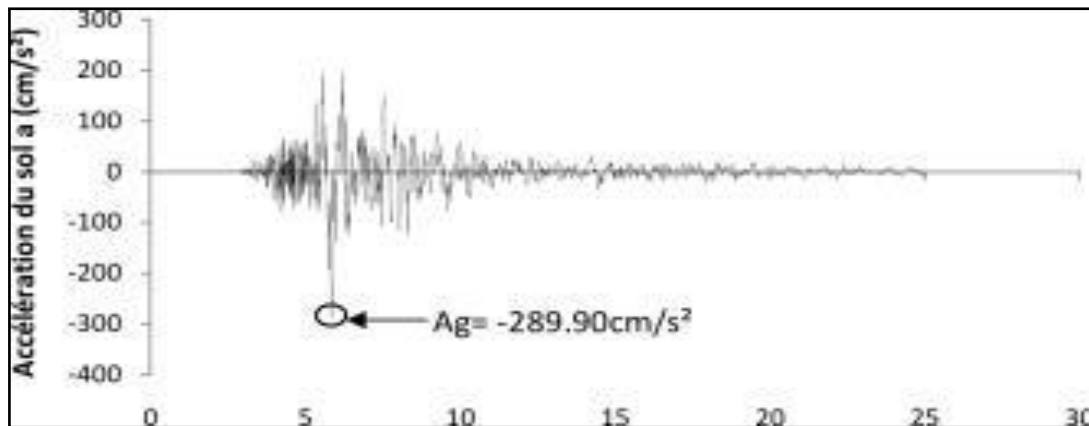


Figure (1-14): Exemple d'accélérogramme (en cm/s^2).

Il convient de noter qu'en un point donné du sol, les mouvements des particules lors d'un séisme s'effectuent dans toutes les directions à l'horizontale comme à la verticale. C'est-à-dire, il est enregistré habituellement pour un même séisme trois accélérogrammes :

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

L'amplitude du mouvement vertical est nettement inférieure à celle du mouvement horizontal, il est généralement admis de prendre un rapport de $2/3$ entre ces amplitudes.

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

L'amplitude : elle est généralement définie par la valeur du pic d'accélération.

La fréquence : la une fréquence moyenne est déterminée en comptant le nombre de fois que l'accélérogramme coupe l'axe des abscisses par unité de temps.

La durée : elle est 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.

Facteurs à considérer pour le choix d'un accélérogramme

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.

On distingue deux types d'accélérogrammes (figure 1.14) les plus utilisés dans les calculs :

- Des accélérogrammes naturels enregistrés sur des sites comparables à celui de l'ouvrage.
- Des accélérogrammes artificiels (synthétiques), qui tiennent compte de la géologie locale, et qui sont déterminés par le calcul. L'établissement des accélérogrammes comporte donc une grande part d'approximation.

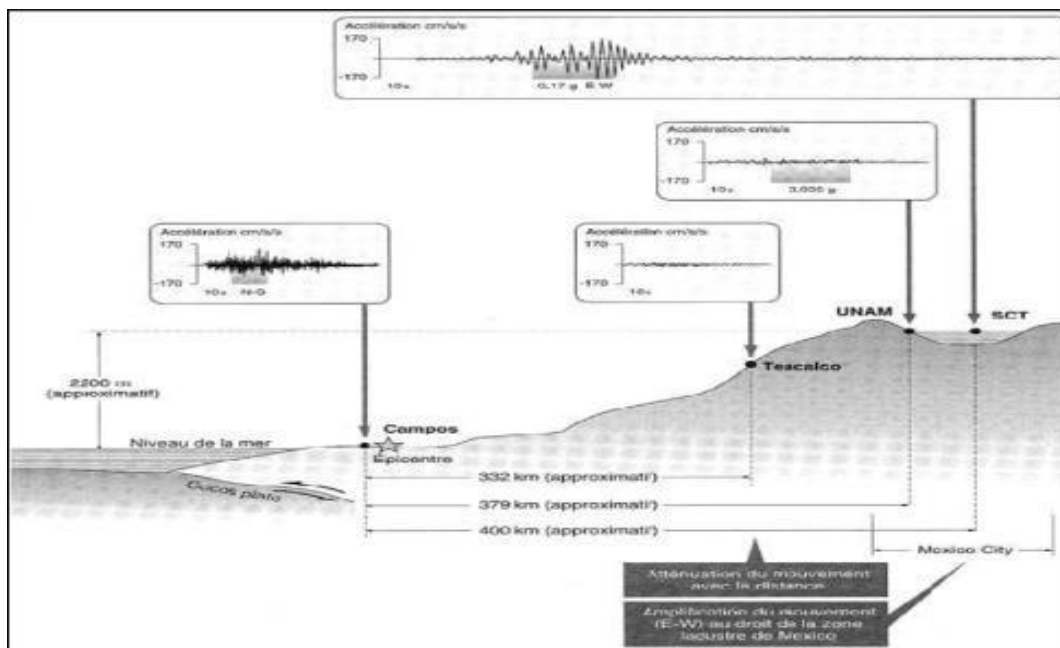


Figure (1-15): Accélérogrammes du séisme de Mexico.

I.9.2. Les spectres de réponse

L'examen d'enregistrements de mouvements de sols produits par un même séisme en surface de sols de natures géologiques et géotechniques différentes fait apparaître une forte dépendance de la nature du mouvement sur les caractéristiques géotechniques.

Les spectres de réponse moyens (figure 1.16), calculés à partir d'enregistrements réels obtenus sur des sols rocheux, argileux, raides, de profondeur moyenne ou des dépôts alluviaux profonds, montrent la nécessité qu'il y a à étudier le comportement des sols sous chargement dynamique pour parvenir, en zones sismiques, à une conception fiable des ouvrages qui y sont fondés, c'est en particulier le cas pour les ouvrages importants comme les centrales nucléaires, les barrages, les tours, .etc.

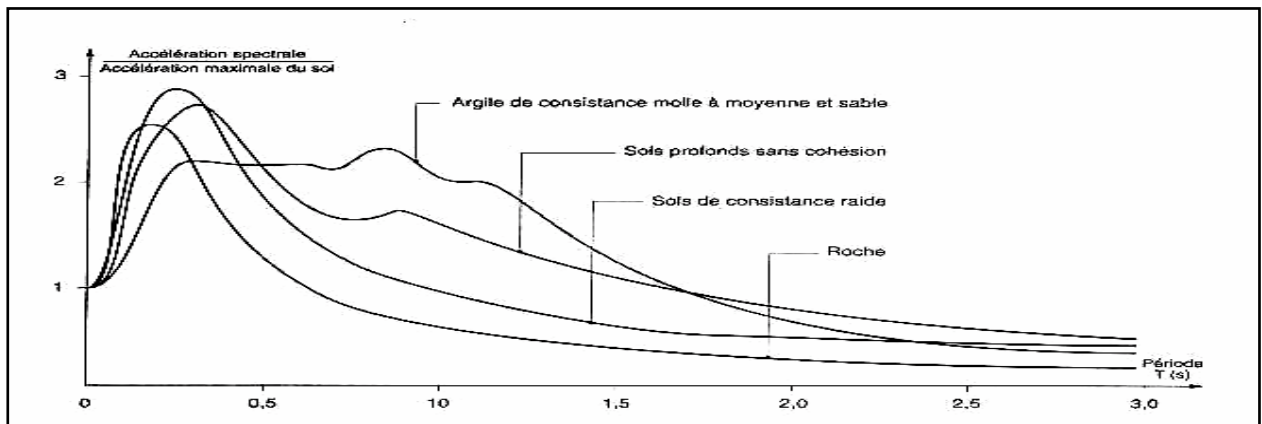


Figure (1-16): Allures des spectres d'accélération moyenne pour différents sols.

I.10. L'accélération maximale

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

Dans un accélérogramme figure (1.17) on peut distinguer quatre phases différentes :

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

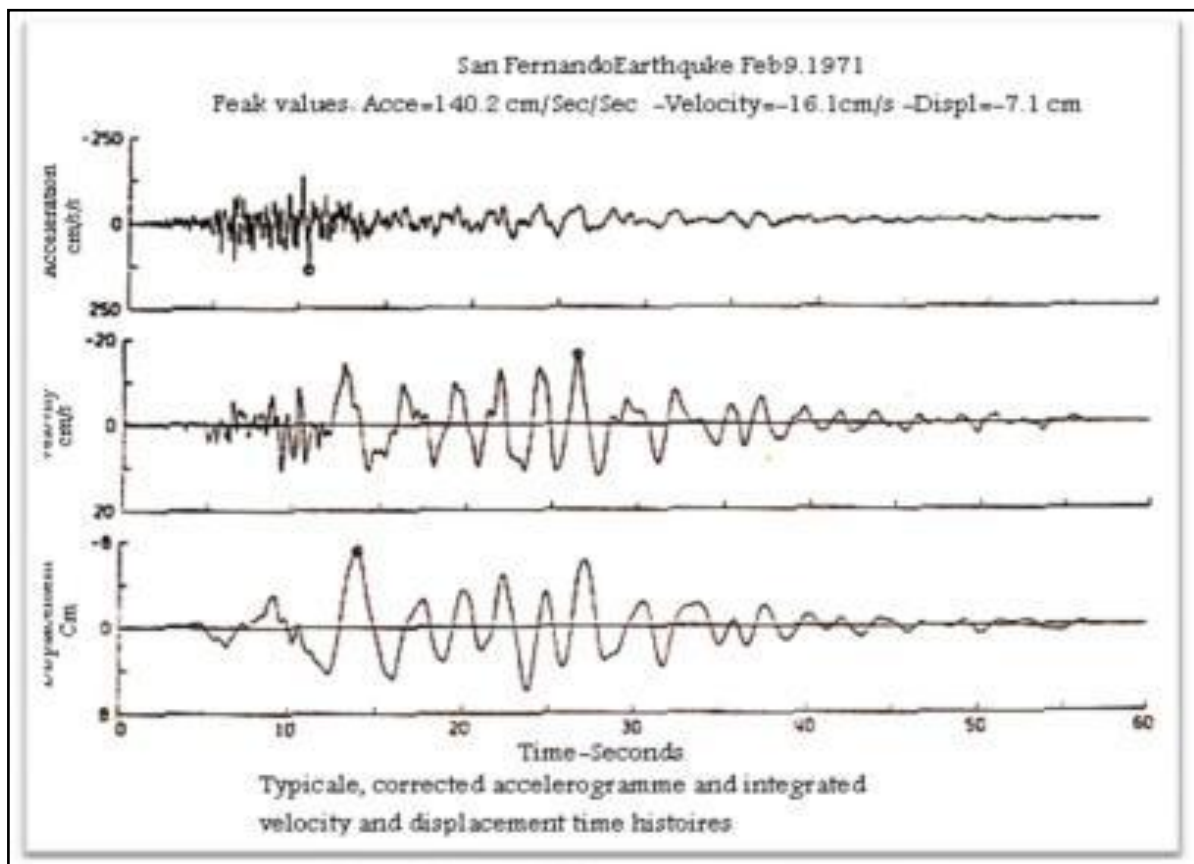


Figure (1-17): Les différentes phases d'un accélérogramme.

I.11. Durée du séisme

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 de mouvements forts du sol peut avoir une forte influence sur les dégâts du séisme. De nombreux processus physiques, tels que la dégradation de la rigidité et la résistance de certains types de structures et de l'accumulation de pressions de l'eau interstitielle dans les sables lâches et saturés, sont sensibles au nombre de changement de signe de charges ou de contraintes qui se produisent lors d'un tremblement de terre. Un mouvement de courte durée ne produira pas des changements de signe de charge suffisants pour causer des dommages importants dans une structure, même si l'amplitude du mouvement est élevée. D'autre part, un mouvement d'amplitude modérée mais de longue durée peut produire des changements de signe de charges suffisants pour causer des dommages importants.

I.12. Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique :

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

- a) Facteurs liés à la source (mécanismes de génération du séisme), le trajet parcouru entre le foyer et le site et les facteurs liés à des conditions locales propres au site.
- b) Les facteurs de la source englobent le genre de la faille génératrice, les dimensions de la zone de rupture, la profondeur de la source, les valeurs des contraintes le long de la surface de rupture, les mécanismes de rupture et les caractéristiques de propagation le long de la faille.
- c) Une partie de l'énergie libérée à la source se propage par radiation d'ondes sismiques lors de leur trajet entre le foyer et le site à la surface de la terre.

I.13. Mouvement du sol en champ libre

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

Le phénomène d'interaction sol structure correspond à une perturbation du mouvement incident sous l'effet du mouvement propre de la structure, perturbation, d'où il résulte que le mouvement de l'interface de contact sol structure n'est pas le mouvement dit de champs libres. L'interaction est d'autant plus forte que la structure est rigide et le sol déformable. D'autant plus faible que la structure est souple et que le sol est rigide.

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

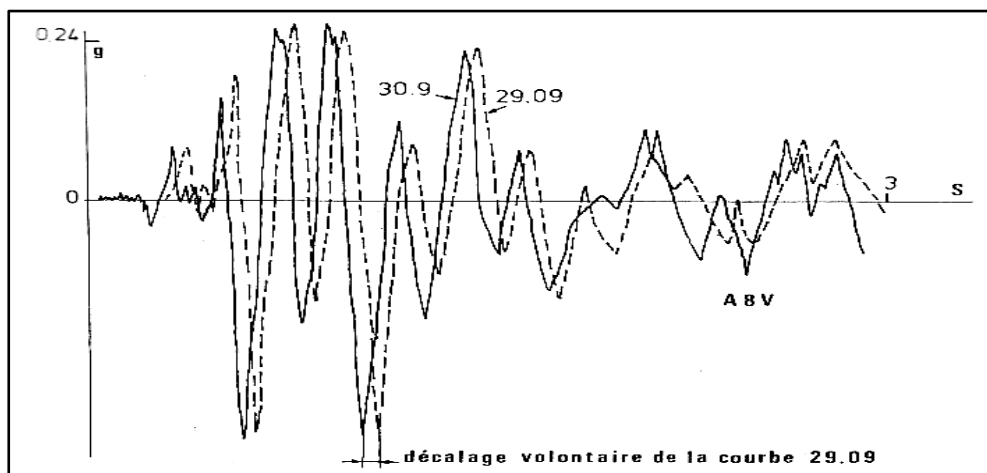


Figure (1-18) : Accélération en champ libre.

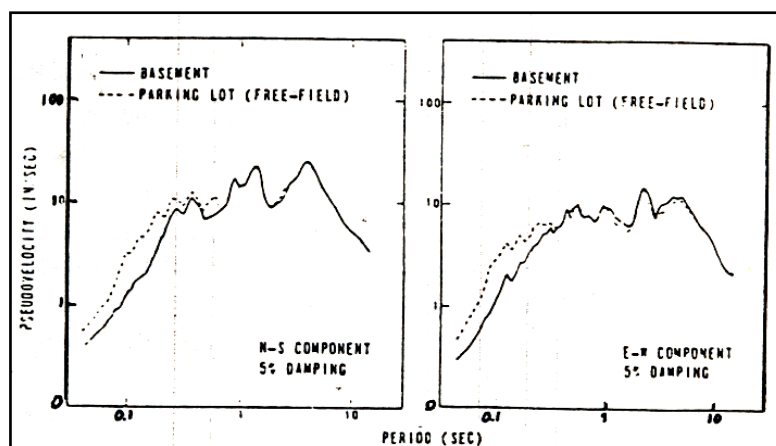


Figure (1-19) : Comparaison des spectres du champ libre et au sein du bâtiment d'après Crouse(1978).

I.14. Conclusion

Ce chapitre a pour but de clarifier comment se produit un séisme et quels sont les risques de celui-ci 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 parasismiques.

Chapitre II

Comportement dynamique des sols

II.1. Introduction

C'est l'étude du comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique. Elle traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) en présence de l'autre lors du séisme.

Les forces d'inertie développées dans la structure lorsqu'elle est soumise à un mouvement de son support, qui sont exercés par la structure sur sa fondation. On a également étudié les mouvements du sol support lorsque les ondes sismiques se propagent dans celui-ci avant d'atteindre l'ouvrage dont on cherche à étudier la réponse. La question se pose de savoir comment ces deux phénomènes interagissent et dans quelle mesure le mouvement du support est affecté par la réponse de la structure, dont la réponse sera elle-même modifiée par le mouvement du support.

Les modules dynamiques étant fonction des vitesses des ondes longitudinales et transversales ; leur détermination se fait par des essais sismiques.

Les vitesses d'ondes sismiques sont de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mètres par seconde.

Le comportement dynamique des sols est complexe et les mesures des caractéristiques dynamiques sur le site, comme en laboratoire, font appel à des techniques variées. La nature et le nombre d'essais à effectuer dépendent du sol : plus le sol est hétérogène, plus les essais seront nombreux et détaillés.

II.2. Comportement des sols sous sollicitation sismique

II.2.1. Comportement élastique du sol

Lorsque dans un essai, la courbe effort - déplacement ou contrainte - déformation est la même en chargement et en déchargement, le comportement du matériau est dit élastique et peut être linéaire ou non linéaire. La relation comportementale s'exprime par une fonction tensorielle (F_{ij}), dont la forme dépend de la configuration de référence choisie telle que :

$$\sigma_{ij} = F_{ij} \cdot \xi_{ijk} \dots\dots\dots (2.1)$$

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

Dans un comportement élastique linéaire, il existe une relation linéaire entre le tenseur des contraintes et celui des déformations. Ce type de comportement a été découvert par Hooke [1678]. En réalité, le comportement linéaire constitue seulement une approximation du comportement réversible des matériaux (en petites déformations). Ce n'est généralement pas le cas des sols qui, même pour de faibles déformations ont un comportement élastique non linéaire. Dans un comportement élastique non linéaire les essais montrent généralement que la courbe contrainte - déformation devient rapidement non linéaire. La première loi élastique non linéaire à été introduite par Leibniz en 1690.

II.2.2. Comportement élasto-plastique du sol

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

Les modèles de comportement élasto-plastique sont caractérisés par les concepts fondamentaux suivants :

- **la surface de charge** : qui définit le seuil de contrainte au-delà du quel le comportement d'un matériau est irréversible (plastique) ;
- **le domaine d'élasticité** : qui correspond à l'intérieur de la surface de charge et dans lequel les déformations sont réversibles ;
- **la règle d'écoulement plastique** : qui décrit la manière dont évoluent les déformations plastiques ;
- **la partition des déformations** : qui décompose le tenseur des déformations totales (ϵ_{ij}) en la somme du tenseur des déformations élastiques (ϵ^e_{ij}) et de celui des déformations plastiques (ϵ^p_{ij}) ;
- **Écrouissage** : qui permet de faire évoluer la surface de charge dans l'espace des

contraintes en fonction de l'intensité des sollicitations, dans ce cas, le domaine d'élasticité varie également ;

- le *critère de plasticité* : ou de rupture, qui caractérise la rupture du matériau (les déformations tendent vers l'infini).



Figure (2-1): Comportement élastoplastique avec écrouissage.

Le long du chemin OA le comportement est élastique, c'est à dire quand on décharge on revient en O. le point A, point limite au-delà duquel on n'a plus le comportement élastique, correspond à une contrainte caractéristique dite seuil de plasticité initial ou limite élastique.

Après l'avoir franchi, et si étant au point B, par exemple, on décharge, le chemin de déchargement ne sera pas BAO mais BCD. La déformation qui reste OD = ε^p est une déformation irréversible, dite plastique. Si on recharge, le chemin sera DEF, F étant le prolongement du chemin du premier chargement.

On peut assimiler en général la courbe BCDEF à la droite DGH et admettre que les déformations sont réversibles le long de cette ligne. Le nouveau seuil de plasticité est alors le point H qui est plus élevé que le point précédent (A). Cette évaluation du seuil de plasticité s'appelle écrouissage.

Dans ce cas la déformation totale est la somme des déformations élastiques ε^e et plastique ε

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

- Si le seuil actuel σ_B est constant, le matériau est dit parfaitement plastique.
- Si σ_B est toujours croissant ou décroissant le matériau est dit écrouissable à écrouissage positif ou négatif respectivement.

II.3. Description expérimentale

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

Par rapport à la vitesse d'application des charges, la perméabilité du sol n'est donc pas suffisante pour permettre un drainage de celui-ci. Dans ce type d'approche, les contraintes sont exprimées en termes de contraintes totales, le comportement du sol est régi par les contraintes effectives. La compréhension du comportement non drainé du sol réside dans la loi de comportement. Cette loi détermine la tendance à la variation du volume du sol qui se traduit, en comportement non drainé ou partiellement drainé, par une variation de la pression interstitielle, donc de la contrainte effective. La limitation de cette deuxième approche en contraintes totales apparaît clairement dès que les conditions de drainage deviennent complexes.

On distingue dans le comportement du sol deux stades distincts :

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

Sous chargement cyclique (sismique par exemple), le comportement des sols est non linéaire, hystérétique. Certaines sollicitations cycliques peuvent induire la rupture.

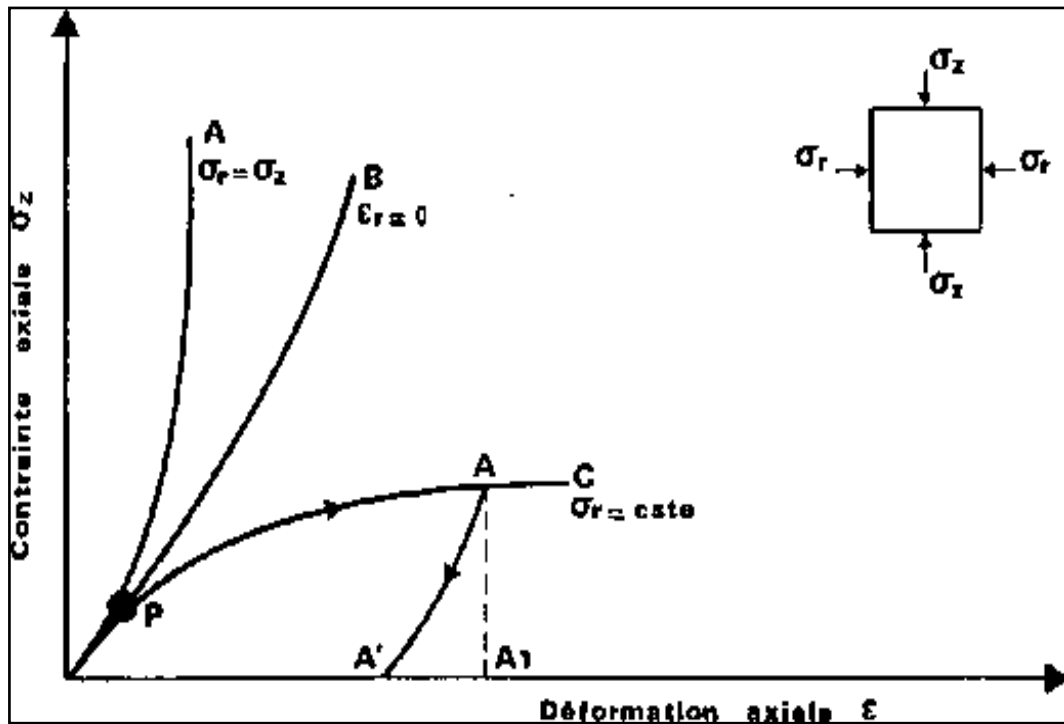


Figure (2-2): Courbe effort déformation Chargement quasi statique monotone.

Le passage de l'onde de cisaillement se traduit par l'application sur les faces de l'élément de sol d'une contrainte de cisaillement $\tau(t)$, Sous l'effet de cette contrainte, l'élément subit une déformation de cisaillement simple, également appelée distorsion L'enregistrement d'un courbe effort – déformation $\tau = f(\gamma)$ montre que pour un cycle fermé (figure 2.3). Le comportement du sol est caractérisé par une boucle appelée : boucle d'hystérésis, dont la surface et l'inclinaison dépendent de l'amplitude de la déformation au cours du cycle.

Dés que le chargement cyclique n'est pas fermé (figure 2.4), le comportement devient plus complexe à décrire.

Il est commode et classique de définir cette boucle à l'aide de deux paramètres :

- le module sécant G_s : qui est la pente de la droite joignant les extrémités de la boucle ;
- le coefficient d'amortissement β : qui est une mesure de l'aire de la boucle.

Ils caractérisent l'énergie dissipée par le matériau lors d'un cycle et varient en fonction de la distorsion (figure 2.5).

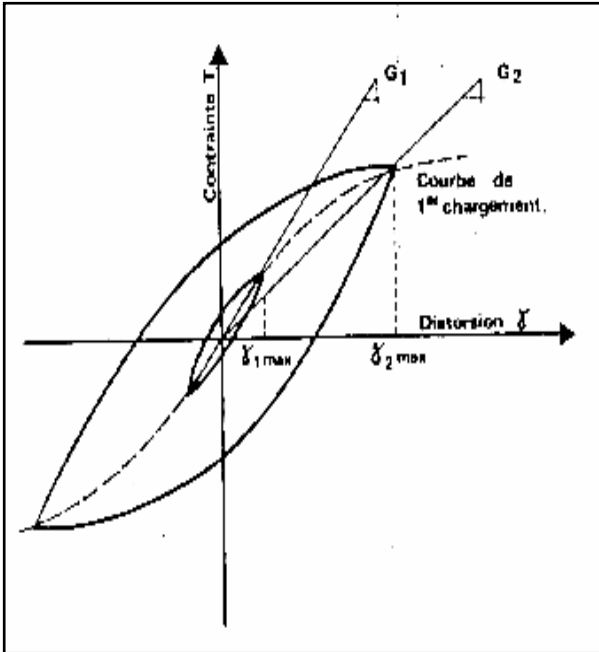


Figure 2.3 : Courbe effort – déformation.

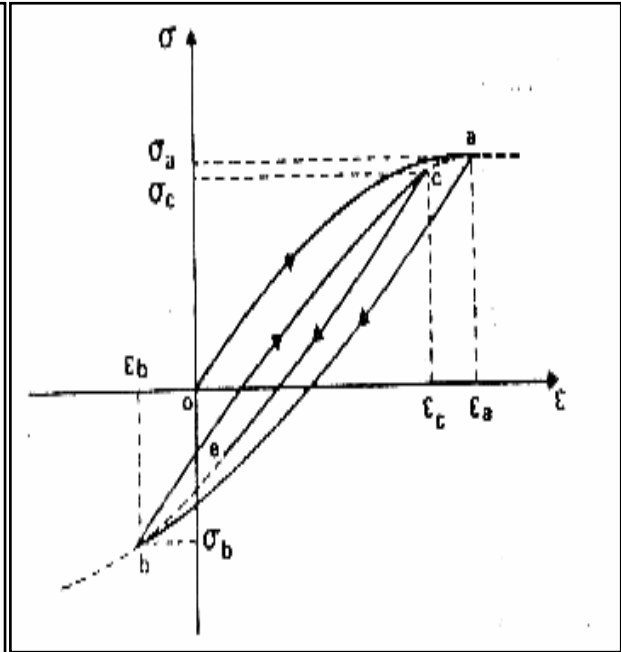


Figure (2-4): Chargement cyclique quelconque.

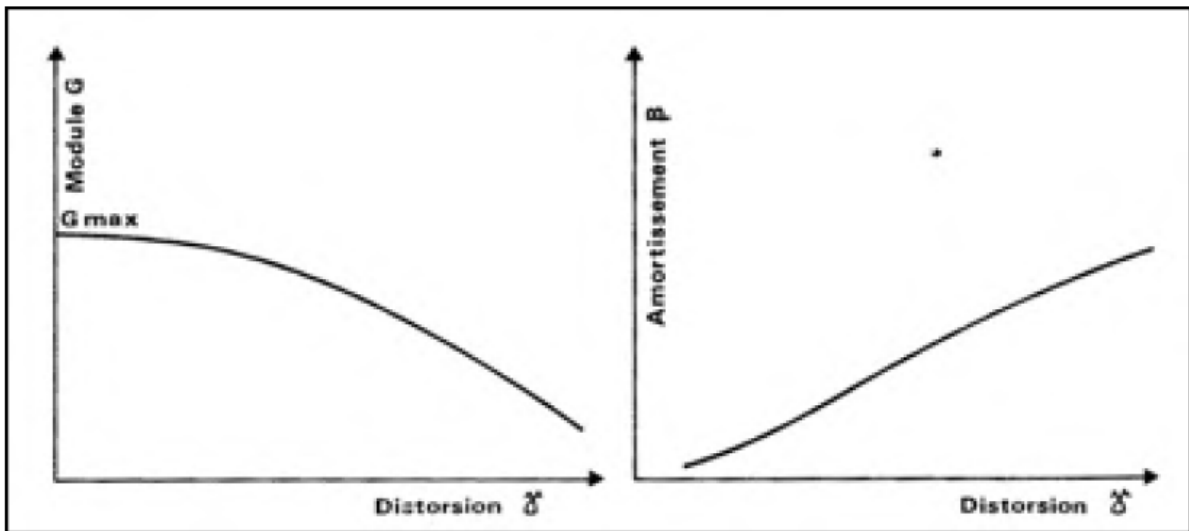


Figure (2-5): Variations de β et G en fonction de la distorsion. (Pecker, 1984).

II.4. Caractéristiques dynamique des sols

II.4.1. Détermination de τ_{max}

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

$$\tau_{\max} = \left(\left| \left(\frac{1+K_0}{2} \right) \bar{\sigma}_v \sin \phi' + C' \cos \phi' \right|^2 - \left| \left(\frac{1-K_0}{2} \right) \bar{\sigma}_v \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \dots (2.2)$$

Ou ($\bar{\sigma}_v$) la contrainte verticale effective, (ϕ') est l'angle de frottement interne effectif, c' est la cohésion effective et (K) est le coefficient de pression des terres au repos. Les résultats des expériences faites à l'aide des différents appareils (Triaxial, cisaillement simple, etc...).

II.4.2. Module de cisaillement maximum

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

Cette relation s'écrit :

$$G_{\max} = K P_a F(e) \left[\frac{\sigma_m'}{P_a} \right]^n \dots (2.3)$$

Pour les argiles, la formulation proposée diffère suivant :

$$G_{\max} = K P_a (OCR)^K F(e) \left[\frac{\sigma_m'}{P_a} \right]^n \dots (2.4)$$

- ✓ K : Paramètre fonction de l'indice de plasticité.
- ✓ P_a : Pression atmosphérique.
- ✓ σ_m' : Contrainte moyenne effective.

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

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

- ✓ OCR : Rapport de sur consolidation.

La valeur du module de cisaillement (G) des sols, ces paramètres sont :

- la compacité du sol, généralement traduite à l'aide de l'indice des vides e du matériau ;
- l'état de contrainte actuel auquel est soumis le matériau ;
- l'histoire des contraintes antérieures subies par le sol.

II.4.3. Amortissement hystérétique

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.

$$W = \oint \tau(\gamma) d\gamma \dots (2.5)$$

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. Toute fois, 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.

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 2.1).

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

Tableau (2-1): Coefficient d'amortissement critique β_{max} (Black.1984).

II.5. Lois de comportement

II.5.1. Loi de comportement élastique linéaire

Le sol aura un comportement élastique si ses déformations sont réversibles, la relation contrainte - déformation sera biunivoque, sans qu'elle soit linéaire. Si en plus il existe une relation linéaire entre les contraintes et les déformations on dira que le sol a un comportement élastique linéaire.

Dans le cas de l'élasticité linéaire, si le massif de sol est homogène et isotrope, on montre en calcul tensoriel que dans ces conditions σ_{ij} (ou σ) est une fonction linéaire tensorielle isotrope de (ou ε_{ij}), deux coefficients suffisent pour décrire la loi. En effet, l'équation générale de Hooke est:

$$\sigma_{ij} = C_{ijk} \cdot \varepsilon_{ij} \dots (2.6)$$

Où σ_{ij} et ε_{ij} sont des tenseurs du deuxième ordre et C_{ijkl} un tenseur du quatrième ordre.

Matériau isotrope : Dans le cas d'un matériau isotrope, si l'on reprend en compte le coefficient de Poisson ν , la loi de Hooke devient :

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \dots (2.7)$$

Avec

- ✓ δ_{ij} : le symbole de Kronecker
- ✓ ε_{kk} : la notation abrégée de la trace du tenseur des déformations (somme des termes diagonaux du tenseur).

On peut aussi l'écrire sous forme matricielle :

$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon + \frac{\nu}{1-2\nu} Tr(\varepsilon) I \right) \dots (2.8)$$

Les relations ci-dessus peuvent être inversées pour donner :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[(1+\nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij} \right] \dots (2.9)$$

Où, sous forme matricielle (en appliquant la trace à la relation plus haut)

$$\varepsilon = \frac{1}{E} [(1 + \nu)\sigma - \nu Tr(\sigma)I] \dots (2.10)$$

Les relations entre les paramètres de comportement sont les suivantes:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \dots (2.11) \qquad E = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \dots (2.12)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \dots (2.13) \qquad G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \dots (2.14)$$

Où le paramètre E représente le module d'Young, ν le coefficient de Poisson.

Les coefficients E et ν sont soumis aux conditions suivantes: $E > 0$ et $-1 < \nu < 0.5$ (Pour un sol, le coefficient de Poisson ν est positif dans la pratique).

II.5.2. Modèle viscoélastique linéaire équivalent

Ces modèles faisant apparaître une boucle d'hystérésis sous chargement harmonique, on a remplacé le modèle non linéaire par un modèle linéaire équivalent ayant des propriétés dissipatives plus ou moins équivalentes à celles du matériau réel. On se consacrera au cas de la sollicitation harmonique, pour ces sollicitations la loi de comportement de la viscoélasticité linéaire s'écrit :

$$\varepsilon = \varepsilon^0 . e^{i\omega t} \dots (2.15)$$

$$\sigma = \lambda^* (trace \varepsilon^0) I + 2\mu^* \varepsilon^0 \dots (2.16)$$

λ^* et μ^* : fonction complexes ;

D'après le modèle Kelvin – Voigt :

$$\lambda^* = \lambda + i\omega\lambda' \\ \mu^* = \mu + i\omega\mu' \dots (2.17)$$

λ, μ : constantes d'élasticité ;

λ', μ' : constantes de viscosité ;

Le module de cisaillement complexe G s'écrit :

$$G^* = G \left[1 + i\omega \frac{\mu'}{G} \right] = G [1 + i\omega\eta] \dots (2.18)$$

η : Coefficient de perte défini par : $\eta = \frac{\Delta W}{2\pi W} \dots (2.19)$

ΔW : énergie dissipée par le matériau au cours d'un cycle ;

Par analogie avec la dynamique des structures, l'énergie dissipée par le sol est traduite à l'aide d'un pourcentage d'amortissement critique : $\beta = \eta / 2$ donc :

$$G^* = G(1 + 2i\beta) \dots (2.20)$$

En résumé, le comportement non linéaire du sol à été approché par un modèle viscoélastique linéaire équivalent. L'équivalence est fonction des caractéristiques du matériau mais également de la sollicitation.

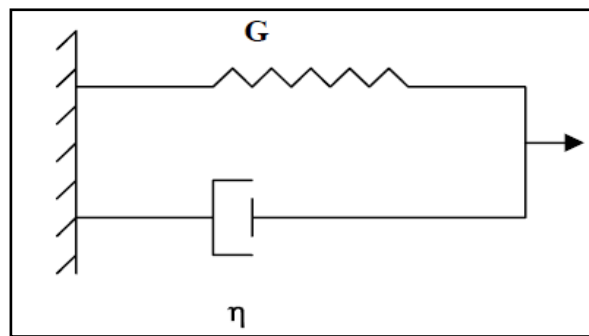


Figure (2-6): Modèle viscoélastique linéaire (Modèle de KELVIN – VOIGT).

II.5.3. Lois de comportement non linéaire

III.5.3.1. Modèle élastique non linéaire de Ramberg-Osgood

L'objet de ce paragraphe n'est pas de faire la synthèse de tous les modèles non linéaires proposées pour décrire le comportement des sols, on se limitera au modèle que nous avons choisi qui est le modèle de Ramberg-Osgood.

❖ Loi d'hystérésis et amortissement de Ramberg-Osgood (1943)

Ramberg-Osgood (1943) ont proposé une relation contrainte-déformation à trois paramètres qui exprime bien la dégradation du module et prend en compte la notion de « cycle » dont l'amortissement est issu.

La formule classique de Ramberg-Osgood s'écrit :

$$\gamma - \gamma_c = \frac{1}{G_{\max}} \left[1 + \alpha \left(\frac{|\tau - \tau_c|}{\eta \tau_y} \right)^{r-1} \right] (\tau - \tau_c) \quad \dots (2.21)$$

- ✓ τ_c et γ_c : sont respectivement la contrainte et la déformation de cisaillement lors du dernier changement de direction du chargement ;
- ✓ G_{\max} : module de cisaillement tangent initial ;
- ✓ r, α : paramètres du modèle ;
- ✓ τ_y : déviateur maximum.

Un inconvénient de ce modèle est sa formulation sous forme contrainte-déformation. Afin de l'utiliser, il faut le transformer en une relation de dégradation G/G_{\max} .

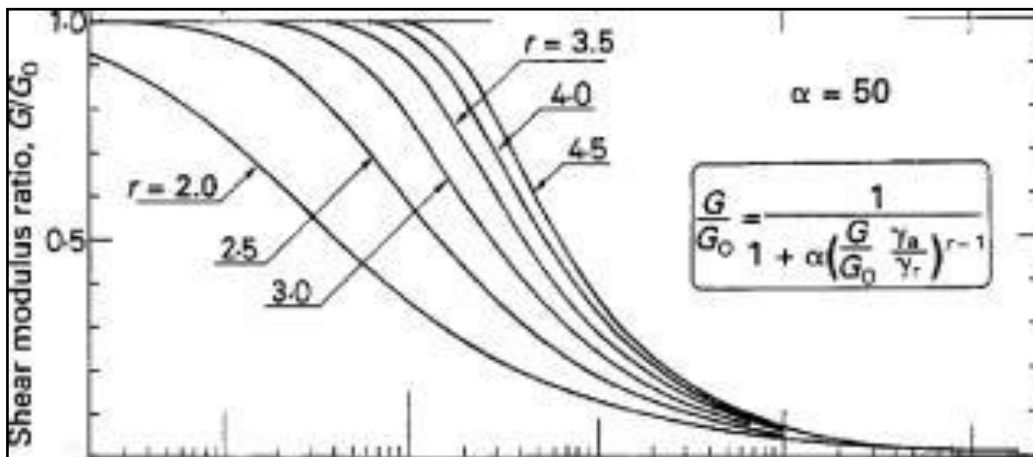


Figure (2-7): Exemple numérique du modèle de R-O.

II.6. Réponse sismique d'une couche de sol

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 au niveau du roc. 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 (Pecker, 1984).

Les facteurs d'influence liés à la source sont fonction des dimensions de la zone de rupture, du mécanisme de rupture et des contraintes le long de la surface de rupture. Ils sont caractérisés par le moment sismique et la chute de contrainte. Ces deux paramètres sont plutôt utilisés par les sismologues, les ingénieurs préférant utiliser la magnitude ou l'intensité.

Les facteurs d'influence liés au trajet parcouru sont fonction des hétérogénéités du sol et de leurs effets soit : la réflexion, la réfraction, l'amortissement et la modification de la fréquence fondamentale. La plupart de ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender en l'état des connaissances actuelles (Pecker, 1984).

Enfin, pour les facteurs d'influence liés aux conditions locales, on remarque, entre autres, l'influence de la géologie, de la topographie (vallée / crête), des interactions sol-structure. En général, l'influence de la géologie est mise en évidence par une classification simplifiée des sols : roche, sol raide, sol mou. Pour la topographie, on remarque que la présence d'une crête amplifie très fortement les accélérations maximales au sol : elles peuvent être multipliées par 5 en haut de la crête (Athanasopoulos, 1993).

Le paramètre le moins affecté par le passage dans différentes couches est l'accélération maximale. Cependant les sols mous atténuent moins l'accélération sur la distance. Plus la rigidité du sol est faible, plus les déplacements et la vitesse sont grands.

Actuellement la source n'est pas intégrée dans les modèles de sol à grande échelle. On connaît généralement le mouvement ou l'accélération en champ libre. Puis, on calcule mathématiquement le mouvement à la base des couches et les réponses sont évaluées en posant des conditions restrictives au niveau de la géométrie (couches horizontales...). De plus, le comportement réel est fortement non linéaire, et on doit prendre ce facteur en compte pour obtenir des solutions raisonnables. La complexité du phénomène est telle que seules des solutions numériques sont envisageables. Pour les obtenir on suit les étapes suivantes :

- a) choix de la nature et de la direction de l'onde ;
- b) choix de la modélisation du milieu ;
- c) détermination des conditions aux limites ;
- d) choix d'une méthode d'intégration dans le temps.

Chapitre III

Outil numérique de calcul « le code Plaxis »

III.1. Introduction

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

Du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. 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.

III.2. Description de l'interface graphique

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 3.1). 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.

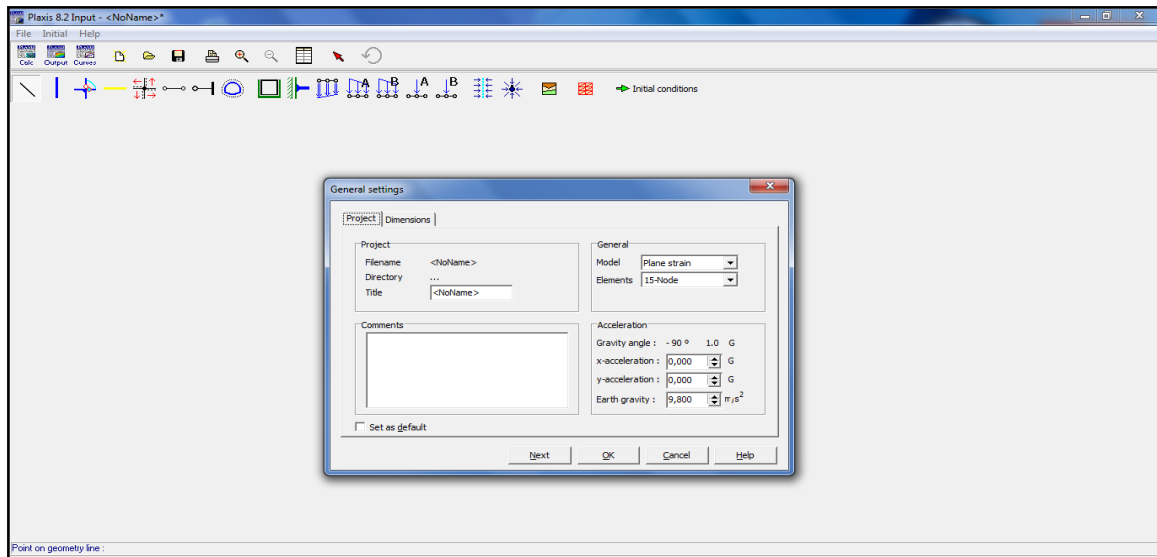


Figure (3-1): Interface utilisateur pour l'entrée des données.

En ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements : Si celles-ci sont complexes (figure 3.2). 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.

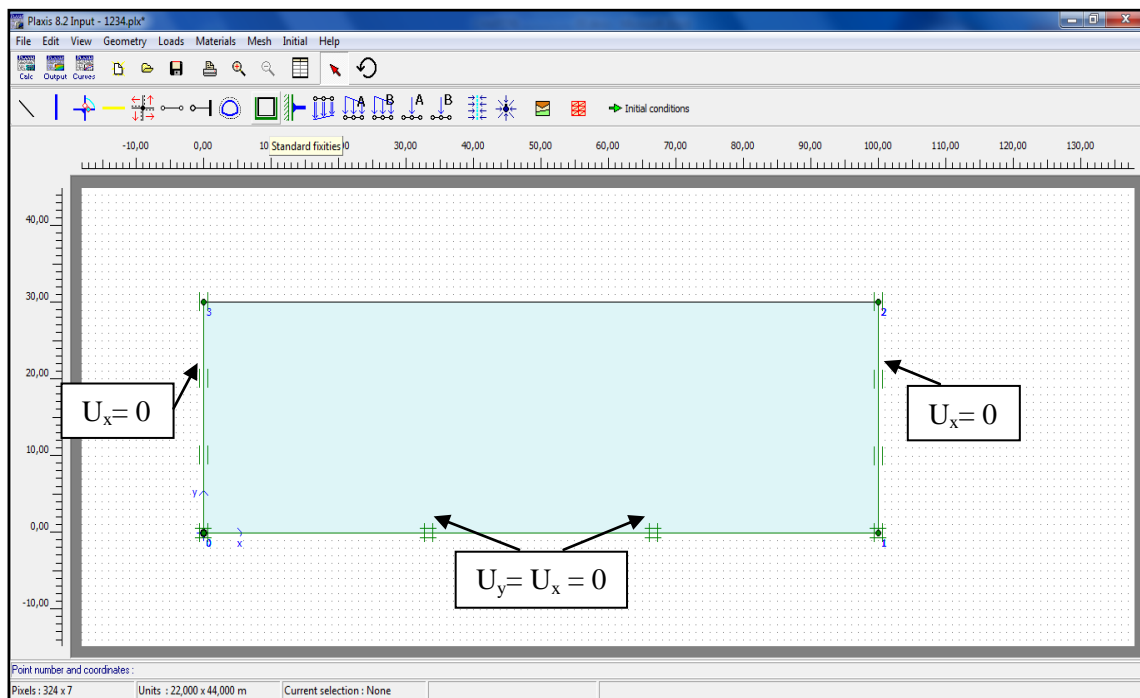


Figure (3-2): condition aux limites.

Les options par défaut commencent dès le maillage (figure 3.3). 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 nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité.

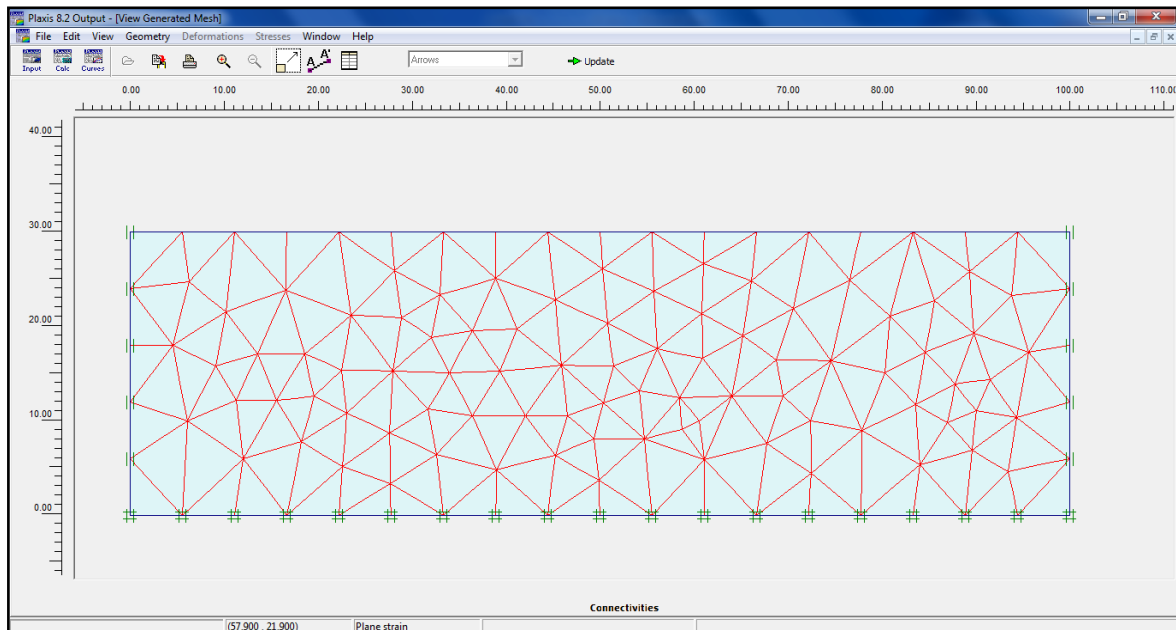


Figure (3-3): Exemple de maillage.

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 3.4).

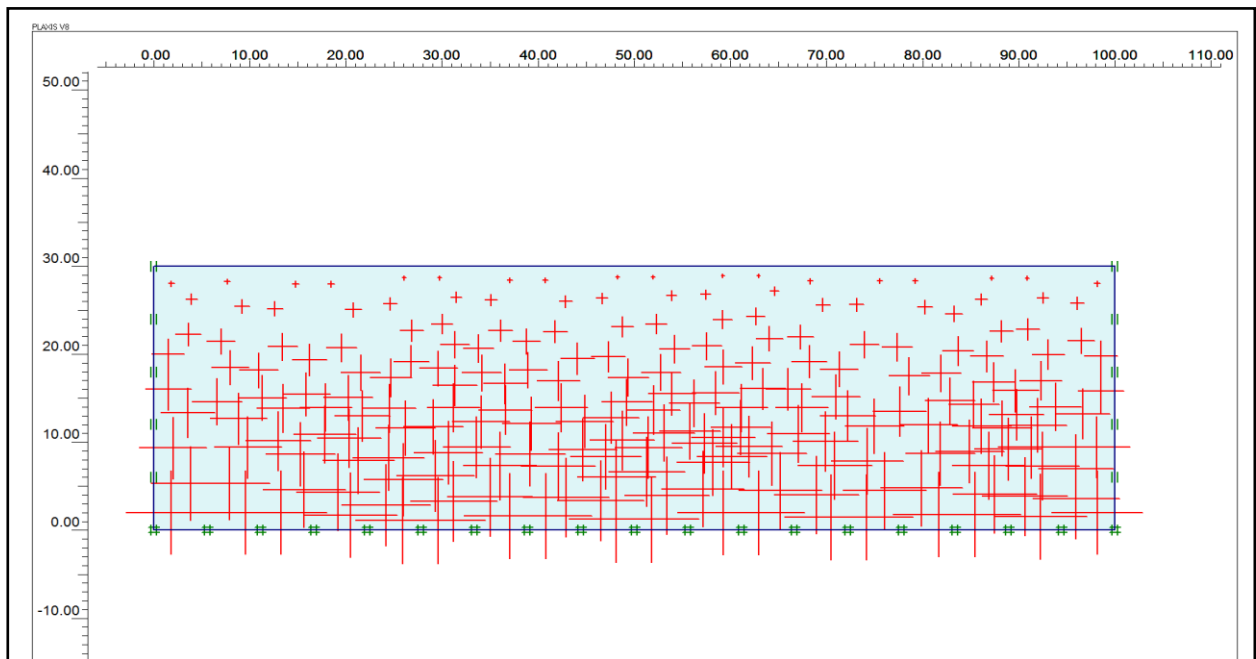


Figure (3-4): Définition des contraintes initiales : condition « k_0 ».

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 3.5). 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.

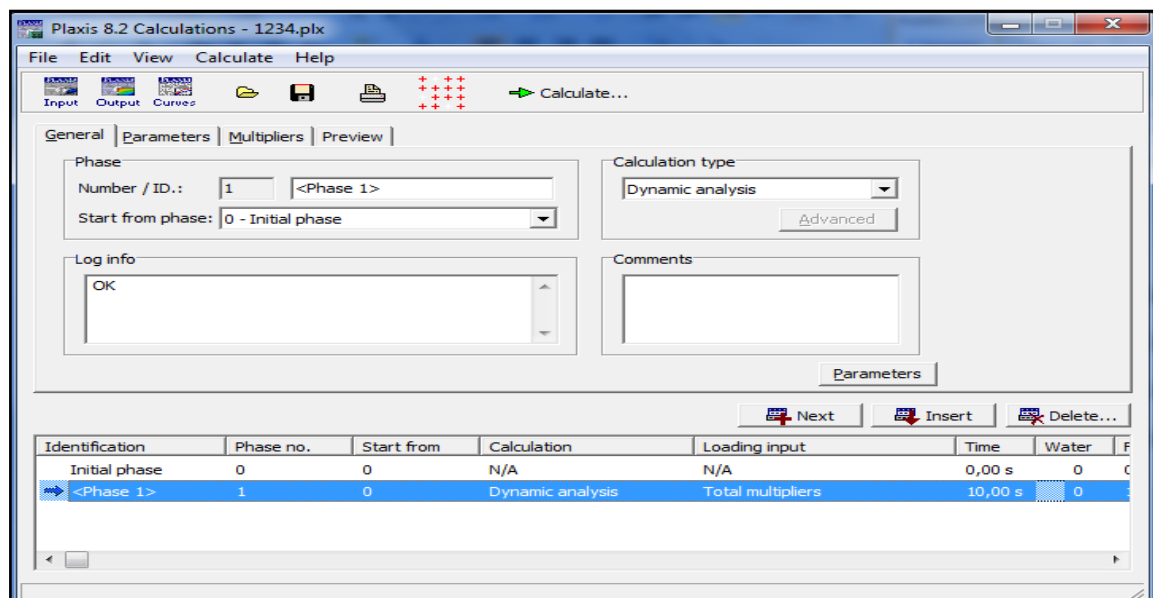


Figure (3-5): Interface utilisateur pour le choix du modèle de comportement du sol retenu pour les calculs.

Un calcul par élément finis fournit une masse imposante de résultats (figure 3.6). 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 3.7). 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.

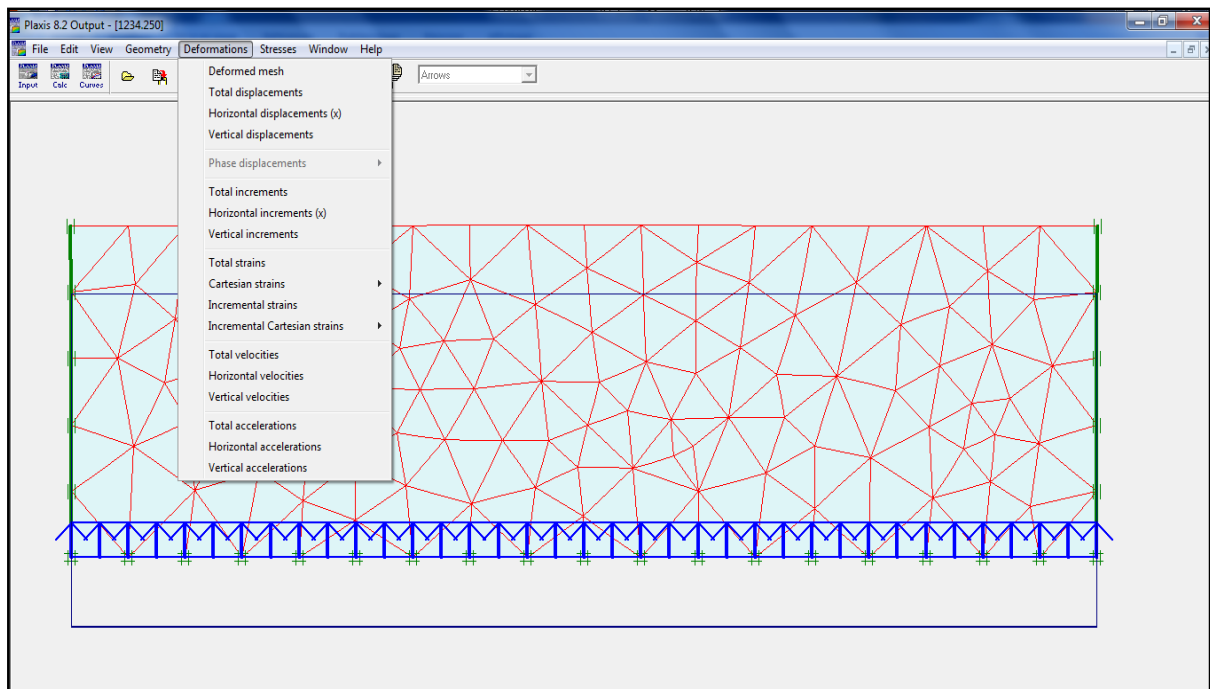


Figure (3-6): Menu « output ».

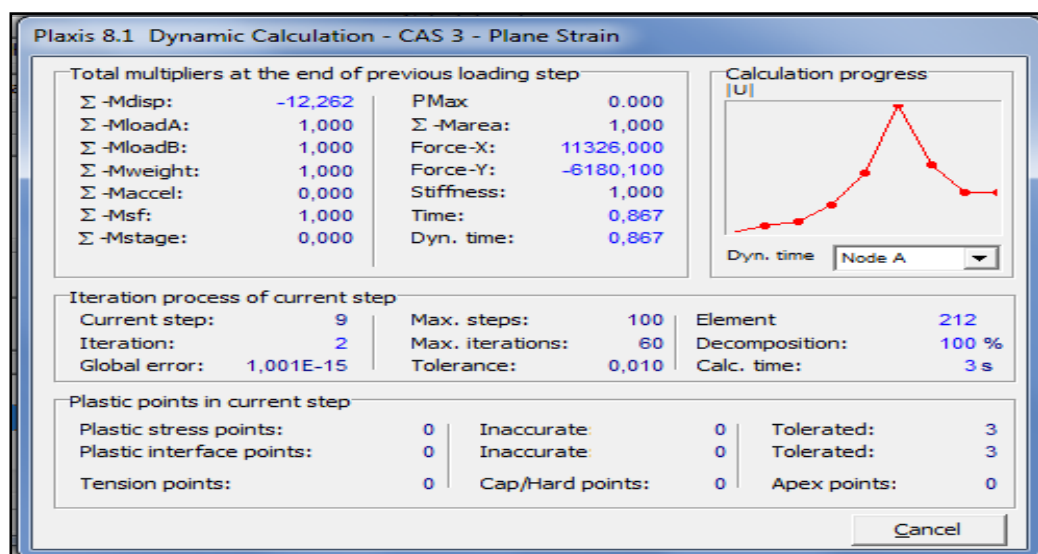


Figure (3-7): View calculations results.

III.3. Modèles de comportement implémentés dans PLAXIS

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique 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. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. 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 démarche suivie dans le développement du code PLAXIS consiste à 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 délai 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.

III.3.1. Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique. Les tableaux d'entrée des données demandent le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. Les paramètres sont reliés par les trois expressions suivantes :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 + \nu)} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \dots\dots\dots (3.3)$$

Le modèle élastoplastique de type Mohr-coulomb est régi par cinq paramètres (figure 3.8).

- Le module d'Yong E.
- Le coefficient de poisson ν .
- Cohésion c.
- L'angle de frottement φ
- L'angle de dilatance ψ .

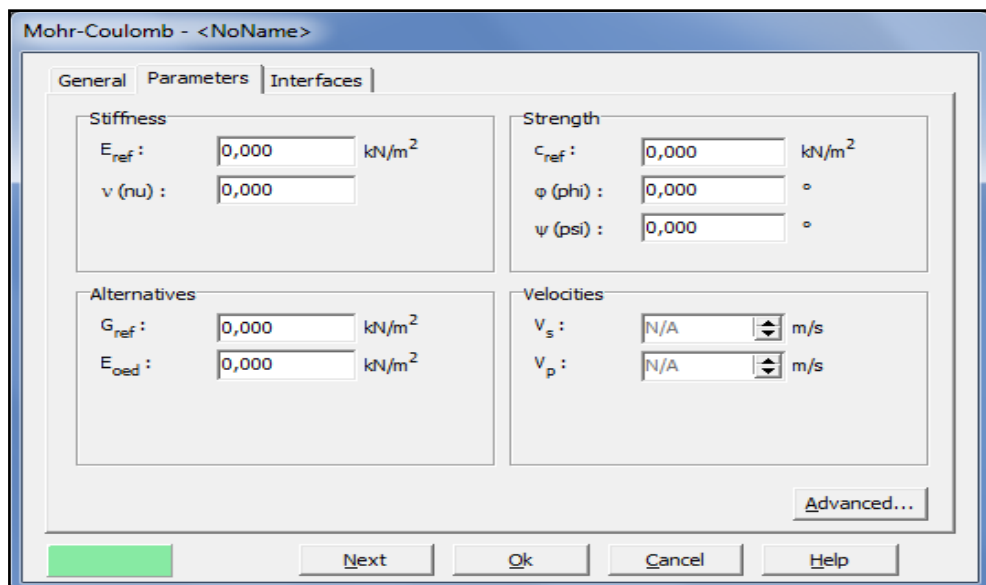


Figure (3-8): fenêtre au modèle Mohr-Coulomb.

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la figure 3.9 :

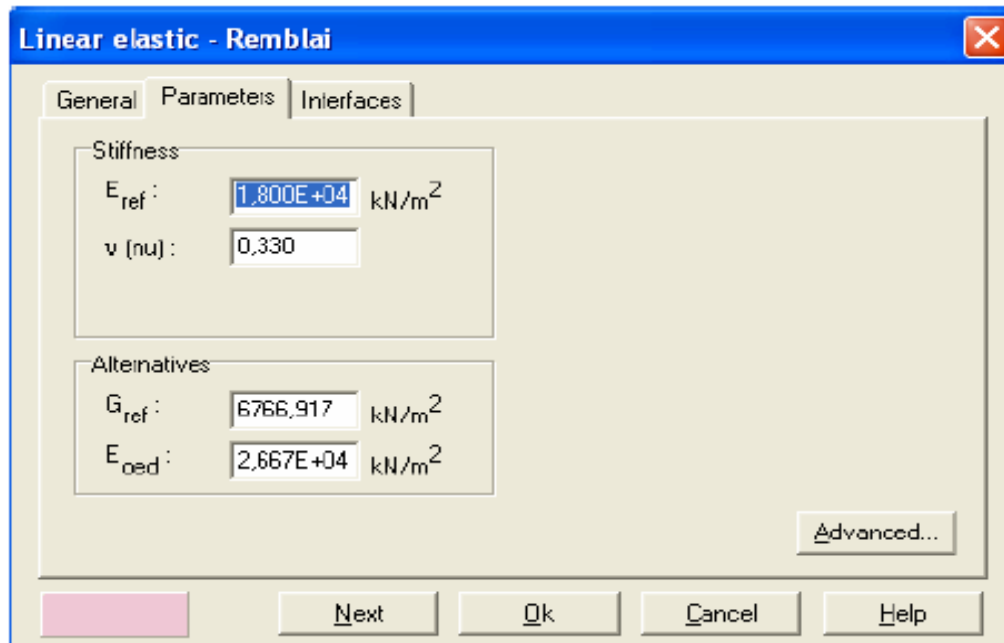


Figure (3-9): Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

Et les paramètres avancés sur la figure 3.10 :

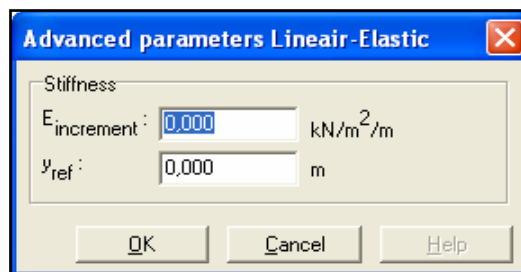


Figure (3-10): Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.

a) Module d'Young (E) :

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il 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 3.11).

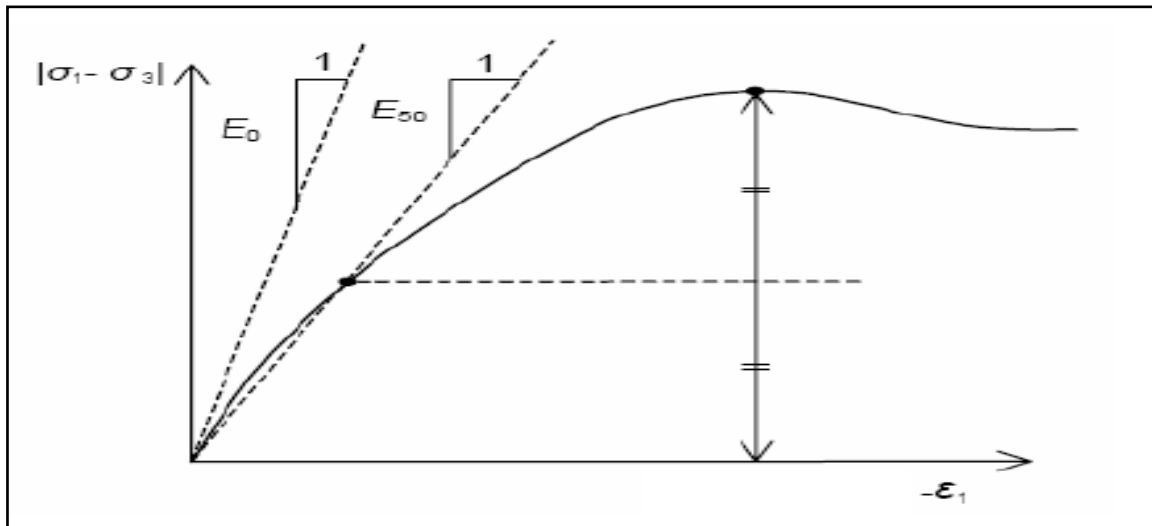


Figure (3-11): Définition du module à 50 % de la rupture.

b) Coefficient de Poisson (ν) :

On conseille une valeur comprise entre 0,2 et 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 interne (φ) :

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

d) Cohésion (c) :

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

$\phi_U = 0$, PLAXIS offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c-depth.

e) Angle de dilatance (ψ) :

À un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. (figure 3.12)

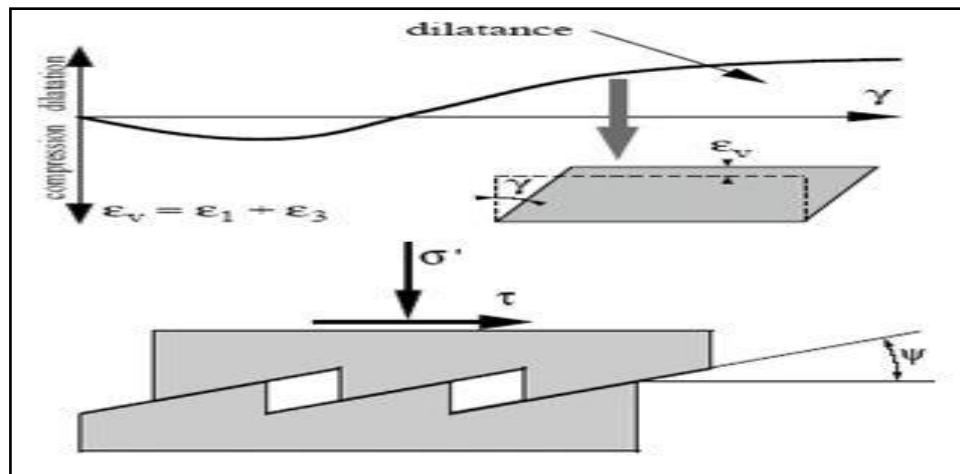


Figure (3-12): Résultats d'essais triaxiaux CD sur un sable dense.

Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

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

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

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique).

III.3.2. 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 3.13).

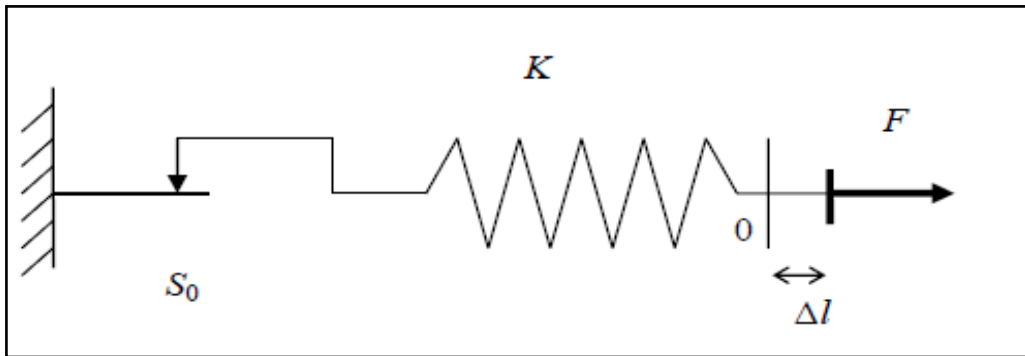


Figure (3-13): Modèle monodimensionnel du comportement élastoplastique.

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la (figure 3.14) pour le modèle élastique parfaitement plastique et dans (figure 3.15) pour le modèle élastoplastique avec écrouissage.

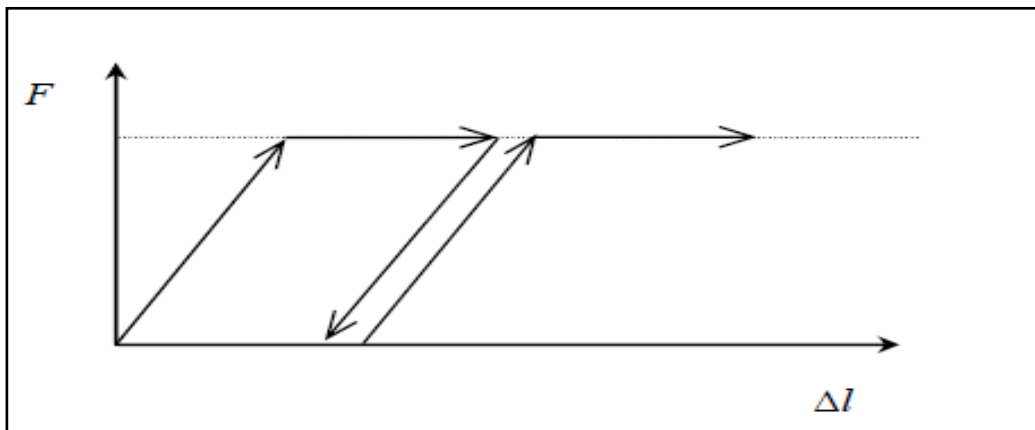


Figure (3-14): Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

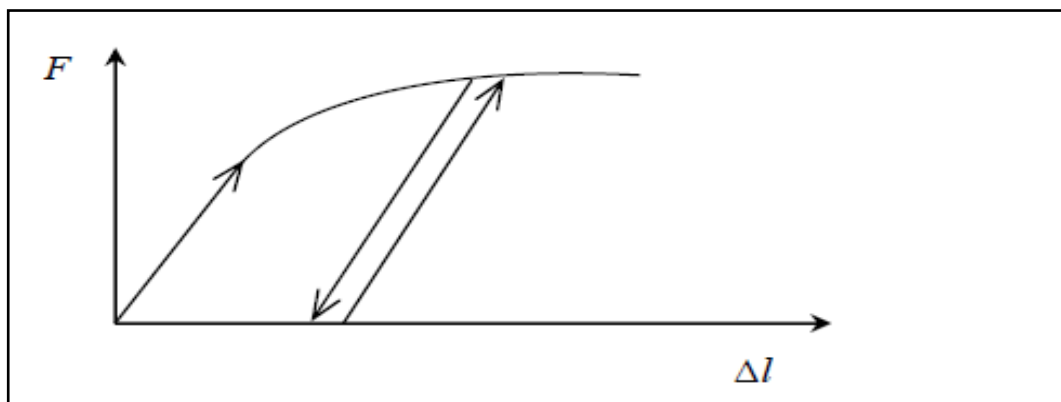


Figure (3-15): Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

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

III.4. Module dynamique du code PLAXIS

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

Dans le programme de calcul, on peut considérer soit une sollicitation harmonique (figure 3.16) soit une sollicitation sismique (Figure 3.17).

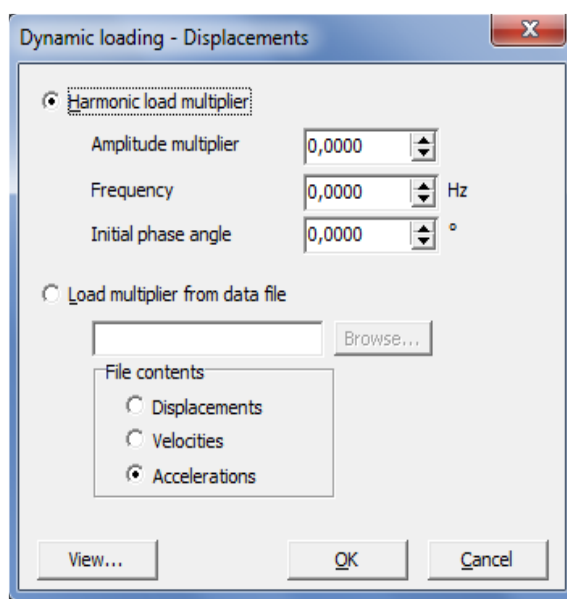


Figure (4-16): sollicitation harmonique.

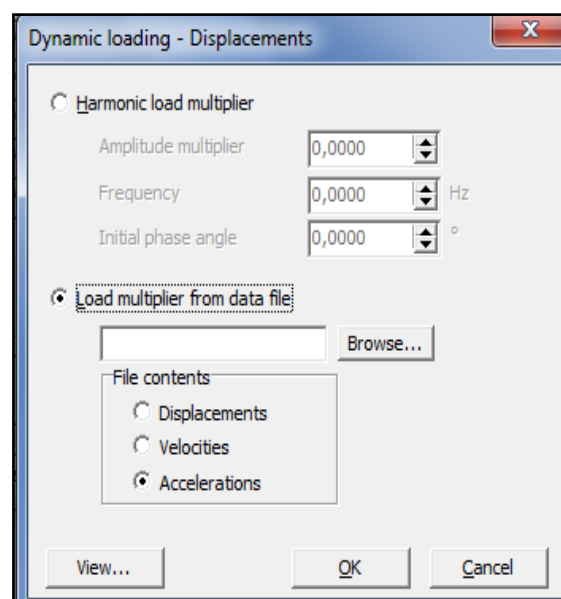


Figure (4-17): sollicitation sismique.

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

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

Dans cette étude on a utilisé « l'accélérogramme 225smc » sont présentés dans le tableau suivant et figurés avec leur fichiers dans l'annexe. (Figure 3.18).

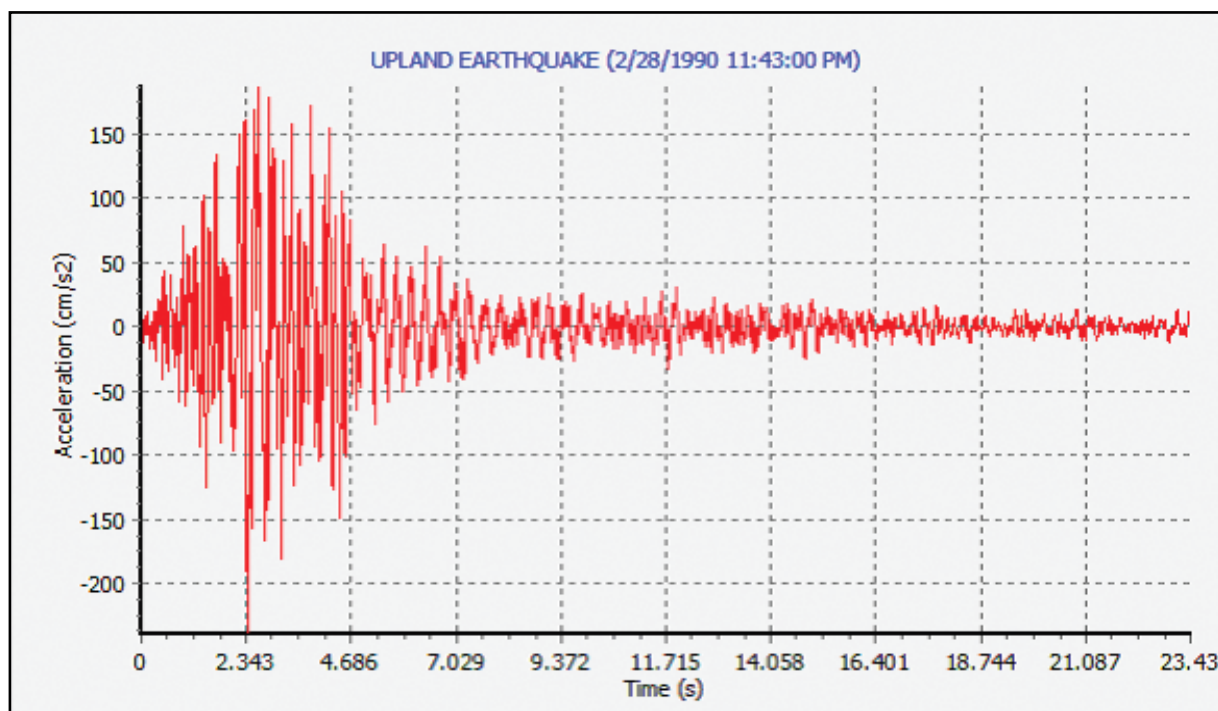


Figure (3-18): Accélérogramme de l'U.S (géological seurvey).

Chapitre IV

Mise en œuvre des calculs

IV.1. Introduction

Cette application numérique a pour but d'étudier la réponse sismique d'une couche de sol homogène en champs libre, c'est-à-dire 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.

Le modèle a été établi et calculé avec le logiciel « PLAXIS ».

IV.2. Définition des données

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

IV.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 4.1). Il est modélisé par un massif homogène sans eau de 50 m de largeur et de 14 m de profondeur.

Trois couches de sol composent la géologie du site :

- Une couche de remblai sableux en surface de 4 m de profondeur ;
- Une couche sable uniforme compacte de 5 m de profondeur ;
- Enfin une couche argile organique de 5 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 modélisés par des frontières absorbantes.

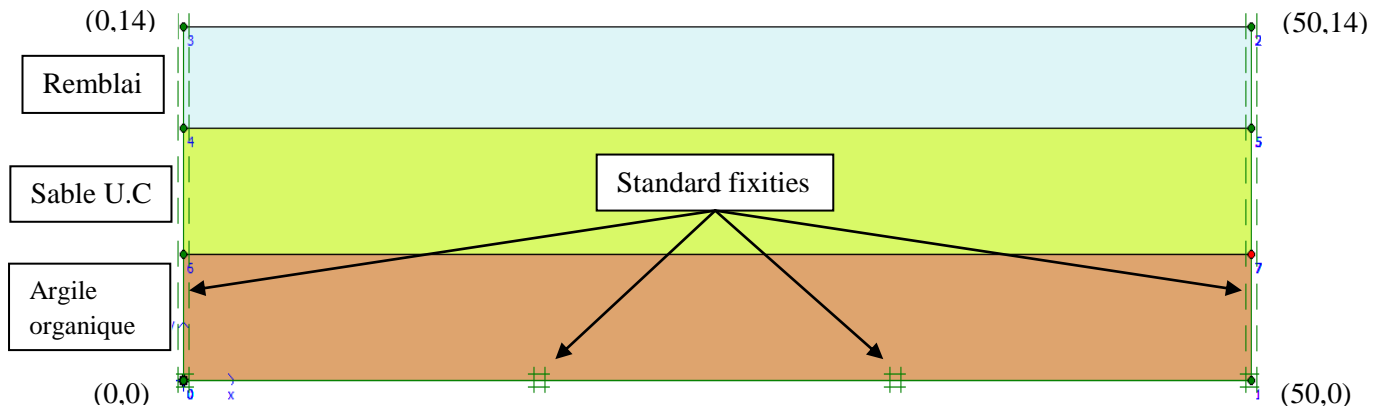


Figure (4-1): Modèle géométrique de profil retenu.

IV.2.2. Caractéristiques des sols

❖ Propriétés de couche de sol:

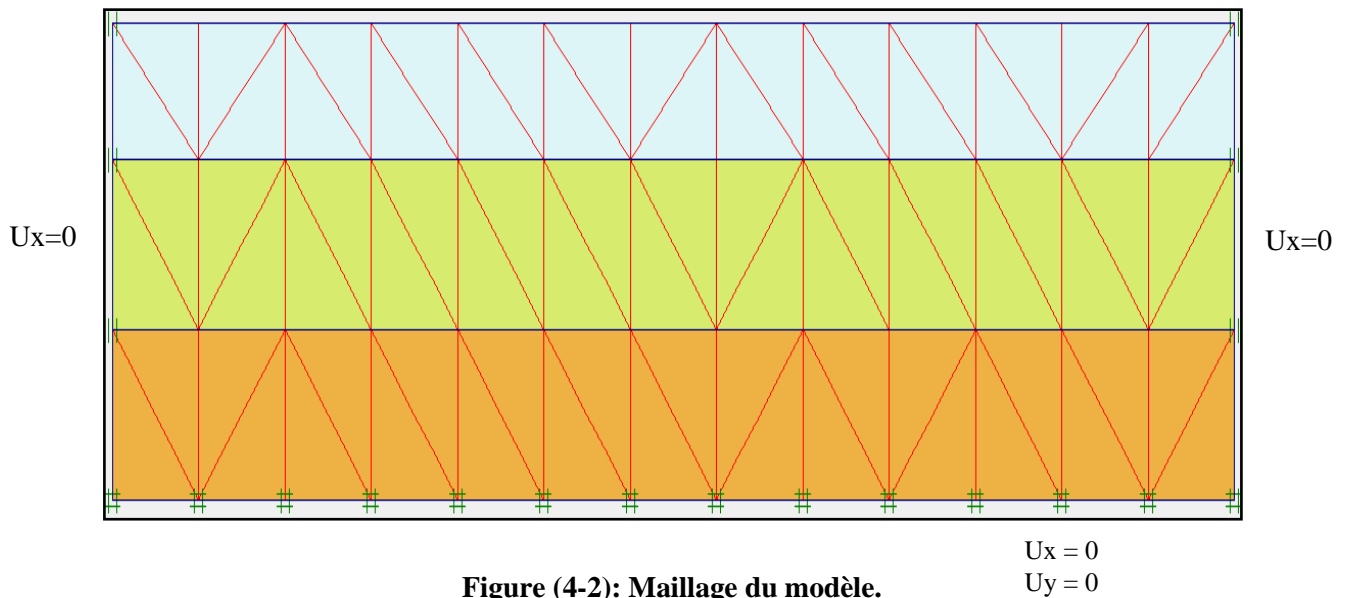
Les propriétés du sol constituant le massif sont résumées dans le tableau 4.1 :

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur		
			Remblai	Sable U.C	Argile
Poids volumique sec	γ_{dry}	KN/m ³	18,5	18	16
Poids volumique humide	γ_{wet}	KN/m ³	20	20	18
Perméabilité horizontale	K_x	m/jour	0,000	0,000	0,000
Perméabilité verticale	K_y	m/jour	0,000	0,000	0,000
Module d'Young	E_{ref}	KN/m ²	300 000	140 000	180 000
Coefficient de Poisson	ν	-	0,4	0,3	0,48
Cohésion	C_{ref}	KN/m ³	0,2	0,2	7
Angle de frottement	ϕ	°	35	36	31
Angle de dilatation	ψ	°	5	6	1
Facteur de rigidité de l'interface	R_{inter}	-	Rigide	Rigide	Rigide

Tableau (4-1): Propriétés du sol constituant le massif.

IV.2.3. Génération du maillage

Le modèle de référence choisi est constitué par des éléments triangulaires à 15 nœuds. Le nombre d'éléments est de 78 éléments et le nombre de nœuds est de 689. On règle la finesse du maillage (*global Coarseness*) sur « *very fine* », (figure 4.2).



IV.2.4 Conditions initiales

Les conditions initiales fixées correspondent à un état de type $K_0 = 1$ (contraintes de type géostatique) (figure 4.3).

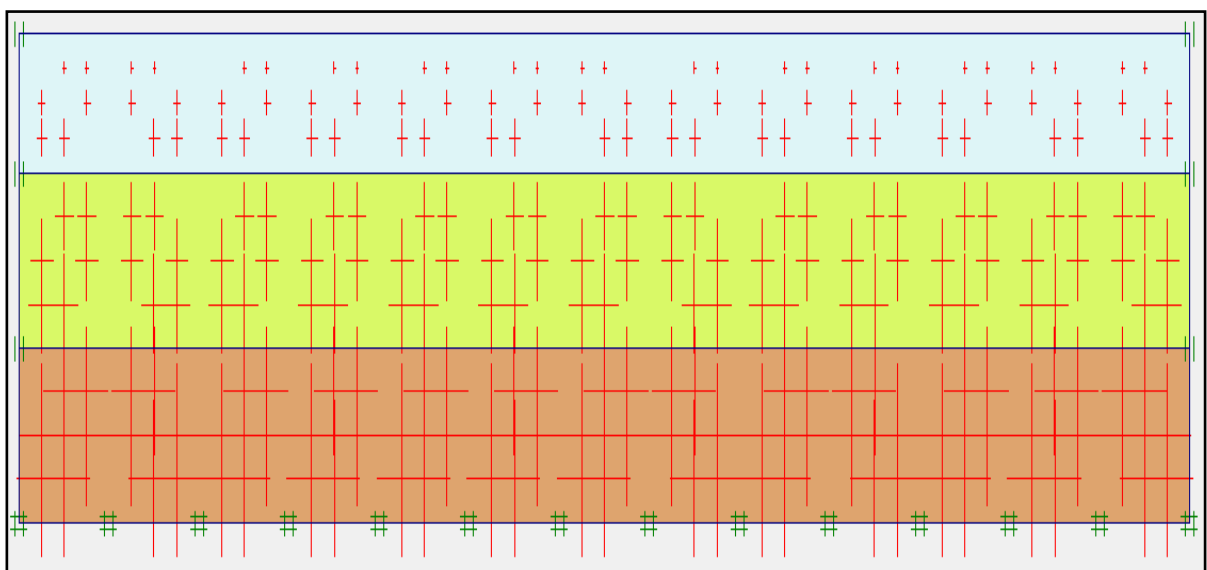


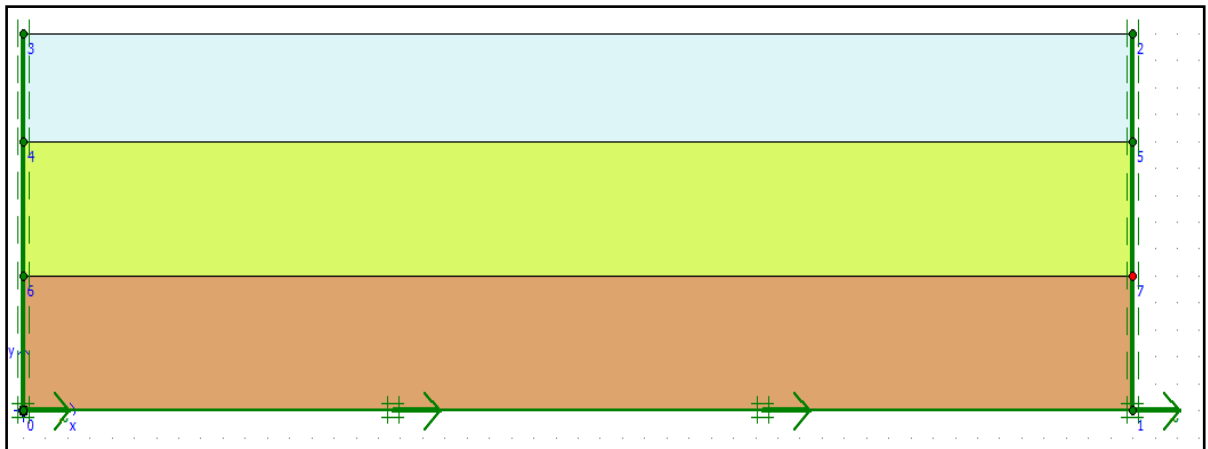
Figure (4-3): Génération des contraintes initiales.

IV.3. Sollicitations sismiques

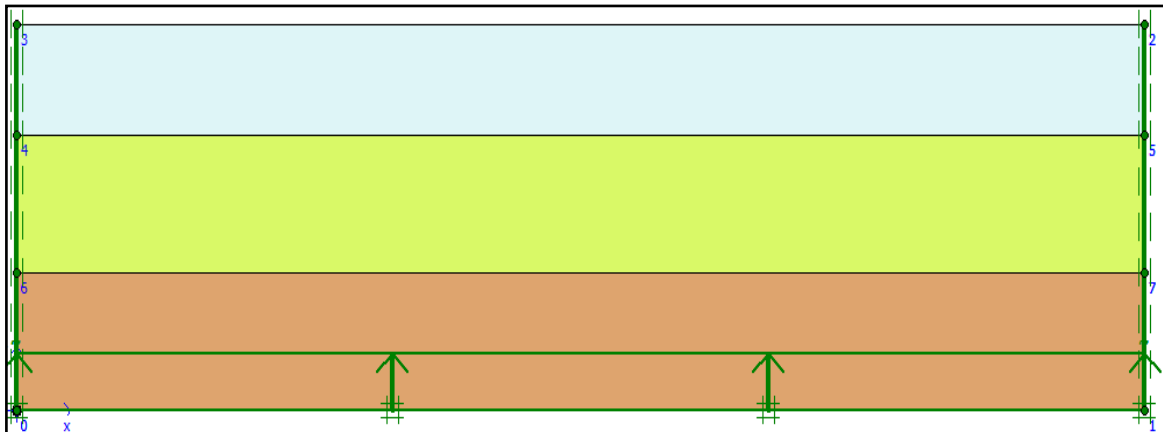
Dans cette application numérique, trois types de sollicitations sismiques sous forme de déplacements imposés à la base du modèle de calcul ont été considérées :

- Une accélération horizontale simulant le mouvement horizontal.
- Une accélération verticale simulant le mouvement vertical.
- Une sollicitation inclinée simulation les combinaisons des deux mouvements précédant.

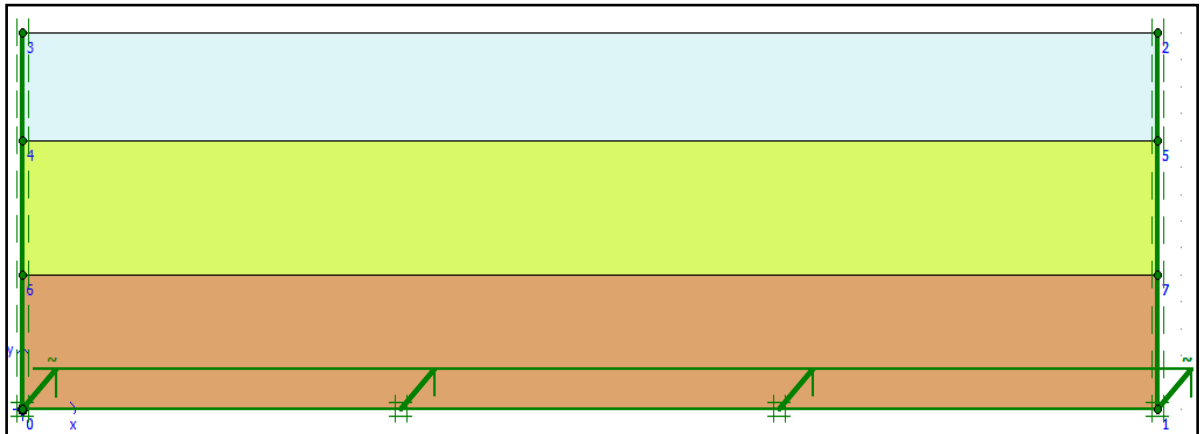
La figure 4.4 présente les trois sollicitations imposées à la base du modèle de calcul.



a. Cas horizontale.



b. cas verticale.



c. cas inclinée.

Figure (4-4): Sollicitations sismiques imposées.

IV.4. Procédure de calcul

Le calcul se fait en deux phases : une phase initiale (phase 0) pour initier les contraintes initiales suivi d’une seconde phase (phase 1) pour l’analyse dynamique (figure 4.5). Le séisme est simulé par une analyse dynamique. Pour analyser les effets du tremblement de terre en détail des déplacements sont remis à zéro au début de cette phase.

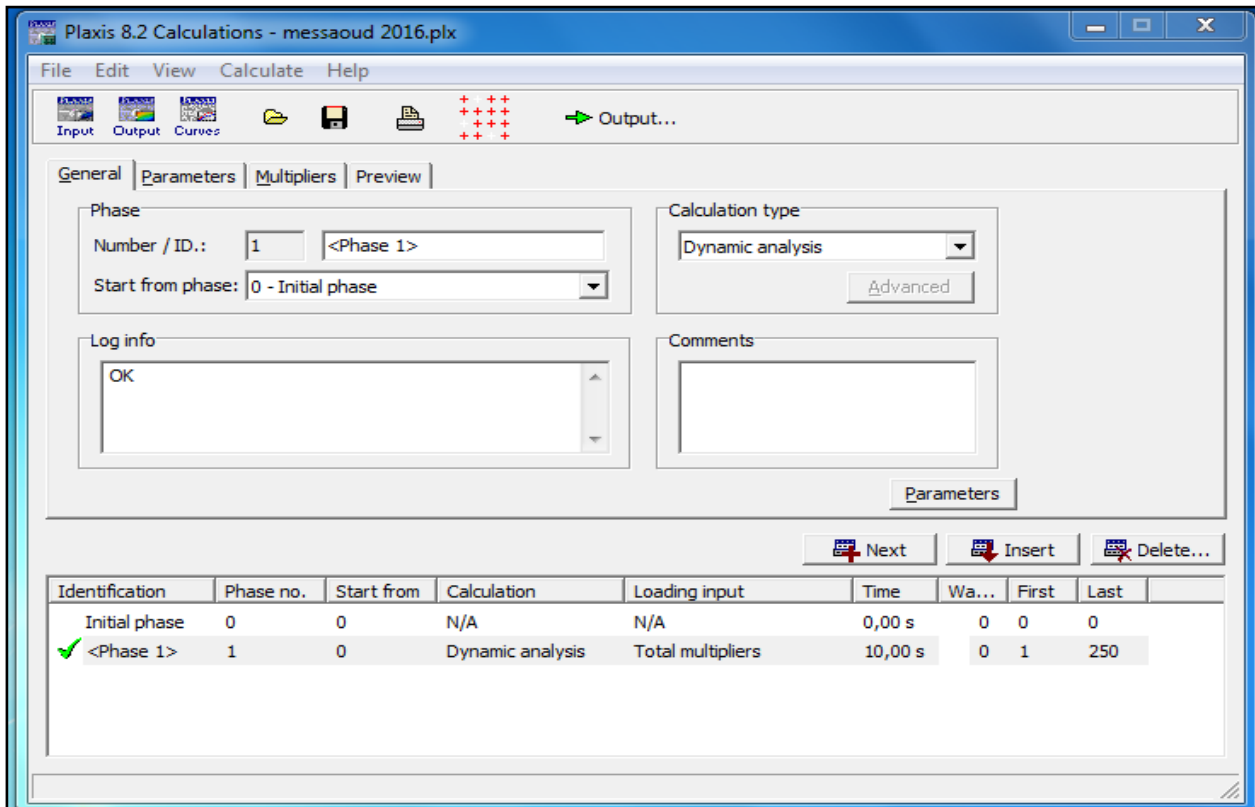



Figure (4-5): Déclarations des phases (Plaxis).

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 de 10 sec dans le chargement a *input*.
 5. sélectionner *Manuel setting* pour le procédé itératif.
 6. Cliquer *Définir*.
 7. sélectionner : *multiplier*.
 8. Cliquer  à côté du Σ - *Mdisp multiplier*.
 9. sélectionner *l'option load multiplier from data file*.
 10. Sélectionner l'accélérogramme défini dans le fichier approprié de SMC (225A.smc). Ce dossier peut être trouvé dans le répertoire d'installation du calcul PLAXIS.
 11. Cliquer OK.
 12. Sélectionner les points A, B, C et D pour tracer les courbes de déplacement, vitesse et accélération (figure 4.6), puis appuyant sur *calcul*. La fenêtre des calculs affichée sur la figure 4.7 va l'afficher tout au long des calculs.

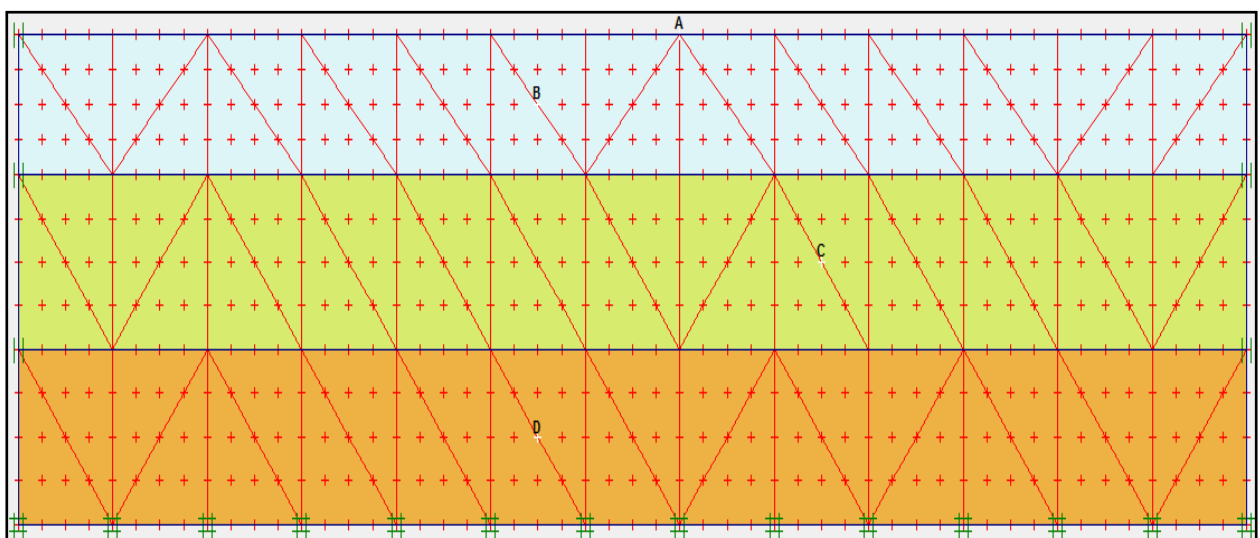


Figure (4-6): Position des points choisis sur le profil.

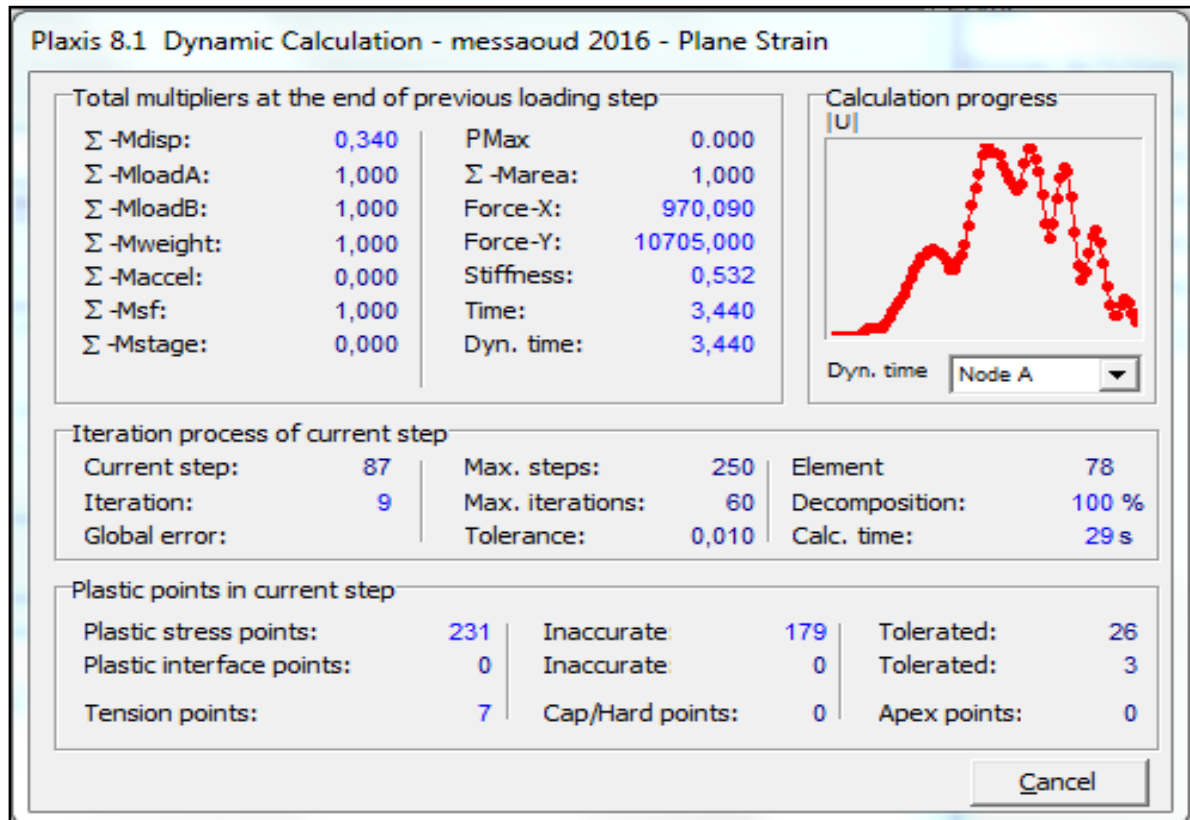


Figure (4-7): Procédure de calcul (Plaxis).

On trace les points A, B, C et D dans le profile pour obtenir les courbes, Les coordonnées des points présentés dans le tableau 4.2.

points	A	B	C	D
X (m)	25,960	21,150	32,690	21,150
Y(m)	14,000	12,000	7.500	2,500

Tableau (4-2): Coordonnées des points sélectionnés pour l'édition des résultats des calculs.

Résultats des calculs et interprétation

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

IV.5. Résultats des calculs

IV.5.1. Cas d'un déplacement horizontal imposé à la base (1^{er} cas)

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

a) maillage déformé

Le maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la figure 4.8.

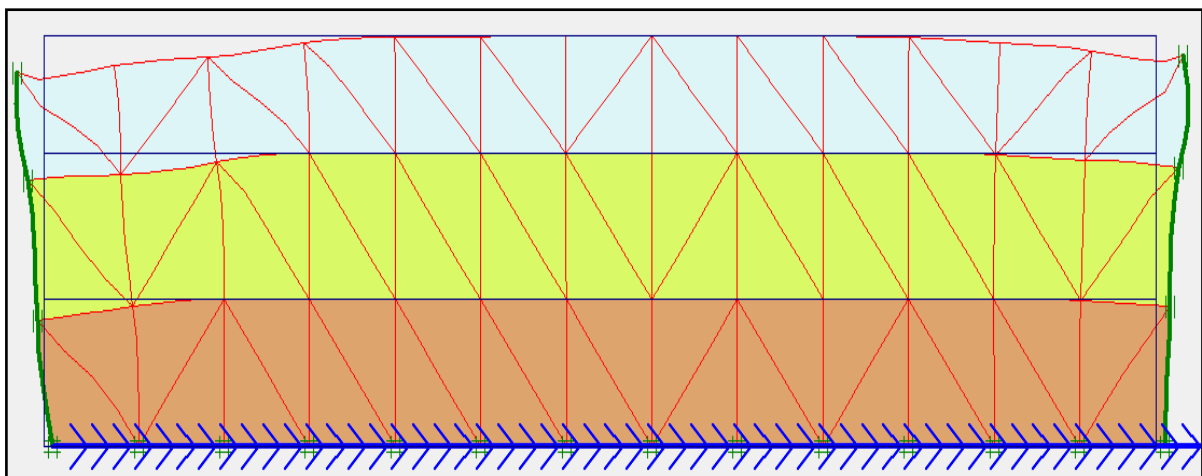


Figure (4-8): Maillage Déformé du profil (1^{er} cas).

b) contraintes

Les isovaleurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure 4.9.

On note une contrainte initiale égale à : 351,22 KN /m²

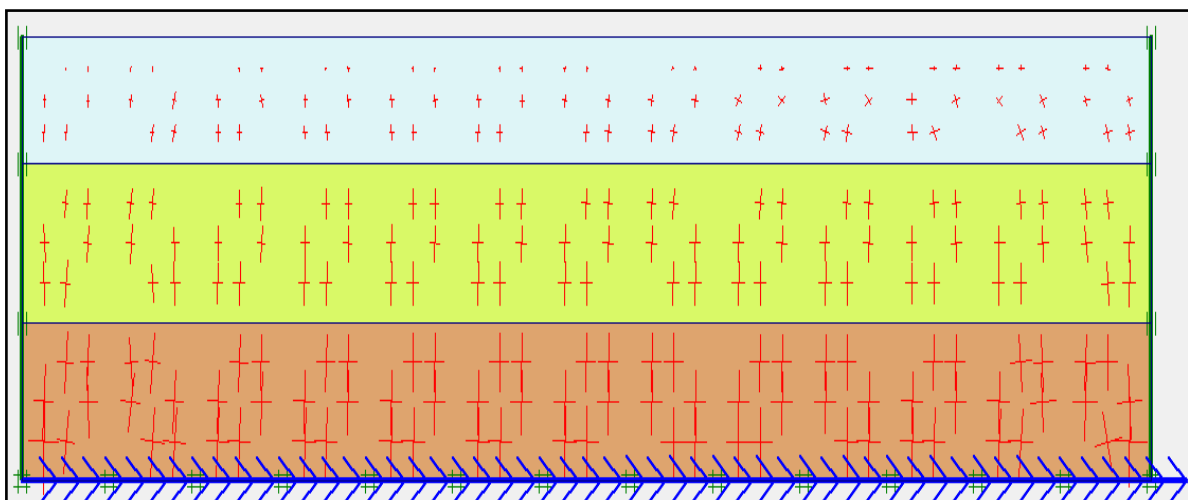


Figure (4-9): Isovaleurs des Contraintes (1^{er} cas).

c) déplacements

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure 4.10. On note un déplacement maximal égal à : $94,74.10^{-3}$ m.

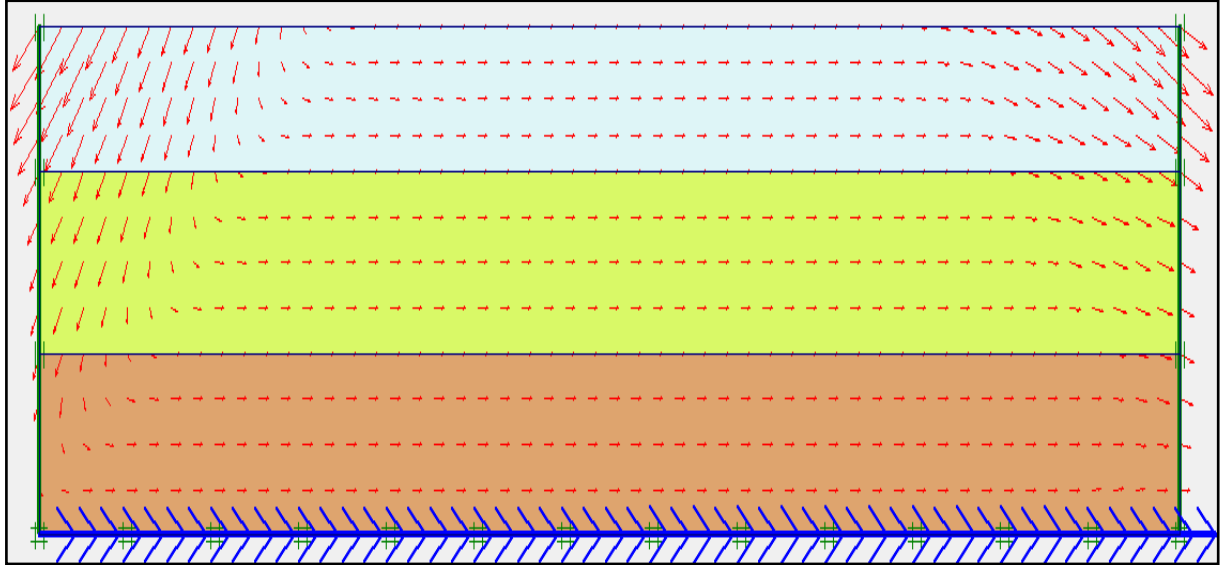


Figure (4-10): Vecteurs déplacements (1^{er} cas).

d) courbes déplacements-temps

- **L'axe xx :** (figure 4.11).

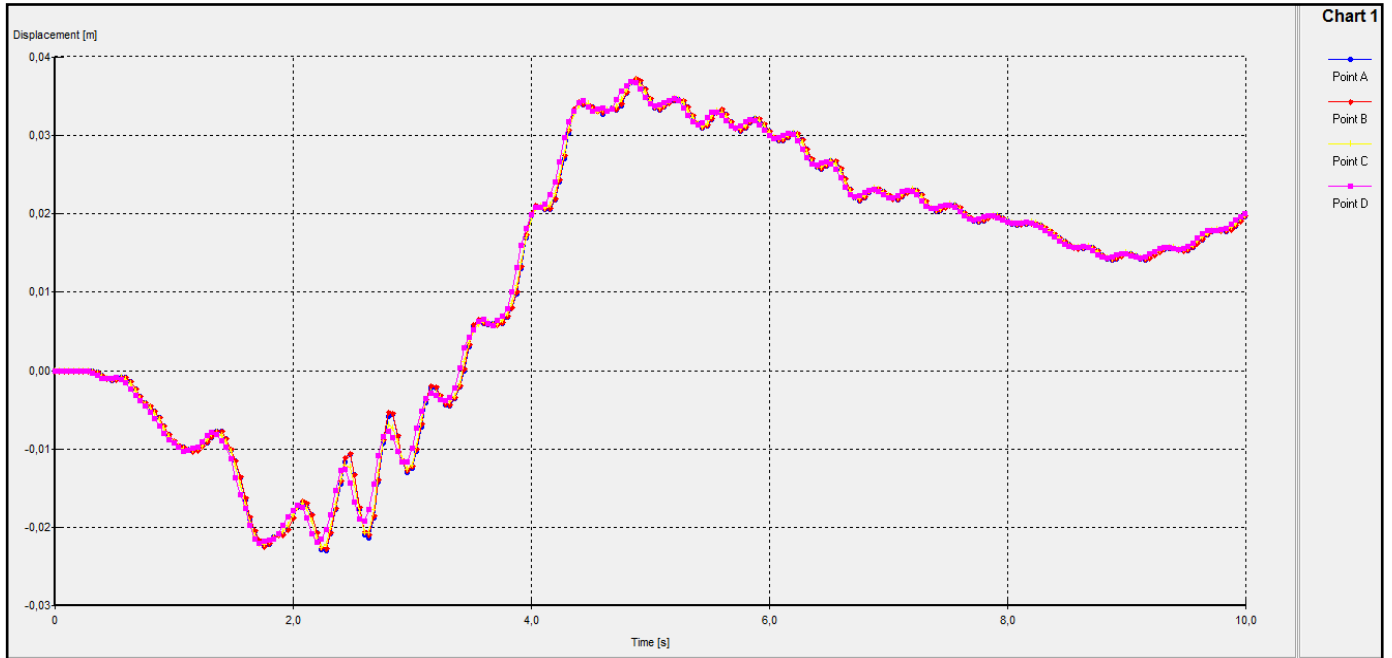


Figure (4-11): Déplacements des points en fonction de temps, (1^{er} cas).

- **L'axe YY :** (figure 4.12).

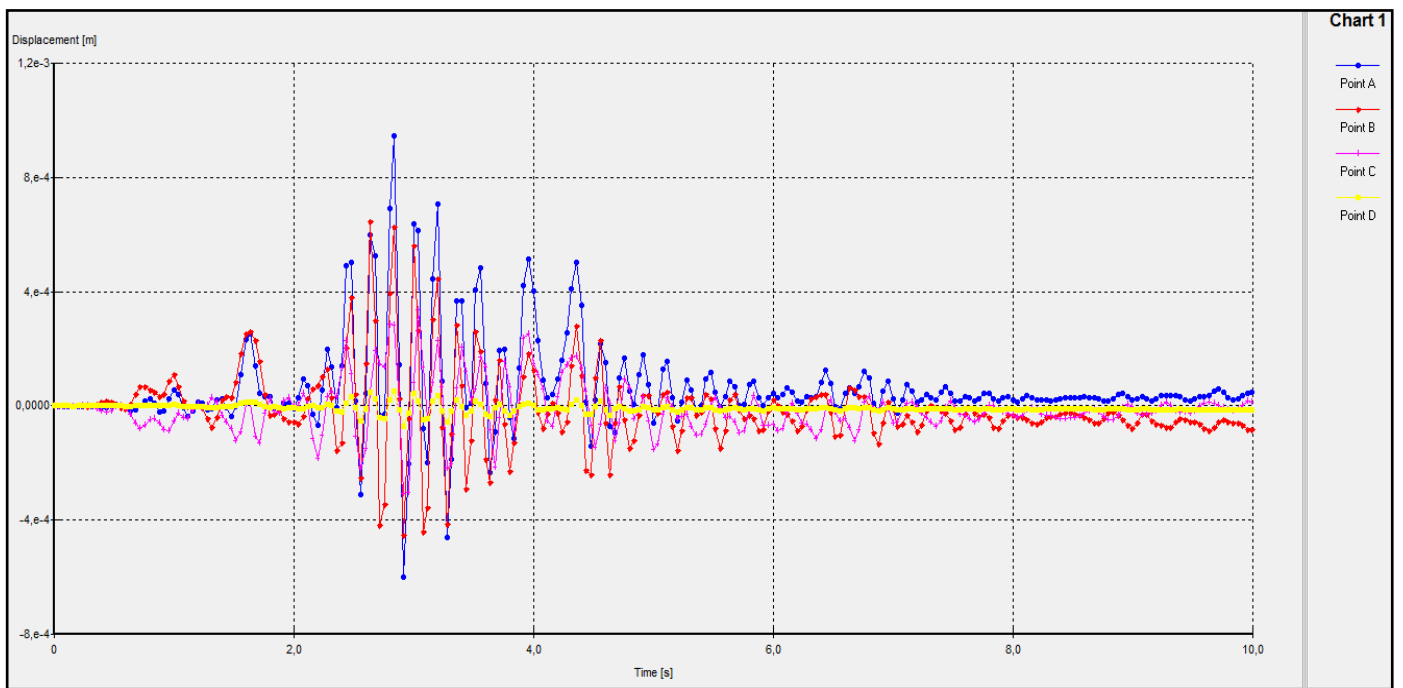


Figure (4-12): Déplacements des points en fonction de temps, (1^{er} cas).

e) courbes vitesses-temps

- L'axe XX : (figure 4.13).

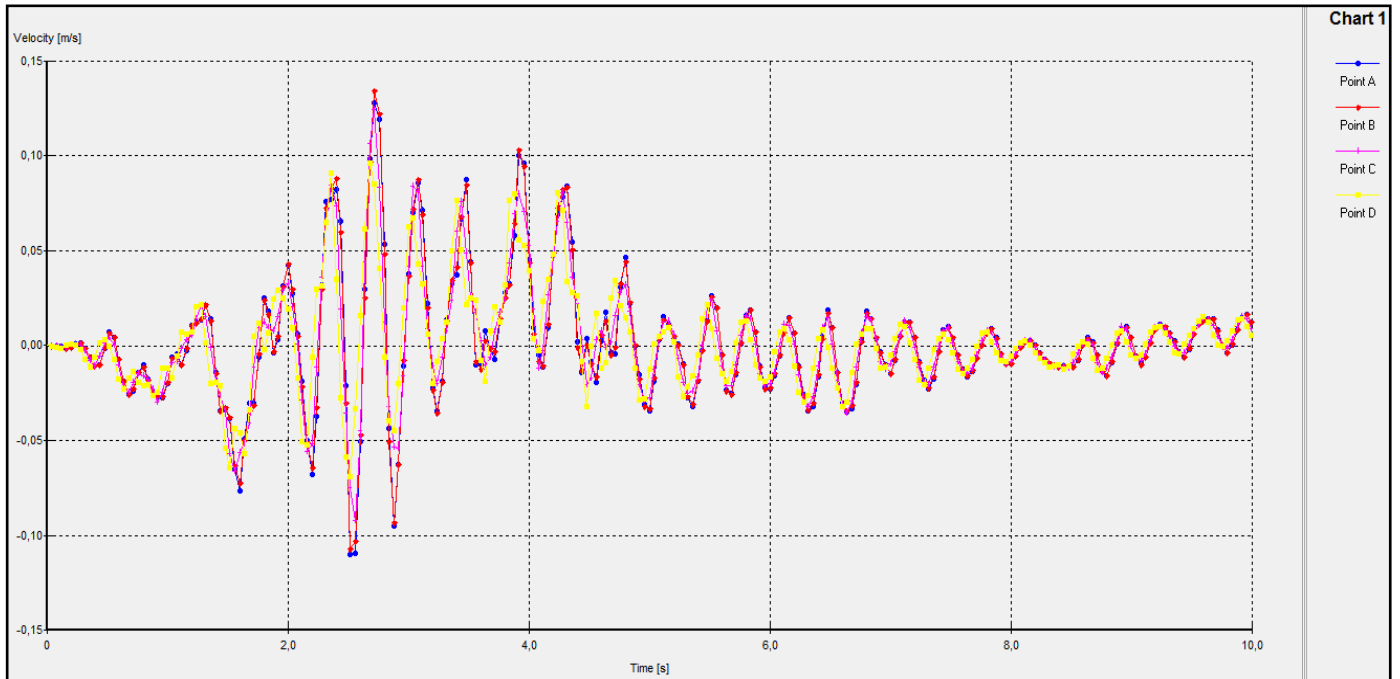


Figure (4-13): Vitesses des points en fonction de temps, (1^{er} cas).

- L'axe YY : (figure 4.14).

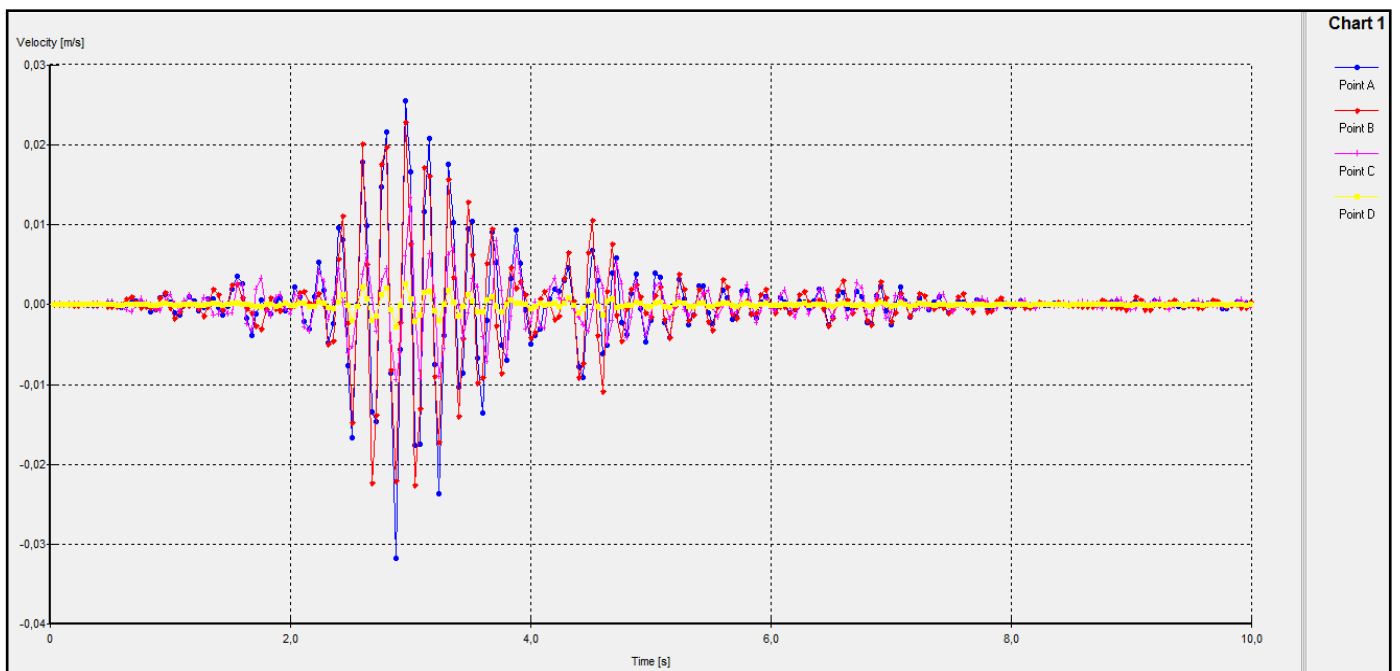


Figure (4-14): Vitesses des points en fonction de temps, (1^{er} cas).

f) courbes accélérations-temps

- L'axe XX : (figure 4.15).

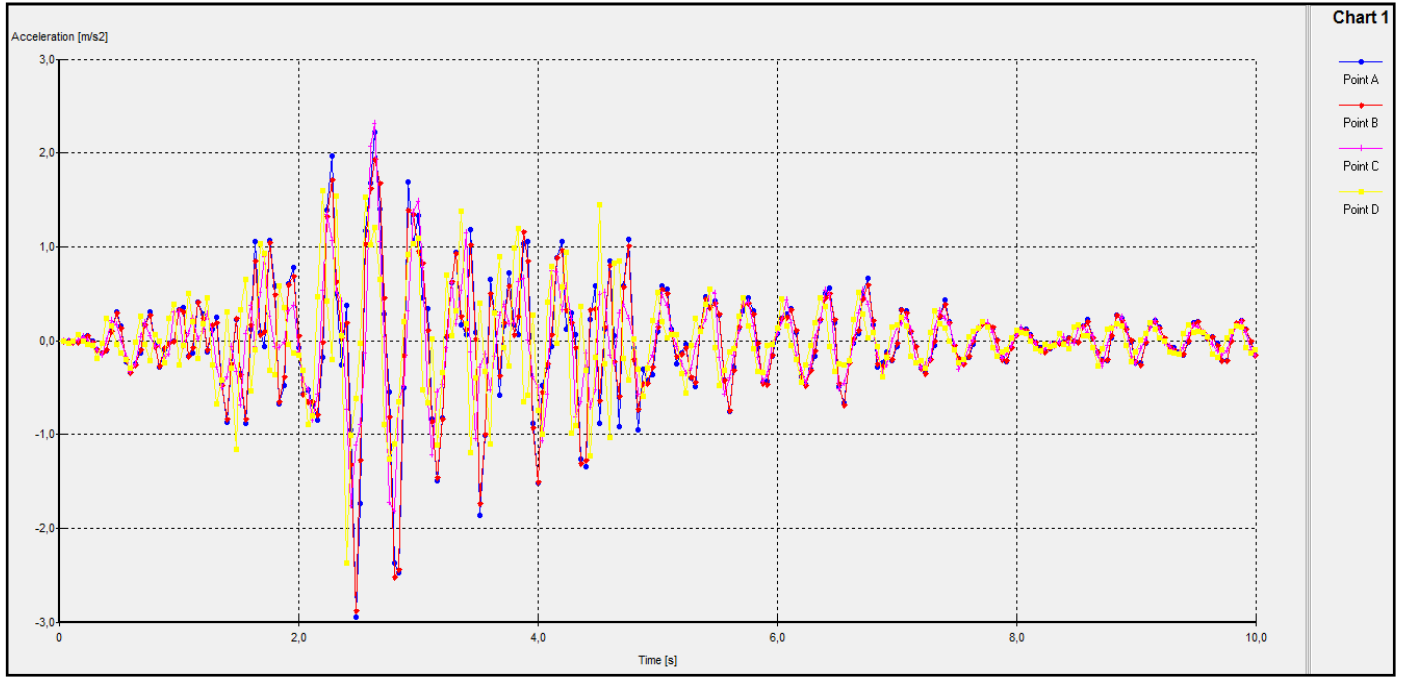


Figure (4-15): Accélérations des points en fonction de temps, (1^{er} cas).

- L'axe YY : (figure 4.16).

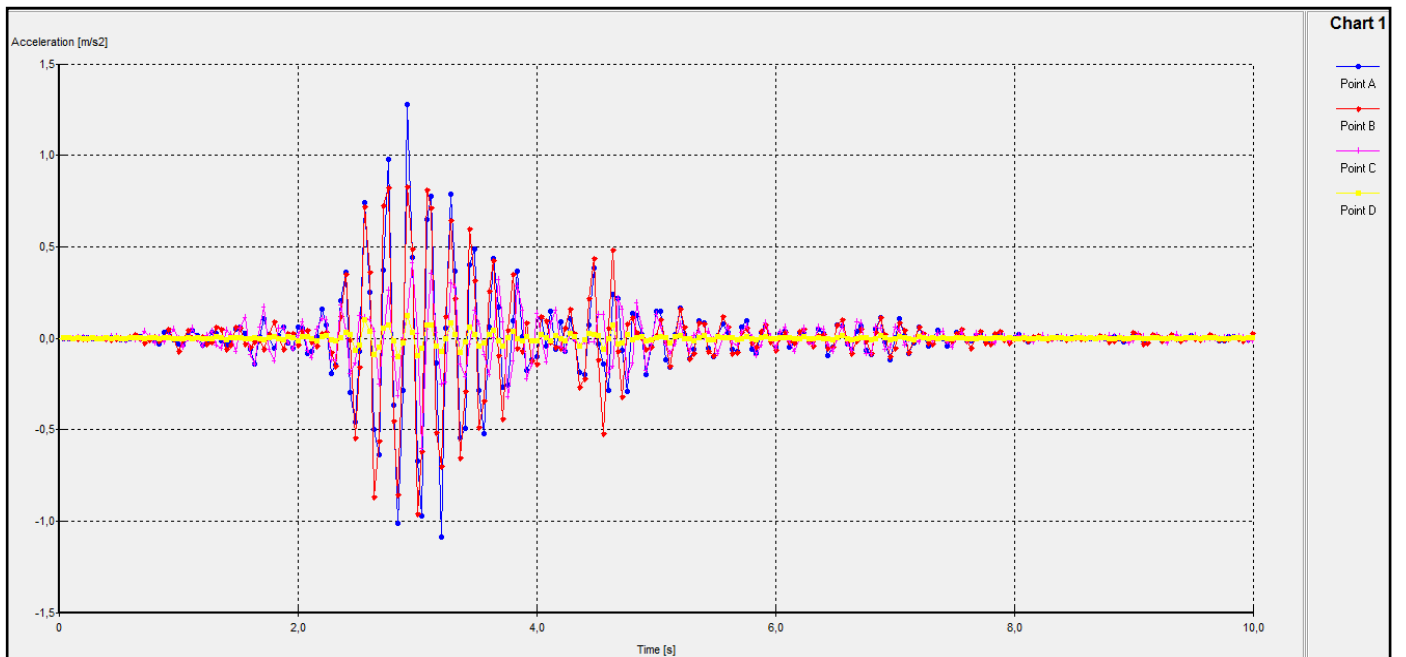


Figure (4-16): Accélérations des points en fonction de temps (1^{er} cas).

g) courbe force-temps

- L'axe XX : (figure 4.17).

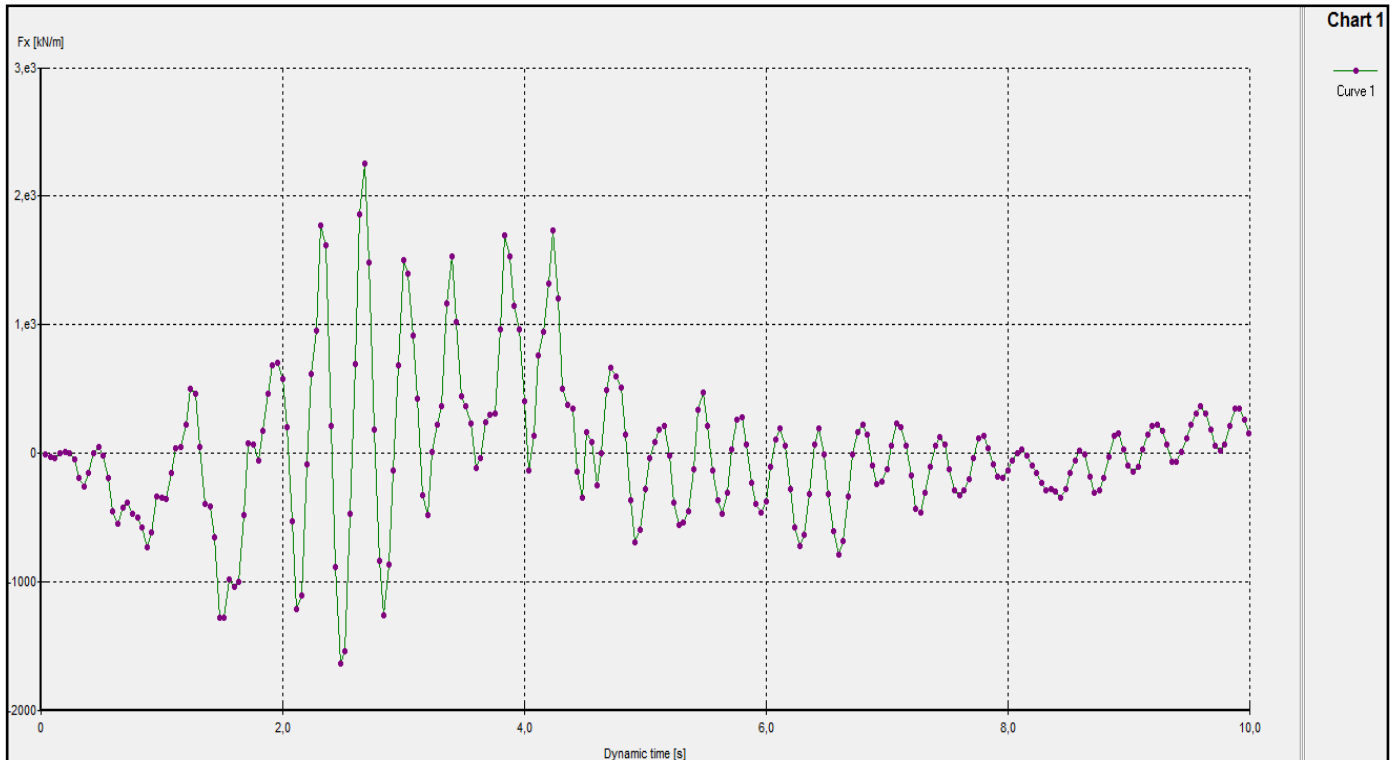


Figure (4-17): La force en fonction de temps, (1^{er} cas).

h) synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau 4.3. considérés

points		A	B	C	D
Déplacement (m)	XX	0,037	0,037	0,037	0,037
	YY	$9,457 \cdot 10^{-4}$	$6,431 \cdot 10^{-4}$	$3,347 \cdot 10^{-3}$	$7,213 \cdot 10^{-5}$
Vitesse (m/s)	XX	0,128	0,134	0,124	0,096
	YY	0,032	0,023	0,013	$2,778 \cdot 10^{-3}$
Accélération (m/s ²)	XX	2,951	2,876	2,314	2,368
	YY	1,280	0,958	0,604	0,126

Tableau (4-3): Valeurs maximal aux points considérés.

IV.5.2. Cas d'un déplacement vertical imposé à la base (2^{ème} cas)

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

a) maillage déformé

Le maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la figure 4.18.

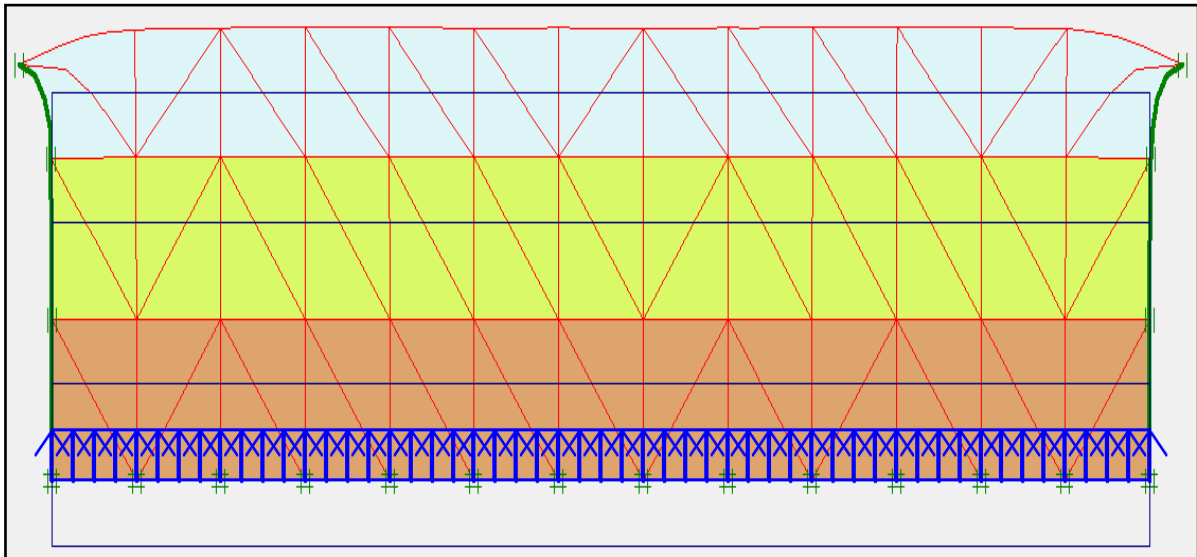


Figure (4-18): Maillage Déformé du profil (2^{ème} cas).

b) contraintes

Les isovaleurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure 4.19.

On note une contrainte initiale égale à : 245,78 KN /m²

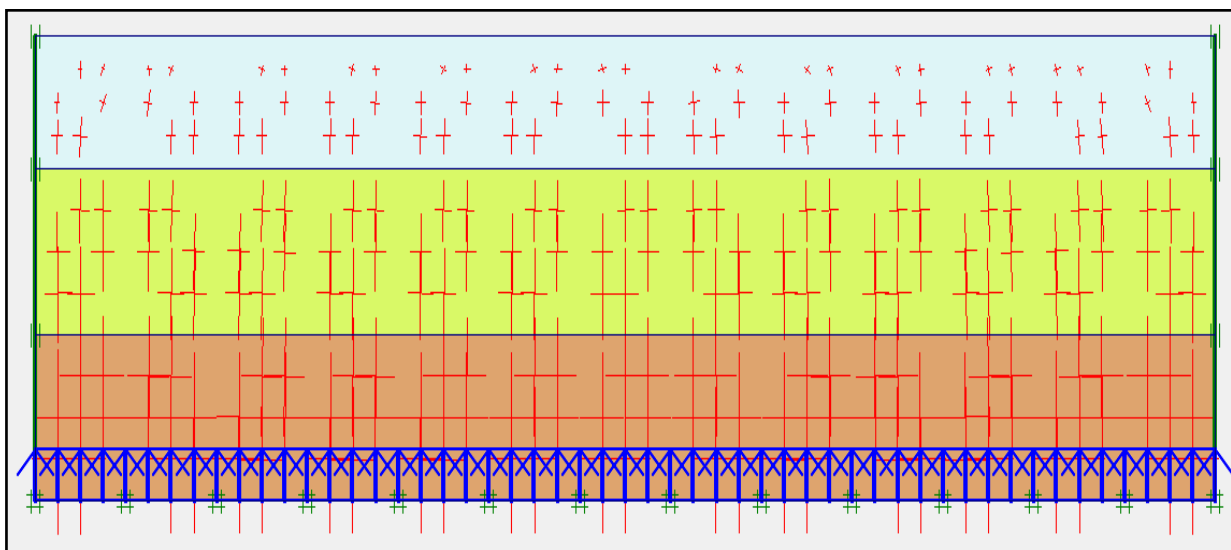


Figure (4-19): Isovaleurs des Contraintes (2^{ème} cas).

c) déplacements

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure 4.20. On note un déplacement maximal égal à : $20,14 \cdot 10^{-3}$ m.

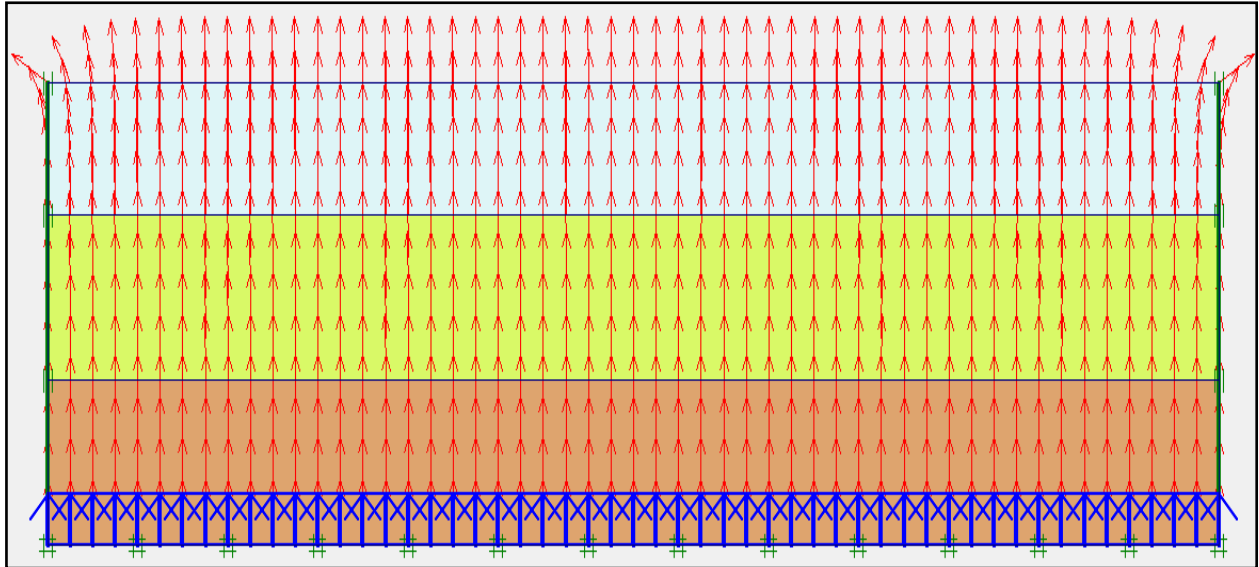


Figure (4-20): Vecteurs déplacements (2^{ème} cas).

d) courbes déplacements-temps

- **L'axe XX :** (figure 4.21).

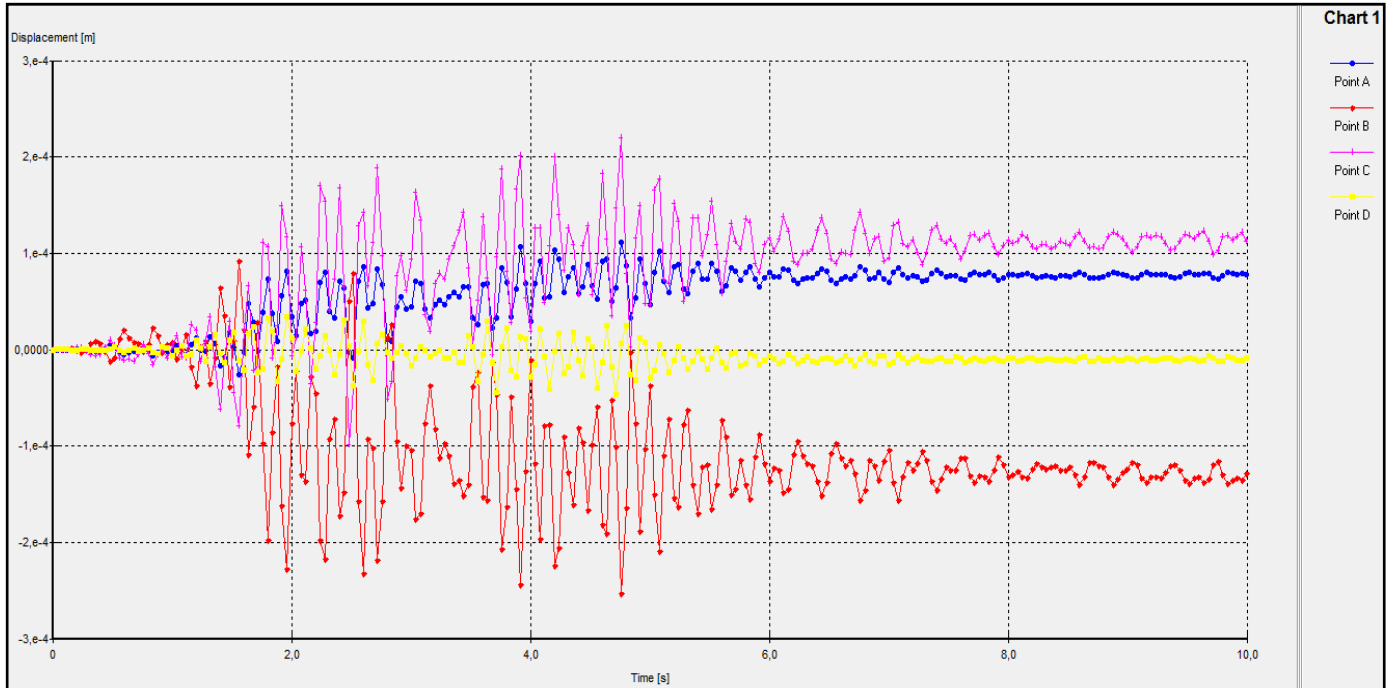


Figure (4-21): Déplacements – temps-axe xx, (2^{ème} cas).

- **L'axe YY :** (figure 4.22).

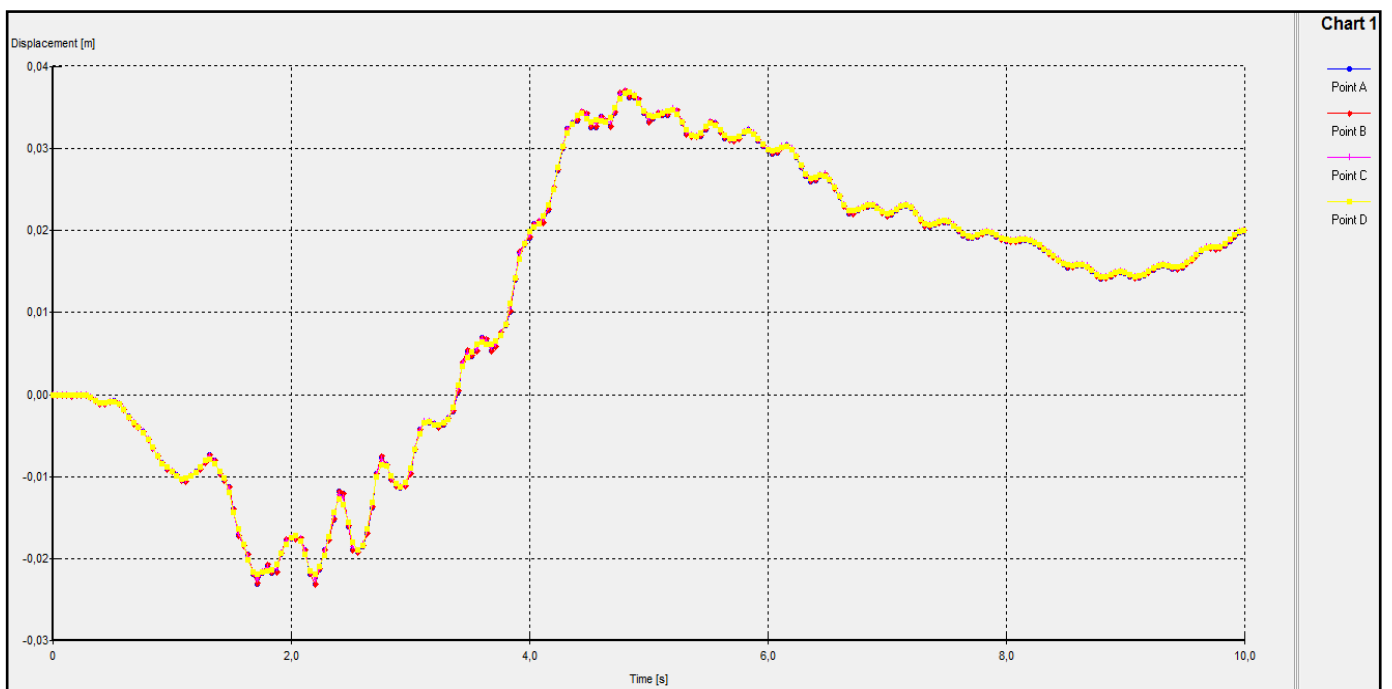


Figure (4-22): Déplacements – temps-axe yy, (2^{ème} cas).

e) courbes vitesses-temps

- **L'axe XX :** (figure 4.23).

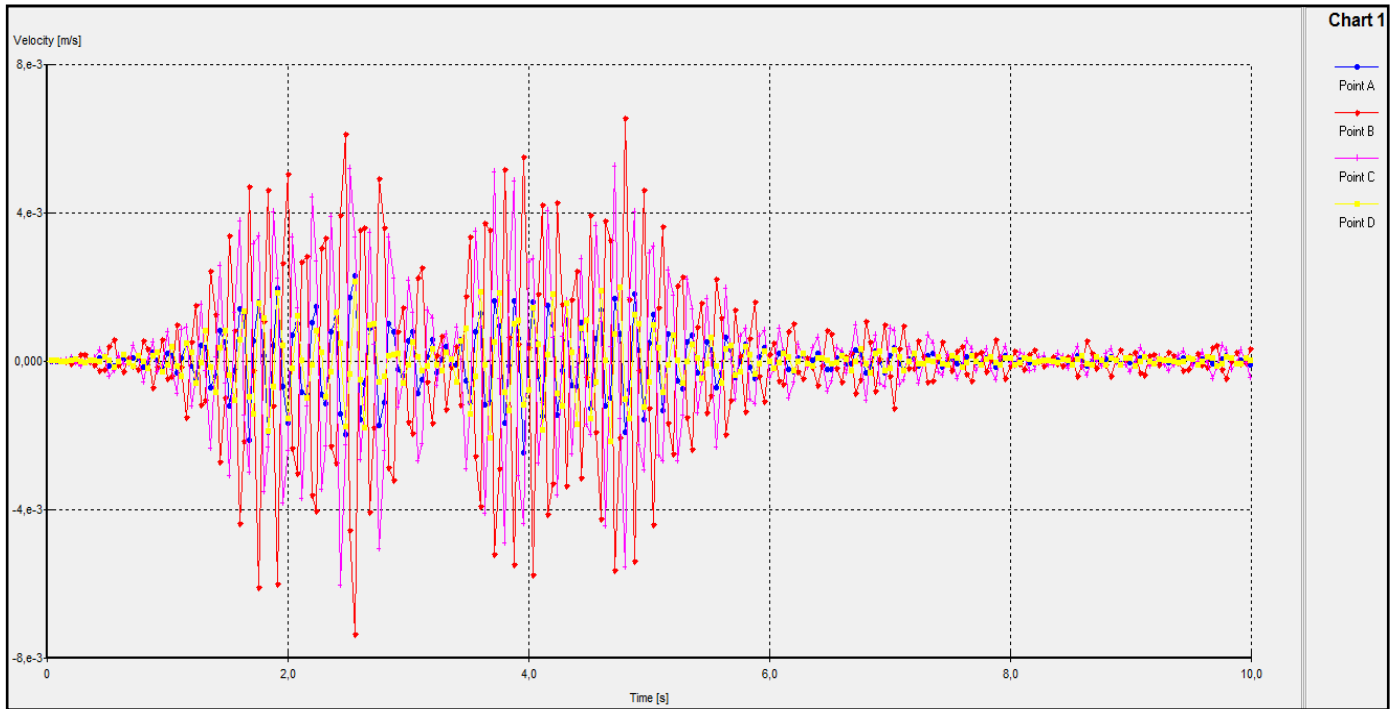


Figure (4-23): Vitesses – temps-axe xx, (2^{ème} cas).

- **L'axe YY :** (figure 4.24).

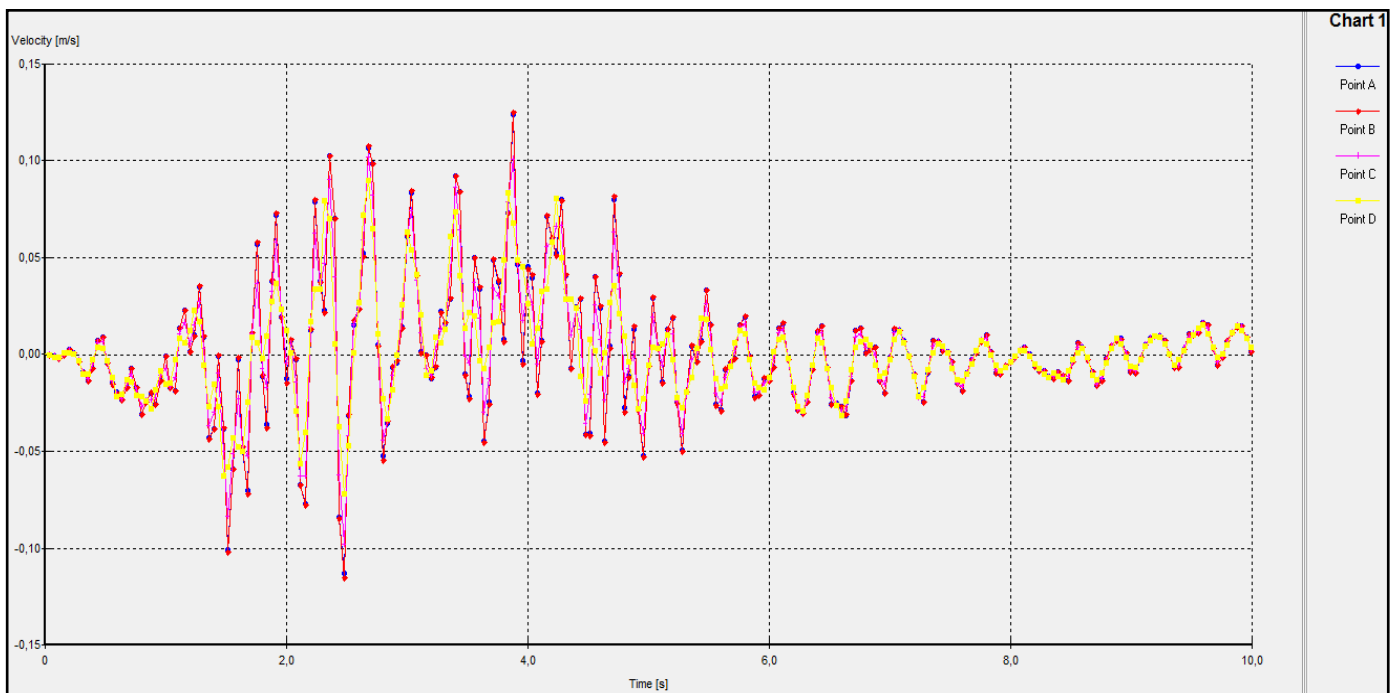


Figure (4-24): Vitesses – temps-axe yy, (2^{ème} cas).

f) courbes accélérations-temps

- L'axe XX : (figure 4.25).

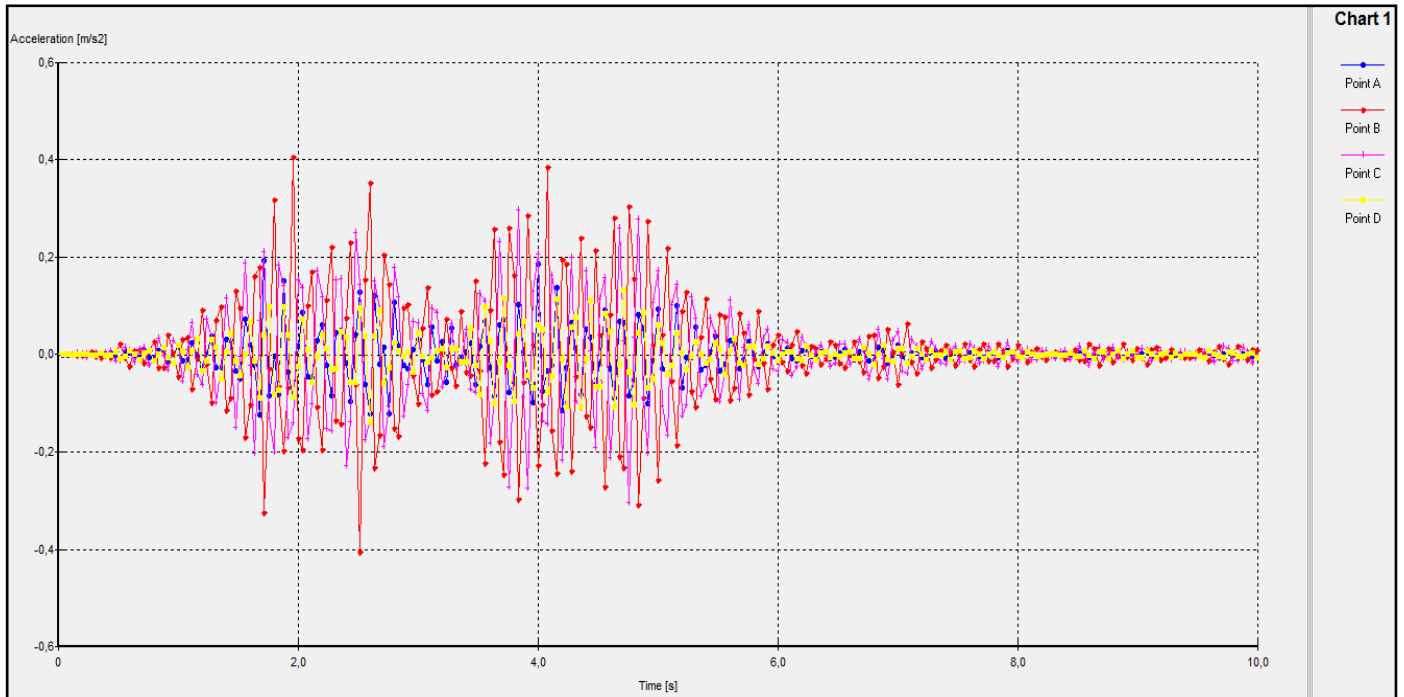


Figure (4-25): Accélérations – temps-axe xx, (2^{ème} cas).

- L'axe YY : (figure 4.26).

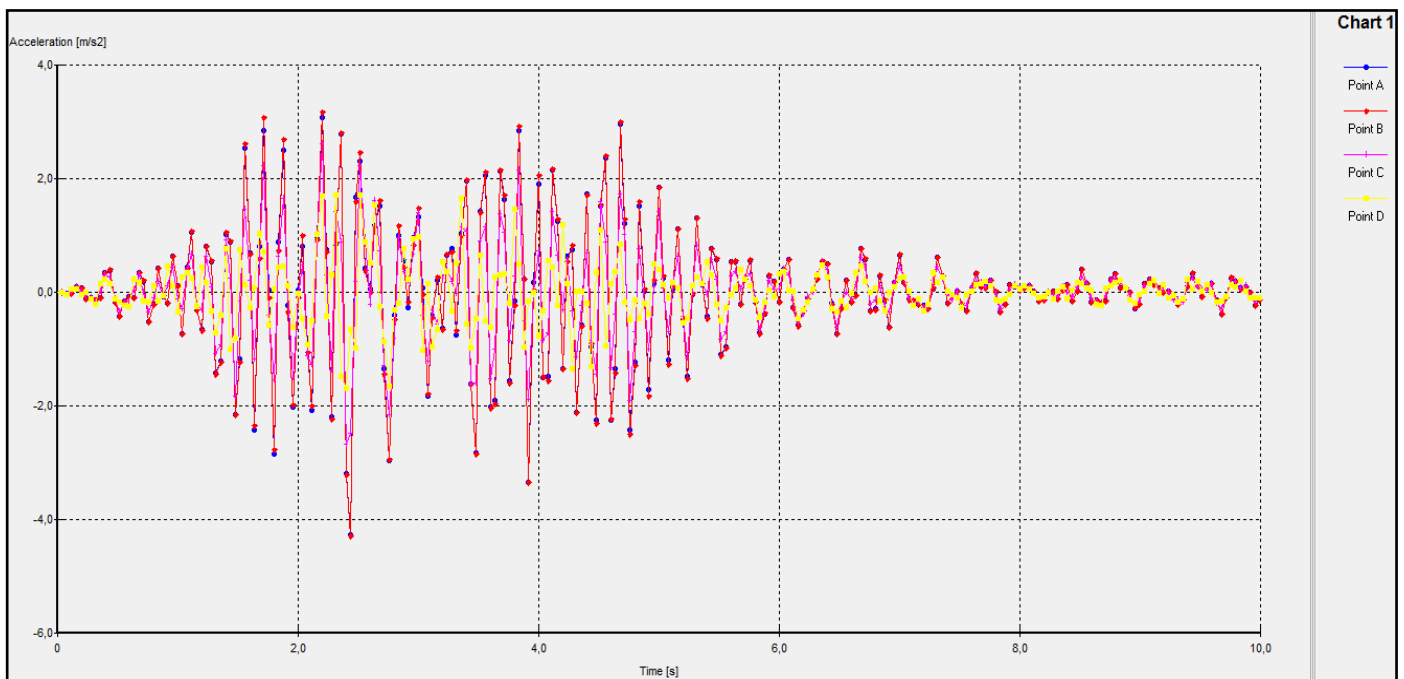


Figure (4-26): Accélérations – temps-axe yy, (2^{ème} cas).

g) courbe force-temps

- L'axe YY : (figure 4.27).

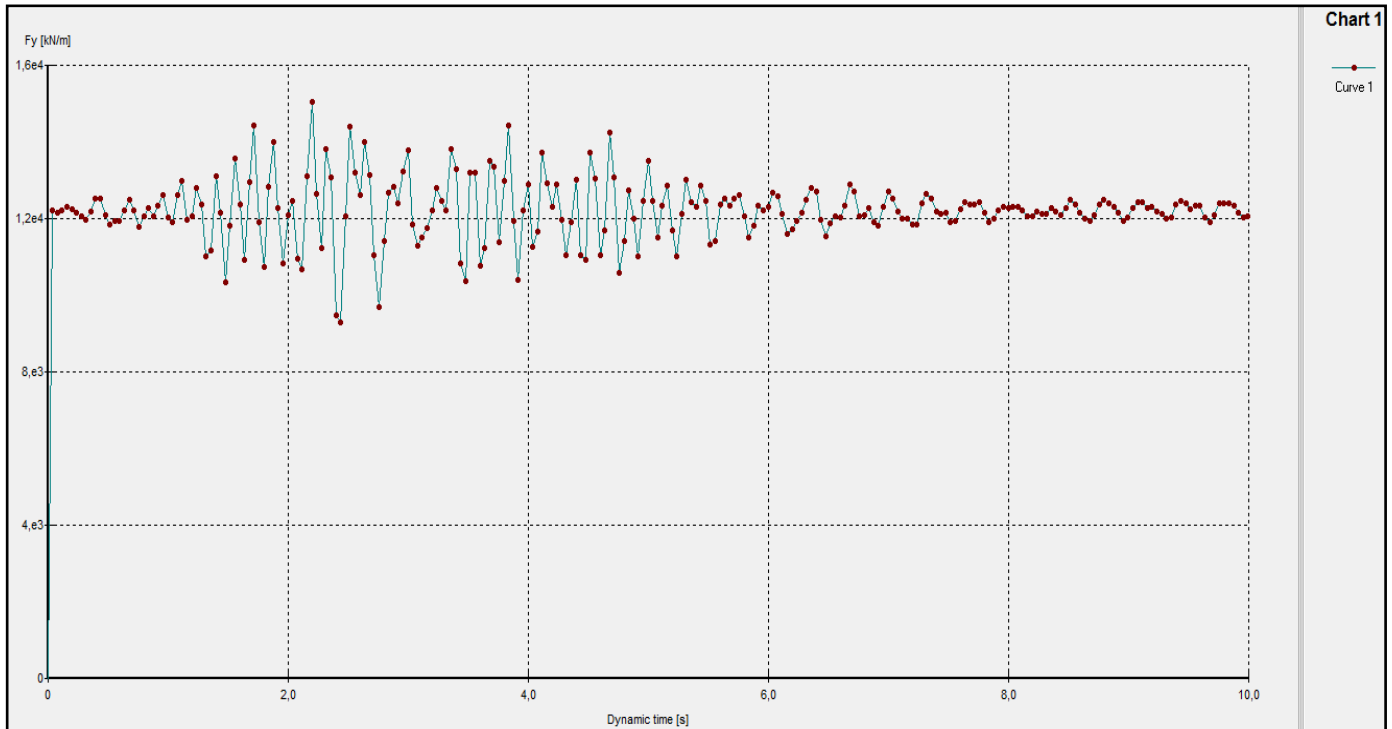


Figure (4-27): La force – temps, (2^{ème} cas).

h) synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau 4.4 considérés

points		A	B	C	D
Déplacement (m)	XX	$1,111.10^{-4}$	$2,533.10^{-4}$	$2,201.10^{-4}$	$4,647.10^{-5}$
	YY	0,037	0,037	0,037	0,037
Vitesse (m/s)	XX	$2,475.10^{-3}$	$7,361.10^{-3}$	$6,036.10^{-3}$	2,168
	YY	0,124	0,125	0,102	0,09
Accélération (m/s ²)	XX	0,193	0,406	0,304	0,137
	YY	4,284	4,297	2,674	1,7

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

IV.5.3. Cas d'un déplacement inclinée imposé à la base (3^{ème} cas)

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

a) maillage déformé

Le maillage déformé du modèle de calcul est représenté sur la figure 4.28.

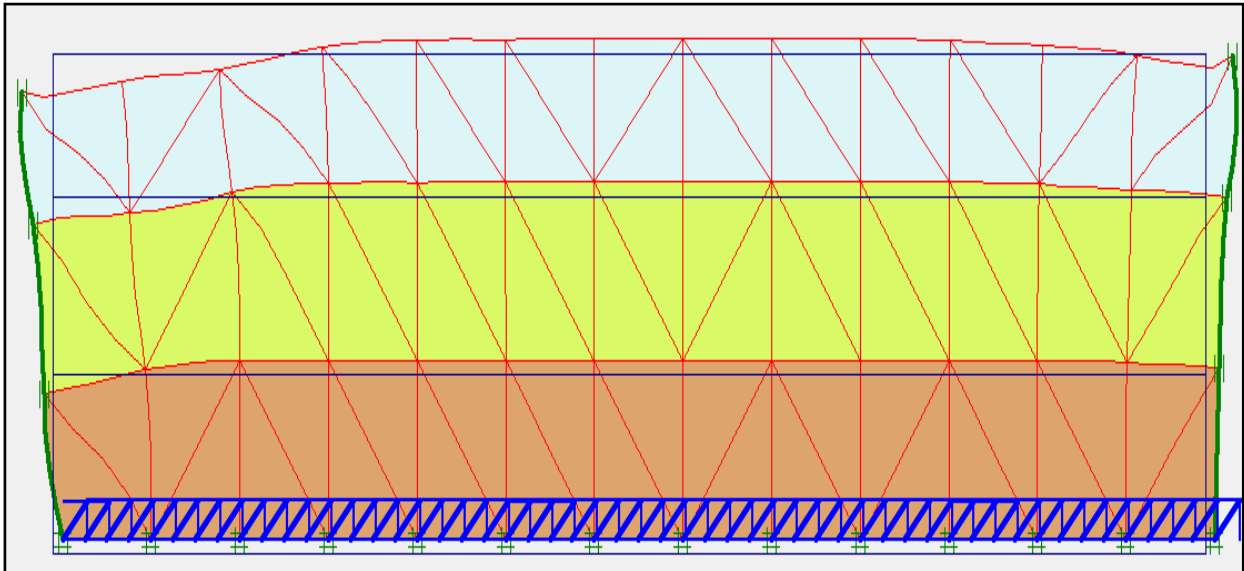


Figure (4-28): Maillage Déformé du profil (3^{ème} cas).

b) contraintes

Les isovaleurs des contraintes générées dans le massif sont représentées sur la figure 4.29.

On note une contrainte initiale égale à : 366,62 KN /m²

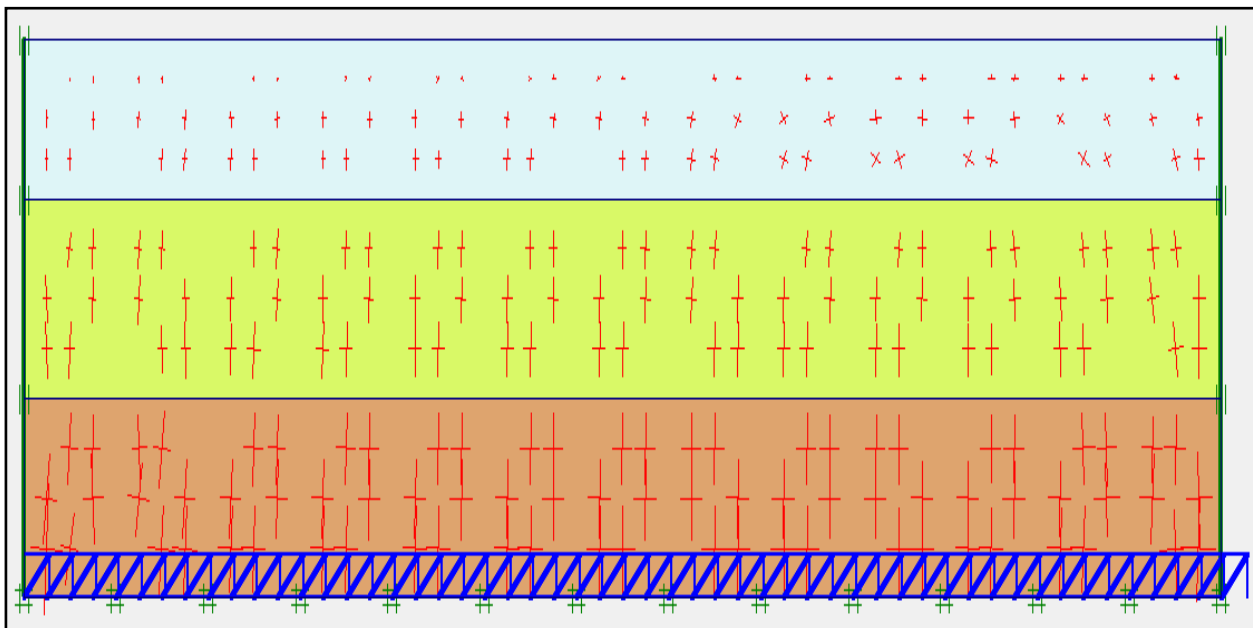


Figure (4-29): Isovaleurs des Contraintes (3^{ème} cas).

c) déplacements

Les vecteurs déplacements sont représentés sur la figure 4.30. On note un déplacement maximal égal à : $93,46 \cdot 10^{-3}$ m.

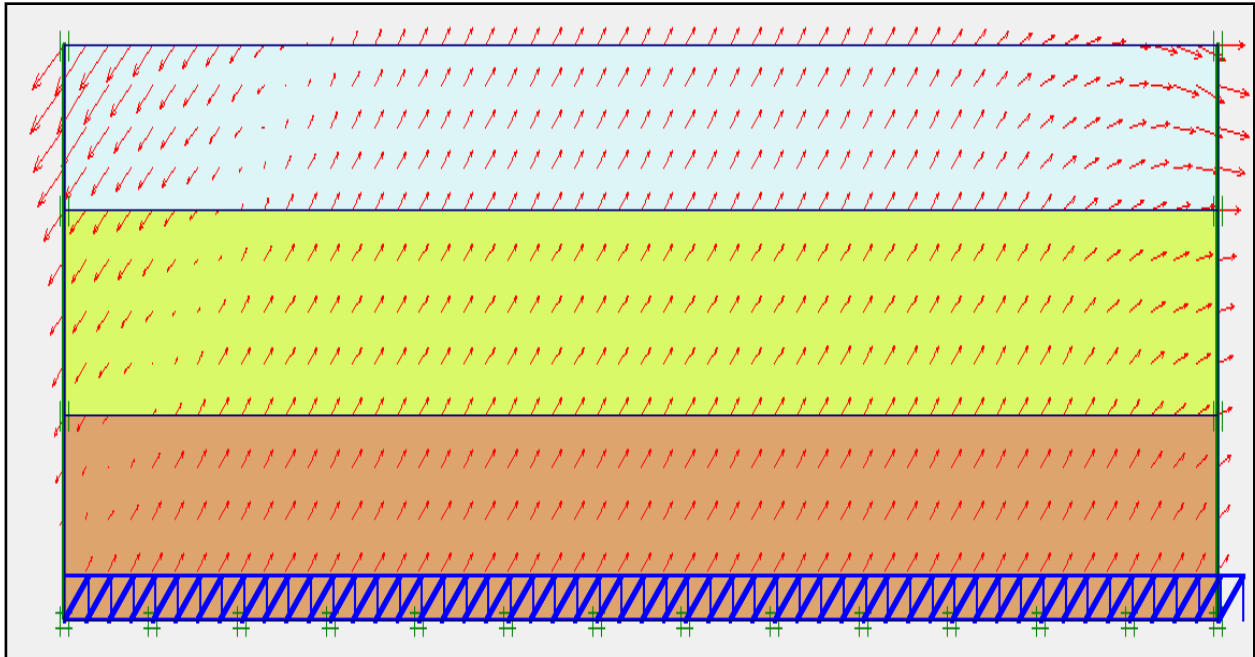


Figure (4-30): Vecteurs déplacements (3^{ème} cas).

d) courbes déplacements-temps

- **L'axe XX :** (figure 4.31).

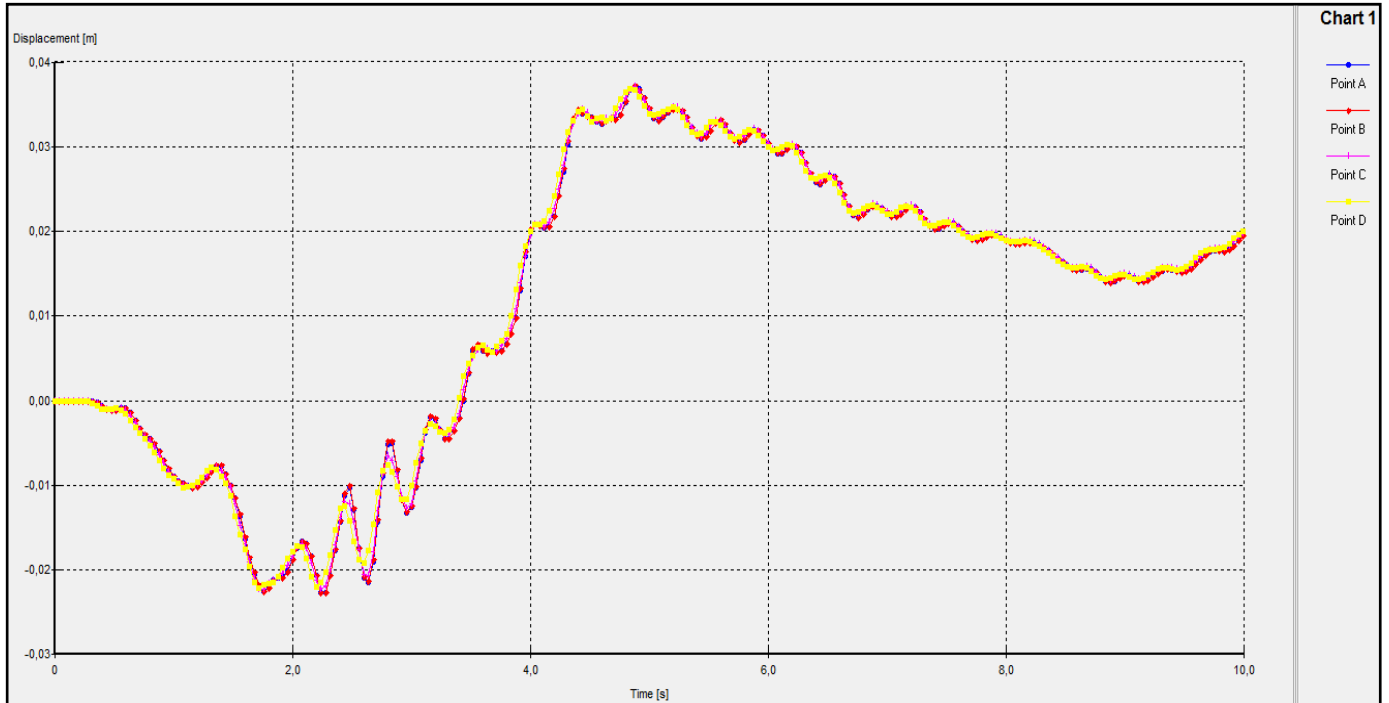


Figure (4-31): Déplacements – temps-axe xx, (3^{ème} cas).

- **L'axe YY :**(figure 4.32).

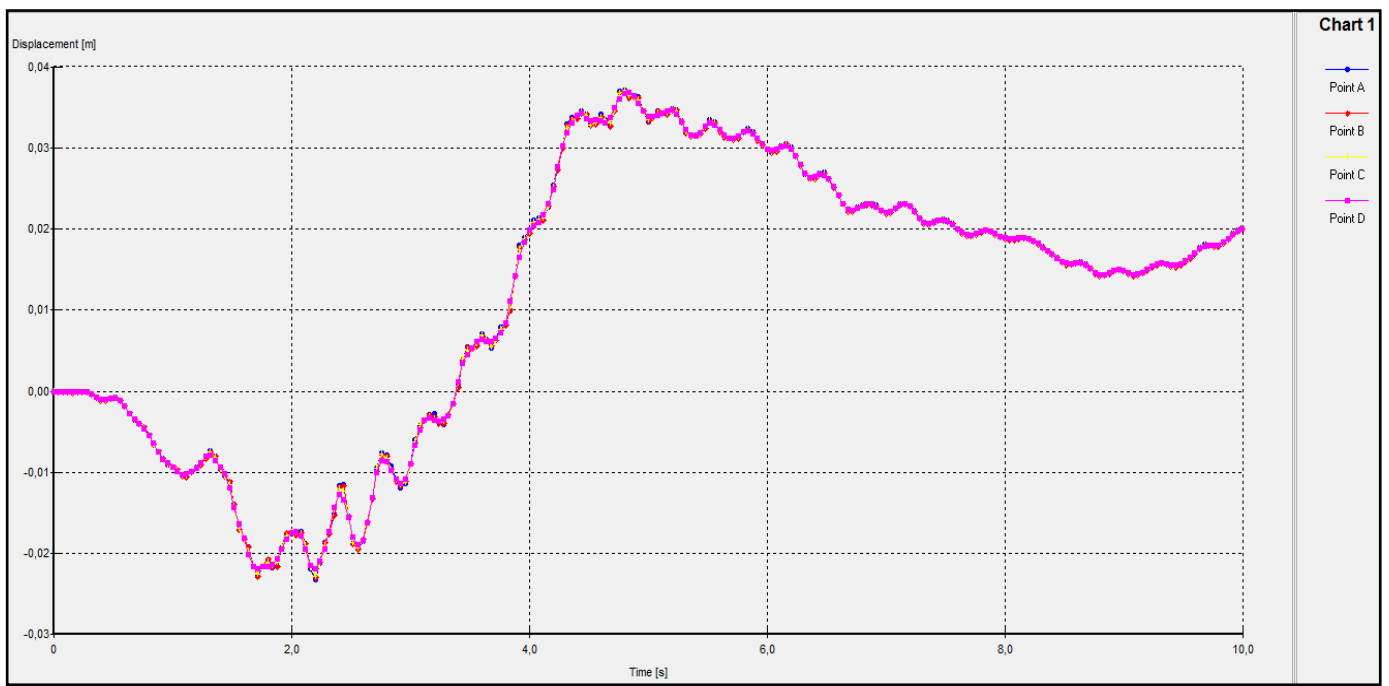


Figure (4-32): Déplacements – temps-axe yy, (3^{ème} cas).

e) courbes vitesses-temps

- **L'axe XX :** (figure 4.33).

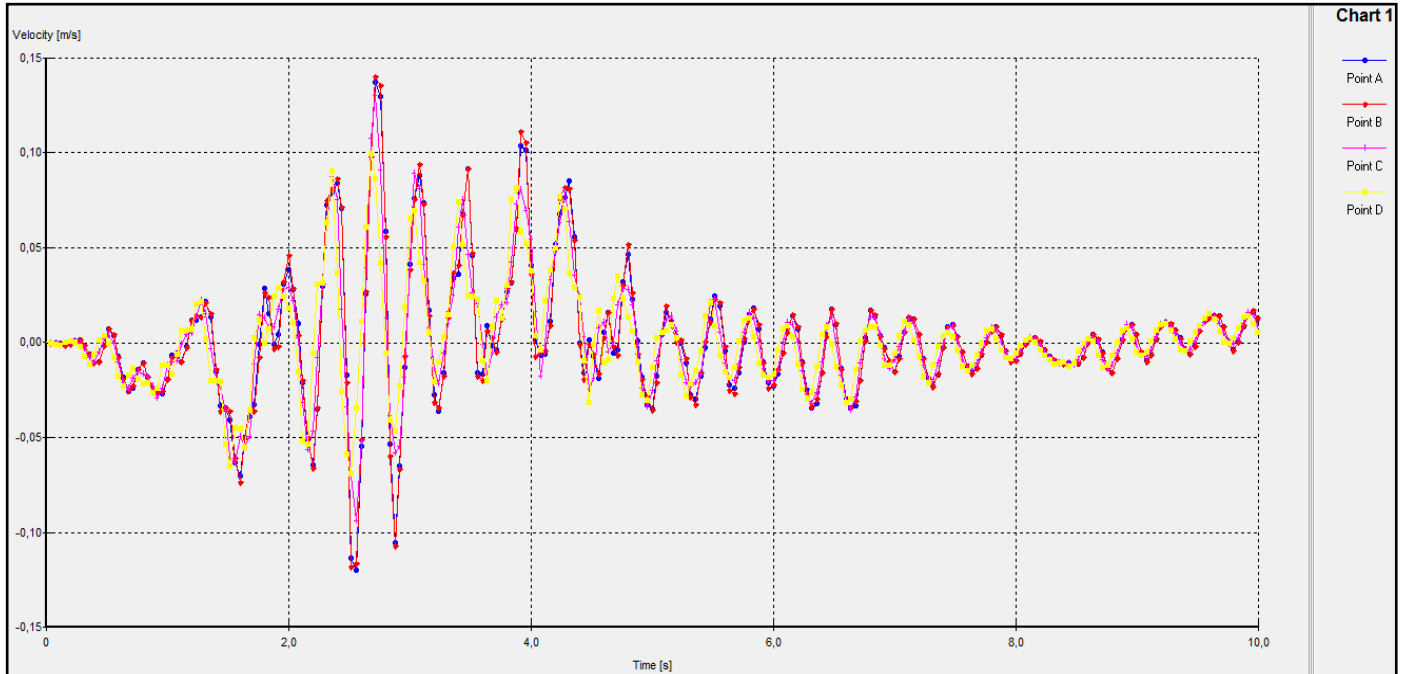


Figure (4-33): Vitesses – temps-axe xx, (3^{ème} cas).

- **L'axe YY :**(figure 4.34).

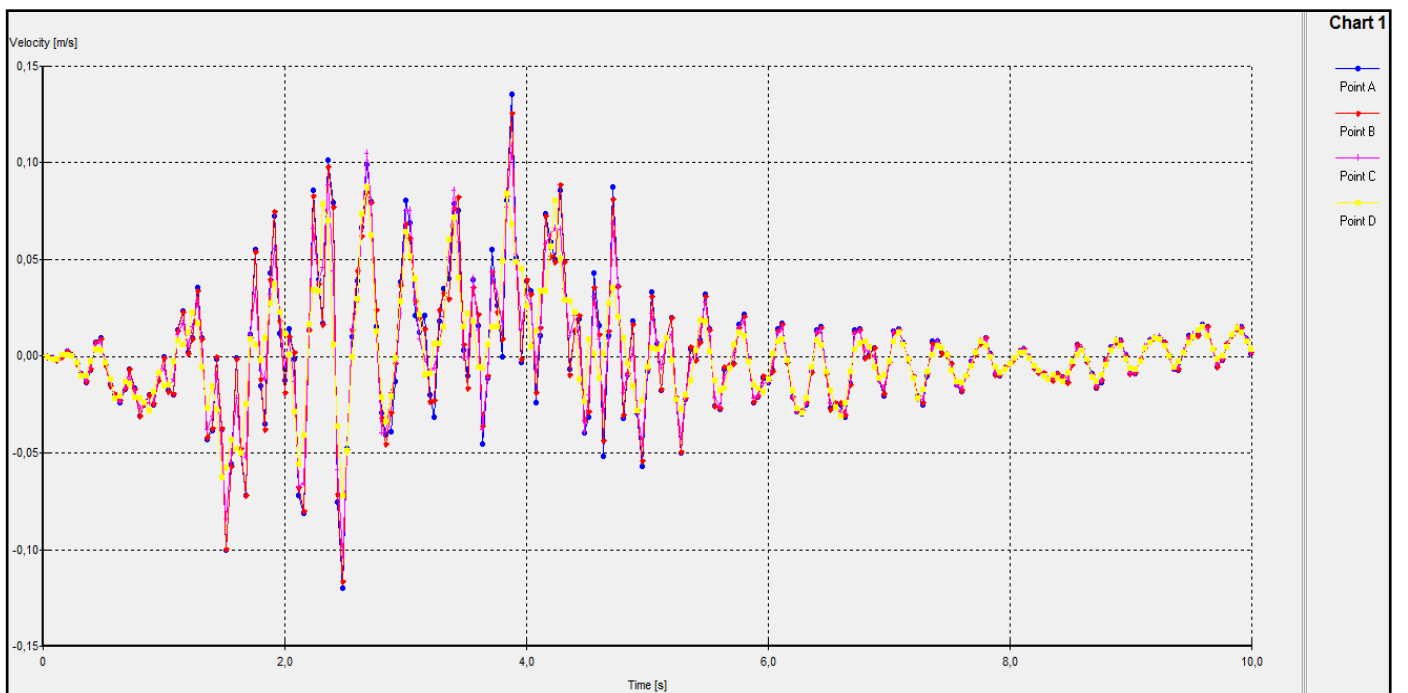


Figure (4-34): Vitesses – temps-axe yy, (3^{ème} cas).

f) courbes accélérations-temps

- **L'axe XX :** (figure 4.35).

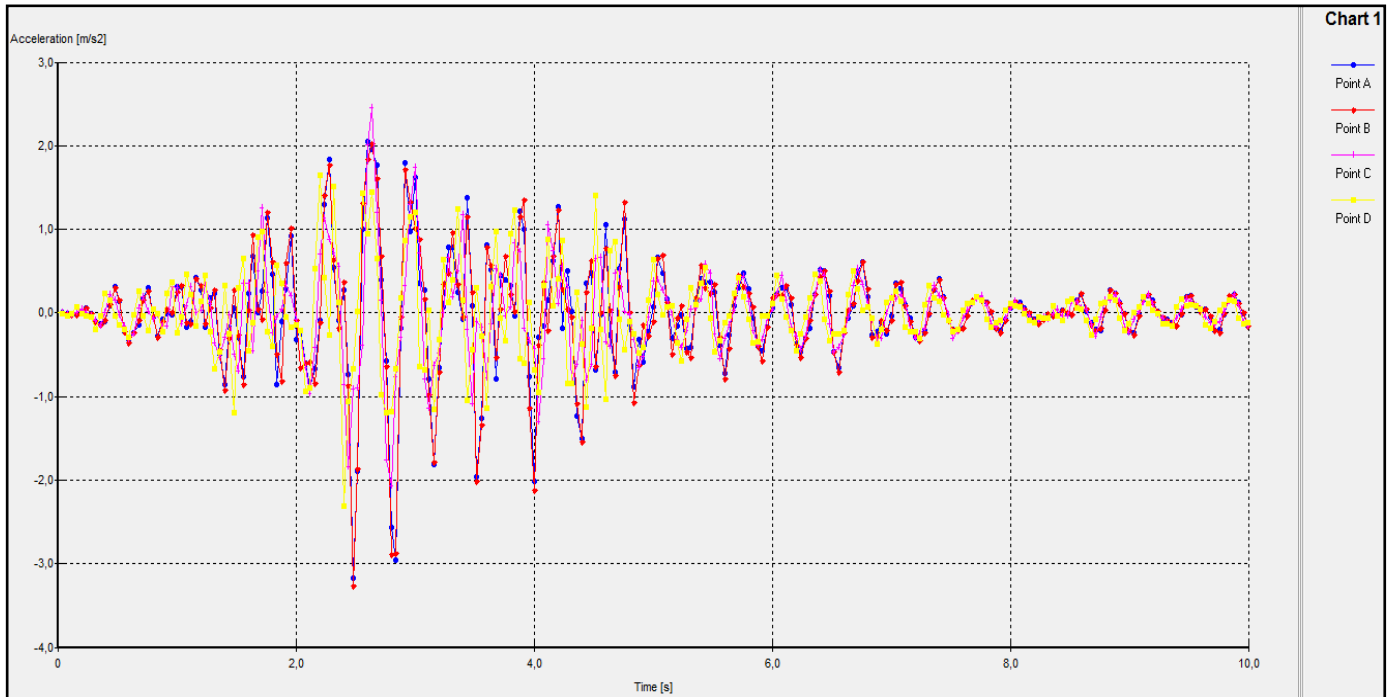


Figure (4-35): Accélérations – temps-axe xx, (3^{ème} cas).

- **L'axe YY :** (figure 4.36).

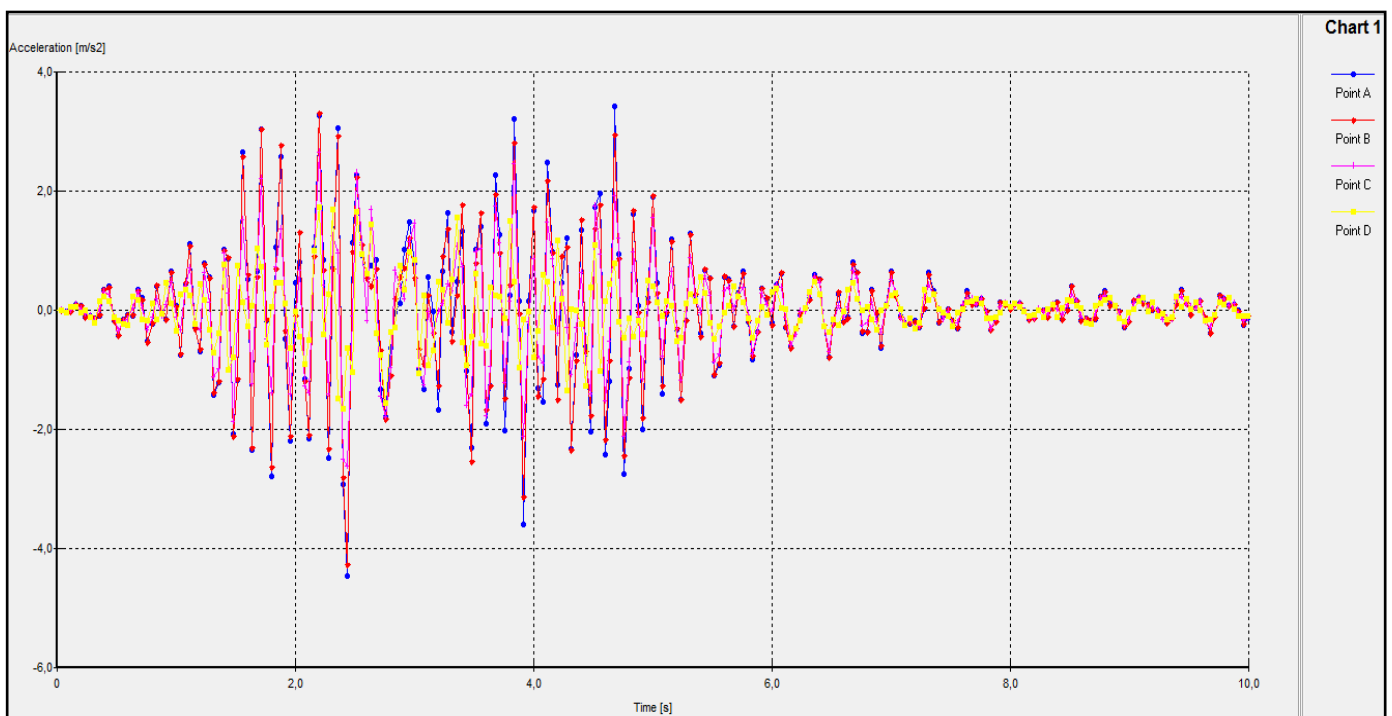


Figure (4-36): Accélérations – temps-axe yy, (3^{ème} cas).

g) courbe force-temps

- L'axe XX : (figure 4.37).

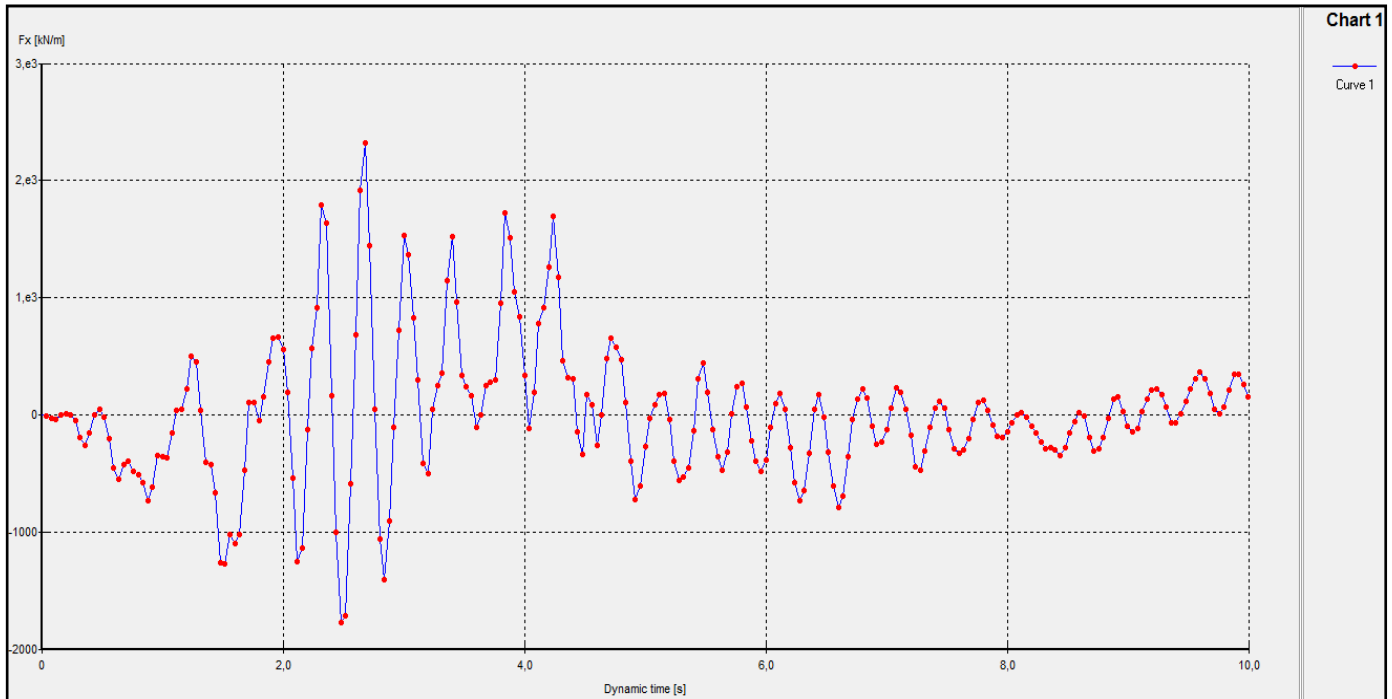


Figure (4-37): La force – temps, (3^{ème} cas).

- L'axe YY : (figure 4.38).

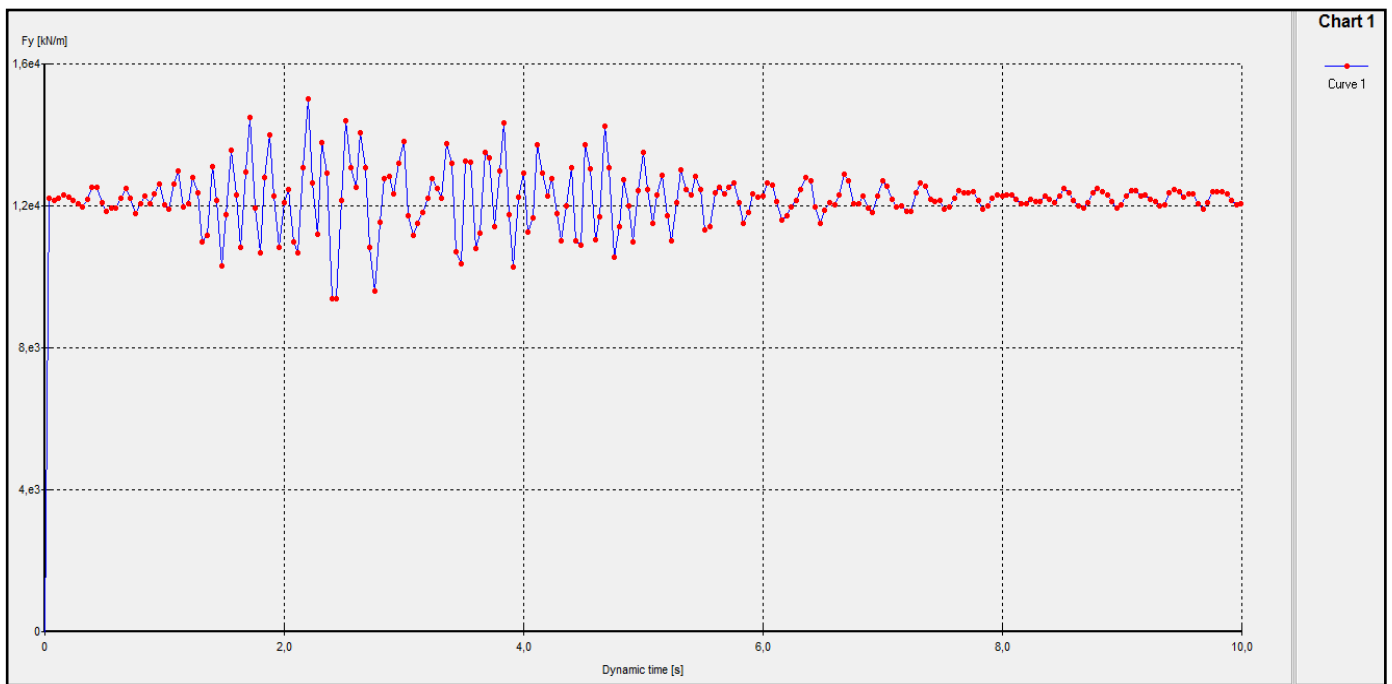


Figure (4-38): La force – temps, (3^{ème} cas).

h) synthèse :

Les valeurs maximales calculées aux points sont données dans le tableau 4.5. considérés

points		A	B	C	D
Déplacement (m)	XX	0,037	0,037	0,037	0,037
	YY	0,037	0,037	0,037	0,037
Vitesse (m/s)	XX	0,137	0,140	0,130	0,100
	YY	0,135	0,126	0,109	0,087
Accélération (m/s ²)	XX	3,175	3,267	2,459	2,317
	YY	4,473	4,287	2,642	1,715

Tableau (4-5): Valeurs maximal aux points considérés.

IV.6. Interprétation des résultats des calculs

IV.6.1. Comparaison des calculs

La comparaison des calculs pour les trois cas est résumée dans le tableau 4.6

Sollicitations sismique	Horizontal (1 ^{ere} cas)	Vertical (2 ^{eme} cas)	Inclinée (3 ^{eme} cas)
Déplacement (m)	37.10^{-3}	37.10^{-3}	52.10^{-3}
Vitesse (m/s)	$13,5.10^{-3}$	$12,5.10^{-3}$	$16,1.10^{-3}$
Accélération (m/s ²)	$298,6.10^{-3}$	$430,4.10^{-3}$	$453,3.10^{-3}$

Tableau (4-6): Comparaison entre les trois cas.

On observe Les valeurs de : déplacement, vitesse et l'accélération dans le 3^{ème} cas supérieur à les deux autres cas.

Les résultats montrent que :

L'influence des ondes qui se trouvent dans le sens inclinée sur le profil des sols est supérieure à celle des ondes dans les sens vertical et horizontal.

IV.6.2. Effet des ondes horizontal

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

- Influence de distance sur les déplacements des points selon les axes (xx, yy).

On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau 4.7

points		A	B	C	D
X(m)		0	15,38	30,77	50
Y(m)		7,50	7,50	7,50	7,50
Déplacement (m)	XX	0,027	0,037	0,037	0,051
	YY	0,038	$2,988.10^{-4}$	$3,994.10^{-4}$	0,015

Tableau (4-7): Déplacement des points (1^{ère} cas).

L'évaluation des déplacements en fonction de la distance dans les sens horizontal et vertical est représentée sur les figures 39 et 40 respectivement.

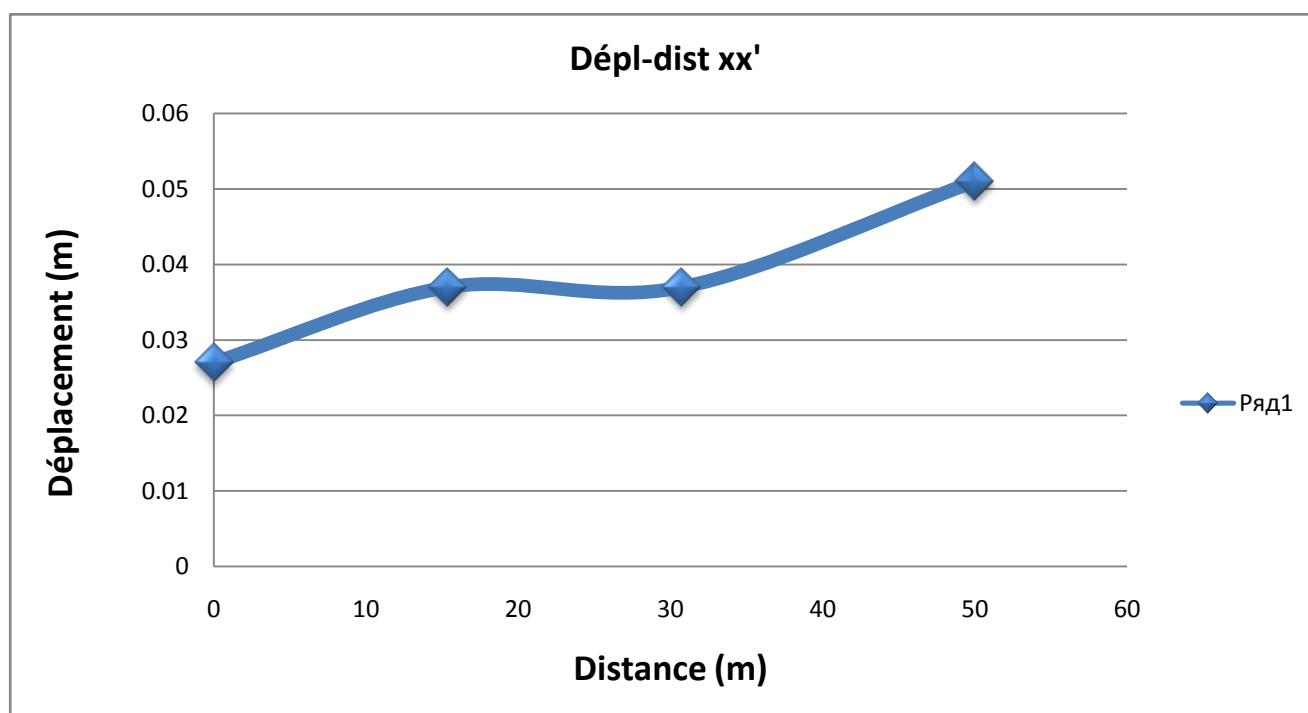


Figure (4-39): Déplacement horizontal.

Le résultat représenté dans le diagramme suivant :

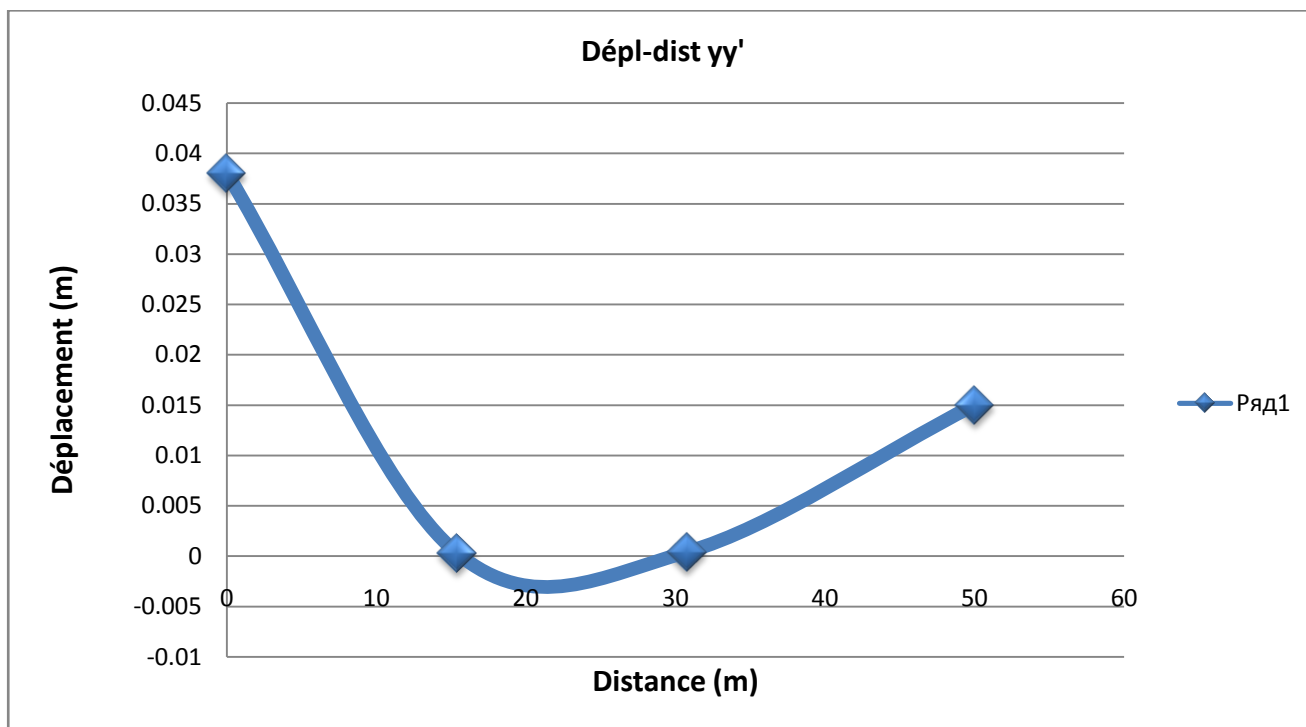


Figure (4-40): Déplacement vertical.

IV.6.3. Effet des ondes verticales

On a déterminé les déplacements aux points de coordonnées fixées dans le tableau 4.8.

points		A	B	C	D
X(m)		25,00	25,96	24,04	25,96
Y(m)		0,00	7,5	12,00	14,00
Déplacement (m)	XX	0,00	1,523	$9,801 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-4}$
	YY	0,036	0,037	0,037	0,037

Tableau (4-8): Déplacement des points (2^{ème} cas).

L'évaluation des déplacements en fonction de la profondeur dans les sens horizontal et vertical est représentée sur les figures 41 et 42 respectivement.

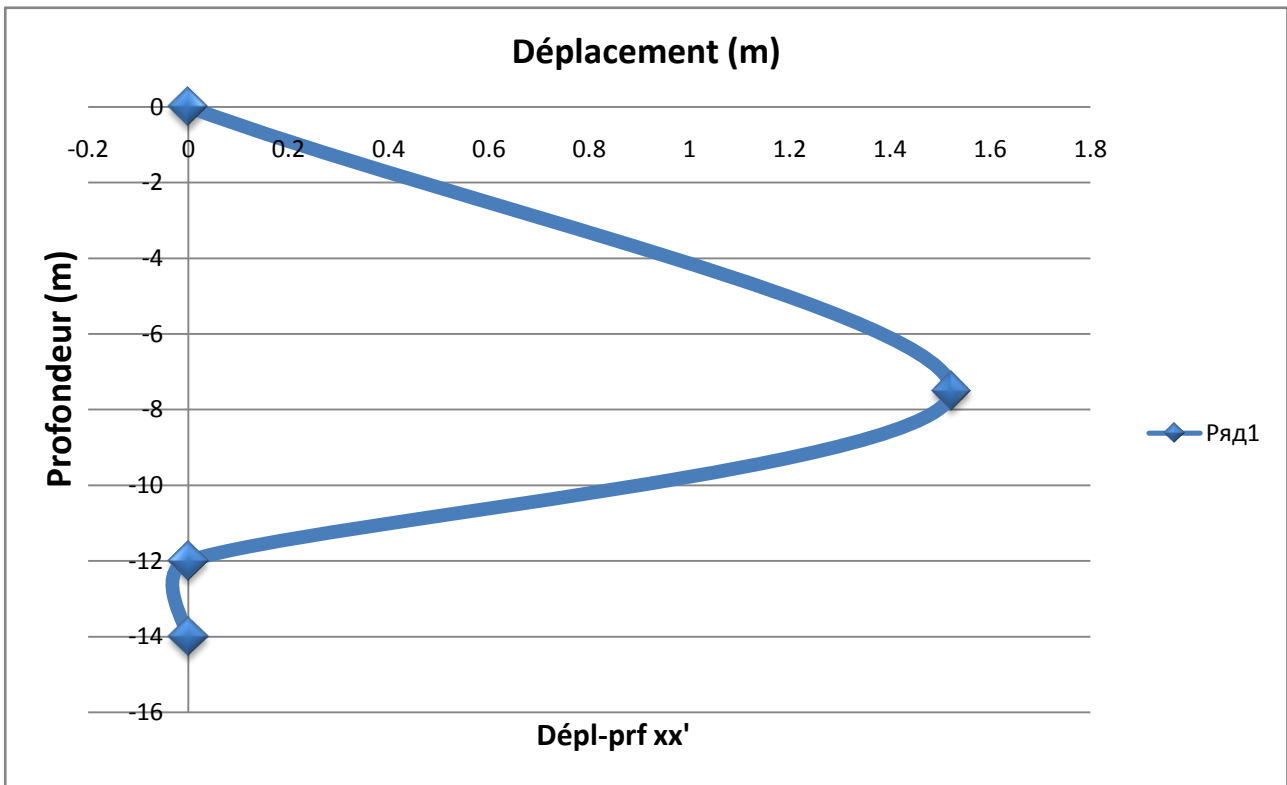


Figure (4-41): Déplacement horizontal.

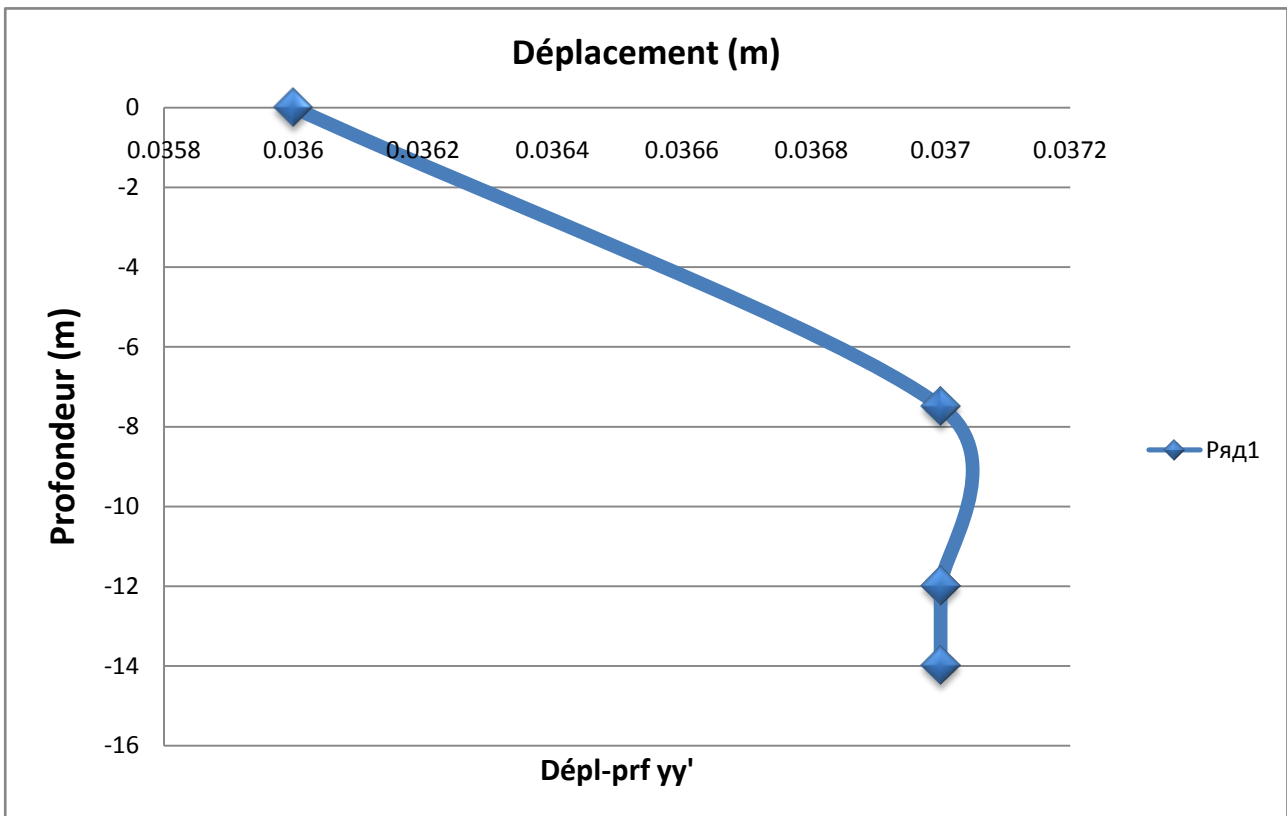


Figure (4-42): Déplacement vertical.

Commentaire de cas horizontal :

Selon l'axe xx' : (La figure 39).

Les valeurs du déplacement augmentent pour des points d'abscisses (0 à 15 m) de distance, puis elle devient presque constante à l'intervalle (15 à 30 m), dont les abscisses sont supérieures à 30 m, cette la valeur de déplacement augmente de nouveau.

Selon l'axe yy' : (La figure 40).

Une réduction ou ralentissement du déplacement pour des points restreints dans la formule (0 à 15 m), puis augmente d'un taux élevé dans (15 à 50 m).

Commentaire de cas vertical :

Selon l'axe xx' : (La figure 41).

La courbe contenue dans le croquis, nous démontre la destruction en profondeur du déplacement car l'augmentation en déplacement, progressivement pour atteindre son niveau élevé (7,5 m), puis diminue le déplacement et la progression en profondeur dans le cadre (7,5 à 14 m).

Selon l'axe yy' : (La figure 42).

Nous constatons une légère augmentation du déplacement dans (0 à 7,5 m) jusqu'à l'atteinte du cadre (7,5 à 14 m).

IV.6.4. Synthèse

D'après les résultats des calculs on peut conclure que le mouvement sismique influe dans le champ libre par plusieurs facteurs.

Notamment en facteur de distance. On peut dire que :

- L'augmentation de distance entre les points et le centre de faille résulte une diminution du déplacement.
- La diminution d'espacement entre la source du séisme et le point étudié (site) a une influence beaucoup plus importante que leur augmentation.

L'étude effectuée sur le facteur de profondeur :

- La valeur du déplacement est augmentée lorsque la profondeur diminue jusqu'à la surface.

Et peut être un facteur lié aux caractéristiques et type de sol.

CONCLUSION GENERALE

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

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

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

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

La réponse 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 et de distance entre la source (faille) et le point étudié (site) qui dominant.

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 par, 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 des sens horizontal ou vertical.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]Alain Pecker (1984) : « Dynamique des sols ». Presse, ENPC, Paris, France.
- [2]Alain Pecker(1986) : « Dynamique des ouvrages ». Presses de l'ENPC, Paris, France.
- [3]Règles parasismique algériennes« RPA99/ Version 2003 ».
- [4]MARC BADAUX et PILRINO LESTUZZI. (2008) : « GENIE PARASISMIQUE » Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [5]Davidovici : « Génie parasismique ». Presses de l'ENPC, Paris, (1985).
- [6]Milan. Zacek : « Construire parasismique (Risque sismique ; conception parasismique des bâtiments, réglementation) ».
- [7]Frank sampson : « les séismes ».
- [8]Jenney Canne : « Séisme et énergie, au de le leivre et beroit welf ».
- [9]Eric Savin : « influence de la variabilité stable en interaction sismique sol structure ».
- [10]Hamou Kada, Ramdane Khei Eddine, « Etablissement de la courbe de fragilité par La méthode PUSH EVER ».
- [11]KEVIN SIMONEAU « ANALYSE NON-LINEAIRE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES SOLS GRANULAIRES LÂCHES ».
- [12]GALY. BETRAND, (2009). « Effets de la catégorisation sismique des sites sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts de la ville de Québec » thèse de l'Ecole de technologie supérieure des Québec.
- [13]Mémoire du magister dpt de génie civil, présenté par Lila SACI « étude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols a partir d'essais géophysiques »(2011).
- [14]Mémoire du magister dpt de génie civil, présenté par Mr Hassani Karim« Effet des séismes proches et lointains sur la performance sismique des structures auto-stables en béton armé »(2013).
- [15]PLAXIS (2002). Finite Element Code for soil and rock analyses, professional version Balkemal/

Rotterdam/Brookfield.

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

Site Internet:

<http://www.afps-séisme.org>

<http://www.plaxis.nl>

<http://www.geologe.algérien>.

ANNEXES

PLAXIS Version 8 Professionnelle pour Windows
FINITE ELEMENT CODE FOR SOIL AND ROCK ANALYSES
<http://www.plaxis.nl>

CARACTERISTIQUES

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 est donné ci-dessous :

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.

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



Conditions aux limites : Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. D'autre part, il est possible de définir des déplacements imposés non nuls pour certaines frontières du modèle. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas.

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 ϕ -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.

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.

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.

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.



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.

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.

ملخص

الزلازل هي من بين الظواهر الطبيعية الأكثر خطورة، مع تأثيرات مختلفة بسبب كثافتها.

الأعمال المبينة في هذه المذكرة تتمثل في معالجة التشوهات الناجمة عن أنواع معينة من الموجات الزلزالية وفقا لاتجاهها (الأفقي، العمودي والمائلة) على الموقع، وانتشار الموجات السطحية في حقل مفتوح عن طريق ملاحظة التشوهات الناتجة عن بعض النقاط التي وزعت في هذا المجال.

المذكرة تحتوي على دراسة في المراجع ومحاكاة عددية :

■ دراسة المراجع تتناول توصيف الحركة الزلزالية والسلوك الديناميكي للتربة، والاستجابة الزلزالية لطبقة من التربة.

■ المحاكاة العددية تنطوي، أولا وصفا موجزا للأدوات المستخدمة في برنامج Plaxis، وتنفيذ العمليات الحسابية وعرض النتائج التي تم الحصول عليها في الحساب وتفسيرها.

الكلمات المفتاحية :

زلازل، حركة الزلازل، حقل مفتوح، الموجة الزلزالية، والتسارع الزلزالي، والمحاكاة، Plaxis.

ABSTRACT

Earthquakes are among the most dangerous natural phenomena, with different effects because of their intensity.

The work presented in this paper deals with deformations resulting from certain types of seismic waves according to the direction (horizontal, vertical and inclined) on the site, and propagation of surface waves in an open field through observation distortions resulting from some of the points distributed in this area.

The brief supported a literature and a numerical simulation:

- The review of the literature deals with the characterization of seismic motion and dynamic behavior of soils, and the seismic response of a layer of soil.
- The simulation involves, first a brief description of the numerical tool used (the code Plaxis), the implementation of the calculations and presentation of calculation results obtained and their interpretation.

Keys Words

Keywords: earthquake, seismic movement, opens field, seismic wave, seismic acceleration, simulation, Plaxis.

RESUME

Les tremblements de terre sont parmi les phénomènes naturels les plus dangereux, avec des effets différents en raison de leur intensité.

Les travaux présentes dans ce mémoire, traitent des déformations résultant de certains types d'ondes sismiques en fonction de la direction (horizontale, verticale et inclinée) sur le site, et de la propagation des ondes de surface dans un champs libre à travers l'observation des déformations résultant de quelques-uns des points répartis dans cette surface.

Le mémoire supporté une synthèse bibliographique et une simulation numérique :

- La synthèse bibliographique traite de la caractérisation du mouvement sismique et du comportement dynamique des sols, ainsi que de la réponse sismique d'une couche de sol.
- La simulation numérique comporte, d'abord une description sommaire de l'outil de calcul numérique utilisé (le code Plaxis), la mise en œuvre des calculs effectués, puis la présentation de résultats des calculs obtenus et leur interprétation.

Mots-clés

Séisme, mouvement sismique, champs libre, onde sismique, accélération sismique, simulation numérique, Plaxis.

ملخص

الزلازل هي من بين الظواهر الطبيعية الأكثر خطورة، مع تأثيرات مختلفة بسبب كثافتها. الأعمال المبينة في هذه المذكرة تتمثل في معالجة التشوهات الناجمة عن أنواع معينة من الموجات الزلزالية وفقا لاتجاهها (الأفقي، العمودي والمائلة) على الموقع، وانتشار الموجات السطحية في حقل مفتوح عن طريق ملاحظة التشوهات الناتجة عن بعض النقاط التي وزعت في هذا المجال. المذكرة تحتوي على دراسة في المراجع ومحاكاة عددية :

- دراسة المراجع تتناول توصيف الحركة الزلزالية والسلوك الديناميكي للتربة، والاستجابة الزلزالية لطبقة من التربة.
- المحاكاة العددية تنطوي، أولا وصفا موجزا للأدوات المستخدمة في برنامج Plaxis، وتنفيذ العمليات الحسابية وعرض النتائج التي تم الحصول عليها في الحساب وتفسيرها.

الكلمات المفتاحية :

زلازل، حركة الزلازل، حقل مفتوح، الموجة الزلزالية، التسارع الزلزالي، المحاكاة، Plaxis.

Résumé

Les tremblements de terre sont parmi les phénomènes naturels les plus dangereux, avec des effets différents en raison de leur intensité.

Les travaux présentes dans ce mémoire, traitent des déformations résultant de certains types d'ondes sismiques en fonction de la direction (horizontale, verticale et inclinée) sur le site, et de la propagation des ondes de surface dans un champs libre à travers l'observation des déformations résultant de quelques-uns des points répartis dans cette surface.

Le mémoire supporté une synthèse bibliographique et une simulation numérique :

- La synthèse bibliographique traite de la caractérisation du mouvement sismique et du comportement dynamique des sols, ainsi que de la réponse sismique d'une couche de sol.
- La simulation numérique comporte, d'abord une description sommaire de l'outil de calcul numérique utilisé (le code Plaxis), la mise en œuvre des calculs effectués, puis la présentation de résultats des calculs obtenus et leur interprétation.

Mots-clés

Séisme, mouvement sismique, champs libre, onde sismique, accélération sismique, simulation numérique, Plaxis.

Abstract

Earthquakes are among the most dangerous natural phenomena, with different effects because of their intensity.

The work presented in this paper deals with deformations resulting from certain types of seismic waves according to the direction (horizontal, vertical and inclined) on the site, and propagation of surface waves in an open field through observation distortions resulting from some of the points distributed in this area.

The brief supported a literature and a numerical simulation:

- The review of the literature deals with the characterization of seismic motion and dynamic behavior of soils, and the seismic response of a layer of soil.
- The simulation involves, first a brief description of the numerical tool used (the code Plaxis), the implementation of the calculations and presentation of calculation results obtained and their interpretation.

Keys Words

Keywords: earthquake, seismic movement, opens field, seismic wave, seismic acceleration, simulation, Plaxis.

CHAPITRE PREMIÈRE

Caractérisation du mouvement sismique

CHAPITRE DEUXIÈME

Comportement dynamique des sols

CHAPITRE TROISIÈME

Outil numérique de calcul

« Le code Plaxis »

CHAPITRE QUATRIÈME

Mise en œuvre des calculs