

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Civil

**Mémoire De Fin D'étude**

Présenté par :

**TAMERT Hilal**

**HAMALI Fares**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Génie Civil

Option : Structure en Génie Civil

Thème :

**EFFET DE LA VARIATION DE L'AMORTISSEMENT SUR  
LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN MASSIF DE SOL**

Devant les jurys composés de

BOUAMRA.Y	MCA	UAMOB	Président
REFFAS Brahim	MAA	UAMOB	Encadreur
ADJAL L.	MCB	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

## **Dédicace**

À mes chers parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont toujours été ma source de force et d'inspiration. Vous êtes mon roc et ma lumière dans tous les moments. À mes amis Djab Eddine, Ahmed, Lakhdar, Sofiane, Ali, et abla, pour leur amitié sincère et leur camaraderie inestimable. Vous avez été là pour moi à chaque étape du chemin, et je vous en suis infiniment reconnaissant.

Avec toute mon affection et ma gratitude.

Hilal Tamert.

## **Dédicace**

À mes chers parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont toujours été ma source de force et d'inspiration. Vous êtes mon roc et ma lumière dans tous les moments. À mes amis baaziz DjabEddine, Ahmed, Lakhdar, pour leur amitié sincère et leur camaraderie inestimable. Vous avez été là pour moi à chaque étape du chemin, et je vous en suis infiniment reconnaissant.

Avec toute mon affection et ma gratitude.

Fares hamali.

## **Remerciements**

Nous souhaitons également remercier chaleureusement les membres de mon jury de mémoire pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Nous tenons à exprimer nos reconnaissance envers nos professeurs et enseignants, qui nous ont transmis des connaissances fondamentales tout au long de notre parcours académique.

Aussi, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre directeur de mémoire, Mr. Reffas, pour son encadrement attentif et ses encouragements constants tout au long de ce processus. Vos remarques constructives et votre expertise dans le domaine ont été d'une valeur inestimable pour la réussite de notre mémoire.

## **Résumé :**

Il est crucial de comprendre le comportement dynamique afin de déterminer la capacité du profil du sol recevant un poste électrique aux sollicitations statiques et dynamiques. De nombreux éléments doivent être pris en considération, tels que la résistance et les caractéristiques des matériaux employés, ainsi que les charges sismiques potentielles. Le but de cette étude est d'évaluer l'effet d'amortissement sur le comportement dynamique d'un massif du sol en tenant compte la variation de profondeur et le nombre de couches de profil du sol, afin de déterminer leurs influence sur les déplacements du sol et l'accélération, en utilisant le logiciel PLAXIS 2D et la méthode des éléments finis pour simuler et modéliser la géométrie de notre modèle étudié, la loi de comportement adopté pour cette modélisation est de Mohr-Coulomb, cette approche nous pourrons d'évaluer le comportement dynamique d'un massif du sol en réponse aux charges sismiques, et aux charges ainsi interpréter les résultat obtenus .

## **Mots clés**

Comportement dynamique - poste électrique – amortissement - les déplacements du sol - l'accélération - PLAXIS 2D - Mohr-Coulomb

## **Abstract**

It is crucial to understand the dynamic behavior in order to determine the capacity of the soil profile receiving an electrical substation to withstand static and dynamic loads. Many elements must be taken into consideration, such as the strength and characteristics of the materials used, as well as potential seismic loads. The aim of this study is to evaluate the damping effect on the dynamic behavior of a soil mass, taking into account the variation in depth and the number of layers in the soil profile, in order to determine their influence on soil displacements and acceleration. This will be done using PLAXIS 2D software and the finite element method to simulate and model the geometry of our studied model. The behavior law adopted for this modeling is the Mohr-Coulomb law. This approach will allow us to evaluate the dynamic behavior of a soil mass in response to seismic and vibratory loads, as in the case of a high-voltage electrical substation, and to interpret the obtained results.

## **Keywords**

Dynamic behavior - Soil profile - Electrical substation - Damping effect - Soil displacement – Acceleration - Finite element method

## ملخص

من الضروري فهم السلوك الديناميكي لتحديد قدرة ملف التربة الذي يستقبل محطة كهربائية على تحمل الأحمال الثابتة والديناميكية. يجب أخذ العديد من العناصر في الاعتبار، مثل مقاومة وخصائص المواد المستخدمة، وكذلك الأحمال الزلزالية المحتملة. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير التخميد على السلوك الديناميكي لكتلة التربة مع مراعاة التغير في العمق وعدد طبقات ملف التربة، لتحديد تأثيرها على حركية التربة والتسارع، باستخدام برنامج PLAXIS 2D وطريقة العناصر المحدودة لمحاكاة وتشكيل هندسة النموذج المدروس. القانون السلوكي المعتمد لهذه النمذجة هو قانون موهر-كولومب. يتيح لنا هذا النهج تقييم السلوك الديناميكي لكتلة التربة استجابة للأحمال الزلزالية والاهتزازية، كما هو الحال في محطة كهربائية عالية الجهد، وتفسير النتائج المتحصلة.

## كلمات مفتاحية

محطة كهربائية - حركية التربة - التسارع - السلوك الديناميكي - تأثير التخميد - موهر-كولومب

## Table des matières

## Chapitre I

<b>I.2. La notion de sismologie .....</b>	<b>2</b>
I.2.1. C'est quoi un séisme .....	2
I.2.2. Causes des séismes .....	3
I.2.3. Séismes et risque sismique en Algérie .....	4
I.2.3. La théorie des plaques tectoniques : .....	4
I.2.4. Notion de la faille .....	7
I.2.5. Diversité des mouvements le long des failles .....	8
I.2.6. Influence sur les ressources naturelles .....	9
I.2.7. Étude et compréhension des failles .....	9
<b>I.3. Paramètres influençant le mouvement sismique .....</b>	<b>10</b>
I.3.1. La magnitude du séisme .....	10
I.3.2. La distance à l'épicentre .....	10
I.3.3. La profondeur du foyer : .....	11
I.3.4. Le type de sol .....	11
I.3.5. La topographie .....	11
I.3.6. La structure géologique .....	11
<b>I.4. Echelle de séisme .....</b>	<b>11</b>
On peut mesurer la force d'un séisme à deux échelles différentes : .....	11
I.4.1. La magnitude .....	11
I.4.2. L'intensité .....	13
<b>II. Effets des séismes sur les profils du sol .....</b>	<b>16</b>

## Chapitre II

<b>II.2. Introduction .....</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Types d'ondes .....</b>	<b>16</b>
II.2.1. Les ondes P .....	16
II.2.2. Les ondes S .....	16
II.2.3. Les ondes de Rayleigh .....	16
<b>II.3. Caractéristiques principales .....</b>	<b>16</b>
II.3.1. Pour les ondes p .....	16
II.3.2. Pour les ondes S .....	17
II.3.3. Pour les ondes de Rayleigh .....	17
<b>II.4. La propagation des ondes sismiques .....</b>	<b>19</b>

<b>IV.5. L'enregistrement des ondes sismiques .....</b>	<b>21</b>
<b>IV.5.1. Les sismographes.....</b>	<b>21</b>
<b>II.5.2. Le sismogramme.....</b>	<b>22</b>
<b>II.4. Types d'effet sur les profils du sol .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4.1. Les effets de surface .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4.1.1. Érosion .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4.1.2. Déposition .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4.1.3. Croûtage .....</b>	<b>24</b>
<b>II.4.1.4. Acidification .....</b>	<b>24</b>
<b>II.4.2. L'effet de la profondeur.....</b>	<b>24</b>
<b>II.4.2.1. Capacité portante.....</b>	<b>24</b>
<b>II.4.2.2. Tassement .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.2.3. Stabilité des pentes.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.2.4. Drainage.....</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2.5. Caractéristiques géotechniques .....</b>	<b>28</b>
<b>II.5. Étude détaillée des effets du Sol.....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.1. La liquéfaction.....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.1.1. Définition .....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.1.2. Processus de liquéfaction.....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.1.3. Les Facteurs Favorisants la liquéfaction : .....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.2. Étude Détaillée du Tassement et de l'Affaissement.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.2.1. Définitions de Tassement.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.2.3. Définitions de Affaissement.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.2.4. Types de Tassement .....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.2.5. Causes du Tassement : .....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.3. Étude Détaillée d'un Glissement de Terrain.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.3.1. Introduction : .....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.3.2. Types de Glissements de Terrain.....</b>	<b>31</b>
<b>II.5.3.3. Causes principales.....</b>	<b>32</b>
<b>II.5.4. ....</b>	<b>33</b>
<b>II.5.4.1. Définition .....</b>	<b>33</b>

II.5.4.2. Types des fissures du sol.....	33
<b>II.6. Facteur favorisant les effets des séismes sur les profils de sol.....</b>	<b>34</b>
II.5.1. Type de Sol.....	34
II.5.2. Topographie.....	34
II.5.3. Présence d'eau .....	34
<b>Chapitre III</b>	
<b>III.1.Caractéristiques des Vibrations .....</b>	<b>35</b>
III.1.1. Amplitude .....	35
III.1.2.Période .....	36
III.1.3.Fréquence .....	36
III.1.4.Phase .....	36
<b>III.2.Types des vibration.....</b>	<b>37</b>
III.2.1.Les vibrations libres .....	37
III.2.2.Les vibrations forcées .....	38
<b>III.3.les Systèmes Vibratoires.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.Masse, Rigidité et Amortissement .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5.La Résonance .....</b>	<b>40</b>
<b>III.6.Effets des Vibrations sur les Structures .....</b>	<b>41</b>
III.6.1.Fatigue des Matériaux.....	41
III.6.2.Dommages Structurels .....	41
III.6.3.Gêne des Occupants.....	42
<b>III.7.les Mesures et Analyses Vibratoires.....</b>	<b>42</b>
III.7.1.Identification des Sources de Vibrations .....	42
III.7.2.Évaluation du Niveau de Risque.....	43
III.7.3.Conception de Solutions de Réduction des Vibrations .....	43
<b>III.8.Types d’amortissement .....</b>	<b>43</b>
III.8.1.Amortissement Visqueux .....	43
III.8.2.Amortissement Structural .....	44
III.8.3.Amortissement par Frottement Sec .....	44
<b>III.9.Classification des Sols.....</b>	<b>45</b>
III.9.1.Classification Géotechnique Unifiée (Unified Soil Classification System - USCS) .....	45
III.9.2. Classification AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) .....	45
III.9.3. Classification WRB (World Reference Base for Soil Resources) .....	45

III.10.Méthodes Expérimentales pour la Détermination des Propriétés Dynamiques des Sols.....	46
III.10.1.Essais de Laboratoire .....	46
III.10.2.Essais In Situ .....	46
III.10.3.Méthodes Avancées.....	47
Importance des Méthodes Expérimentales Dynamiques.....	47
<b>Chapitre IV</b>	
<b>IV.2. Comportement cyclique des sols.....</b>	<b>48</b>
IV.2.1. Pour les sables : .....	48
IV.2.2. Pour les argiles .....	48
<b>IV.3. Modélisation du comportement cyclique du sol.....</b>	<b>49</b>
IV.3.1. Définition du module de cisaillement G .....	50
IV.3.2. Définition du coefficient d'amortissement .....	50
IV.3.3. Les paramètres cycliques équivalents .....	52
<b>IV.4. Caractéristiques dynamique des sols .....</b>	<b>54</b>
IV.4.1.Définition de l'hystérésis des sols .....	54
IV.4.2. Module de cisaillement G sous conditions de chargements cycliques .....	54
IV.5.2. Facteur d'amortissement D sous conditions de chargements cycliques.....	55
IV.5.3. Fonction de pression interstitielle.....	58
<b>Chapitre V</b>	
<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>59</b>
<b>V.2. Description et situation de l'ouvrage .....</b>	<b>59</b>
<b>V.3. Cadre géologique régional .....</b>	<b>60</b>
<b>V.5. Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique.....</b>	<b>62</b>
<b>V.6. Géométrie du modèle numérique.....</b>	<b>62</b>
V.6.1. Introduction .....	62
V.6.2. Maillage et conditions aux limites .....	64
V.6.3. Procédure de modélisation.....	64
<b>V.7. Résultat dans le cas de référence.....</b>	<b>68</b>
<b>V.8. Résultats Dans le cas d'augmentation de l'amortissement.....</b>	<b>73</b>
V.8.1. Comparaison des résultats de modèle de référence avec l'augmentation de l'amortissement .....	78
.....	78

<b>V.9. Les résultat lors de l'augmentation de la profondeur (hauteur) de la couche du sol</b> .....	<b>83</b>
<b>V.9.1. Comparaison des résultats de modèle de référence avec l'augmentation de la hauteur de la couche</b> .....	89
<b>V.10.1. Comparaison des résultats cas de références avec l'augmentation de nombre de couche</b> .....	100
<b>V.11. Interprétation et discussion des résultats</b> .....	<b>104</b>
<b>V.11.1. Influence de l'amortissement</b> .....	104
<b>V.11.2. L'influence de la nature du terrain sur la variation d'amortissement</b> .....	104
<b>V.11.3. Influence d'augmentation de la profondeur (hauteur) de la couche de sol</b> .....	105
<b>V.11.3. Augmentation de nombre de couche de sol</b> .....	105

Figure 1: Les caractéristique d'un séisme	2
Figure 2: Structure interne de la Terre (d'après MEDDE, www.prim.net)	4
Figure 3: Types de frontières de plaques (d'après USGS)	6
Figure 4: Les différentes plaques tectoniques	7
Figure 5: La faille entre les plaques tectoniques africaine et eurasienne passe par tout le littoral algérien	10
Figure 6: Carte simplifiée montrant la répartition des séismes sur Terre	15
Figure 7: Ondes sismiques (Modifié d'après Bruce A. Bolt, 1978)	18
Figure 8: Propagation des ondes sismiques dans des milieux à densité croissante vers la profondeur	19
Figure 9: Courbe de propagation des ondes sismiques	21
Figure 10: Sismographe et sismogramme	22
Figure 11: liquéfaction induit par le séisme	29
Figure 12: Le glissement de terrain	31
Figure 13: Evolution du module de cisaillement G en fonction de la déformation de cisaillement cyclique et des propriétés de plasticité[26].	49
Figure 14: Évolution de l'amortissement D en fonction de la déformation de cisaillement et des propriétés de plasticité[26].	50
Figure 15 : Schéma de la réponse du sol lors d'un chargement Cyclique[27].	51
Figure 16 : Changement de G avec chaque itération.	52
Figure 17: Variation des contraintes de cisaillement en fonction du temps	52
Figure 18 : <i>Module de cisaillement dans les conditions de chargement cyclique</i>	54
Figure 19 : facteur d'amortissement pour le sable (QUAKE/W) [31].	56
Figure 20 : Fonction facteur d'amortissement pour le sable (ProShake) [31].	56
	Figure
21 : Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (QUAKE/W) [31].	57
Figure 22 : Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (ProShake) [31].	58
Figure 23 : la variation du coefficient de pression interstitielle en fonction du nombre de cycles	58
Figure 24 : <i>Localisation de site d'implantation du poste HT/MT</i>	59
Figure 25 : <i>Localisation de site d'implantation du poste HT/MT</i>	59
Figure 26: Extrait de la carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/ 50 000e, feuille n°89-EL ESNAM	61
Figure 27: Géométrie du modèle de référence	64
Figure 28: définir les propriétés de profil du sol	64

Figure 29:maillage et condition aux limite	65
Figure 30 :initial condition les pression interstitiel	65
Figure 31 : définition des phases plastiques de profil du sol et le radier	66
Figure 32: définir la charge de poste électrique	66
Figure 33: l'accélérogramme de séisme de Boumerdès de l'année Mai 2003 2003 (Strong Motion CD-ROM SMC de Boumerdès)	67
Figure 34: la phase de calcule	67
Figure 35 : déplacement total	68
Figure 36 : le champ de déplacement vertical	68
Figure 37 : le champ de déplacement vertical (shading)	69
Figure 38 : le champ de déplacement vertical dans le sol argileux	69
Figure 39 : le champ de déplacement dans le sol sableux	70
Figure 40 : l'accélération verticale	71
Figure 41 : accélération dans la surface de radier	71
Figure 42 : accélération dans la couche d'argile	72
Figure 43: accélération dans la couche de sable	72
Figure 44 : Total déplacement dans le cas d'augmentation d'amortissement	73
Figure 45 : Le déplacement vertical dans le cas d'augmentation d'amortissement (arrows)	74
Figure 46 : le champ de déplacement vertical dans le sol argileux	74
Figure 47 : le champ de déplacement vertical dans le sol sableux	75
Figure 48 : L'accélération verticale	76
Figure 49: l'accélération verticale (shading)	76
Figure 50:accélération dans la surface de radier	76
Figure 51: accélération dans la couche d'argile	77
Figure 52: accélération dans la couche de sable	77
Figure 53 : Courbe de déplacement verticale dans la surface de radier	78
Figure 54 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile	79
Figure 55 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable	79
Figure 56 : Courbe de l'accélération dans la surface libre	81
Figure 57 : Courbe de l'accélération dans la couche d'argile	81
Figure 58 : Courbe de l'accélération dans la couche de sable	82
Figure 59 : Modèle d'augmentation de la profondeur de couche de sol	83
Figure 60 : Le déplacement total (shading )	84
Figure 61 : Le déplacement vertical ( arrows )	84
Figure 62 : Le déplacement vertical ( shading )	85

Figure 63 : L'accélération vertical	86
Figure 64: accélération vertical (shading)	86
Figure 65:accélération dans la surface de radier	87
Figure 66: accélération dans la couche d'argile	87
Figure 67: accélération dans la couche de sable	88
Figure 68 : Courbe de déplacement vertical dans la surface libre	89
Figure 69 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile	89
Figure 70 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable	90
Figure 71 : courbe de l'accélération dans la surface libre	91
Figure 72 : courbe de l'accélération dans la couche d'argile	92
Figure 73 : courbe de l'accélération dans la couche de sable	92
Figure 74 : modèle d'augmentation de nombre de couches	93
Figure 75 : le déplacement total	94
Figure 76 : le déplacement vertical (shading)	94
Figure 77 : le déplacement vertical (arrows)	95
Figure 78 : le déplacement vertical dans la couche d'argile	95
Figure 79 : le déplacement vertical dans la couche de sable	96
Figure 80 : le déplacement vertical dans la couche de marne	96
Figure 81 : l'accélération vertical	97
Figure 82: accélération vertical (shading)	97
Figure 83:accélération dans la surface de radier	98
Figure 84: accélération dans la surface d'argile	98
Figure 85: accélération dans la couche de sable	99
Figure 86: accélération dans la couche de marne	99
Figure 87 : Courbe de déplacement vertical dans la surface de radier	100
Figure 88 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile	100
Figure 89 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable	101
Figure 90 : Courbe de l'accélération dans la surface de radier	102
Figure 91 : Courbe de l'accélération au milieu	102
Figure 92 : Courbe de l'accélération dans la profondeur	103

Tableau 1: Plus forts séismes enregistrés depuis 1900 dans le monde .....	12
Tableau 2: Equivalences magnitude, énergie , durée, rejet, longueur du plan de faille rompu	12
Tableau 3 : Description de l'échelle d'intensité macrosismique EMS-98 .....	13
Tableau 4: Comparaison entre les ondes sismiques .....	18
Tableau 5 : Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique .....	62
Tableau 6 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour chaque couche .....	70
Tableau 7 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour chaque couche .....	75
Tableau 8 : Tableau de déplacement vertical dans cas de référence par rapport à l'augmentation d'amortissement .....	80
Tableau 9 : comparaison des résultats d'accélération.....	82
Tableau 10 : Tableau de déplacement vertical dans cas de référence par rapport à l'augmentation de la couche .....	91
Tableau 11 : comparaison des résultats d'accélération.....	93
Tableau 12 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour les trois couches .....	96
Tableau 13 : comparaison de déplacement dans le cas de référence par rapport à l'augmentation de nombre de couche.....	101
Tableau 14 : comparaison de l'accélération dans le cas de référence par rapport à l'augmentation de nombre de couche.....	103

## Liste des symboles

**L** : largeur de profil du sol

**H** : profondeur de profil du sol

**G** : module de cisaillement

**D** : module d'amortissement

$\tau_n$  : Contraintes de cisaillement sur la tranche n

$\tau$  : Contraintes de cisaillement s'exerçant réellement sur la surface

$\tau'_{\max}$  : Contraintes de cisaillement maximal

**Kh** : coefficients de perméabilité horizontale

**Kv** : coefficients de perméabilité verticale

$\gamma_{\text{sat}}$  : Poids volumique du sol saturé

$\gamma_W$  : Poids volumique de l'eau

$\gamma_{\text{unsat}}$  : Le poids volumique du sol

$\emptyset$  : Angle de frottement du sol

$\nu$  : coefficient de Poisson

$\Psi$  : Angle de dilatance du sol

**E** : Module de Young

$C_{\text{réf}}$  : Cohésion

**T** : La période d'une vibration

**F** : La fréquence d'une vibration

**m** : est la masse du système

**C** : est le coefficient d'amortissement

**k** : est la raideur du système

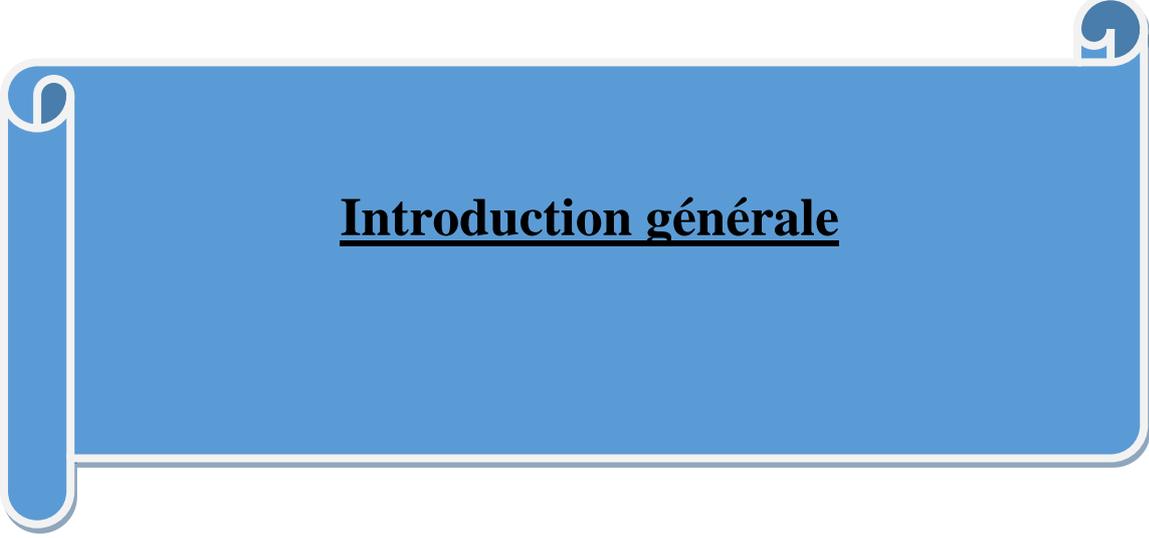
**x** : est la position du système par rapport à sa position d'équilibre

$\mathbf{x}'$  : est la vitesse du système

$\mathbf{x}''$  : est l'accélération du système

$\zeta$  : Le facteur d'amortissement

$\alpha, \beta$  : Les coefficients d'amortissement de Rayleigh



**Introduction générale**

## Introduction générale

L'étude de l'amortissement sur le comportement d'un massif de sol est un aspect important de la géotechnique qui intéresse de nombreux domaines tels que le génie civil, la géologie et la construction. L'amortissement désigne la capacité d'un sol à dissiper l'énergie vibratoire lorsqu'il est soumis à des charges dynamiques telles que des vibrations sismiques, des ondes de choc ou des Charges cycliques. Cette étude revêt une importance cruciale dans la conception et la construction de structures telles que les fondations, les barrages, les ponts et les infrastructures sismiques. Comprendre comment un massif de sol réagit aux vibrations et comment il dissipe l'énergie peut permettre de prendre des mesures préventives pour renforcer les structures et assurer leur stabilité et leur durabilité. L'amortissement d'un massif de sol dépend de plusieurs facteurs, notamment sa composition, sa densité, sa porosité, sa perméabilité, sa cohésion et son frottement interne. Ces propriétés influent sur la capacité du sol à absorber et à disperser l'énergie vibratoire, réduisant ainsi les risques de dommages ou de défaillance des structures. L'utilisation de techniques telles que les essais de laboratoire, les modèles numériques et les études in situ permet aux ingénieurs et aux géotechniciens d'évaluer l'amortissement d'un massif de sol dans des conditions réelles ou simulées. Ces données sont essentielles pour élaborer des recommandations de conception et de construction adaptées, garantissant la sécurité et la performance des ouvrages géotechniques face aux charges dynamiques.

Notre problématique appréhende sur l'application de ses charges et leurs influences sur la stabilité d'un profil du sol avec la variation de l'amortissement, et on essaye de voir comment agit-il sur le comportement d'un profil du sol en tenant compte l'augmentation de la hauteur et le nombre de couche du massif de sol étudié pour connaître l'influence de ces derniers sur les déplacements et l'accélération dans le sol en exploitant le code de calcul PLAXIS 2D

L'objet de ce travail est de voir l'influence de la variation d'amortissement, l'augmentation de la hauteur et le nombre de couche sur un profil du sol recevant un poste électrique de haute tension situé à oued el berdi sous une charge dynamique sur les résultats de déplacement et d'accélération dans le massif sol étudié. Ce mémoire contient quatre chapitres, une introduction et conclusion générale, le premier chapitre est un rappel sur les notions de sismologie, le deuxième chapitre présente les effets des séismes sur les profils des sols. Le troisième chapitre sera consacré à parler sur le comportement cyclique des sols et le quatrième chapitre est une présentation de l'ouvrage étudié avec une simulation numérique et des interprétations et discussions des résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE  
COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU  
PROFIL DE SOL**

## I. Etude bibliographique sur le comportement dynamique du profil de sol

### I.1. Introduction

La sismologie est une discipline qui est étudiée par des sismologues et qui utilise le sismographe pour générer des sismogrammes. Est le domaine de la science qui examine ces phénomènes. Dans ce chapitre, on débute par des réflexions générales, rappelant des concepts fondamentaux des différentes formes d'ondes sismiques et la description du phénomène sismique qui sont étudiées en sismologie, avant de s'intéresser à l'impact sismique sur un profil topographique.

### I.2. La notion de sismologie

#### I.2.1. C'est quoi un séisme

Un séisme est un phénomène géologique où les roches situées sous la surface terrestre se brisent et émettent une grande quantité d'énergie. Les ondes sismiques produites par cette libération brusque d'énergie se propagent à travers la Terre, provoquant des secousses et des tremblements ressentis à sa surface. Différents facteurs peuvent entraîner des séismes, comme les mouvements des plaques tectoniques, les éruptions volcaniques ou même les activités humaines telles que l'exploitation minière. Les séismes peuvent être causés par divers éléments tels que les mouvements des plaques tectoniques, les éruptions volcaniques ou même les activités humaines comme l'exploitation minière.

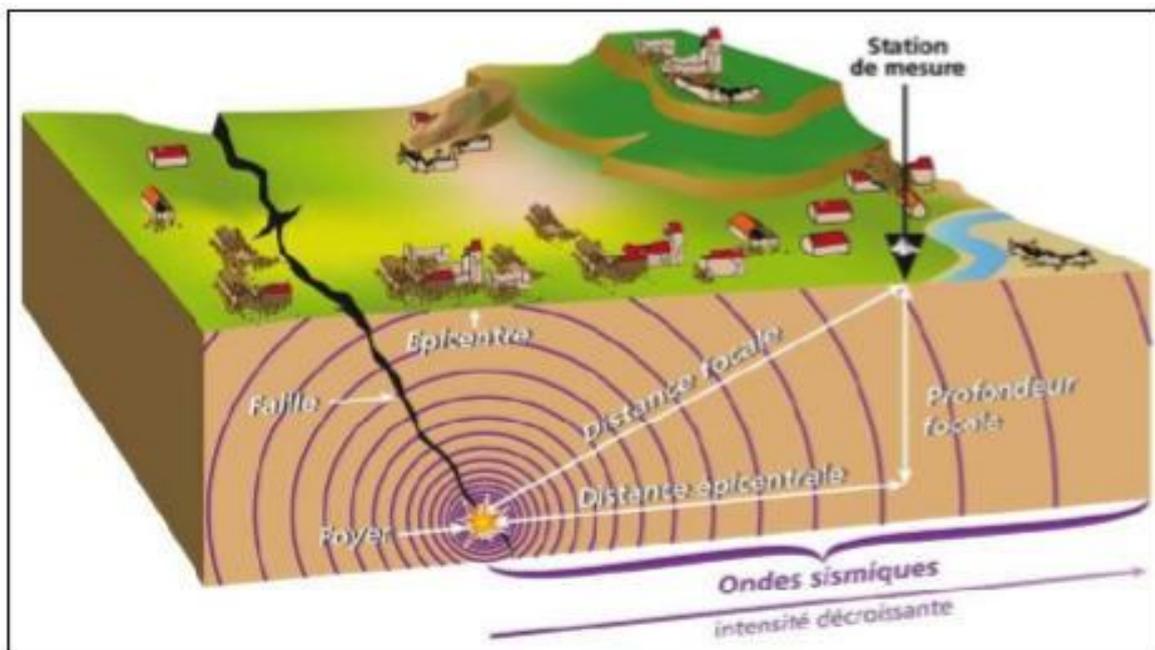


Figure 1: Les caractéristiques d'un séisme

## I.2.2. Causes des séismes

Les séismes peuvent être déclenchés par divers facteurs géologiques et géophysiques. Voici les principales causes des séismes, expliquées en détail : [01].

- **Tectonique des plaques :** La tectonique des plaques est la principale cause des séismes. La face de la Terre est formée de plusieurs plaques rigides qui forment le manteau terrestre semi-fluide. Les mouvements relatifs de ces plaques créent des zones de contrainte, qui exercent des forces considérables sur les roches. Quand cette contrainte atteint un niveau élevé, le long des failles, les roches se brisent, ce qui entraîne un séisme.
- **Les failles :** Les failles sont des fissures dans la croûte terrestre où les roches se déplacent entre elles par interaction. Les failles peuvent être normales (quand les blocs se déplacent verticalement), inverses (quand les blocs se déplacent horizontalement) et décrochantes (quand les blocs se déplacent horizontalement de façon latérale). Les mouvements sur ces failles peuvent provoquer des tremblements de terre.
- **Activité volcanique :** Les séismes volcaniques sont associés à l'activité des volcans. Lorsqu'un volcan entre en éruption, il peut générer des séismes dus à la montée du magma à travers la croûte terrestre, à l'effondrement de la chambre magmatique. Il existe d'autres processus associés à l'activité volcanique, tels que les mouvements de terrain. Les mouvements de terrain peuvent aussi provoquer des tremblements de terre, en particulier lorsqu'ils entraînent des millions de roches importantes qui se déplacent rapidement le long d'une pente abrupte. Ces mouvements peuvent générer des ondes sismiques ressenties à distance.  
C'est quoi la chambre magmatique : une grande cavité située sous un volcan où le magma s'accumule avant d'être expulsé. C'est une zone de stockage de magma.  
La montée du magma peut provoquer un séisme par fracturation de la croûte terrestre due à la pression du magma, déplacement des roches.
- **Activités humaines :** Certaines activités humaines peuvent provoquer des séismes induits. Par exemple, La pression dans les couches souterraines peut être modifiée par l'extraction de pétrole et de gaz, ce qui peut provoquer des mouvements de roches et des séismes. De la même manière, l'implantation de vastes réservoirs d'eau ou l'incorporation de fluides dans le sous-sol peuvent altérer l'équilibre des contraintes et provoquer des tremblements de terre.

Il est important de noter que la plupart des séismes sont naturels et résultent de phénomènes géologiques de la Terre, tels que les mouvements des plaques tectoniques.

Cependant, l'action humaine peut parfois entraîner des séismes, notamment dans les régions où l'exploitation des ressources naturelles est intensive. [01]

### I.2.3. Séismes et risque sismique en Algérie

La partie nord de l'Algérie se situe dans une zone très sensible aux tremblements de terre, l'une des zones les plus sismiquement actives. En octobre 1980, Al Asnam (aujourd'hui Chlef) est touchée par un séisme violent qui a entraîné 3 000 morts, détruit 80% de la ville de Chlef et causé des dégâts estimés à 10 milliards d'autres. À Boumerdès, ce séisme a causé 1 400 morts dans la wilaya de Boumerdès et des dommages estimés à 5 milliards de dollars américains. Plus tard, en mai 2003, un deuxième tremblement de terre dévastateur fait plus de 2 000 morts, des milliers de blessés et laisse de nombreuses personnes sans abri à Boumerdès. [02].

### I.2.3. La théorie des plaques tectoniques :

Ils sont composés de différentes couches superposées qui se caractérisent par leur solidité, leur liquidité ou leur plasticité (élasticité) et leur densité. Depuis le centre vers la surface de La Terre est composée de trois éléments : le noyau, le manteau et la croûte. (Figure 2).

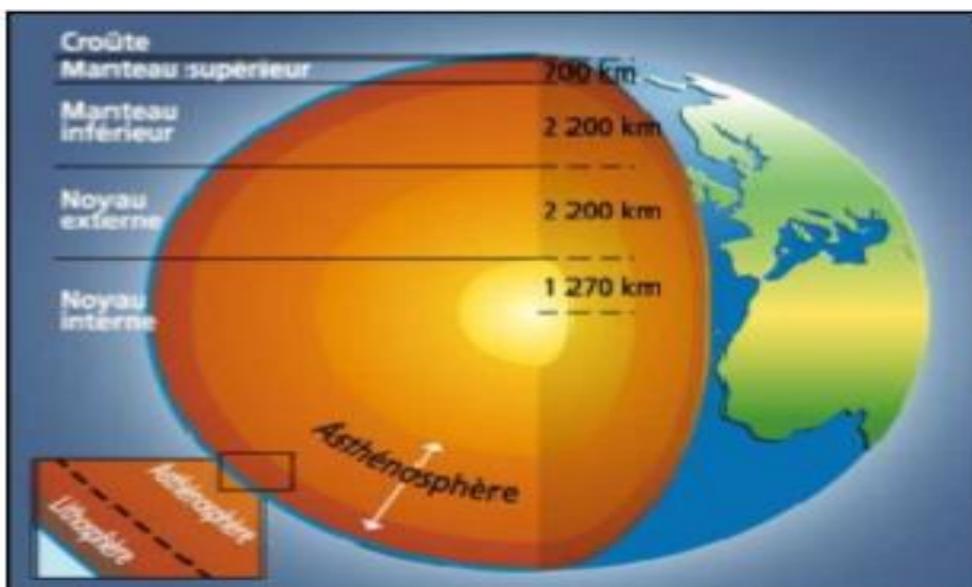


Figure 2: Structure interne de la Terre (d'après MEDDE, [www.prim.net](http://www.prim.net))

Les deux parties du noyau sont le noyau interne solide et le noyau externe liquide ; le centre de la Terre est situé à une profondeur de 6370 km. Le manteau comprend deux pièces sections séparées : le manteau inférieur, qui est une couche solide et élastique s'étendant de 700 à 2900 kilomètres de profondeur, et le manteau supérieur, qui comprend à son tour deux sous-parties.

La partie rigide, connue sous le nom de « manteau lithosphérique », est une partie de la lithosphère et s'étend de 15 à 70 kilomètres à une profondeur de 70 à 150 kilomètres.

Certains éléments chimiques se désintègrent radio activement dans le manteau, ce qui entraîne un flux de chaleur et des mouvements de convection. La lithosphère rigide est déformée par ces mouvements de convection, ce qui entraîne son découpage en plaques rigides. La tectonique des plaques est un processus de déplacement des plaques les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère [03]. Les mouvements entre les plaques lithosphériques lors du glissement sur l'asthénosphère (Figure 3) sont :

Distension ou éloignement (zone de divergence), compression ou rapprochement. Les grands tremblements de terre sont causés par les mouvements tectoniques constants qui modifient la surface de la Terre, créant des chaînes de montagnes et des fosses océanique.

Il y a plusieurs plaques lithosphériques impliquées dans ces mouvements qui interagissent aux frontières, créant des contraintes. Lorsque ces contraintes dépassent la résistance au frottement, cela déclenche un tremblement de terre, suivi d'une période de stabilité temporaire. Ainsi, les zones à risque sismique sont généralement proches des limites des plaques tectoniques.

Selon la théorie des plaques tectoniques, la lithosphère terrestre est séparée en plaques rigides qui sont distinctes flottant sur l'asthénosphère. Ces plaques sont délimitées par des frontières, telles que les dorsales océaniques (où la lithosphère est créée), les cavités océaniques (où elle est détruite) et les zones modifiées (où les plaques se déplacent horizontalement).

Des forces internes telles que la convection dans le manteau et les forces de traction de la subduction et de la divergence entraînent les mouvements des plaques. Des phénomènes géologiques tels que les tremblements de terre, les volcans et la formation de montagnes sont causés par les différentes limites (divergentes, convergentes, transformâtes) [03].

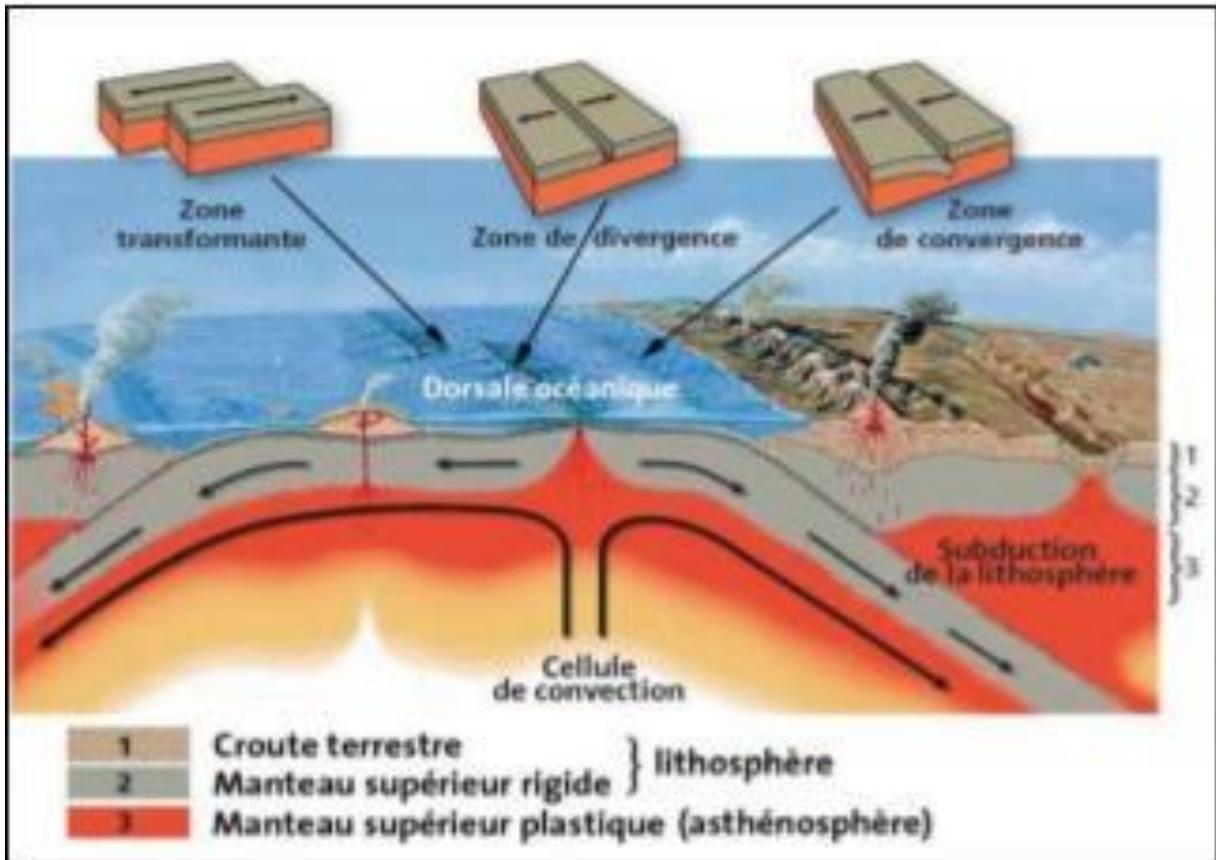


Figure 3: Types de frontières de plaques (d'après USGS)

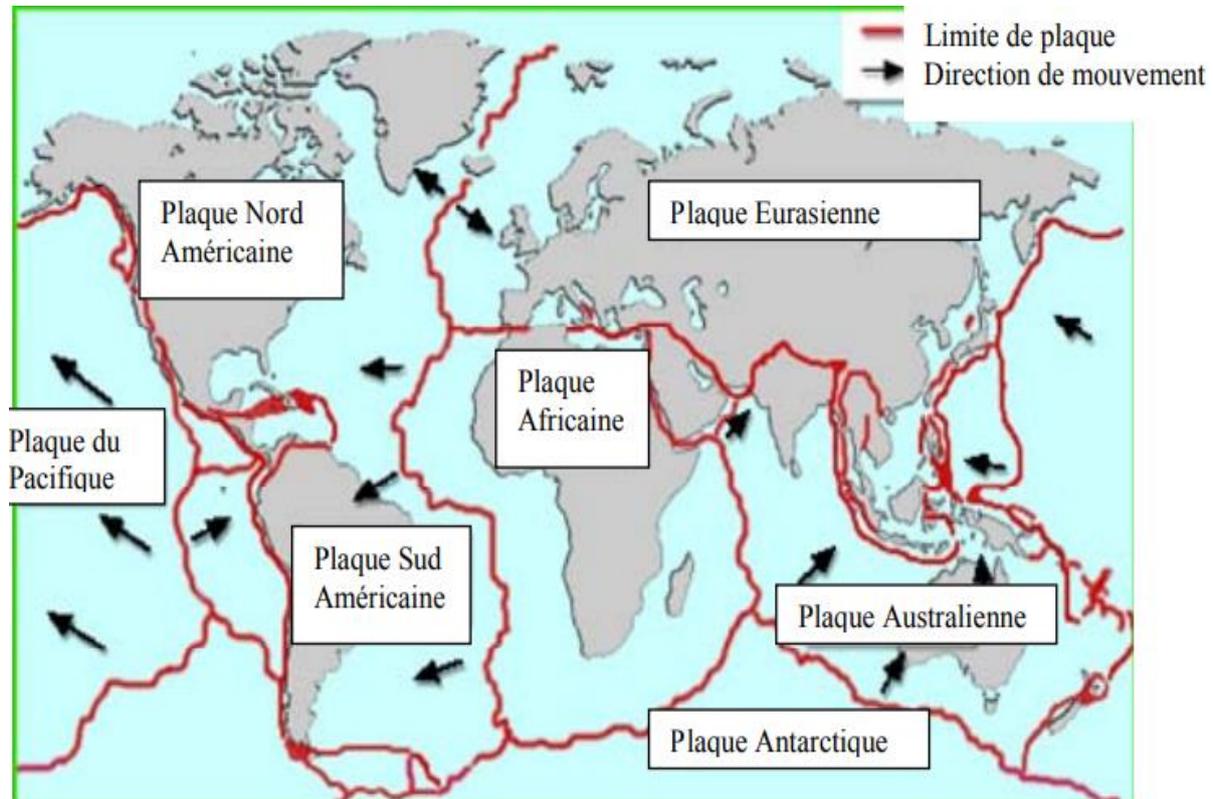


Figure 4: Les différentes plaques tectoniques

#### I.2.4. Notion de la faille

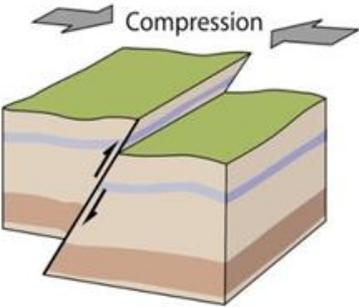
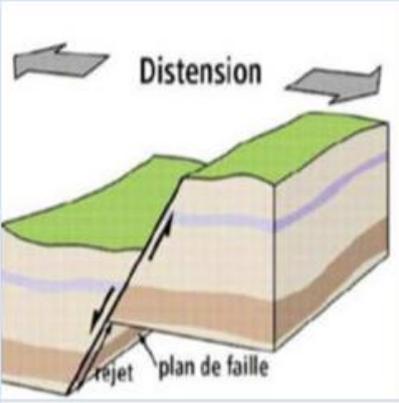
Une faille correspond à une fissure ou à une zone de fracture dans la croûte terrestre où des blocs de roches se déplacent par rapport les uns aux autres. La formation de ces fractures est due à des forces tectoniques qui exercent des contraintes sur la croûte, ce qui entraîne des mouvements le long des surfaces de rupture. Il y a différents types de fissures selon la direction et le sens des mouvements des roches. Les principales catégories de failles incluent :

- **Une faille normale :** Est un type de faille où le bloc supérieur (bloc suspendu) se déplace vers le bas par rapport au bloc inférieur (bloc encaissant) le long du plan de faille. Ce type de faille se produit généralement dans des contextes d'extension crustale. Une faille normale se caractérise par le mouvement du bloc supérieur vers le bas par rapport au bloc inférieur le long du plan de faille [04].

Ce type de faille est typique des contextes d'extension crustale et présente les caractéristiques suivantes :

- Le plan de faille est généralement incliné.
- Le pendage du plan de faille est souvent supérieur à 45 degrés.
- Le bloc suspendu est en position plus basse que le bloc encaissant.
- Des stries horizontales peuvent être regardées sur le plan de faille.

- **Une faille inverse :** Est un type de faille dans laquelle le bloc au-dessus du plan de faille (bloc suspendu) se déplace vers le haut par rapport au bloc en dessous (bloc encaissant). La formation de failles se produit habituellement dans des situations de compression crustale qui se distinguent par :
  - En général, le plan de faille est incliné.
  - Le pendage du plan de faille est généralement inférieur à 45 degrés.
  - Le bloc suspendu est soulevé par rapport au bloc encaissant.
  - Des stries horizontales et/ou verticales peuvent être observées sur le plan de faille.

<p><b>Faille inverse ou chevauchante</b></p> 	<p><b>Mouvement inverse ; séisme de Spitak, Arménie, 1988</b> (photo BRGM, P. Mouroux)</p> 	<p><b>Mouvement inverse ; séisme d'El Asnam, Algérie, 1980</b> (photo IPG-P, R. Armijo)</p> 
<p><b>Faille normale</b></p> 	<p><b>Mouvement inverse ; séisme d'El Asnam, Algérie, 1980</b> (photo IPG-P, R. Armijo)</p> 	<p><b>Faille normale ; séisme d'Edgecumbe, Nouvelle Zélande, 1987</b> (photo GNS)</p> 

### **I.2.5. Diversité des mouvements le long des failles**

Les failles, loin d'être statiques, sont le siège de mouvements complexes et variés, influencés par les forces tectoniques qui les entourent. Ces mouvements peuvent se manifester de différentes manières :

- **Rotation** : Un bloc rocheux peut pivoter autour d'un axe vertical ou horizontal, comme une pièce sur un plateau tournant.
- **Plissement** : Les roches adjacentes à la faille peuvent se plier et se déformer, créant des structures géologiques spectaculaires comme les plis et les anticlinaux.
- **Extension** : La croûte terrestre peut s'étendre et s'amincir le long de la faille, comme si elle était étirée.
- **Compression** : À l'inverse, la croûte peut se comprimer et se raccourcir, provoquant un épaissement et un raccourcissement de la zone.

Ces mouvements ne sont pas sans conséquences sur la géologie locale. Les failles sont à l'origine de la création de nombreux reliefs, tels que :

- **Montagnes** : Le soulèvement des blocs rocheux le long d'une faille peut créer des chaînes de montagnes imposantes.
- **Vallées** : L'affaissement des blocs le long d'une faille peut créer des vallées profondes et des fossés.
- **Fosses** : Des mouvements complexes de compression et d'extension peuvent créer des fosses géologiques, comme la Mer Morte.

### I.2.6. Influence sur les ressources naturelles

Les failles ne se contentent pas de modeler le paysage. Elles peuvent également influencer la circulation des fluides souterrains, comme l'eau et les hydrocarbures. Cela les rend particulièrement importantes pour l'exploration et la production d'énergie, car les zones de failles peuvent abriter des réservoirs naturels de ressources.

### I.2.7. Étude et compréhension des failles

Les géologues et les sismologues s'attèlent à l'étude des failles pour mieux comprendre les processus tectoniques qui façonnent notre planète. En analysant les mouvements des failles et leurs effets sur le paysage, ils peuvent :

- Prédire les risques sismiques et mieux se préparer aux tremblements de terre.
- Déterminer l'histoire géologique d'une région et retracer les mouvements des plaques tectoniques.
- Comprendre la formation des paysages géologiques et identifier les zones potentiellement riches en ressources naturelles.

La faille sud-atlasique sépare l'Algérie en deux plaques tectoniques (Figure 5). La tectonique alpine est dominante au Nord et la plate-forme saharienne est relativement stable au Sud.



Figure 5: La faille entre les plaques tectoniques africaine et eurasiennne passe par tout le littoral algérien

### I.3.Paramètres influençant le mouvement sismique

Le mouvement sismique, tremblement du sol provoqué par les séismes, est un phénomène complexe influencé par divers paramètres. Parmi les plus importants, on trouve :

#### I.3.1. La magnitude du séisme

La magnitude représente la taille d'un tremblement de terre, mesurant l'énergie libérée par la rupture de la faille.

Deux échelles principales sont utilisées :

- **Magnitude locale (ML) :** Basée sur l'amplitude des ondes de surface à courte distance (10-60 km de l'épicentre), utile pour les séismes de faible à moyenne magnitude (< 7).
- **Magnitude sur l'échelle de Richter (Ms) :** Prend en compte l'amplitude et la distance à l'épicentre, plus connue du grand public mais moins précise pour les séismes très forts.

Le moment sismique (Mw) a une magnitude de plus en plus utilisée par les sismologues car elle est indépendante de la distance et plus précise pour comparer des séismes à l'échelle mondiale.

#### I.3.2. La distance à l'épicentre

L'épicentre est le point à la surface terrestre juste au-dessus du foyer du séisme.

L'intensité du mouvement sismique est maximale à l'épicentre et diminue ensuite avec la distance selon une loi logarithmique.

Plus la distance à l'épicentre est grande, plus l'énergie du séisme est dissipée et moins les secousses sont ressenties.

### I.3.3. La profondeur du foyer :

La profondeur du foyer correspond à la distance verticale entre le point où la faille se rupture et la surface.

Elle a un impact sur la force et la répartition des ondes sismiques.

- **Foyers superficiels** : (< 30 km) : ondes de surface prédominantes, impact localisé mais intense.
- **Foyers intermédiaires** : (30-70 km) : ondes P et S importantes, propagation sur de longues distances.
- **Foyers profonds** : (> 70 km) : ondes P prédominantes, à la surface est faible.

### I.3.4. Le type de sol

Le type de sol influence l'amplification et la propagation des ondes sismiques :

- **Sols meubles** : (sables, argiles) : ce sont des sols qui ne représentent pas une grande cohésion ils amplifient les ondes, le danger de se liquéfier et les mouvements de terrain.
- **Sols durs** : (roches) : atténuent les ondes, meilleure fondation pour les structures.

### I.3.5. La topographie

La forme du paysage peut influencer le mouvement sismique :

Montagnes et vallées réfléchissent et diffractent les ondes, modifiant l'intensité et la direction.

Bassins sédimentaires peuvent amplifier les ondes.

### I.3.6. La structure géologique

Les failles et autres structures peuvent canaliser les ondes sismiques, les concentrant dans certaines zones.

## I.4. Echelle de séisme

On peut mesurer la force d'un séisme à deux échelles différentes :

### I.4.1. La magnitude

L'énergie du séisme libérée sous forme d'onde est définie par la magnitude. On la détermine en se basant sur les ondes enregistrées par les sismomètres. Différentes catégories de dimensions. La plus ancienne et la plus connue du grand public est la magnitude de Richter, mais elle est de plus en plus rarement utilisée par les sismologues. La magnitude de Moment est devenue depuis quelques années la nouvelle référence internationale. Jusqu'à présent, le

tremblement de terre le plus violent enregistré est celui du Chili, en 1960. (Tableau.1, Tableau.2) [05].

*Tableau 1: Plus forts séismes enregistrés depuis 1900 dans le monde*

Les séismes enregistrés les plus puissants depuis 1900	
Chili, 1960	M = 9,5
Sumatra, 2004	M = 9,3
Alaska, 1964	M = 9,5
Alaska, 1957	M = 9,2
Kamchatka, 1952	M = 9,0
Japon, 2011	M = 9,0
Equateur, 1906	M = 8,8
Chili, 2010	M = 8,8
Alaska, 1965	M = 8,7
Sumatra, 2005	M = 8,7
Tibet, 1950	M = 8,6
Kamtchatka, 1923	M = 8,5
Indonésie, 1938	M = 8,5
Iles Kourilies, 1963	M = 8,5
Chili, 1939	M = 8,3
Chili, 1906	M = 8,2

La magnitude d'une unité est multipliée par 32 : un séisme de magnitude 6 libère 32 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 5 ; un séisme de magnitude 7 libère 1000 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 5. Les dimensions de la faille activée (coulissage moyen ou rejet, longueur du coulissage) et les séismes entre eux peuvent également être mesurées à l'aide de la magnitude. En 1909, on estime que le tremblement de terre de Provence (46 morts, intensité VIII-IX) a une magnitude vers 6. [06].

*Tableau 2: Equivalences magnitude, énergie, durée, rejet, longueur du plan de faille rompu*

Magnitude	Energie libérée	Durée de la rupture	Valeur moyenne du rejet	Longueur moyenne du coulissage	Nombre de séismes par an dans le monde (ordre de grandeur)
9	$E \times 30^9$	250 s	8 m	800 km	1 tous les 10 ans
8	$E \times 30^8$	85 s	5 m	250 km	1
7	$E \times 30^7$	15 s	1 m	50 km	10
6	$E \times 30^6$	3 s	20 cm	10 km	100
5	$E \times 30^5$	1 s	5 cm	3 km	1 000
4	$E$	0,3 s	2 cm	1 km	10 000
3	$E / 30$				> 100 000
2	$E / 30^2$				
1	$E / 30^3$				

**I.4.2. l'intensité**

L'intensité désigne les conséquences du tremblement de terre. En général, elle reflète le sentiment de la population face à d'éventuels dommages aux constructions ou à l'environnement, et elle est maximale à proximité du plan de faille, ce qui est appelé une intensité épiscopentrale.

En général, l'intensité est exprimée en chiffres romains pour la différencier de la magnitude (chiffres arabes).

Les échelles MSK 1964 (Medvedev, Sponheuer, Karnik) et EMS-98 (European Macroseismic Scale, 1998) sont les plus couramment utilisées en Europe. La version la plus récente de l'échelle EMS-98 (Tab.3) convient particulièrement aux diverses catégories de constructions actuelles. [07].

*Tableau 3 : Description de l'échelle d'intensité macrosismique EMS-98*

I Imperceptible		
II	A peine ressenti	Ressenti seulement par quelques rares personnes au repos dans leurs habitations.
III	Faible	Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou léger tremblement.
IV	Largement ressenti	Ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques rares personnes à l'extérieur. Quelques personnes endormies sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle font un bruit de tremblement.
V	Fort	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs sont réveillés. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans toute leur structure. Les objets suspendus oscillent nettement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent et se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Quelques objets tombent. Quelques maisons subissent de légers dégâts non

		structuraux (légères fissures, chute de petits morceaux de plâtre).
<b>VII</b>	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Le mobilier est déplacé et les objets tombent des étagères en grand nombre. De nombreux bâtiments bien construits subissent des dégâts modérés (petites fissures dans les murs, chute de plâtre, chutes partielles de cheminées). Des bâtiments plus anciens présentent des fissures dans les murs et des désordres au niveau des cloisons.
<b>VIII</b>	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout. De nombreuses maisons présentent des crevasses dans les murs. Quelques bâtiments bien construits présentent des désordres au niveau des murs, tandis que d'autres bâtiments plus anciens s'effondrent partiellement.
<b>IX</b>	Destructeur	Panique générale. De nombreuses constructions s'effondrent. Même les bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants (désordres au niveau des murs et effondrement partiel des structures).
<b>X</b>	Très destructeur	De nombreux bâtiments pourtant bien construits s'effondrent.
<b>XI</b>	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent. Quelques bâtiments construits selon les règles parasismiques sont détruits.
<b>XII</b>	Catastrophe complète	Presque tous les bâtiments sont détruits.

#### IV.5. Répartition des séismes sur le globe terrestre

L'énergie dégagée par tous les tremblements de terre représente un millième du flux de chaleur interne, ce qui est assez faible. Toutefois, l'analyse des tremblements de terre est essentielle pour la géologie. La géographie des tremblements de terre permet de mettre en évidence quelques grandes régions souvent affectées. Trois zones présentent une sensibilité particulière. (Figure.4). Une petite région très étroite qui s'étend de la Méditerranée à l'Indonésie, en passant par le Proche et le Moyen-Orient, l'Himalaya et la Birmanie ; • une ceinture entourant le Pacifique avec la Cordillère des Andes, la Sierra Madre au Mexique, la Californie, l'Alaska, le Japon, la Chine orientale, les îles du Sud-Est asiatique et la Nouvelle-Zélande ; les centres des océans où se trouvent les dorsales médio-océaniques. [08].

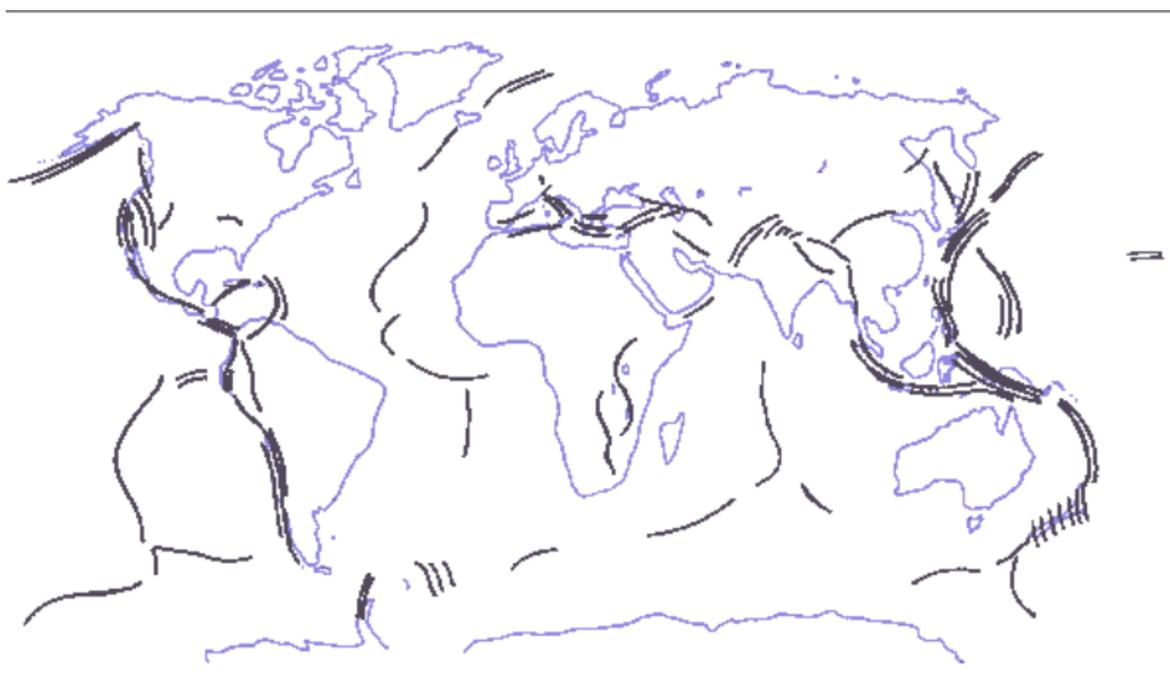


Figure 6: Carte simplifiée montrant la répartition des séismes sur Terre

Les différentes régions touchées par les séismes ont reçu des indices de sismicité en fonction du nombre de séismes par an sur une même superficie. L'analyse de la carte de Ces indices, en particulier en examinant attentivement les régions qui n'ont pas été touchées par les séismes, La plupart des tremblements de terre se produisent sur des fissures à la limite des plaques tectoniques. Les tremblements de terre se produisent dans des zones de subduction ou de collision où des plaques tectoniques se chevauchent ou s'opposent, ainsi que dans les dorsales médio-océaniques où des plaques tectoniques s'écartent. Il y a aussi de nombreux tremblements de terre près des zones volcaniques : ils sont dus aux mouvements du magma sous la surface.

## **CHAPITRE II**

### **EFFETS DES SEISMES SUR LES PROFILS DU SOL**

### II. Effets des séismes sur les profils du sol

#### II.2. Introduction

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. L'onde peut traverser un environnement sans avoir de conséquences durables. Les particules élémentaires seront "poussées" par l'impulsion initiale, qui va "pousser" d'autres particules et reprendre leur position. Ces particules nouvelles vont "pousser" les suivantes et reprendre leur position, etc. Les vibrations provoquées par un tremblement de terre se répandent dans tous les sens. La terre est traversée par des ondes de volume et par des ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Elles se succèdent et se superposent sur les relevés des sismomètres. La vitesse et l'ampleur de leur propagation sont influencées par les structures géologiques traversées c'est la raison pour laquelle les signaux enregistrés sont le résultat d'une combinaison d'effets associés à la source, aux milieux traversés et aux agents de mesure.

#### II.2. Types d'ondes

##### II.2.1. Les ondes P

Sont des ondes de compression, ce qui signifie qu'elles provoquent des variations de pression et de densité du matériau qu'elles traversent. Ces variations se propagent sous forme de zones de compression et de dilatation.

##### II.2.2. Les ondes S

Egalement appelées ondes de cisaillement ou ondes secondaires, sont l'un des principaux types d'ondes sismiques provoquées par un tremblement de terre ou une autre source d'énergie souterraine.

##### II.2.3. Les ondes de Rayleigh

Egalement appelées ondes R, sont un type particulier d'ondes de surface qui se propagent le long de la surface de la Terre suite à un tremblement de terre, une éruption volcanique ou une explosion. Elles font partie des ondes sismiques, et sont nommées d'après Lord Rayleigh, qui en a prédit l'existence en 1885.

#### II.3. Caractéristiques principales

##### II.3.1. Pour les ondes p

- **La rapidité** : Les ondes P sont les ondes sismiques les plus rapides, voyageant généralement à environ 6 kilomètres par seconde (6 km/s) dans la croûte terrestre. Cela signifie qu'elles sont les premières ondes sismiques à être détectées par un sismomètre lors d'un tremblement de terre.

- **Propagation** Les ondes P peuvent se propager dans tous les types de milieux, y compris les solides, les liquides et les gaz. Cela est dû à leur capacité à comprimer et dilater le matériau.
- **Mouvement des particules** : Lors de leur passage, les particules du sol vibrent d'avant en arrière dans la même direction que la propagation de l'onde.

### II.3.2. Pour les ondes S

- **Propagation** : se propagent uniquement dans les milieux solides (ne traversent pas les liquides)
- **Vitesse** : Plus lentes que les ondes P (environ 3,5 km/s dans la croûte terrestre)
- **Effets** : Provoquent un mouvement de vibration latéral (de cisaillement) du sol, perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Ce mouvement est souvent ressenti comme un tremblement secouant lors d'un séisme.

### II.3.3. Pour les ondes de Rayleigh

- **Mouvement** : Contrairement aux ondes P et S qui se propagent à l'intérieur de la Terre, les ondes de Rayleigh se déplacent le long de la surface. Elles provoquent un mouvement similaire à celui d'une vague roulant sur l'eau, mais dans le sol. Ce mouvement combine à la fois des vibrations verticales et horizontales du sol, suivant une ellipse allongée dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation.
- **Amplitude** : L'amplitude des ondes de Rayleigh diminue généralement de manière exponentielle avec la profondeur, ce qui signifie qu'elles sont plus fortes en surface et s'atténuent rapidement en pénétrant le sol.
- **Vitesse** : Les ondes de Rayleigh se propagent plus lentement que les ondes P et S, mais plus rapidement que les autres types d'ondes de surface. Leur vitesse dépend des propriétés du sol qu'elles traversent.
- **Domages** : Les ondes de Rayleigh sont souvent responsables des dommages les plus importants causés par les tremblements de terre, car leur mouvement ondulatoire et leur grande amplitude peuvent secouer et fissurer les structures.

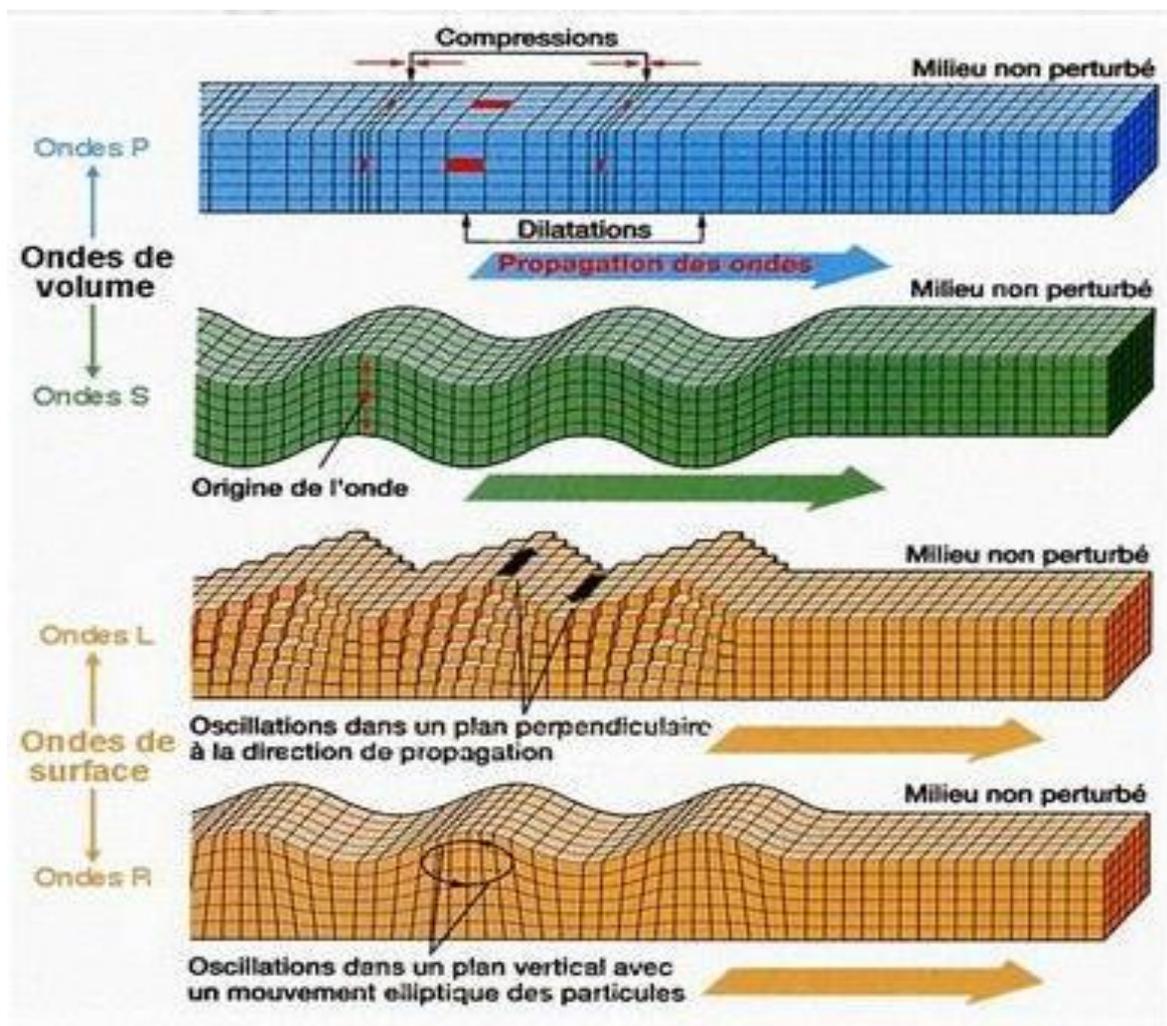


Figure 7: Ondes sismiques (Modifié d'après Bruce A. Bolt, 1978)

Tableau 4: Comparaison entre les ondes sismiques

Onde sismique	Type	Propagation	Mouvement	Vitesse	Importance
Onde P	Onde primaire	Toutes directions à partir du foyer	Compression et dilatation	Plus rapide	Premières vibrations ressenties
Onde S	Onde secondaire	Milieux solides seulement	Cisaillement	Plus lente que P	Secousses plus importantes
Onde de Rayleigh	Onde de surface	Le long de la surface de la Terre	Mouvement ondulatoire (vertical et horizontal)	Plus lente que P et S	Cause des dommages les plus importants

## II.4. La propagation des ondes sismiques

En cas de discontinuité (changement de milieu), une onde P ou une onde S peuvent produire quatre ondes : deux ondes P – réfléchi et réfracté – et deux ondes S – réfléchi et réfracté – (figure.8). Le milieu de propagation des ondes n'est pas uniforme sous la surface de la Terre : sa densité augmente. Cela explique le mouvement des ondes car à chaque modification de l'environnement, la trajectoire des ondes est légèrement modifiée selon les lois de Descartes [09].

- **L'angle de réflexion (i2)** L'angle d'incidence (i1) de l'onde réfléchi par rapport à une "verticale" est égal à l'angle d'arrivée (i1) dans la même "verticale",  $i_1 = i_2$  [09].
- **L'angle de réfraction (r)** L'angle d'incidence de l'onde réfracté par rapport à une "verticale" n'est pas égal à l'angle d'arrivée de cette même "verticale". Il suit la loi suivante :  $n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(r)$  où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des différents milieux, qui sont fortement liés à la densité des milieux [09].

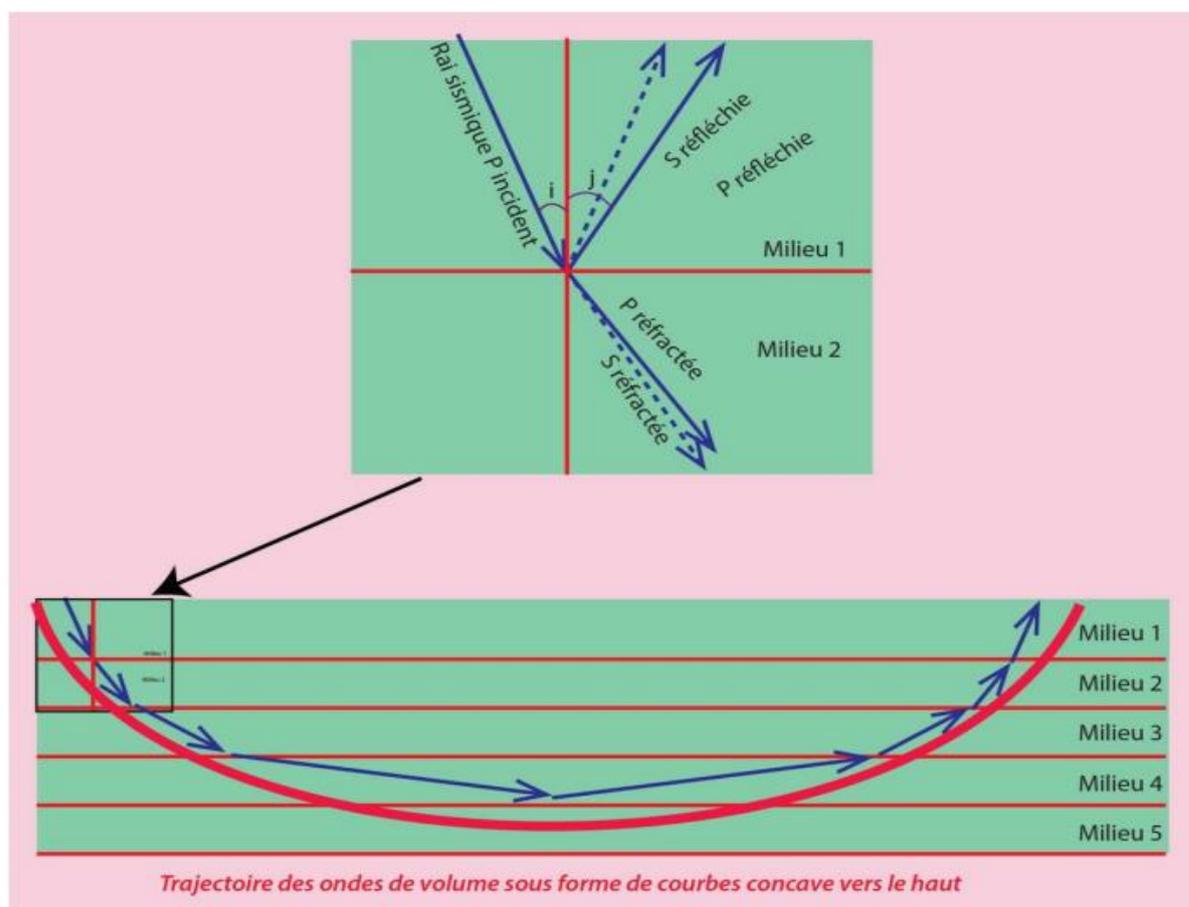


Figure 8: Propagation des ondes sismiques dans des milieux à densité croissante vers la profondeur

L'onde réfractée progresse donc, approximativement, dans des milieux de densité croissante sous la forme d'une courbe et, à un moment donné, lorsque la trajectoire de l'onde est devenue presque parallèle à la ligne de changement de milieu (c'est-à-dire, lorsque la trajectoire de l'onde, à la suite des différentes réfractions, est devenue presque horizontale), il y a réflexion totale : l'onde est entièrement réfléchie et repart vers la surface de la terre.

C'est de cette manière que les sismomètres ont été complètement réfléchis et ont traversé des milieux plus denses où leur vitesse était augmentée par rapport à la surface. Ainsi, les densités des milieux et les discontinuités entre les milieux de différentes natures peuvent être mesurées. Cependant, les sismomètres placés à une distance adéquate du point de départ d'un séisme enregistrent les ondes P si elles parviennent jusqu'à eux, mais jamais les ondes S. Il est possible d'exister assez profondément pour ne pas perturber les ondes S près du foyer, un environnement qui se comporte comme un liquide. Un seul type d'onde P1 directe est enregistré dans une station proche de l'épicentre. Une autre onde P2, plus rapide, est enregistrée dans une station éloignée, mais l'arrivée est tardive, car son trajet est plus long. On interprète cette onde comme une onde réfléchie. Une interface, ou discontinuité, existe donc entre deux enveloppes.

### II.5. Les courbes temps/distance

On les désigne aussi sous le nom de courbes hodochrones ou de courbes de propagation (figure 9). Il faut qu'elles soient repérées par deux axes rectangulaires. L'intervalle de  $t$  entre l'arrivée des ondes à l'épicentre et leur arrivée aux différentes stations d'enregistrement est porté sur l'axe des ordonnées (axe « vertical »). La durée nécessaire pour que les ondes atteignent la station d'enregistrement dépend uniquement de la distance  $\Delta$ . Autrement dit, pour chaque valeur de  $\Delta$ , il n'y a qu'une seule valeur de  $t$  (et une seule valeur de  $(t_s - t_p)$ ) et inversement. La vitesse  $\Delta/dt$  donnée par ces courbes fluctue avec la distance  $\Delta$  pour les P et les S, et elle augmente particulièrement avec cette distance vers  $d=103^\circ$ . (C'est la vitesse apparente car le trajet réel des P et des S est interne et que  $\Delta$ , qui est mesurée à la surface, n'est pas la distance réelle parcourue par les P et les S). - La courbe des ondes de longue période est une droite et cela signifie que leur vitesse est constante (à l'échelle des distances considérées ici, autrement dit à l'échelle de la longueur de la circonférence terrestre. [10].

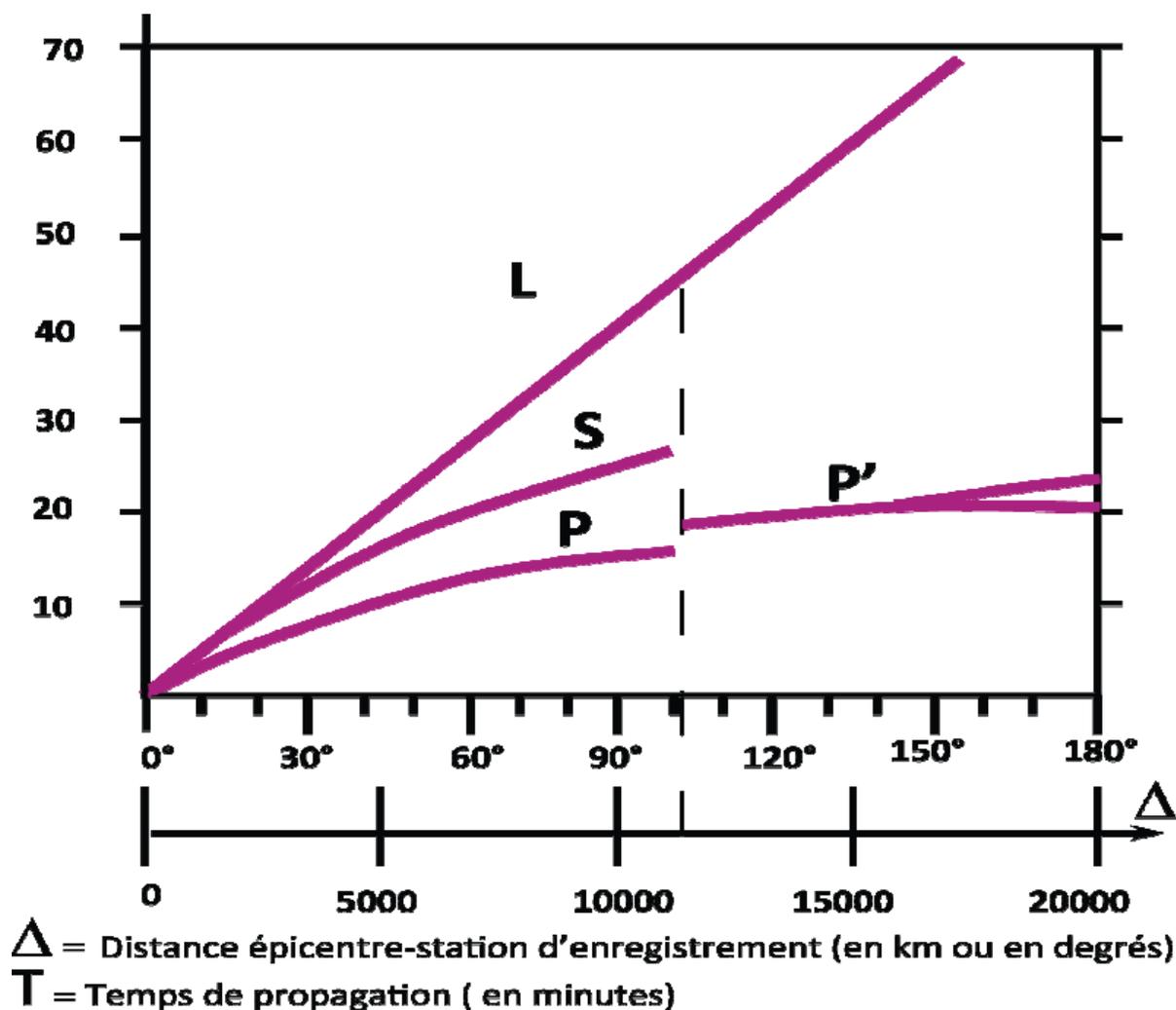


Figure 9: Courbe de propagation des ondes sismiques

#### IV.5. L'enregistrement des ondes sismiques

##### IV.5.1. Les sismographes

Les sismographes sont des appareils très sensibles. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est très amplifié 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.8). 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 verticale. Dans des stations d'observation sismographiques il faut, au minimum, trois sismographes :

Un horizontal et deux verticaux. Les deux sismographes horizontaux sont placés de manière à enregistrer la composante X (Nord-Sud) et la composante Y (Est-Ouest), tandis que le sismographe vertical enregistre la composante Z. [11].

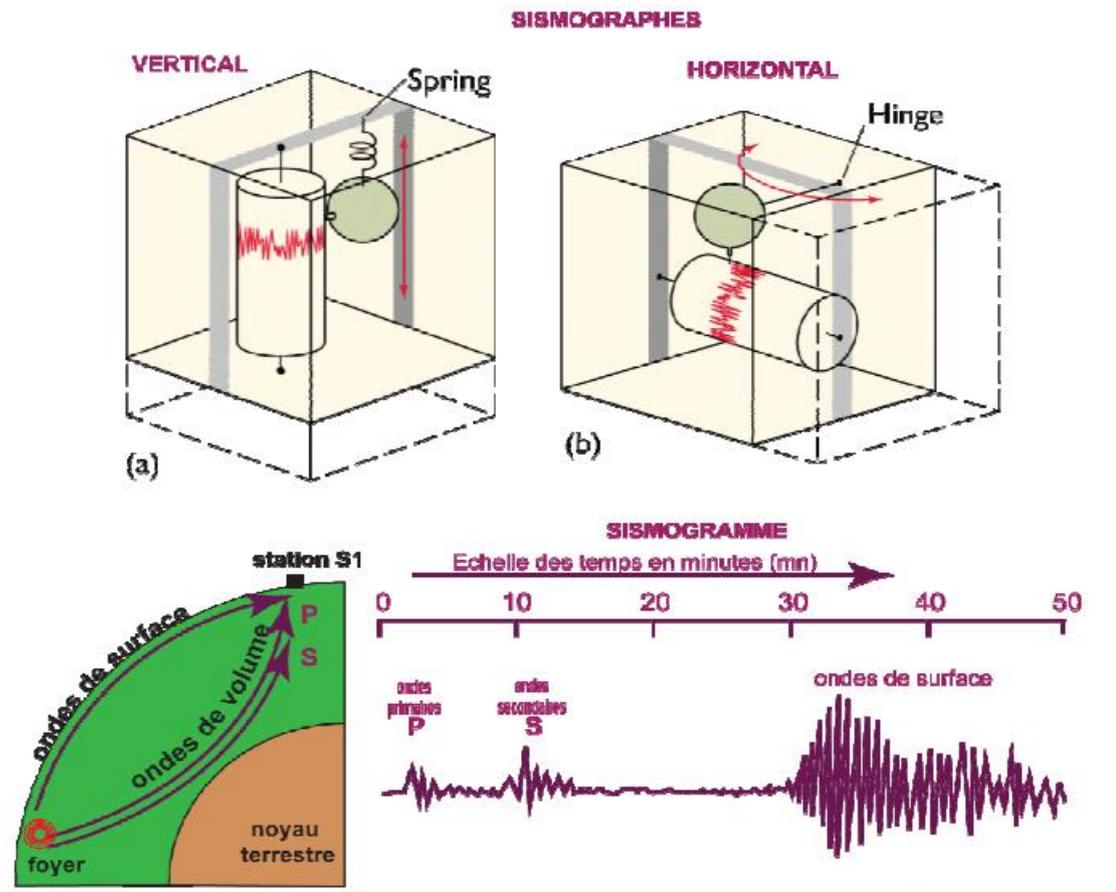


Figure 10: Sismographe et sismogramme

### II.5.2. Le sismogramme

Un sismogramme est l'enregistrement des sismographes (Fig.10), une courbe qui évolue en fonction de l'énergie libérée au foyer sous forme d'ondes sismiques, de la distance entre le foyer et la station sismographique, de la nature et de la structure du milieu traversé par les ondes et, enfin, du type de sismographe utilisé. Les ondes sismiques arrivent aux stations d'enregistrement et ne comprennent pas seulement les ondes qui ont suivi le chemin le plus direct entre le foyer et la station, mais aussi les ondes qui n'y sont parvenues qu'après une série de réflexions et/ou de réfractions. [11].

### II.4. Types d'effet sur les profils du sol

#### II.4.1. Les effets de surface

##### II.4.1.1. Érosion

L'érosion désigne l'arrachement et le transport des matériaux de la surface du sol par des agents naturels (eau, vent, gel) ou par des activités humaines (chantiers de construction). Elle peut poser de sérieux problèmes de sécurité et de stabilité pour les infrastructures construites et parmi les Impact de l'érosion :

- Instabilité des sols : L'érosion peut affaiblir les sols qui supportent les structures telles que les routes, les ponts et les bâtiments, ce qui peut entraîner des fissures, des tassements et même des effondrements.
- Recouvrir les canalisations souterraines : ce qui rend difficile leur accès pour l'entretien et les réparations.
- Colmatage des drains : Les sédiments érodés peuvent obstruer les drains et les systèmes de collecte des eaux pluviales, ce qui peut entraîner des problèmes d'infiltration et des inondations.

##### • II.4.1.2. Déposition

La déposition est un processus géologique par lequel des matériaux tels que des sédiments, des cendres volcaniques ou des produits chimiques sont déposés à la surface de la Terre. Ce processus peut se produire sous l'action de divers agents, notamment l'eau, le vent, la glace et la gravité. [12].

La déposition est un processus important qui façonne la surface de la Terre. Elle est responsable de la formation de nombreuses caractéristiques géologiques, telles que les plaines inondables, les deltas, les dunes de sable et les glaciers. La déposition joue également un rôle important dans le cycle de l'eau et le cycle du carbone et peut trouver parmi les Types des dépôts :

- **Dépôts naturels** : Alluvions qui est les dépôts transportés et déposés par l'eau courante, généralement riches en nutriments et contribuant à la fertilité du sol. Lœss qui est les dépôts de poussière fine transportés par le vent, souvent présents dans les régions arides et semi-arides. Moraines qui sont les dépôts de roches et de sédiments laissés par les glaciers en fonte et enfin on a les cendres volcaniques qui sont des dépôts de matériaux éjectés lors d'éruptions volcaniques, pouvant modifier la chimie du sol et affecter la végétation.
- **Dépôts anthropiques** : Sédiments de dragage qui sont des dépôts provenant du dragage des rivières, des lacs ou des fonds marins, utilisés pour l'aménagement

paysager ou la construction. Déchets solides municipaux qui sont des dépôts d'ordures ménagères et d'autres déchets, pouvant polluer le sol et contaminer les eaux souterraines. Engrais et amendements qui sont des dépôts de matériaux destinés à améliorer la fertilité du sol ou sa structure, mais pouvant avoir des impacts négatifs s'ils ne sont pas utilisés de manière durable.

### II.4.1.3. Croûtage

Le croûtage est la formation d'une couche dure à la surface du sol. Cela peut être causé par l'impact des gouttes de pluie, le dessèchement du sol ou la compaction. Le croûtage peut empêcher l'émergence des plantules et réduire l'infiltration de l'eau et parmi les impacts de croûtage :

- **Réduction de l'infiltration de l'eau :** La couche croûtée empêche l'eau de pénétrer dans le sol, ce qui entraîne un ruissellement accru et une augmentation du risque d'érosion. la stabilité des pentes et des talus, augmentant le risque de glissements de terrain et d'affaissements. Le ruissellement d'eau peut également entraîner une surcharge des systèmes de drainage, provoquant des inondations locales. [13].

### II.4.1.4. Acidification

L'acidification est le processus par lequel le pH du sol diminue. Cela peut être causé par les pluies acides, l'utilisation d'engrais acides ou la décomposition de la matière organique. L'acidification peut réduire la disponibilité des nutriments pour les plantes et favoriser la croissance de certaines espèces d'insectes et de maladies.

## II.4.2. L'effet de la profondeur

### II.4.2.1. Capacité portante

La capacité portante du sol est sa capacité à supporter des charges sans se déformer excessivement. Elle dépend de plusieurs facteurs, dont la profondeur et la composition du sol. En général, la capacité portante augmente avec la profondeur et parmi les impacts de la capacité portante sur le profil du sol :

- **Distribution des charges :** La charge appliquée par une structure se répartit dans le sol selon un angle de talus dépendant des propriétés du sol.
- **Tassement du sol :** Sous la charge, le sol se tasse, ce qui entraîne une compression des pores et une réduction de son volume. Le tassement dépend de la capacité portante du sol et de la magnitude de la charge.
- **Déformation du profil du sol :** Le tassement différentiel du sol peut entraîner une déformation du profil du sol, avec des affaissements localisés ou des soulèvements.

- **Risque de rupture** : Si la charge appliquée dépasse la capacité portante du sol, le sol peut se rompre, ce qui peut entraîner l'effondrement de la structure.

### II.4.2.2. Tassement

Le tassement est le processus par lequel le sol se comprime sous l'effet d'une charge. La quantité de tassement dépend de la profondeur et de la compressibilité du sol. Les sols meubles et profonds sont plus susceptibles de se tasser que les sols denses et peu profonds, parmi les effets du tassement sur le profil du sol :

- **Modification de la structure du sol** : Le tassement réduit la porosité du sol, ce qui diminue l'espace disponible pour l'air et l'eau. Cela affecte la circulation de l'oxygène et des nutriments dans le sol, essentiels pour la croissance des plantes. La structure du sol devient plus dense et compacte, ce qui peut entraver la pénétration des racines et l'infiltration de l'eau.
- **Réduction de la capacité de drainage** : Un sol tassé a une capacité de drainage réduite, ce qui signifie qu'il évacue l'eau plus lentement. Cela augmente le risque d'engorgement et d'inondation, surtout après de fortes pluies. L'eau stagnante peut asphyxier les racines des plantes et favoriser le développement de maladies fongiques.
- **Augmentation du risque d'érosion** : Un sol tassé est plus susceptible à l'érosion hydrique, car l'eau ne s'infiltré pas efficacement dans le sol et ruisselle à la surface. Le ruissellement emporte les particules fines du sol, réduisant la fertilité du sol et pouvant causer des dommages aux cultures et aux infrastructures.
- **Impact sur la vie du sol** : Le tassement du sol perturbe l'habitat des micro-organismes et des vers de terre, qui jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique et la fertilité du sol. La réduction de la diversité et de l'activité biologique du sol peut affecter négativement la croissance des plantes et la santé globale du sol.
- **Modification du profil du sol** : Le tassement peut entraîner une baisse de la surface du sol, ce qui peut affecter le drainage et le microclimat local.

Les facteurs influençant le tassement du sol :

- **Type de sol** : Les sols argileux et limoneux sont plus susceptibles au tassement que les sols sableux, car leurs particules fines se compactent plus facilement.
- **Teneur en eau du sol** : Un sol humide est plus susceptible au tassement qu'un sol sec, car l'eau lubrifie les particules du sol et facilite leur compaction.

- **Charge appliquée** : La quantité de poids appliquée sur le sol est un facteur déterminant du tassement. Plus la charge est importante, plus le tassement sera important.
- **Activité de surface** : Le passage répété de personnes, d'animaux ou de machines sur le sol peut entraîner un tassement important, surtout si le sol est humide.

### II.4.2.3. Stabilité des pentes

La stabilité des pentes est influencée par la profondeur et la composition du sol. Les pentes raides avec des sols meubles sont plus susceptibles de subir des glissements de terrain que les pentes douces avec des sols denses et parmi les facteurs influençant la stabilité des pentes :

#### 1-Propriétés du sol :

- **Type de sol** : La composition granulométrique (sable, limon, argile) et la cohésion du sol influencent sa résistance au cisaillement, un facteur clé de la stabilité des pentes. Les sols argileux et limoneux, généralement plus fins et plus cohésifs, sont plus susceptibles aux glissements de terrain que les sols sableux. [14].
- **Densité et porosité** : Un sol dense et compacté offre une meilleure résistance au cisaillement qu'un sol meuble et poreux. La porosité, en revanche, permet l'infiltration de l'eau, qui peut fragiliser le sol si elle s'accumule et exerce une pression excessive.
- **Teneur en eau** : La teneur en eau du sol affecte sa cohésion et sa résistance au cisaillement. Un sol saturé d'eau perd sa cohésion et devient plus susceptible aux glissements de terrain. [14].

#### 2-Géométrie de la pente :

- **Inclinaison** : L'inclinaison de la pente est un facteur déterminant de sa stabilité. Des pentes plus raides sont plus sujettes aux glissements de terrain que des pentes plus douces.
- **Hauteur** : La hauteur de la pente influence également sa stabilité. Des pentes plus hautes accumulent plus de poids et sont donc plus susceptibles de se rompre.
- **Forme** : La forme de la pente, concave, convexe ou rectiligne, peut influencer la distribution des contraintes et la concentration des eaux de surface, affectant ainsi la stabilité.

#### 3-Végétation

- **Couverture végétale** : La présence d'une couverture végétale dense, avec des racines profondes, renforce la structure du sol et augmente sa résistance au cisaillement, contribuant ainsi à la stabilité des pentes.
- **Type de végétation** : Le type de végétation, arbres, arbustes ou herbes, influence l'efficacité du système racinaire et son impact sur la stabilité de la pente.

### 4-Conditions hydrogéologiques

- **Infiltration et écoulement de l'eau** : L'infiltration et l'écoulement de l'eau dans le sol peuvent affecter la teneur en eau du sol et sa stabilité. Une infiltration excessive ou un mauvais drainage peuvent fragiliser la pente.
- **Présence d'eaux souterraines** : La présence d'eaux souterraines peut saturer le sol et réduire sa cohésion, augmentant le risque de glissements de terrain.

#### II.4.2.4. Drainage

Drainage de l'eau dans le sol est influencé par la profondeur et la perméabilité du sol. Les sols profonds et perméables drainent l'eau plus facilement que les sols peu profonds et imperméables, ce dernier a beaucoup d'importance et parmi eux :

- **Aération du sol** : Un sol bien drainé assure une bonne circulation de l'air, ce qui est essentiel pour la respiration des racines des plantes et l'activité des micro-organismes du sol. Un sol gorgé d'eau peut asphyxier les racines et limiter la décomposition de la matière organique. [15].
- **Développement des racines** : Les racines des plantes ont besoin d'espace pour se développer et explorer le sol en quête d'eau et de nutriments. Un sol mal drainé peut restreindre la croissance des racines et limiter la capacité des plantes à absorber les ressources nécessaires à leur croissance. [15].
- **Structure du sol** : Un bon drainage contribue à maintenir une structure grumeleuse du sol, ce qui améliore la porosité et la perméabilité. Un sol mal drainé peut devenir compact et imperméable, augmentant le risque d'érosion et réduisant la capacité du sol à retenir l'eau. [15].
- **Production agricole** : Un drainage adéquat est essentiel pour une production agricole réussie. Un sol mal drainé peut entraîner des maladies des plantes, une réduction des rendements et une dégradation de la qualité des cultures. [15].

Parmi les types de drainage on trouve :

- **Drainage naturel** : Le drainage naturel se produit lorsque l'eau s'écoule du sol sous l'action de la gravité, à travers les pores et les fissures du sol. Ce type de drainage est influencé par la texture du sol, la topographie du terrain et la présence de couches imperméables.
- **Drainage artificiel** : Le drainage artificiel est mis en place lorsque le drainage naturel est insuffisant pour assurer une évacuation adéquate de l'eau du sol. Il existe différentes techniques de drainage artificiel, telles que :
  - **Drains enterrés** : Des tuyaux percés sont installés sous le sol pour collecter et évacuer l'eau vers un exutoire.
  - **Fossés** : Des fossés sont creusés à la surface du sol pour collecter et diriger l'eau de ruissellement vers un exutoire.
  - **Buttage** : Des billons de terre sont créés pour surélever le niveau du sol et améliorer le drainage des parcelles agricoles.
  - **Labour profond** : Le labour profond peut fracturer les couches imperméables du sol et améliorer le drainage interne.

### II.4.2.5. Caractéristiques géotechniques

La profondeur influence les caractéristiques géotechniques du sol, comme la résistance au cisaillement, la compressibilité et l'angle de frottement interne. Il est crucial de connaître ces caractéristiques afin de concevoir les fondations et les structures. Parmi les effets de profondeur sur les profils de sol en génie civil, voici quelques exemples :

- Les fondations doivent être profondes en fonction de la capacité portante du sol.
- L'épaisseur des ancrages est influencée par la résistance au cisaillement du sol.
- Le drainage des eaux pluviales et des eaux usées repose sur la capacité du sol à être perméable.
- Les tunnels varient en profondeur en fonction de la stabilité du sol et de la présence d'obstacles.

En résumé, il est essentiel de prendre en considération l'impact de la profondeur sur les profils de sol dans de nombreux projets de génie civil. Il est crucial de bien comprendre les caractéristiques du sol à différentes profondeurs afin d'assurer la sécurité et la performance des structures.

## II.5. Étude détaillée des effets du Sol

### II.5.1. La liquéfaction

#### II.5.1.1. Définition

Le processus de liquéfaction du sol est une opération géotechnique qui implique un sol meuble et saturé en eau perd sa résistance et se comporte comme un liquide sous l'effet de vibrations intenses, généralement causées par un séisme.

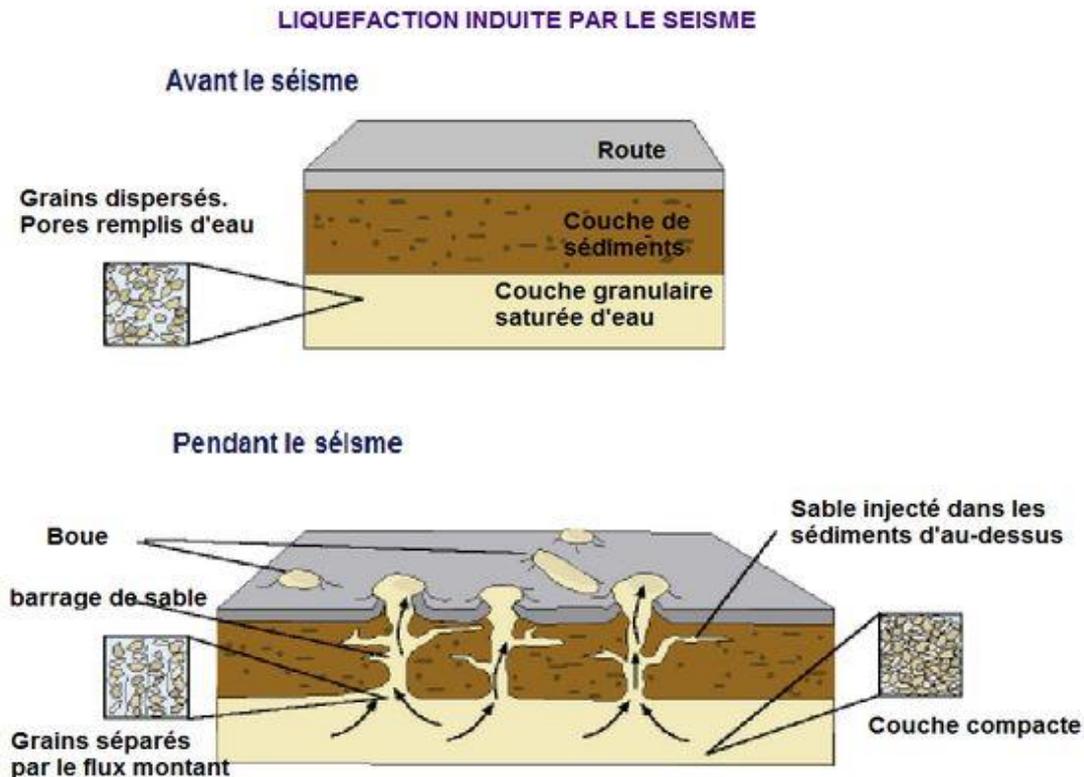


Figure 11: liquéfaction induit par le séisme

#### II.5.1.2. Processus de liquéfaction

- **Secousses sismiques** : La pression interstitielle dans le sol est augmentée par les vibrations produites par un séisme.
- **Réduction de la résistance au cisaillement** : En augmentant la pression interstitielle, la friction entre les particules du sol diminue, ce qui réduit sa capacité.
- **Comportement liquéfié** : Le sol se transforme en un état semi-liquide, perdant sa cohésion et sa capacité à supporter des structures. [16].

#### II.5.1.3. Les Facteurs Favorisant la liquéfaction :

- **Sol meuble** : Les sols sableux et limoneux fins sont plus sensibles à la liquéfaction.
- **Saturation en eau** : La présence d'eau est indispensable pour la liquéfaction.

- **Intensité du séisme** : Des secousses sismiques intenses sont nécessaires pour déclencher la liquéfaction.
- **Densité relative du sol** : Un sol dense est moins susceptible de se liquéfier.
- **Granulométrie du sol** : Un sol qui présente une répartition homogène des grains présente une plus grande probabilité de liquéfier.
- **Historique de liquéfaction** : Les sols ayant déjà subi une liquéfaction sont plus sensibles.

### II.5.2. Étude Détaillée du Tassement et de l'Affaissement

#### II.5.2.1. Définitions de Tassement

Processus de compression du sol sous l'effet d'une charge, entraînant une diminution de son volume.

#### II.5.2.3. Définitions de Affaissement

Abaissement du niveau du sol suite à un tassement, une érosion, une extraction de ressources naturelles ou un phénomène naturel (karst).

#### II.5.2.4. Types de Tassement

- **Tassement primaire** : Tassement initial et rapide du sol sous l'effet d'une charge.
- **Tassement secondaire** : Tassement lent et continu du sol sur une longue période.
- **Tassement différentiel** : Tassement inégal du sol, pouvant causer des fissures et des dommages aux structures.

#### II.5.2.5. Causes du Tassement :

- **Charges** : Poids des bâtiments, des infrastructures et des remblais.
- **Consolidation** : Compression des sols argileux sous l'effet d'une charge et d'une dissipation de l'eau interstitielle.
- **Dessèchement** : Rétrécissement du sol argileux lors de la perte d'eau.
- **Érosion** : Départ des particules du sol par l'eau ou le vent.
- **Affaissement minier** : Abaissement du sol suite à l'extraction de ressources naturelles.

### II.5.3. Étude Détaillée d'un Glissement de Terrain

#### II.5.3.1. Introduction :

Le glissement de terrain se produit lorsque des terrains meubles ou rocheux se déplacent le long d'une surface de rupture. Les mouvements de terrain peuvent causer des catastrophes naturelles, provoquant des dégâts. Des décès. En général, ils se manifestent dans des matériaux peu cohérents (marnes, argiles) [17].

Lorsque les contraintes de ce cisaillement, causées par les forces motrices comme le poids, dépassent la résistance du sol le long de la surface de rupture, on observe un glissement de terrain.

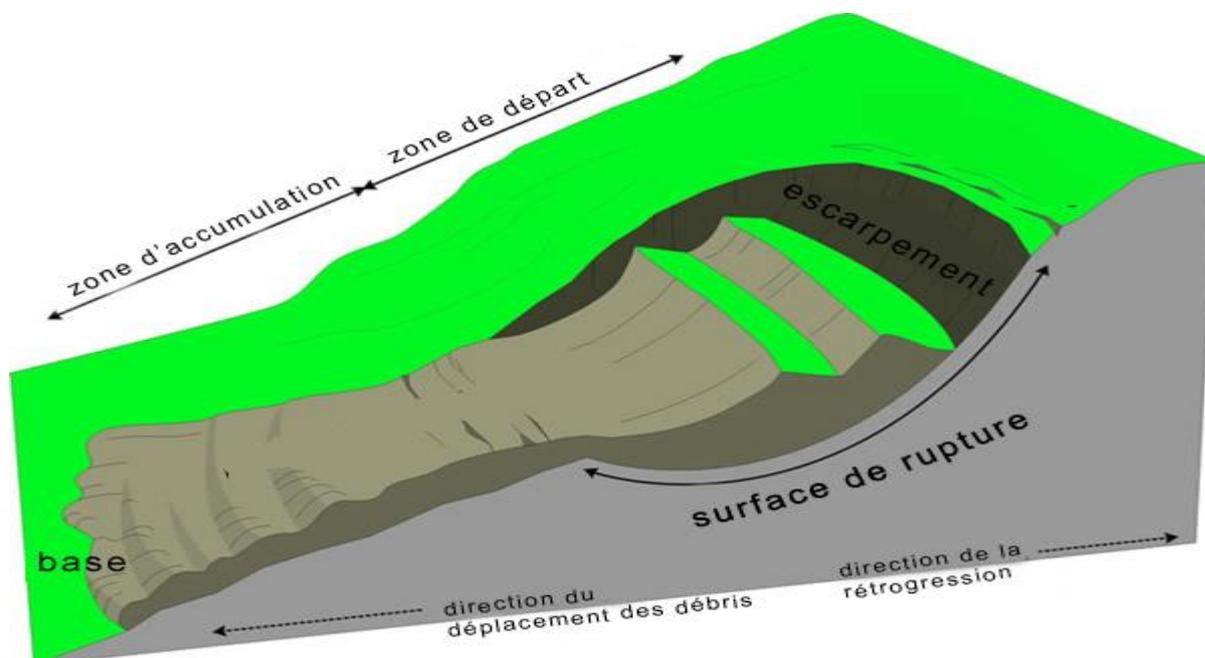


Figure 12: Le glissement de terrain

### II.5.3.2. Types de Glissements de Terrain

Différents glissements de terrain peuvent survenir, chacun ayant ses propres caractéristiques et origines. Voici certains des types principaux de mouvements de terrain :

- **Les chutes de pierres :** Les pierres tombantes sont des roches ou des rochers qui se détachent d'une pente abrupte et tombent ou roulent le long de la pente. Les mouvements de terrain de ce genre sont fréquemment provoqués par l'érosion et l'érosion de la paroi rocheuse, ainsi que par l'activité sismique. [18].
- **Les coulées de débris, ou coulées de boue,** sont des coulées qui se forment lorsque le sol, la roche et l'eau se déversent rapidement le long d'une pente. Souvent, ces types de mouvements de terrain sont provoqués par de fortes précipitations ou une fonte rapide des neiges, ce qui peut assécher le sol et perturber la pente. [18].
- **Les glissements de terrain** surviennent lorsqu'une masse de sol ou de roche se déplace le long d'une pente. Différents facteurs peuvent provoquer ces types de mouvements de terrain, tels que des précipitations abondantes, une activité sismique et des activités humaines telles que la construction ou l'exploitation minière.

- **Le mouvement du sol** ou de la roche le long d'une pente se glisse de manière lente et continue. La plupart du temps, ce genre de mouvement de terrain est provoqué par les conditions météorologiques et l'érosion à long terme de la pente, ainsi que par des variations de l'humidité et de la température du sol.
- Les affaissements sont causés par le mouvement d'un bloc de sol ou de roche qui tourne et glisse le long d'une pente courbe. Les mouvements de terrain de ce genre sont fréquemment provoqués par une combinaison de facteurs géologiques, comme le type de sol ou de roche et l'angle de la pente. [18].

La surface de rupture du terrain, ou surface de cisaillement, peut-être : plane : droite, rotative : courbée. La vitesse de déplacement du terrain lors d'un glissement est d'ordinaire lente, avec un mouvement de quelques millimètres à quelques mètres par an.

### II.5.3.3. Causes principales

- **La nature des sols et l'hygrométrie** : L'hygrométrie, c'est-à-dire la mesure de l'humidité de l'air, influence considérablement les caractéristiques mécaniques des diverses essences de sol. Les mouvements de terrain sont beaucoup plus courants pendant les périodes de fortes précipitations. Les sols argileux présentent une grande sensibilité à l'eau, ce qui les rend plus susceptibles de subir des mouvements de terrain. Cela s'explique par le fait que ces sols absorbent aisément l'eau. L'érosion est causée par la charge et la décharge d'eau du sol, ce qui rend le terrain plus vulnérable. En outre, l'eau peut geler une fois qu'elle est présente dans le sol. L'eau gelée occupe davantage de place et exerce des contraintes internes considérables sur le sol. Le dégel de l'eau entraîne des mouvements plus ou moins importants dans le sol pour qu'il retrouve sa forme d'avant le gel. [19].
- **Le chargement** : Le chargement d'un terrain englobe l'ensemble des éléments qui l'affectent. La probabilité d'un glissement de terrain est influencée par l'augmentation des charges en amont de la pente. Les charges en amont de la pente peuvent être augmentées par la construction d'un immeuble, la chute d'un rocher ou la fonte de glace d'un flanc de montagne. Les conséquences d'une réduction des appuis du sol au pied de la pente peuvent être tout aussi significatives. Il est possible que cette baisse des appuis en aval soit due à l'érosion du sol causée par l'eau stagnante en bas de la pente, ou à un décaissement qui permet de niveler un terrain en enlevant sa couche de terre supérieure [19].
- **L'activité humaine** : L'action humaine, telle que l'agriculture, peut accroître le risque de dérapage. Les opérations courantes telles que la déforestation, l'irrigation ou encore l'excavation permettent de rendre un terrain favorable à l'agriculture. Néanmoins, ces

activités ont tendance à accroître la consommation d'eau des sols. En outre, la pente est stabilisée grâce aux racines des plantes et des arbres.

### II.5.4. Les fissures et rupture du sol

#### II.5.4.1. Définition

Les fissures dans les sols sont des ruptures ou des fractures qui se forment à la surface ou à l'intérieur du sol. Elles peuvent avoir différentes origines et significations en fonction de leur cause et de leur contexte.

#### II.5.4.2. Types des fissures du sol

- **Fissures de retrait** : Ces fissures se forment généralement lorsqu'un sol argileux perd de l'humidité et se rétracte. Elles sont courantes dans les zones arides où les cycles de sécheresse et d'humidité entraînent des mouvements de retrait du sol. Ces fissures peuvent être superficielles ou s'étendre en profondeur dans le sol. [20].
- **Fissures de compression** : La pression exercée sur le sol, telle que le poids des bâtiments, des infrastructures, ou des véhicules. Il est possible qu'elles se manifestent près des fondations ou le long des routes où la charge est concentrée. Souvent, ces fissures sont liées à une érosion du sol. [21].
- **Fissures de cisaillement** : Les fissures de cisaillement se forment lorsque les différentes parties d'un sol se déplacent horizontalement les unes par rapport aux autres. En général, elles sont provoquées par des forces de cisaillement, telles que les mouvements tectoniques sur les failles ou les mouvements de terrain. Ces fissures peuvent être linéaires ou courbes selon la nature du mouvement. [22].
- **Fissures de dessiccation** : Ces fissures se forment lorsque le sol s'assèche rapidement, généralement après des pluies abondantes suivies d'une période de sécheresse. Elles sont courantes dans les sols argileux et peuvent être profondes et larges. Les fissures de dessiccation peuvent également se former dans les zones soumises à des cycles de gel-dégel. [22].
- **Fissures causées par des contraintes thermiques** : Les changements de température peuvent engendrer des pressions thermiques dans le sol, ce qui peut entraîner des fissures. Cela est vrai. Cette situation peut survenir dans les zones où les différences de température entre le jour et la nuit sont élevées, ainsi que dans les sols exposés à des températures extrêmes. [22].
- **Fissures liées à des mouvements du sol** : Des mouvements du sol tels que les glissements de terrain, les affaissements ou les cavités souterraines peuvent entraîner

des fissures à la surface du sol. Ces fissures sont souvent associées à des mouvements du sol sous-jacents et peuvent indiquer des problèmes de stabilité [23].

### II.6. Facteur favorisant les effets des séismes sur les profils de sol

#### II.5.1. Type de Sol

##### 1-Sols meubles et saturés :

Plus sensibles à la liquéfaction, aux glissements de terrain et aux affaissements.

Exemples : sols sableux, argileux, marécages.

##### 2-Sols denses et secs :

Moins sensibles aux effets d'un séisme.

Exemples : sols rocheux, graviers, sols compactés.

#### II.5.2. Topographie

##### 1-Pentes raides :

Augmentent le risque de glissements de terrain et d'éboulements.

Amplifient les secousses sismiques.

##### 2-Zones planes :

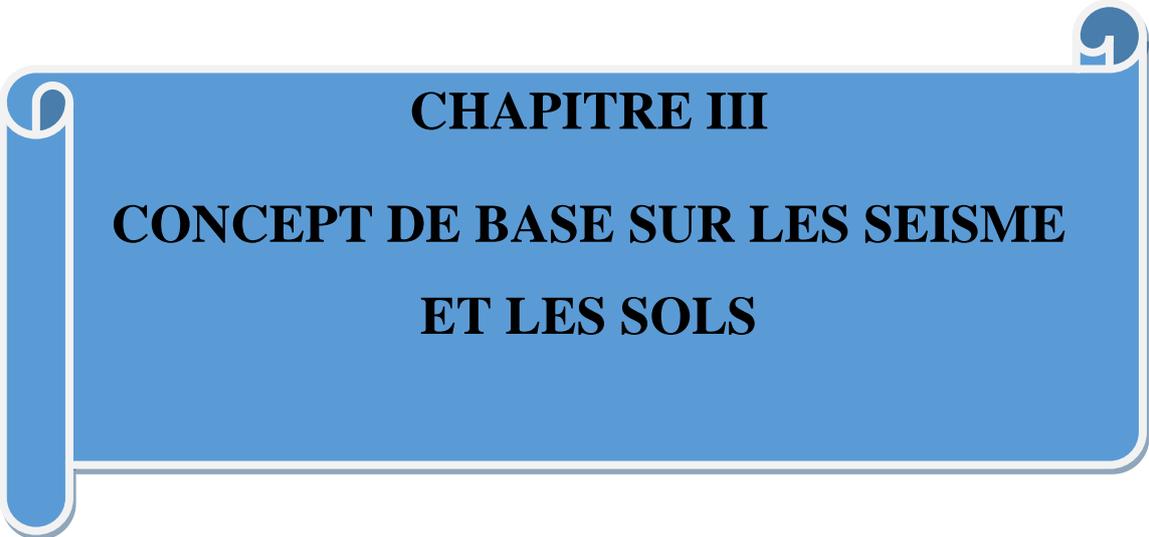
Moins exposées aux glissements de terrain.

Secousses sismiques moins amplifiées.

#### II.5.3. Présence d'eau

##### 1-Eau saturée dans le sol :

Offre un risque accru de liquéfaction et de mouvements de terrain.

A blue scroll graphic with a white border and a white shadow. The scroll is unrolled in the middle, showing the text. The top and bottom edges of the scroll are curled up, and the left edge is curled down.

## **CHAPITRE III**

# **CONCEPT DE BASE SUR LES SEISME ET LES SOLS**

## Introduction

Les vibrations sont des mouvements oscillatoires autour d'une position d'équilibre, caractérisés par une période, une fréquence et une amplitude. Elles peuvent se propager à travers les matériaux solides, liquides ou gazeux et affecter divers types de structures, des bâtiments aux ponts en passant par les pipelines et les équipements industriels. Les vibrations peuvent être classées en vibrations libres, où le système vibre naturellement sans influence externe après une perturbation initiale, et vibrations forcées, causées par des forces externes continues ou périodiques.

Les vibrations répétées peuvent entraîner une fatigue des matériaux, des déformations excessives et même des dommages structurels à long terme, compromettant ainsi la durabilité des infrastructures. Les vibrations excessives peuvent affecter le confort des occupants des bâtiments et des véhicules, influençant ainsi la qualité de vie et la productivité. Par exemple, des vibrations perceptibles dans les immeubles de bureaux peuvent perturber les activités quotidiennes des occupants. Les vibrations émises par les infrastructures peuvent avoir des répercussions sur l'environnement local, affectant la faune et la flore, en particulier dans les zones sensibles telles que les habitats aquatiques. L'étude des vibrations permet d'évaluer la réponse dynamique des structures face à différentes charges et conditions environnementales, ce qui est crucial pour concevoir des structures résilientes et adaptées aux besoins spécifiques de leur environnement.

### III.1. Caractéristiques des Vibrations

#### III.1.1. Amplitude

L'amplitude d'une vibration se réfère à l'ampleur maximale du mouvement oscillatoire par rapport à la position d'équilibre d'un système. Elle peut être mesurée de différentes manières selon le type de vibration :

- **Amplitude de déplacement** : Représente la distance maximale de déplacement d'un point oscillant par rapport à sa position d'équilibre. Par exemple, dans le cas d'une corde vibrante, l'amplitude de déplacement est la distance maximale que chaque point de la corde atteint lorsqu'elle oscille. [24]
- **Amplitude de vitesse** : Indique la vitesse maximale atteinte par un point oscillant pendant le mouvement vibratoire. Elle est directement liée à l'énergie cinétique du système vibratoire.

- **Amplitude d'accélération** : Décrit l'accélération maximale subie par un point oscillant pendant la vibration. Elle est associée à la force exercée sur les structures et les matériaux.

L'amplitude est généralement mesurée en unités spécifiques comme les mètres (m) pour le déplacement, les mètres par seconde (m/s) pour la vitesse et les mètres par seconde carrée (m/s<sup>2</sup>) pour l'accélération.

### III.1.2.Période

La période d'une vibration est la durée nécessaire pour accomplir un cycle complet d'oscillation. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence et peut être définie comme :

$$T=1/f$$

Où T est la période en secondes (s) et f est la fréquence en hertz (Hz). La période est une mesure fondamentale de la dynamique vibratoire et détermine la rapidité avec laquelle le système revient à sa position initiale après une perturbation. [25].

### III.1.3.Fréquence

La fréquence d'une vibration est le nombre de cycles complets d'oscillation qui se produisent par unité de temps. Elle est inversement proportionnelle à la période et peut être exprimée comme :

$$f=1/T$$

Où f est la fréquence en hertz (Hz) et T est la période en secondes (s). La fréquence est souvent mesurée en Hertz (Hz), équivalent à un cycle par seconde. [26].

- **Haute fréquence** : Correspond à des vibrations rapides, souvent associées à des sources comme le bruit haute fréquence ou les vibrations à haute vitesse dans les machines.
- **Basse fréquence** : Correspond à des vibrations plus lentes, telles que celles générées par les tremblements de terre ou les mouvements de véhicules lents.

### III.1.4.Phase

La phase d'une vibration indique la position relative d'un point oscillant par rapport à un point de référence à un moment donné. Elle est souvent mesurée en degrés ou en radians et donne des informations sur la synchronisation des oscillations dans des systèmes vibratoires complexes. [27].

- **Phase relative** : Compare la position actuelle d'un point oscillant par rapport à un point de référence au début du cycle ou à un autre point dans le cycle.

- **Déphasage** : Indique le retard ou l'avance entre les oscillations de différents points d'un système vibratoire.

### III.2.Types des vibration

#### III.2.1.Les vibrations libres

Représentent un mouvement oscillatoire d'un système autour d'une position d'équilibre stable, en l'absence de toute force d'excitation externe. Ce mouvement est caractérisé par sa fréquence propre, son amplitude et son amortissement. Un système vibrant librement est soumis à deux forces principales :

- **La force de rappel** : Elle ramène le système vers sa position d'équilibre et est proportionnelle à l'éloignement du système par rapport à cette position. Cette force peut être représentée par un ressort, un champ gravitationnel ou toute autre force conservative.
- **La force d'inertie** : Elle s'oppose à toute modification du mouvement du système et est proportionnelle à sa masse et à son accélération.

La combinaison de ces deux forces entraîne un mouvement oscillatoire autour de la position d'équilibre. La fréquence de ce mouvement, appelée **fréquence propre**, est déterminée par les propriétés du système, telles que sa masse, sa rigidité et son amortissement.

Le mouvement d'un système vibrant librement peut être décrit par une équation différentielle du second ordre :

$$Mx'' + cx' + kx = 0$$

où :

- **m** est la masse du système
- **c** est le coefficient d'amortissement
- **k** est la raideur du système
- **x** est la position du système par rapport à sa position d'équilibre
- **x'** est la vitesse du système
- **x''** est l'accélération du système

La solution de cette équation différentielle dépend de la valeur du coefficient d'amortissement (c) :

- **Cas non amorti (c = 0)** : Le système oscille à sa fréquence propre avec une amplitude constante.
- **Cas amorti (c > 0)** : Les oscillations du système s'amortissent progressivement jusqu'à ce que le système revienne à sa position d'équilibre.

- **Cas critique ( $c = \sqrt{4mk}$ )** : Le système oscille à sa fréquence propre avec une amplitude qui diminue exponentiellement. [28].

### III.2.2. Les vibrations forcées

Sont un type de mouvement oscillatoire qui se produit lorsqu'un système est soumis à une force externe variable dans le temps. Cette force peut être périodique ou non périodique, et elle peut entraîner le système à vibrer à une fréquence différente de sa fréquence naturelle.

Un système vibrant forcé est un système oscillant soumis à une force externe  $F(t)$ . Cette force peut être appliquée de différentes manières, par exemple :

- **Force appliquée directement sur la masse du système**
- **Force appliquée à un point du système relié à la masse par un élément élastique (ressort)**
- **Force appliquée à l'environnement du système**

La force externe  $F(t)$  peut être **périodique** (sinusoïdale, carrée, triangulaire, etc.) ou **non périodique** (aléatoire, impulsionnelle, etc.). La fréquence de la force externe est généralement notée  $f$  et est exprimée en hertz (Hz).

Le mouvement du système vibrant forcé est décrit par une équation différentielle du second ordre :

$$Mx'' + cx' + kx = F(t)$$

où :

- $m$  est la masse du système
- $c$  est le coefficient d'amortissement
- $k$  est la raideur du ressort
- $x$  est le déplacement du système par rapport à sa position d'équilibre
- $F(t)$  est la force externe appliquée au système

Le comportement du système vibrant forcé dépend de plusieurs facteurs :

- La fréquence de la force externe  $f$
- La fréquence naturelle du système  $f_0$
- Le facteur d'amortissement  $\zeta$

Le facteur d'amortissement  $\zeta$  est défini par :

$$\zeta = c / (2\sqrt{mk})$$

Il représente la proportion d'énergie dissipée par le système à chaque oscillation. Un facteur d'amortissement élevé indique un système fortement amorti, tandis qu'un facteur d'amortissement faible indique un système faiblement amorti. [29].

On distingue trois cas principaux :

- $f < f_0$ : Le système vibre à une fréquence inférieure à sa fréquence naturelle. L'amplitude des vibrations est généralement faible.
- $f = f_0$ : C'est le cas de la **résonance**. Le système vibre à sa fréquence naturelle et l'amplitude des vibrations est maximale.
- $f > f_0$ : Le système vibre à une fréquence supérieure à sa fréquence naturelle. L'amplitude des vibrations diminue généralement avec la fréquence.

### III.3.les Systèmes Vibratoires

Un système vibratoire est un ensemble physique ou mécanique qui présente des oscillations périodiques ou aléatoires autour d'une position d'équilibre en réponse à des forces internes ou externes. Ces systèmes sont caractérisés par leurs propriétés dynamiques telles que la masse, la rigidité et l'amortissement, qui influencent leur comportement vibratoire.

Les systèmes vibratoires sont omniprésents et peuvent inclure :

1. **Ponts et Structures de Bâtiments** : Ces structures peuvent subir des vibrations en réponse au vent, aux mouvements du trafic, aux séismes ou aux activités humaines.
2. **Conduites et Tuyauteries** : Les systèmes de tuyauterie dans les réseaux d'eau, de gaz ou d'huile peuvent vibrer en réponse aux changements de débit, à la pression et aux perturbations externes.
3. **Barrages et Structures Hydrauliques** : Les vibrations peuvent affecter les barrages en raison de l'action de l'eau et des changements de pression.
4. **Éoliennes** : Les pales des éoliennes peuvent subir des vibrations dues aux vents changeants, affectant leur performance et leur durabilité.
5. **Systèmes de Transport** : Les ponts, les rails de chemin de fer, les tunnels et les pistes d'aéroport peuvent tous être sujets à des vibrations en raison du passage de véhicules et de trains. [30].

### III.4.Masse, Rigidité et Amortissement

Les caractéristiques clés qui déterminent le comportement vibratoire d'un système sont :

1. **Masse** : La masse d'un système affecte sa réponse aux forces vibratoires. Plus la masse est élevée, plus la fréquence naturelle de vibration du système est basse, et vice versa.
2. **Rigidité** : La rigidité structurelle fait référence à la capacité d'un système à résister aux déformations sous l'effet des forces externes. Une structure rigide a une fréquence naturelle de vibration élevée.
3. **Amortissement** : L'amortissement désigne la capacité d'un système à dissiper l'énergie vibratoire sous forme de chaleur ou d'autres formes d'énergie non vibratoire. Il est crucial pour atténuer les oscillations et prévenir les dommages structurels.

- **Amortissement visqueux** : Utilisé dans les amortisseurs visqueux pour absorber et dissiper l'énergie vibratoire à travers des fluides visqueux comme l'huile.
- **Amortissement structural** : Intégré dans la conception des structures pour minimiser les vibrations indésirables et améliorer la sécurité et le confort des occupants. [30].

### III.5. La Résonance

La résonance est un phénomène physique dans lequel un système vibratoire réagit de manière excessive à une force d'excitation externe lorsque la fréquence d'excitation correspond à sa propre fréquence naturelle. Cela entraîne une augmentation significative de l'amplitude des vibrations, souvent bien au-delà de ce qui serait observé à d'autres fréquences, ce qui peut avoir des conséquences importantes. [31].

La résonance se produit lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- **Fréquence d'excitation correspondante** : La fréquence de la force externe périodique ou continue est proche de la fréquence naturelle du système vibratoire.
- **Amortissement faible** : Un faible amortissement dans le système permet aux vibrations de s'accumuler plutôt que de se dissiper rapidement.
- **Augmentation de l'amplitude** : À la résonance, l'énergie est transférée efficacement dans le système, augmentant l'amplitude des vibrations et pouvant conduire à des déformations excessives ou à des défaillances structurales.

La résonance peut présenter des dangers significatifs dans divers domaines :

1. **Défaillance Structurale** : Des vibrations excessives peuvent conduire à la fatigue des matériaux, à des fractures ou à des déformations permanentes des structures, compromettant leur intégrité et leur sécurité.
2. **Confort et Sécurité des Occupants** : Dans les bâtiments, les véhicules et autres structures où les vibrations sont perceptibles, la résonance peut provoquer des vibrations indésirables, affectant le confort des occupants et potentiellement leur santé.
3. **Domages aux Équipements** : Les machines et les équipements soumis à des vibrations de résonance peuvent subir des dommages mécaniques, entraînant des pannes coûteuses et des temps d'arrêt imprévus.
4. **Effets Environnementaux** : Dans certains cas, la résonance peut également affecter l'environnement, par exemple en amplifiant les bruits ou en augmentant les vibrations transmises au sol.

Pour prévenir les effets néfastes de la résonance, plusieurs mesures peuvent être prises :

- **Conception et Analyse Structurale** : Intégrer des techniques d'analyse structurale pour identifier les fréquences de résonance potentielles et concevoir des structures capables de les éviter.
- **Amortissement** : Utiliser des techniques d'amortissement, comme l'amortissement visqueux ou les matériaux absorbants, pour dissiper l'énergie vibratoire et réduire les risques de résonance.
- **Surveillance et Maintenance** : Mettre en œuvre des programmes de surveillance pour détecter les vibrations anormales et prendre des mesures préventives avant que des dommages sérieux ne se produisent.

Les vibrations peuvent avoir divers effets sur les structures, allant de la fatigue des matériaux aux dommages structurels et à la gêne des occupants. Voici une étude détaillée sur chacun de ces aspects :

### III.6.Effets des Vibrations sur les Structures

#### III.6.1.Fatigue des Matériaux

Les vibrations répétitives peuvent entraîner la fatigue des matériaux, surtout lorsque celles-ci sont soumises à des charges cycliques. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les structures sujettes à des vibrations fréquentes, telles que les ponts, les bâtiments et les équipements industriels. [32].

- **Mécanisme** : Les cycles de tension et de compression induits par les vibrations répétées peuvent conduire à des fissures et à une dégradation progressive des propriétés mécaniques des matériaux, même si les contraintes appliquées sont inférieures à la limite de rupture statique.
- **Conséquences** : La fatigue des matériaux peut diminuer la durée de vie utile des structures et nécessiter des inspections régulières pour détecter et prévenir les dommages.

#### III.6.2.Dommages Structurels

Les vibrations excessives peuvent causer des dommages structurels significatifs, en particulier lorsque les fréquences d'excitation se rapprochent des fréquences naturelles de résonance des systèmes. [33].

- **Effets** : Les dommages peuvent inclure des déformations permanentes, des fissures, voire des ruptures dans les cas extrêmes. Ces dommages compromettent l'intégrité structurelle et peuvent nécessiter des réparations coûteuses ou la mise hors service temporaire des installations.

- **Prévention** : La conception robuste des structures, l'utilisation de matériaux résistants et l'application d'amortisseurs appropriés sont des stratégies courantes pour minimiser les effets des vibrations sur les dommages structurels.

### III.6.3.Gêne des Occupants

Les vibrations perceptibles peuvent également affecter le confort et la sécurité des occupants dans les bâtiments et les véhicules.

- **Effets** : La gêne peut être causée par des vibrations ressenties comme des secousses ou des oscillations inconfortables, surtout lorsque celles-ci sont régulières et persistantes. Cela peut affecter la productivité dans les environnements de travail, la qualité du sommeil dans les habitations et le confort des passagers dans les véhicules.
- **Solutions** : L'utilisation de systèmes d'isolation vibratoire, de matériaux absorbants ou de techniques d'amortissement peut réduire les vibrations transmises aux occupants, améliorant ainsi leur confort et leur bien-être.

### III.7.les Mesures et Analyses Vibratoires

Les mesures vibratoires jouent un rôle crucial dans divers domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées pour évaluer, comprendre et contrôler les vibrations dans les systèmes et les structures. Voici quelques points clés sur leur importance :

1. **Diagnostic des Problèmes** : Les mesures vibratoires permettent d'identifier et de diagnostiquer les problèmes de vibrations potentiellement préjudiciables pour les équipements, les structures et les environnements bâtis.
2. **Prévention des Dommages** : En surveillant les niveaux de vibrations, il est possible de prévenir les dommages structurels, la fatigue des matériaux et les défaillances prématurées des équipements.
3. **Optimisation des Performances** : En comprenant les caractéristiques vibratoires d'un système, il est possible d'optimiser sa conception et son fonctionnement pour améliorer ses performances et sa durabilité.
4. **Sécurité et Confort** : Les mesures vibratoires contribuent à assurer la sécurité des occupants dans les bâtiments, la stabilité des structures dans le génie civil et le confort des passagers dans les véhicules.

#### III.7.1. Identification des Sources de Vibrations

Pour une analyse efficace des vibrations, il est essentiel d'identifier avec précision les sources de ces vibrations :

- **Sources Naturelles** : Comme les séismes, les vents forts, les vagues dans les structures maritimes.

- **Sources Humaines** : Comme le trafic routier, les activités industrielles, les machines en fonctionnement.
- **Sources Mécaniques** : Comme les machines rotatives, les équipements lourds, les systèmes de transport.

La localisation précise des sources de vibrations aide à cibler les mesures de contrôle et à concevoir des solutions efficaces pour réduire les effets indésirables. [34].

### III.7.2.Évaluation du Niveau de Risque

Une fois les sources de vibrations identifiées, il est crucial d'évaluer le niveau de risque associé à ces vibrations :

- **Critères de Performance** : Déterminer les niveaux acceptables de vibrations en fonction des normes et des critères de performance spécifiques à chaque application (par exemple, confort humain, sécurité structurale).
- **Analyse Dynamique** : Utilisation de techniques d'analyse dynamique pour prédire les effets des vibrations sur les systèmes et les structures.
- **Impact sur l'Environnement** : Évaluer les effets potentiels des vibrations sur l'environnement bâti, les équipements sensibles et les processus industriels.

### III.7.3.Conception de Solutions de Réduction des Vibrations

Pour atténuer les vibrations et minimiser les risques associés, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- **Amortissement** : Intégration d'amortisseurs mécaniques, hydrauliques ou visqueux pour absorber et dissiper l'énergie vibratoire.
- **Isolation** : Utilisation de matériaux d'isolation vibratoire pour réduire la transmission des vibrations à travers les structures et les équipements.
- **Optimisation Structurelle** : Conception de structures rigides et résilientes capables de résister aux forces vibratoires sans subir de dommages excessifs.
- **Contrôle Actif** : Utilisation de systèmes de contrôle actif des vibrations pour ajuster dynamiquement les caractéristiques vibratoires des systèmes en fonction des conditions opérationnelles.

## III.8.Types d'amortissement

### III.8.1.Amortissement Visqueux

L'amortissement visqueux est basé sur la dissipation d'énergie due au frottement interne dans un matériau visqueux. Lorsqu'un système vibratoire est soumis à des oscillations, les forces

internes de friction entre les molécules du matériau dissipent l'énergie vibratoire sous forme de chaleur. Ce processus réduit l'amplitude des vibrations et atténue ainsi leur effet sur la structure ou l'équipement.

Les amortisseurs visqueux sont largement utilisés dans divers domaines pour contrôler les vibrations indésirables. Voici quelques exemples d'applications :

- **Amortisseurs de Masse** : Intégrés dans les systèmes mécaniques pour absorber les vibrations provenant de sources externes telles que les machines ou les mouvements sismiques.
- **Amortisseurs à Viscosité Variable** : Ajustent leur capacité d'amortissement en fonction des conditions d'excitation, offrant une réponse adaptative aux vibrations changeantes.

### III.8.2. Amortissement Structural

L'amortissement structural implique l'utilisation de matériaux spécifiques ou de configurations structurales conçues pour absorber les vibrations mécaniques. Contrairement à l'amortissement visqueux qui repose sur la dissipation interne, l'amortissement structural exploite des propriétés physiques spécifiques des matériaux pour atténuer les vibrations.

Les matériaux amortissant comme le caoutchouc ou les composites à haute absorption d'énergie sont utilisés dans diverses applications :

- **Fondations** : Pour réduire les vibrations transmises au sol dans les bâtiments industriels ou les structures sensibles.
- **Joints de Dilatation** : Pour absorber les mouvements et les vibrations causés par les variations de température ou les charges dynamiques.

### III.8.3. Amortissement par Frottement Sec

L'amortissement par frottement sec repose sur l'utilisation de surfaces de frottement pour convertir l'énergie vibratoire en chaleur. Lorsque deux surfaces frottent l'une contre l'autre, le mouvement relatif génère une friction qui dissipe l'énergie vibratoire.

Les dispositifs utilisant l'amortissement par frottement sec sont principalement trouvés dans des applications nécessitant un contrôle précis des vibrations et une dissipation rapide de l'énergie :

- **Systèmes de Freinage à Friction** : Comme les freins de véhicules ou les systèmes de freinage industriels qui convertissent l'énergie cinétique en chaleur via des plaquettes de friction.

- **Dispositifs de Fixation** : Où des éléments à friction sont utilisés pour atténuer les vibrations et maintenir la stabilité, comme dans les assemblages mécaniques ou les structures exposées à des charges dynamiques.

### III.9. Classification des Sols

#### III.9.1. Classification Géotechnique Unifiée (Unified Soil Classification System - USCS)

Le système de classification unifié des sols (USCS) est largement utilisé aux États-Unis et dans de nombreux autres pays. Il classe les sols en fonction de leurs propriétés de grain et de leur comportement à l'état naturel. Les principaux groupes de classification selon l'USCS sont

- **Graviers (GW) et Gravillons (GP)** : Composés principalement de particules de gravier ou de gravillon, avec très peu de fines.
- **Sables (SW, SP)** : Contenant principalement des particules de sable.
- **Limons (ML, CL)** : Principalement composés de particules de limon.
- **Argiles (CH, MH)** : Principalement composés de particules d'argile.

Chaque groupe est ensuite subdivisé en fonction de la distribution granulométrique et du comportement du sol. [35].

#### III.9.2. Classification AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Ce système de classification est spécifiquement utilisé pour les sols rencontrés dans la construction des routes et des autoroutes aux États-Unis. Les sols sont classés en fonction de leur performance en matière de drainage, de résistance et de comportement sous chargement. Les principaux groupes incluent :

- **Groupes de sols granulaires** : Basés sur la taille des grains et la plasticité.
- **Groupes de sols fins** : Basés sur la teneur en fines (limons et argiles) et leur indice de plasticité.

Cette classification est souvent complémentaire à l'USCS et est largement utilisée dans les projets de génie civil et de construction de routes. [36].

#### III.9.3. Classification WRB (World Reference Base for Soil Resources)

Cette classification est internationalement reconnue et utilisée par la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) pour la classification des sols dans le contexte de la gestion durable des ressources naturelles et de l'agriculture. Elle se concentre sur les propriétés des sols en relation avec leur utilisation potentielle. Les principaux groupes incluent :

- **Groupes de sols principaux** : Basés sur les processus de formation et les caractéristiques principales.
- **Groupes de sols secondaires** : Basés sur des caractéristiques supplémentaires telles que la texture, la structure et la porosité.

Cette classification vise à fournir une base internationale pour la description et l'évaluation des sols dans différents contextes agricoles et environnementaux. [37].

### III.10.Méthodes Expérimentales pour la Détermination des Propriétés Dynamiques des Sols

#### III.10.1.Essais de Laboratoire

Les essais de laboratoire visent à caractériser les propriétés dynamiques des sols dans des conditions contrôlées, permettant d'évaluer leur réponse sous des excitations dynamiques spécifiques. [38].

- **Essais de Compression Dynamique** : Ces essais mesurent la réponse du sol sous des charges dynamiques appliquées à l'aide d'un marteau ou d'un pendule d'impact. Ils permettent de déterminer les paramètres de comportement dynamique tels que le module de cisaillement dynamique ( $G_{max}$ ).
- **Essais de Cisaillement Cyclique** : Utilisés pour évaluer le comportement du sol sous chargement cyclique simulant les séismes ou d'autres charges répétitives.
- **Essais de Vibration Triaxiale** : Ces essais appliquent des vibrations multidirectionnelles pour étudier la réponse dynamique du sol et ses propriétés d'amortissement.

#### III.10.2.Essais In Situ

Les essais in situ sont essentiels pour capturer les conditions réelles du sol et leur réponse aux vibrations et aux ondes sismiques. [39].

- **Essais de Vibration In Situ** : Utilisent des dispositifs de vibration pour exciter le sol et mesurer sa réponse vibratoire à différentes profondeurs.
- **Essais de Résonance** : Mesurent la fréquence naturelle du sol et les modes de vibration en utilisant des dispositifs d'excitation et de mesure sur site.
- **Essais de Spectrométrie de Rayonnement** : Utilisent des méthodes géophysiques pour étudier la propagation des ondes sismiques à travers le sol et mesurer ses propriétés dynamiques.

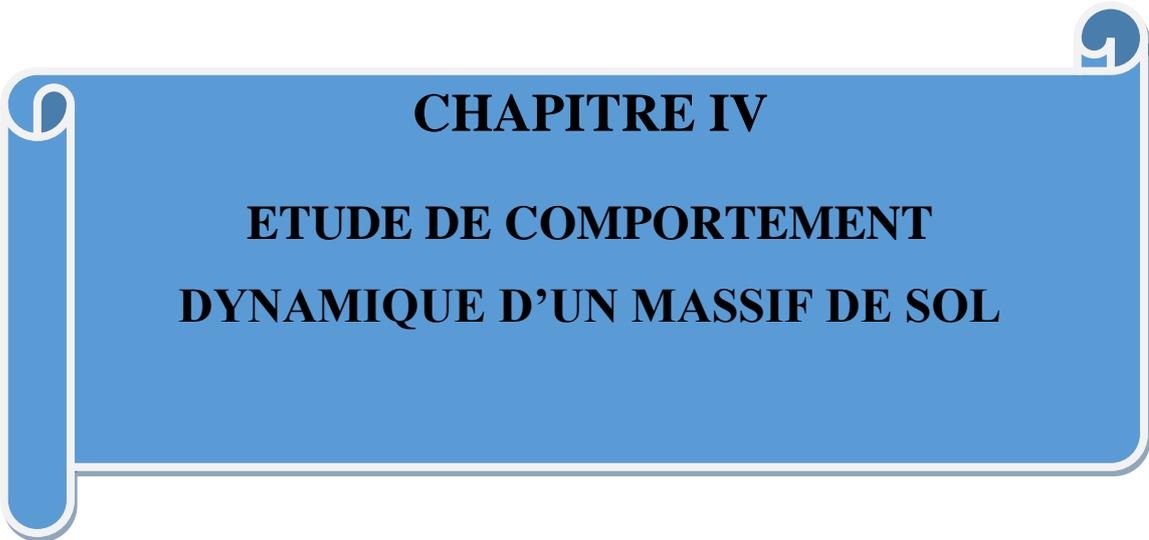
### III.10.3.Méthodes Avancées

Certaines méthodes plus avancées combinent les techniques de laboratoire et in situ pour obtenir une évaluation plus précise et complète des propriétés dynamiques des sols. [40].

- **Essais de Tomographie Sismique** : Utilisent des techniques d'imagerie sismique pour cartographier la structure interne du sol et estimer ses propriétés dynamiques sur une large zone.
- **Essais de Transfert de Charge** : Mesurent la résistance du sol sous charge dynamique en utilisant des plaques de chargement pour simuler des conditions de trafic ou d'impact.
- **Modélisation Numérique Dynamique** : Combinent les données expérimentales avec des simulations numériques pour prédire le comportement dynamique du sol sous différentes conditions de chargement.

#### Importance des Méthodes Expérimentales Dynamiques

- **Évaluation de la Réponse Sismique** : Fournit des données essentielles pour évaluer la capacité du sol à absorber et à dissiper l'énergie sismique, réduisant ainsi les risques de dommages structurels.
- **Conception de Fondations et de Structures Antisismiques** : Aide à concevoir des fondations et des structures capables de résister aux effets des séismes et autres charges dynamiques.
- **Étude des Effets de Vibrations** : Permet de comprendre l'impact des vibrations sur les structures environnantes et les équipements sensibles.
- **Validation des Modèles de Comportement du Sol** : Les données expérimentales dynamiques sont utilisées pour valider les modèles numériques et améliorer la précision des prévisions de comportement du sol [41].



## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN MASSIF DE SOL**

**IV. Étude De Comportement Dynamique D'un massif de sol****IV.1. Introduction**

Le comportement dynamique d'un profil de sol est l'étude de sa réponse aux sollicitations dynamiques, telles que les vibrations dues aux tremblements de terre, aux explosions ou au trafic.

Dans ce chapitre, nous soulignons les principes généraux concernant le comportement cyclique du sol ainsi que les caractéristiques dynamiques des sols.

**IV.2. Comportement cyclique des sols**

La plupart des sols subissent une charge cyclique ou variable qui entraîne une augmentation significative des poids de la pression interstitielle emmagasinée et une déformation graduelle. Des études ont démontré que de nombreux facteurs contribuent au comportement périodique non drainé, tels que la nature et la structure du sol, la contrainte de consolidation et l'évolution des déformations. [42].

**IV.2.1. Pour les sables :**

Les seuls facteurs déterminants dans l'évolution des déformations et des pressions interstitielles sont la densité relative, la contrainte de consolidation et le déviateur de contraintes appliquées. Ces pressions augmentent progressivement jusqu'à ce que la contrainte effective soit éliminée. Ainsi, la résistance au cisaillement du sol est nulle et son comportement est celui d'un liquide. [42].

**IV.2.2. Pour les argiles**

Le comportement cyclique des sols argileux est caractéristique de leur structure et de leur composition. On peut constater ce comportement lorsqu'un sol argileux est soumis à des contraintes répétitives, comme celles qui se produisent sous les charges liées aux cycles de gel-dégel, aux variations saisonnières du niveau de l'eau souterraine ou aux charges cycliques liées au trafic routier. En cas de cycles de chargement et de déchargement répétés, un sol argileux peut subir une détérioration progressive de sa structure interne, ce qui entraîne une diminution de sa force et de sa capacité à supporter des charges. Ce processus est communément désigné sous le nom de "ramollissement cyclique" et peut provoquer des élévations différentielles, des déformations permanentes et même des mouvements de terrain. Les propriétés géotechniques du sol influencent le comportement cyclique des sols argileux, tels que la teneur en eau du sol, le taux de déformation, la fréquence et l'amplitude des cycles de chargement. [42].

**IV.3. Modélisation du comportement cyclique du sol**

L'analyse du comportement cyclique du sol consiste à analyser des échantillons de matériaux qui sont soumis à des charges périodiques et cycliques, ce qui entraîne un comportement non linéaire et non élastique. La déformation de cisaillement  $\gamma$  influence ce comportement en fonction du module de cisaillement  $G$  et de l'amortissement  $D$  du matériau. En fonction de la déformation par cisaillement, les ratios  $G/G_{max}$  et  $D/D_{max}$  diffèrent, où  $G_{max}$  et  $D_{max}$  sont respectivement les valeurs maximales du module de cisaillement et de l'amortissement. Afin d'ajuster ces courbes en fonction des conditions locales, en particulier de la compacité du sol, il est primordial de calculer la valeur de  $G_{max}$  en utilisant des tests dynamiques. Il est fréquent d'estimer le rapport d'amortissement  $D$  en utilisant des matériaux similaires et sécuritaires. La relation entre le module de cisaillement  $G$ , l'amortissement  $D$ , le déplacement de cisaillement et les caractéristiques de plasticité du sol est illustrée dans la figure ci-dessous. [43].

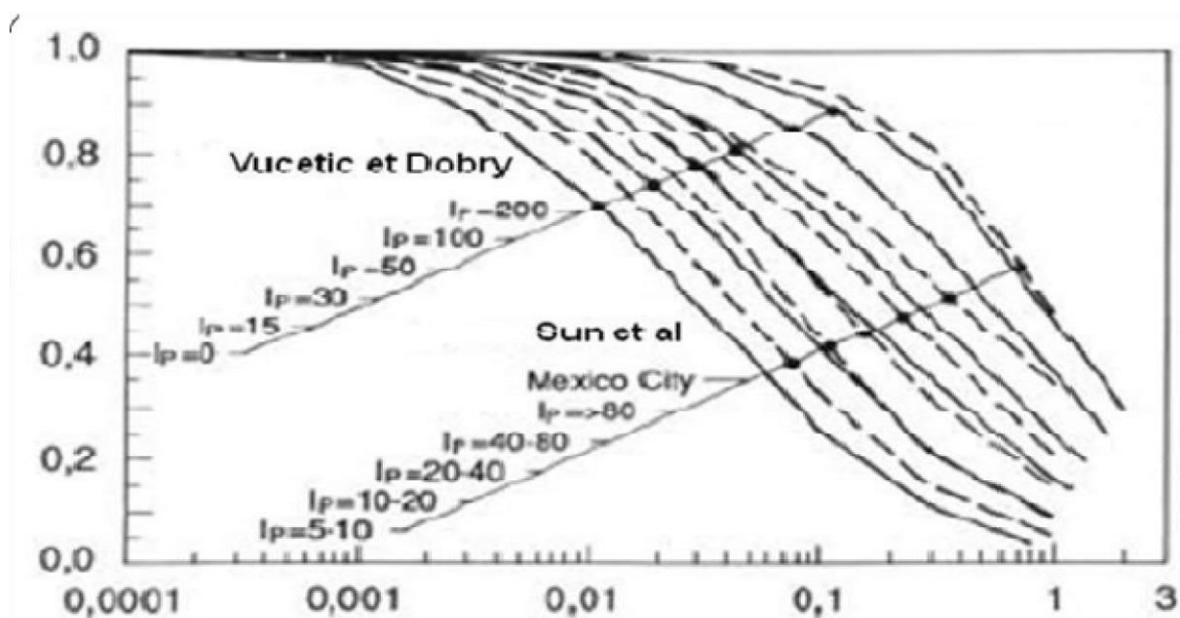


Figure 13: Evolution du module de cisaillement  $G$  en fonction de la déformation de cisaillement cyclique et des propriétés de plasticité[44].

Déformation de Cisaillement Cyclique [%]

-Traits discontinus est d'après les essais de (Sun et al.)

-Traits pleins et d'après les essais de (Vucetic&Dobry.)

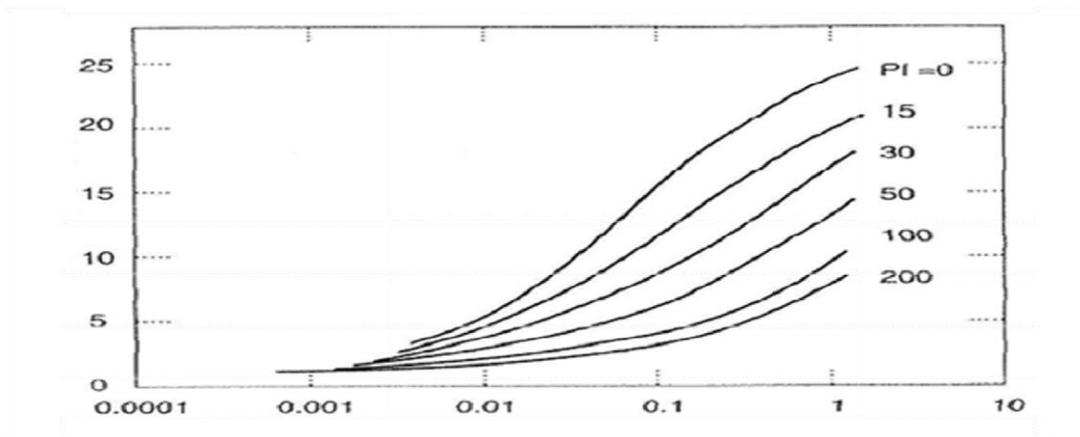


Figure 14: Évolution de l'amortissement  $D$  en fonction de la déformation de cisaillement et des propriétés de plasticité[44].

Déformation de Cisaillement Cyclique [%]

-selon les essais de (Vukcevic et Dobry),

#### IV.3.1. Définition du module de cisaillement $G$

La propriété physique du module de cisaillement, aussi appelée module de glissement, module de rigidité, module de Coulomb ou second coefficient de Lamé, est inhérente à chaque matériau. Il est utilisé pour évaluer la résistance d'un matériau à la déformation sous l'influence d'une contrainte de cisaillement.

#### IV.3.2. Définition du coefficient d'amortissement

De son côté, le coefficient d'amortissement mesure la capacité d'un matériau à évacuer de l'énergie lors de ses oscillations ou de ses vibrations. Il est couramment employé afin de décrire le comportement des sols et des roches lors de séismes comme les séismes. Ce coefficient se définit comme le rapport de l'énergie dissipée à l'énergie totale stockée dans le matériau pendant une oscillation, généralement exprimé en pourcentage (%).

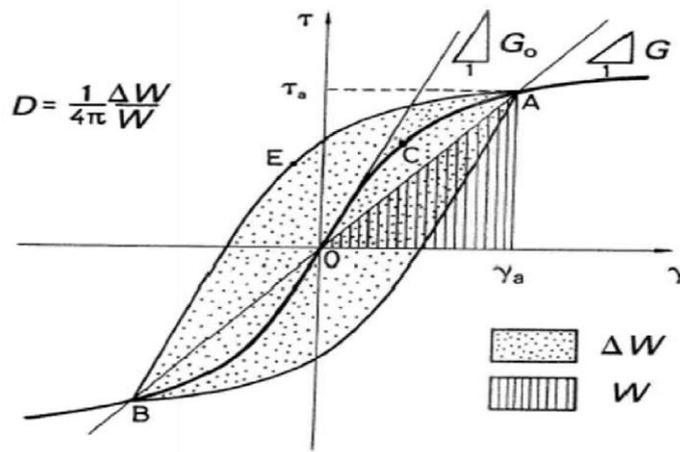


Figure 15 : Schéma de la réponse du sol lors d'un chargement Cyclique[25].

**Modèle équivalent linéaire :** Le modèle de mécanique des sols appelé modèle équivalent linéaire permet de décrire comment un matériau ou une structure réagit à différentes charges et contraintes. Lors d'une analyse dynamique, on utilise le module de cisaillement  $G$  et le facteur d'amortissement  $D$  dans le cadre d'une approche linéaire équivalente.

On obtient ces mesures en se basant sur les déformations de cisaillement cycliques ou similaires. Cette méthode est employée lorsque les propriétés mécaniques du matériau ou de la structure ne sont pas linéaires, mais peuvent être approximativement représentées par un modèle linéaire. Pour les sols, un modèle linéaire équivalent est souvent employé pour décrire la réaction du sol à des charges cycliques ou sismiques.

Elle est basée sur l'hypothèse que le sol a un comportement linéaire élastique pour des amplitudes de déformation faibles. La figure présente de manière graphique le comportement de  $G$ . Les lignes droites indiquent que  $G$  est une constante pendant une itération. La variation de la pente reflète la diminution du module de cisaillement  $G$  entre les itérations (Figure 16). [46].

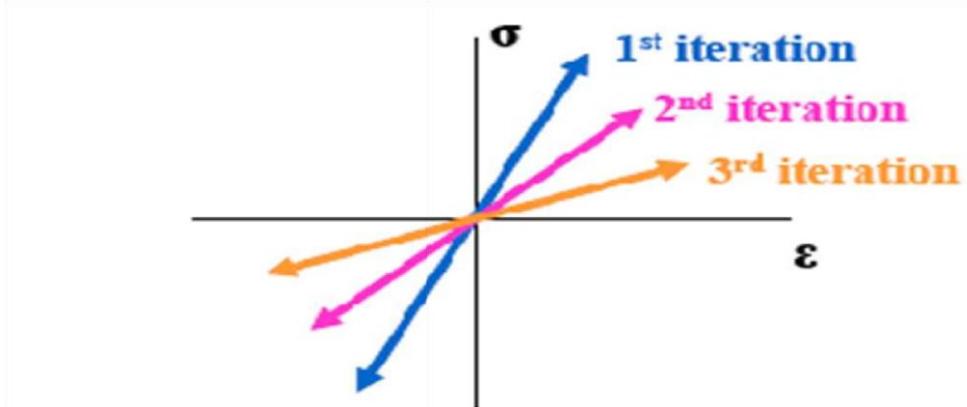


Figure 16 : Changement de  $G$  avec chaque itération.

**Le modèle de Mohr-Coulomb :** C'est une théorie de la mécanique des sols qui explique comment les sols sont soumis à des contraintes. Selon lui, la résistance d'un sol est influencée par deux paramètres essentiels : l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) et la cohésion ( $c$ ). La résistance du sol à la déformation sous contrainte est définie par l'angle de frottement interne, tandis que la cohésion correspond à la force de liaison entre les particules du sol. [28].

Dans l'espace contrainte-déformation, le modèle de Mohr-Coulomb utilise un cercle de Mohr afin de représenter graphiquement les états de contrainte et de déformation d'un matériau dans diverses conditions. En génie civil, il est couramment employé pour l'étude et la conception de structures en contact avec le sol, comme les fondations et les talus.

On connaît les contraintes de cisaillement causées par les séismes pour leur grande diversité et leur caractère irrégulier. Les contraintes dynamiques de cisaillement peuvent aussi être variables.

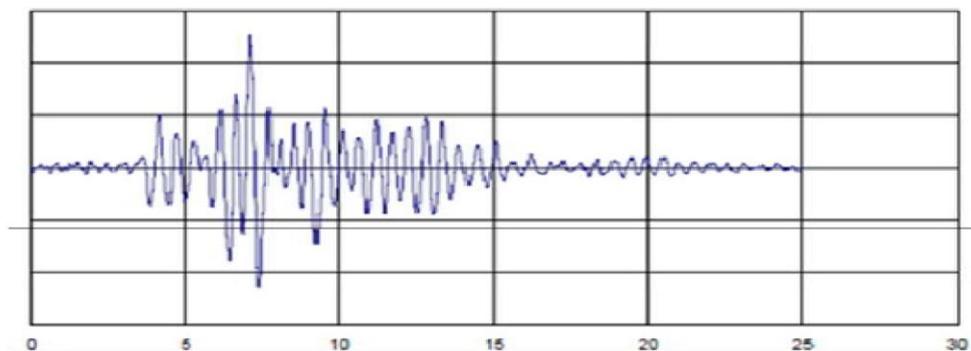


Figure 17: Variation des contraintes de cisaillement en fonction du temps

#### IV.3.3. Les paramètres cycliques équivalents

Il s'agit de caractéristiques mécaniques employées afin de décrire la réaction cyclique des sols et des cristaux. Ces paramètres proviennent d'essais en laboratoire ou de données sur le

terrain et sont utilisés pour représenter la réaction sismique des structures géotechniques. Pour une interprétation précise des données, il est essentiel de convertir un accélérogramme en un nombre équivalent de cycles de contrainte uniforme. On définit l'amplitude de cisaillement cyclique uniforme à 65% de la contrainte de cisaillement maximale :

$$\tau_{\text{cycle}} = 0,65 \times \tau_{\text{peak}}. [47].$$

La réponse d'un sol aux charges cycliques ou dynamiques (tremblements de terre, vibrations industrielles, machines) est déterminée par les caractéristiques dynamiques des sols. Voici une explication plus détaillée des principales caractéristiques dynamiques des sols :

- **Amortissement** : La capacité d'un sol à dissiper l'énergie des vibrations est appelée l'amortissement. On le mesure généralement en comparant l'énergie dissipée à l'énergie totale appliquée. Un sol bien amorcé absorbe de manière efficace les vibrations et diminue les oscillations, ce qui revêt une importance capitale pour assurer la stabilité des structures.
- **Module de cisaillement dynamique (G-dynamique)** : Il illustre la rigidité du sol lorsqu'il est soumis à des charges cycliques. À la différence du module de cisaillement statique qui évalue la réaction du sol face à des charges constantes, le module de cisaillement dynamique fluctue en fonction de la fréquence et de l'intensité des vibrations.
- **Période de résonance** : Il s'agit du moment naturel où un sol commence à vibrer ou à résonner de façon importante en réponse à des forces extérieures. Il est primordial de bien connaître la période de résonance afin d'éviter que les vibrations ne soient en accord avec la fréquence naturelle de la structure, ce qui pourrait causer des dommages.
- **Rapport d'amortissement (Damping ratio)** : Le lien entre l'amortissement réel du sol et l'amortissement critique à la résonance est ici. Une bonne capacité du sol à absorber l'énergie des vibrations sans produire de résonance excessive est indiquée par un rapport d'amortissement élevé.
- **Vitesse d'onde sismique** : La vitesse de propagation des ondes sismiques à travers le sol. Elle est influencée par les caractéristiques physiques du sol, comme sa densité, sa capacité à se comprimer et sa rigidité. Il est indispensable de connaître de manière précise la vitesse d'onde sismique afin d'évaluer le temps de trajet des ondes et la propagation des vibrations.
- **Réponse en fréquence** : La rapidité à laquelle les ondes sismiques se propagent à travers le sol. Les propriétés physiques du sol, telles que sa densité, sa capacité à se comprimer et sa rigidité, ont une influence sur elle. La connaissance précise de la

vitesse d'onde sismique est essentielle pour évaluer le temps de trajet des ondes et la propagation des vibrations.

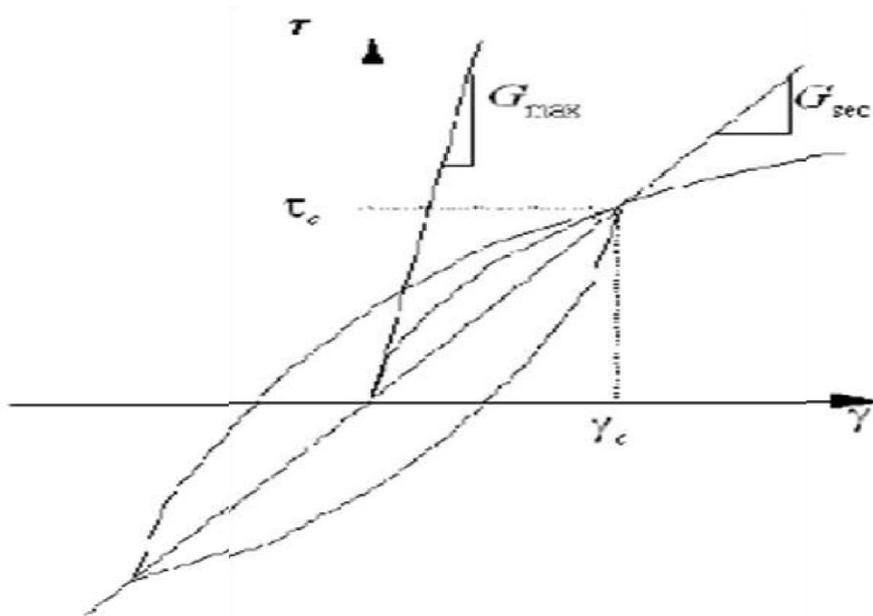
Il est crucial de comprendre et de modéliser le comportement sismique des sols, ainsi que de concevoir des structures solides et résistantes aux charges cycliques ou aux séismes, en tenant compte de ces caractéristiques dynamiques. Les vibrations sont influencées par leur transmission, leur dissipation et leur résonance dans le sol, ce qui a un effet direct sur les performances et la durabilité des infrastructures édifiées.

### IV.4. Caractéristiques dynamique des sols

**IV.4.1. Définition de l'hystérésis des sols :** L'hystérésis des sols est un phénomène physique observé dans les sols lorsqu'ils subissent des cycles de charge et de décharge. Ce phénomène est particulièrement important dans le domaine de la géotechnique et de la mécanique des sols. Voici une définition détaillée : L'hystérésis des sols se réfère à la différence de comportement entre la phase de chargement et la phase de déchargement d'un sol soumis à des cycles de contraintes. En d'autres termes, lorsque le sol est comprimé sous une charge, il se déforme et accumule de l'énergie élastique. Lorsque cette charge est retirée, le sol ne retrouve pas immédiatement sa forme d'origine, mais conserve une partie de cette déformation, dissipant ainsi une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce phénomène est souvent associé aux matériaux viscoélastiques ou plastiques, où les forces internes générées lors de la déformation ne sont pas complètement récupérées lorsque les contraintes sont réduites. En géotechnique, cela a des implications importantes pour la conception et l'analyse des fondations et des ouvrages de soutènement, car l'hystérésis peut influencer la réponse dynamique et la stabilité des structures.

### IV.4.2. Module de cisaillement G sous conditions de chargements cycliques

Le module de cisaillement G est une propriété mécanique des sols qui évalue leur résistance à des collisions. Toutefois, il est possible que le module de cisaillement G des sols évolue en fonction de charges cycliques, en particulier en raison de l'hystérésis, comme le montre la figure.



Avec l'Utilisation d'une relation empirique entre  $G_{max}$  et la contrainte principale moyenne

Initiale comme suit  $G_{max} = k(\sigma'_m)^n$

Avec :  $K$  et  $n$  sont des constantes.

$\sigma'_m$  est la contrainte principale moyenne effective de confinement [48].

#### IV.5.2. Facteur d'amortissement D sous conditions de chargements cycliques

En présence de charges cycliques, le facteur d'amortissement  $D$  tend à augmenter en raison de la réduction du module de cisaillement  $G$  et de l'augmentation de la contrainte de cisaillement cyclique. La surface des boucles d'hystérésis (contrainte-déformation) présente également cette augmentation, ce qui témoigne d'une augmentation du coefficient d'amortissement en fonction de l'amplitude de déformation de la boucle. L'inclusion de l'effet d'amortissement dans la formulation par éléments finis de l'équation de mouvement nécessite l'utilisation de ce coefficient d'amortissement. Ishibashi et Zhang ont réalisé une étude qui a permis d'obtenir une expression pratique pour évaluer la fonction d'amortissement, en utilisant des variables comme l'indice de plasticité (PI), le taux de réduction  $G/G_{max}$  et les contraintes limites indéformables. [49].

L'indice de plasticité (PI) et les contraintes de confinement sont utilisés pour calculer le rapport  $G/G_{max}$ . Par la suite, on calcule le facteur d'amortissement pour un même PI en prenant en compte différentes valeurs de contrainte de cisaillement cyclique. Selon les

logiciels PROSHAKE et QUAKE/W, la fonction du facteur d'amortissement est représentée dans la figure, pour les sols sableux et argileux.

[31].

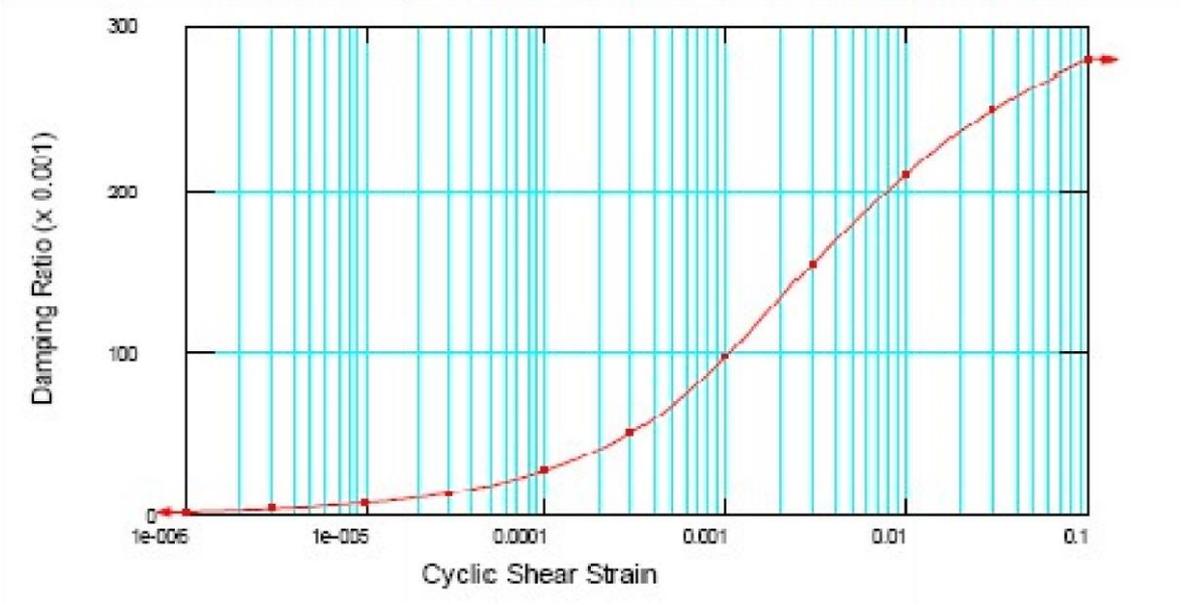


Figure 19 : facteur d'amortissement pour le sable (QUAKE/W) [46].

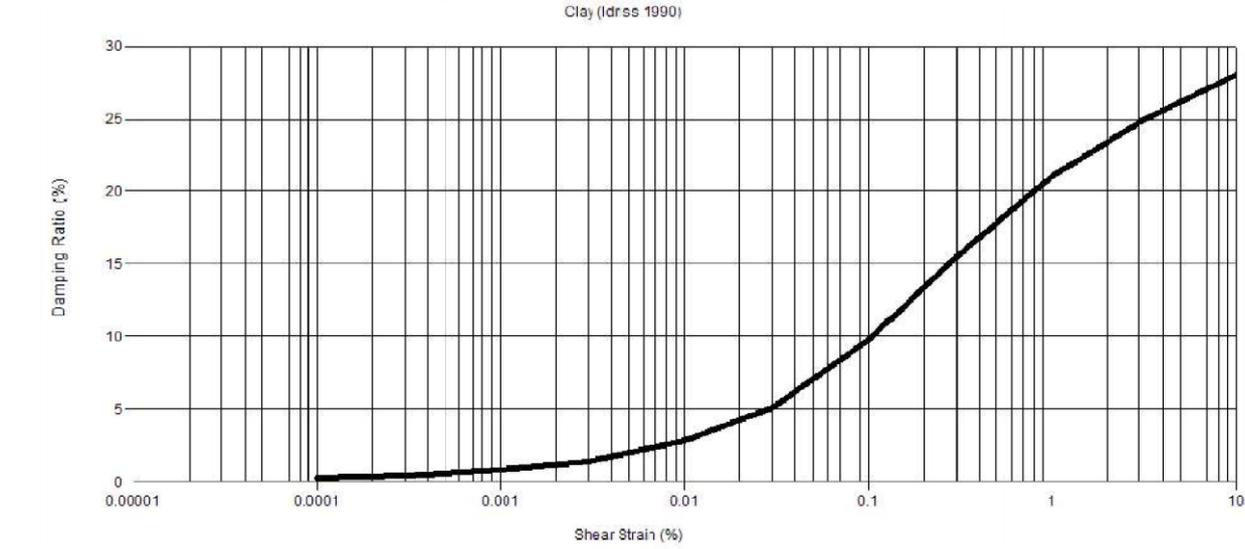


Figure 20 : Fonction facteur d'amortissement pour le sable (ProShake) [46].

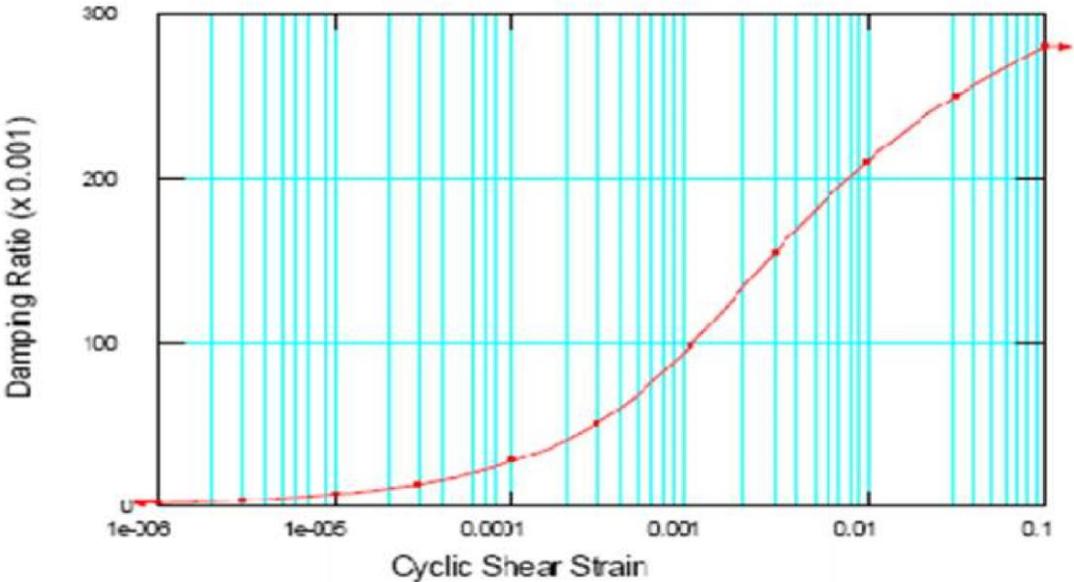


Figure 21 : Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (QUAKE/W) [46].

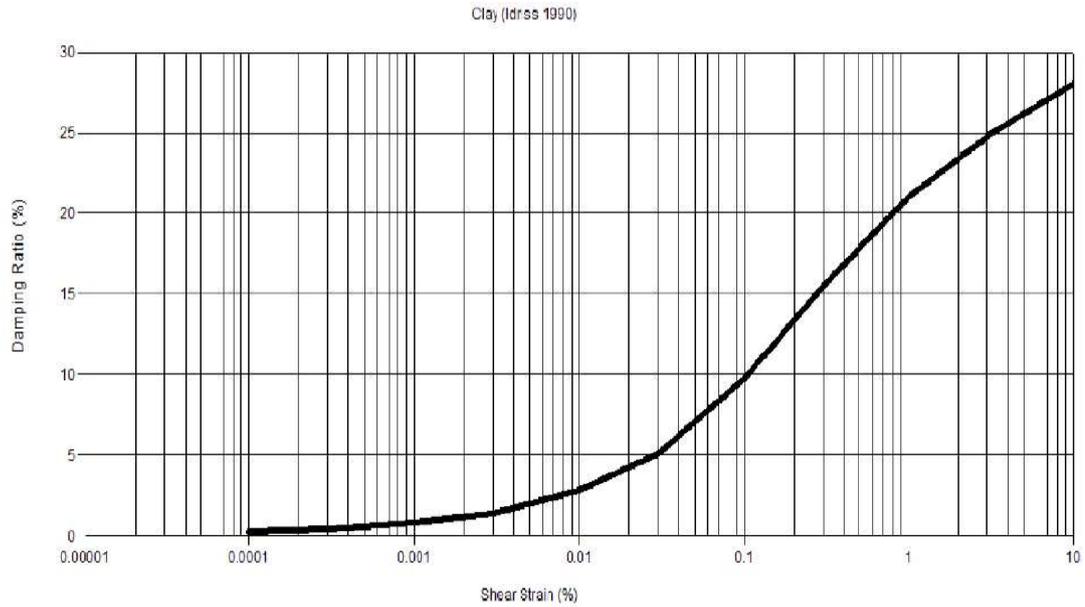


Figure 22 : Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (ProShake) [46].

**IV.5.3. Fonction de pression interstitielle**

La pression interstitielle créée lors d'un séisme est influencée par le nombre de périodes uniformes équivalentes  $N$  liées à ce séisme donné. En outre, le nombre de cycles  $N_L$  requis pour entraîner la liquéfaction d'un sol spécifique est calculé à l'aide d'une fonction qui spécifie le nombre d'itérations nécessaires.

50].

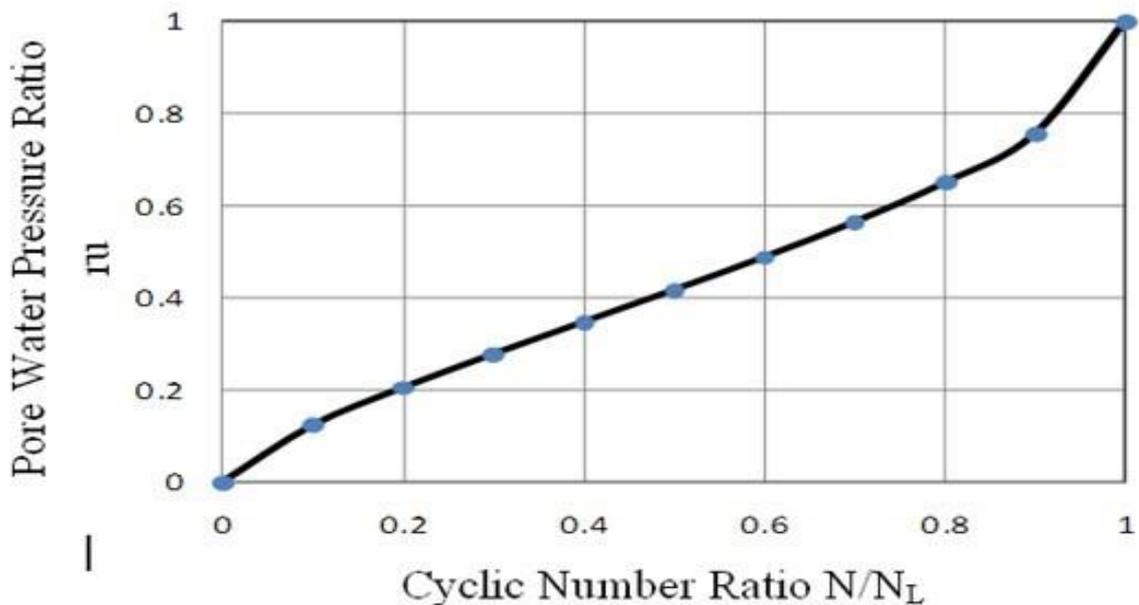


Figure 23 : la variation du coefficient de pression interstitielle en fonction du nombre de cycles

## **CHAPITRE V**

**Modélisations Numériques et Expérimentations-  
Résultats et Discussions :**

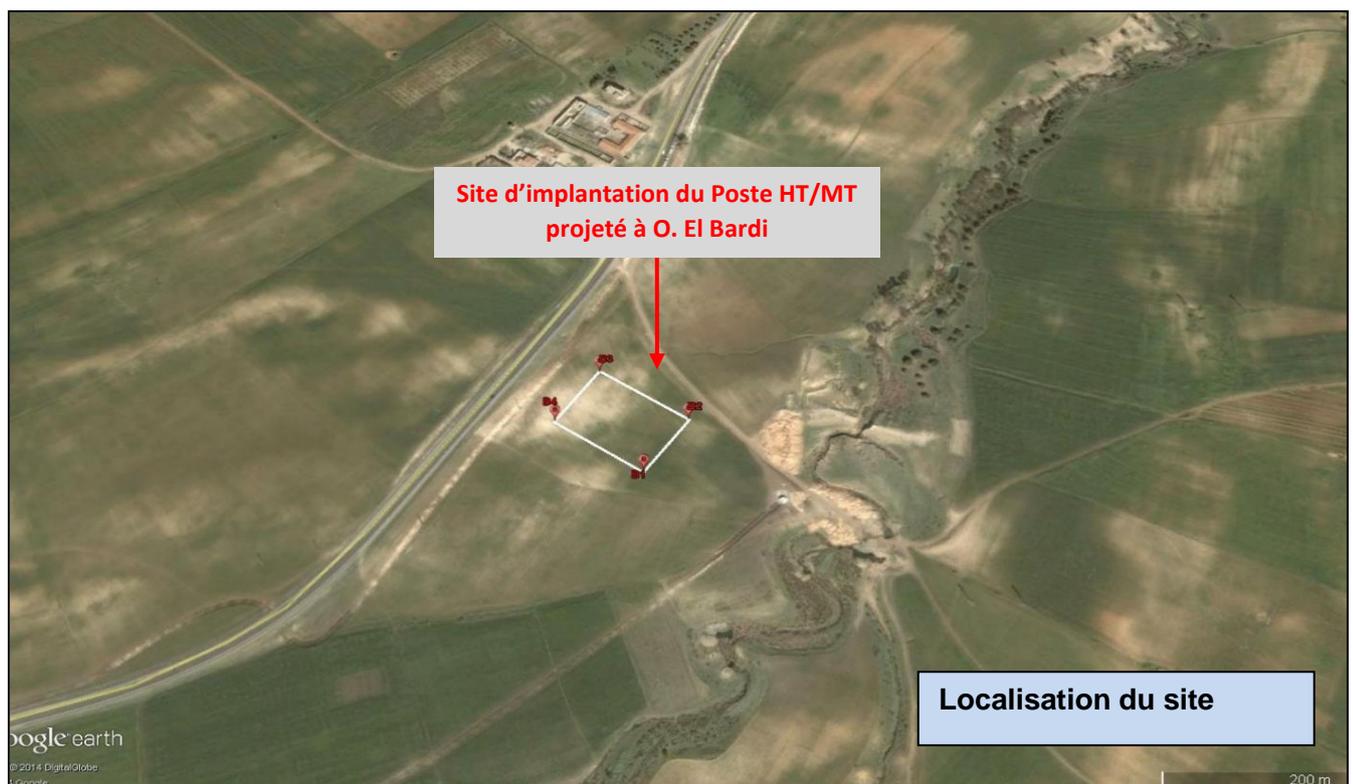
## **V. Modélisations Numériques et Expérimentations- Résultats et Discussions**

### **V.1. Introduction**

La modélisation géotechnique est une discipline clé en ingénierie civile qui permet de prédire le comportement des sols sous différentes conditions de chargement et d'environnement. Le code de calcul PLAXIS 2D est un logiciel de modélisation par éléments finis, est largement utilisé pour analyser et simuler les réponses des structures géotechniques. Dans cette étude, nous concentrons sur la modélisation d'un profil de sol pour évaluer les déplacements et les accélérations sous diverses conditions. Les paramètres d'intérêt sont l'amortissement, la profondeur, et le nombre de couches de sol. Les résultats obtenus seront comparés à un cas de référence pour analyser les influences de chaque paramètre.

### **V.2. Description et situation de l'ouvrage**

Le site destiné à recevoir le poste de haute tension / moyen tension (HT/MT) projeté à Oued El Bardi est situé à la sortie Sud-Est du chef-lieu de la Commune. Soit, à environ de 11.00km au Sud du chef-lieu de la Wilaya de Bouira. Les coordonnées estimées au centre du site sont : X = 582102 et Y = 4015601



*Figure 24 : Localisation de site d'implantation du poste HT/MT*

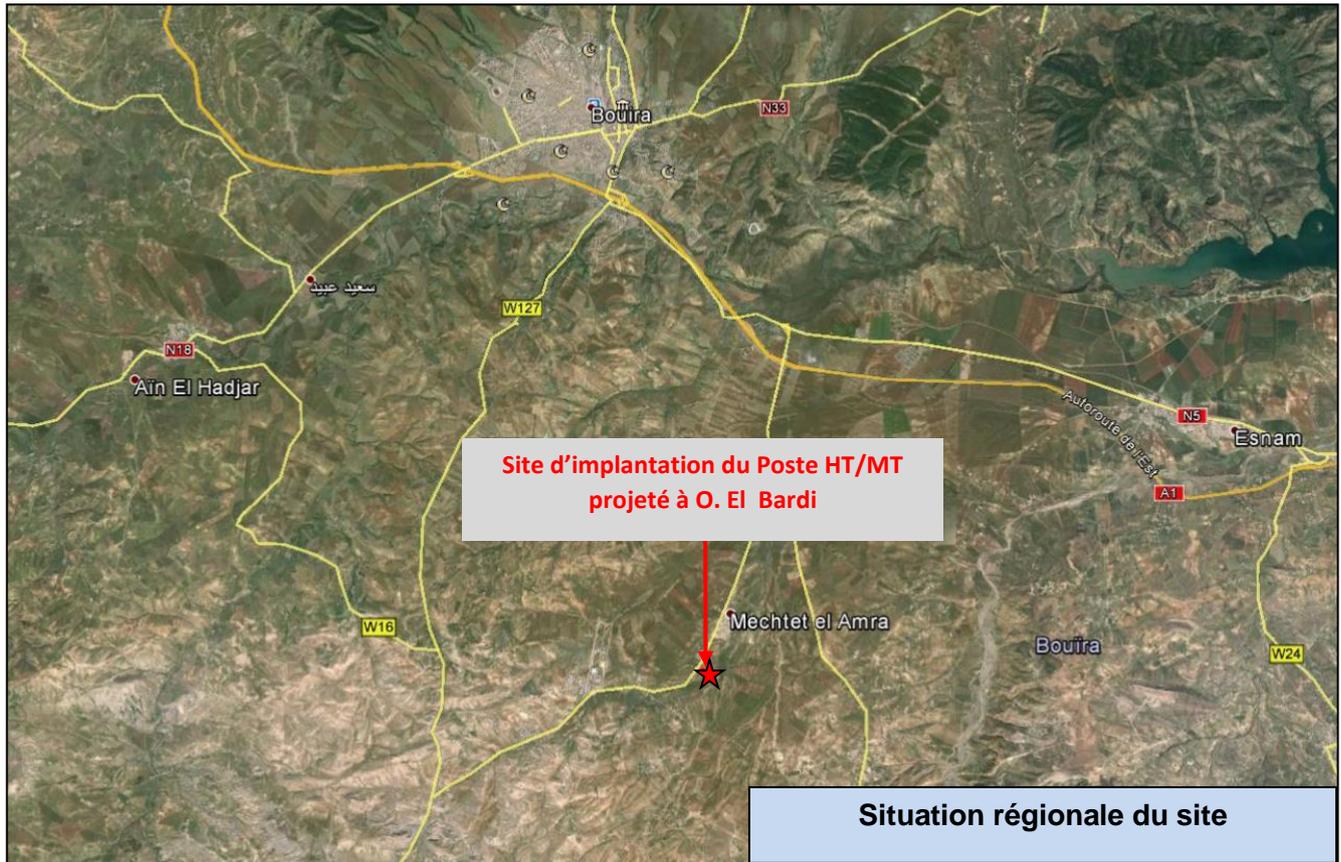
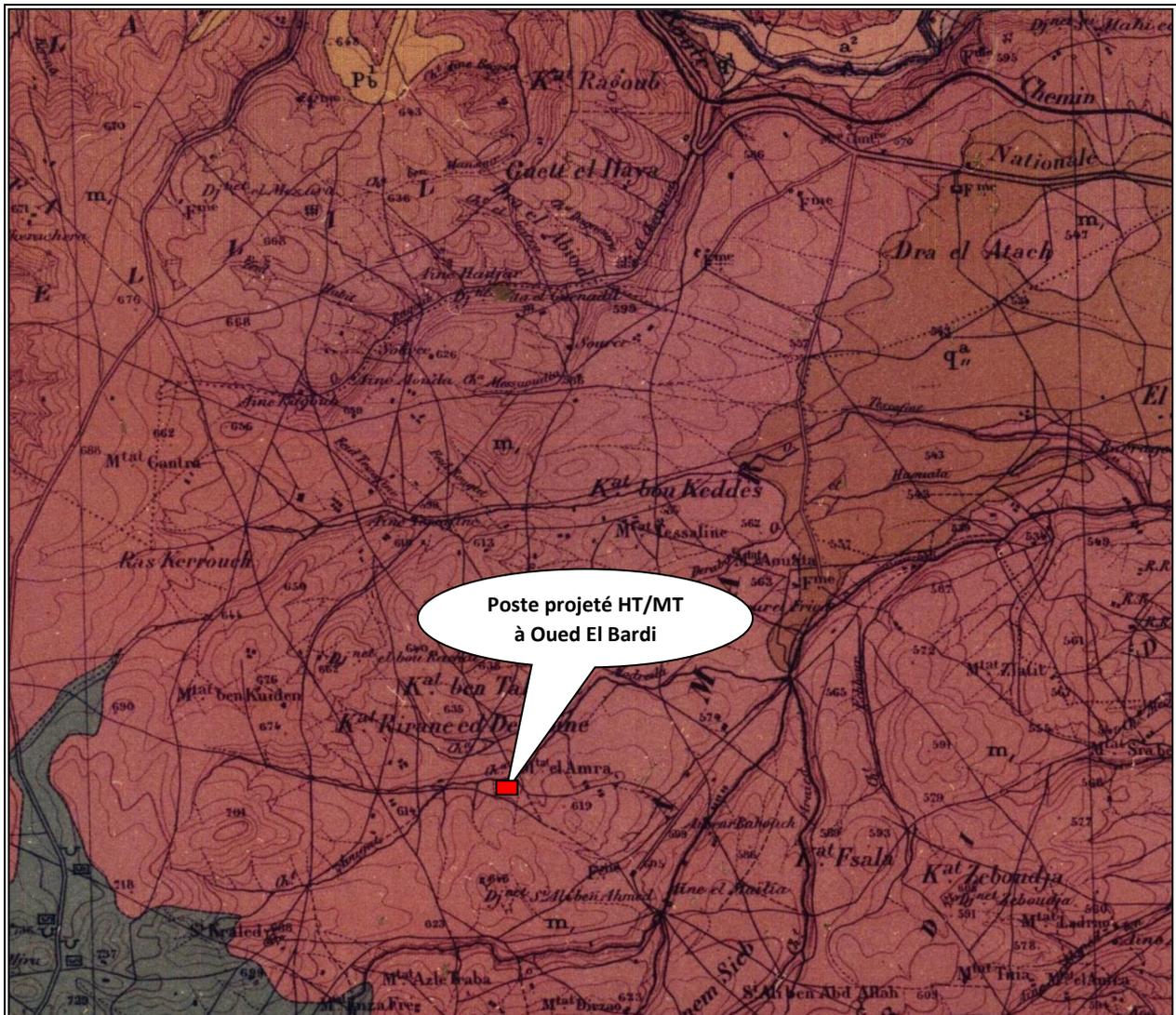


Figure 25 : Site d'implantation du poste HT/MT projeté a O.EL Bardi

### V.3. Cadre géologique régional

La carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/50 000, feuille n°89 -EL ESNAM-, montre que le poste HT/MT d'Oued El Bardi, est projeté sur une formation composée de poudingues et argiles rouges et jaunes d'âge Miocène (Aquitaniens) (*m*,). (Voir Figure 21).



**Légende :**

- a<sup>2</sup>** : Alluvions récentes des vallées
- q<sub>1</sub>** : Alluvions anciennes des vallées (niveau inférieur)
- q<sub>,,^a</sub>** : Alluvions supérieures du plateau d'El Esnam
- Pb<sup>1</sup>** : Alluvions du plateau supérieur de Bouira
- m** : Poudingues et argiles rouges et jaunes (Aquitaniens)

Figure 26: Extrait de la carte géologique de l'Algérie à l'échelle 1/ 50 000e, feuille n°89-EL ESNAM

**V.4. Conception et caractéristiques**

Le profil de sol est d’une largeur de  $L=40m$  et profondeur  $h=10m$ , il se constitué de deux couche du sol, la première c’est une couche l’argile à une profondeur de 3 m, et la deuxième c’est une couche Sable à une profondeur de 7m. Ce profil de sol supporte un radier de 10 m de largeur et ancré de 2 m de profondeur.

**V.5. Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique**

*Tableau 5 : Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique*

Paramètre	Nom	Argile	Sable	Marne	Radier
Type de modèle	Modele	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Linière élastique
Type de drainage	Type	drained	drained	drained	Non poreux
Poids volumique saturé (KN/m3 )	$\gamma_{sat}$	20	19	17.5	
Poids volumique non saturé (KN/m3 )	$\gamma_{usat}$	17	18	16.5	
Module de Young (KN/m2)	E	1000	1500	2000	20000
Coefficient de Poisson	Y	0.35	0.30	0.33	0,2
Cohésion (KN/m2 )	$C_{ref.}$	48	35	55	
Angle de frottement (°)	$\Phi$	27	30	32	
Angle de dilatation (°)	$\psi$	1	1	1	
Perméabilité Horizontale (m/s)	$K_x$	0,001	0,005	0.005	
Perméabilité verticale (m/s)	$K_y$	$1.0 \times 10^{-3}$	0,005	0.005	

**V.6. Géométrie du modèle numérique**

**V.6.1. Introduction**

Une analyse numérique est utilisée pour analyser le comportement d'un profil du sol sous un chargement dynamique, en variant l'amortissement, la hauteur de la couche et le nombre de

couches du massif du sol étudié. Quatre modèles sont utilisés pour l'analyse : le modèle de référence, le modèle d'amortissement accru, l'augmentation de la hauteur de la couche et une augmentation du nombre de couches. On réalise ces modèles géométriques en utilisant une modélisation bidimensionnelle en utilisant la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel Plaxis 2D qui est utilisé. Souvent, cette modélisation numérique inclut les procédures et les étapes suivantes :

- **La géométrie du modèle** doit être définie, incluant les dimensions et les formes des sols et des structures, ainsi que les profondeurs et les pentes.
- **Caractéristiques des matériaux** : énumérer les caractéristiques géotechniques des matériaux telles que la solidité, l'angle de frottement, la densité, la capacité de compression, la perméabilité, etc. En général, ces caractéristiques sont établies à partir de tests en laboratoire ou d'informations sur le terrain. Le modèle est divisé en éléments finis plus petits afin de représenter numériquement le comportement du sol.
- **Le maillage** représente une grille discrète qui permet de résoudre les équations mathématiques.
- **Condition Limites** : établir les limites du modèle, comme les forces appliquées, les déplacements imposés, les contraintes latérales, les conditions de drainage.
- **Évaluation du comportement du sol et des structures** : appliquer les charges ou les contraintes définies dans le modèle et réaliser une analyse dans diverses conditions. Cela englobe des études statiques, dynamiques, de renforcement et de stabilité.
- **Analyse des conclusions** : Étudier les conclusions obtenues, comme les variations, les contraintes, les mouvements, les éléments de sécurité, etc. Grâce à ces résultats, il devient possible de prendre des décisions éclairées en ce qui concerne la conception, la construction ou la gestion des projets géotechniques.
- **Génération du maillage** : Il est préférable de choisir la finesse (Global coarsness) puis on le raffine localement aux niveaux des éléments structuraux, le modèle de référence se fait par des éléments à 15 nœuds

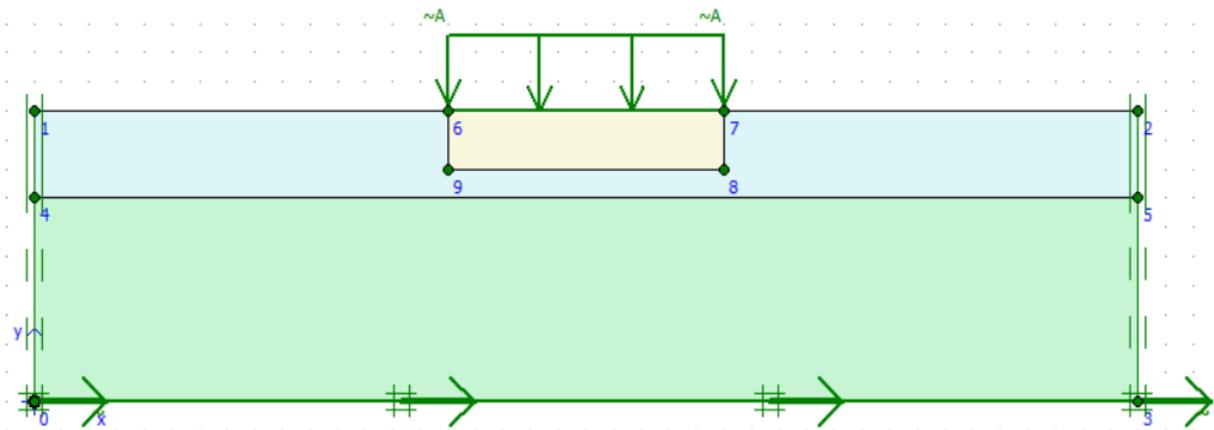


Figure 27: Géométrie du modèle de référence

### V.6.2. Maillage et conditions aux limites

On a préféré des éléments de 15 nœuds pour un maillage raffiné et les conditions aux limites sont appliquées sur le profil du sol dans les deux directions par la commande standard fixities pour bloquer le modèle dans les deux sens horizontal et vertical comme le montre la figure 27.

### V.6.3. Procédure de modélisation

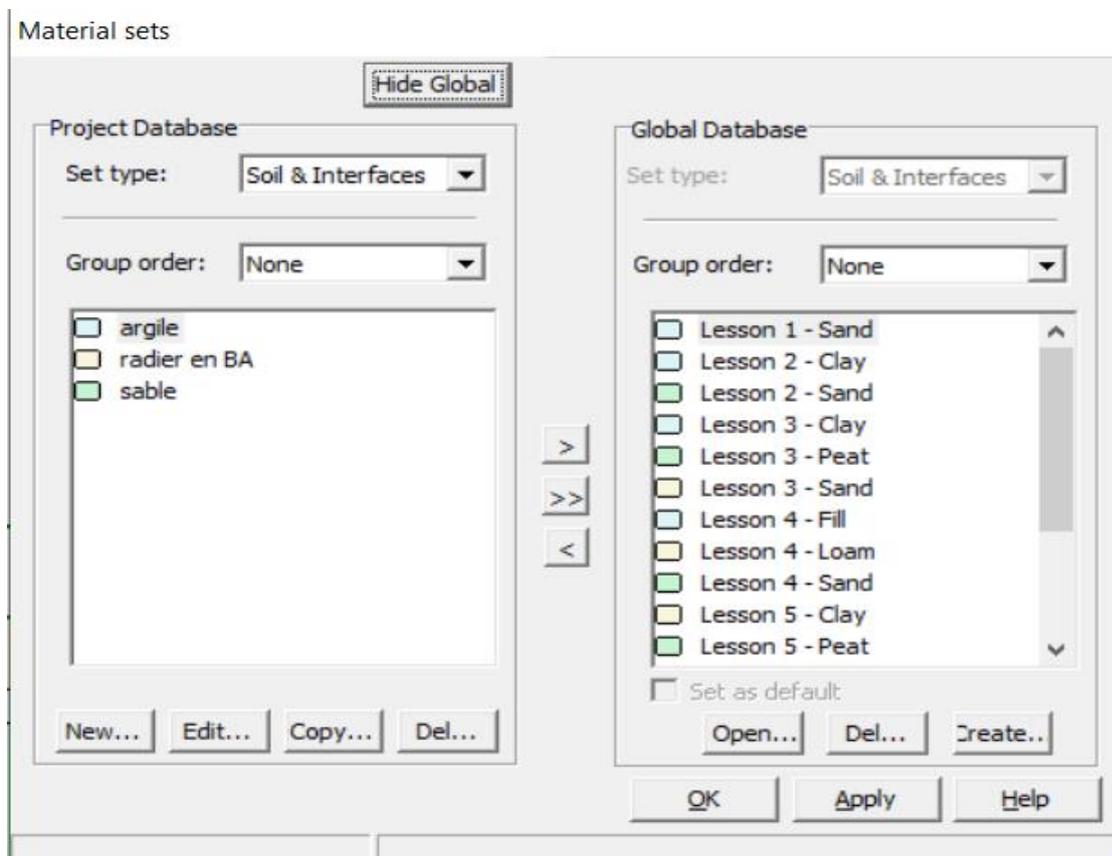


Figure 28: définir les propriétés de profil du sol

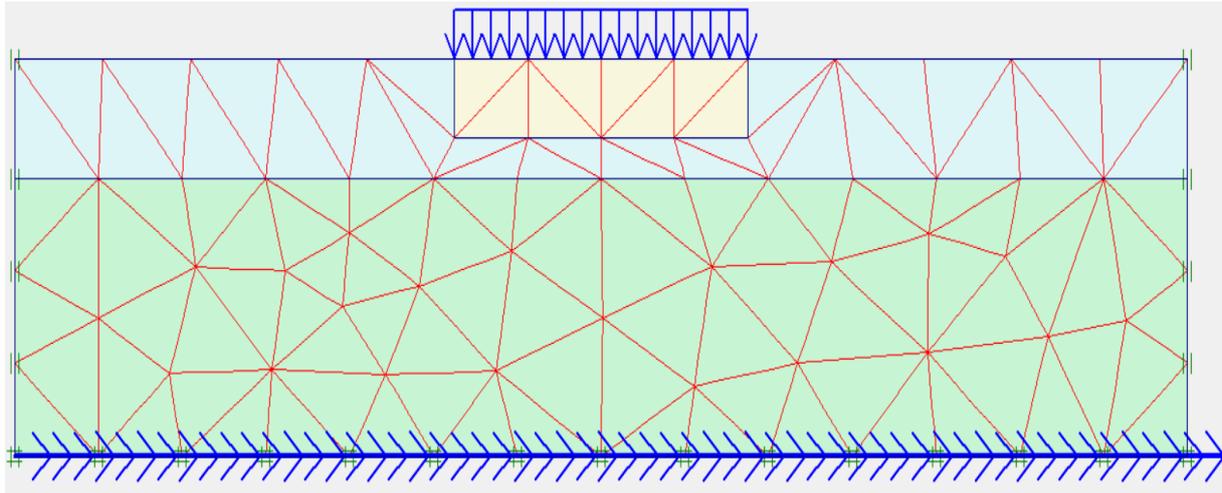


Figure 29: maillage et condition aux limite

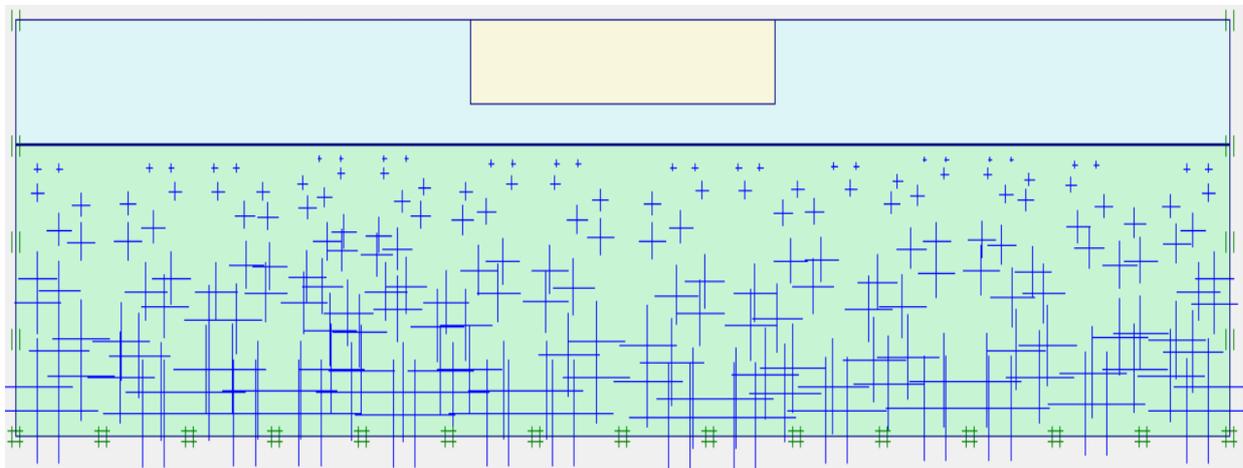


Figure 30 : initial condition les pression interstitiel

# CHAPITRE IV Modélisations Numériques et Expérimentations- Résultats et Discussions

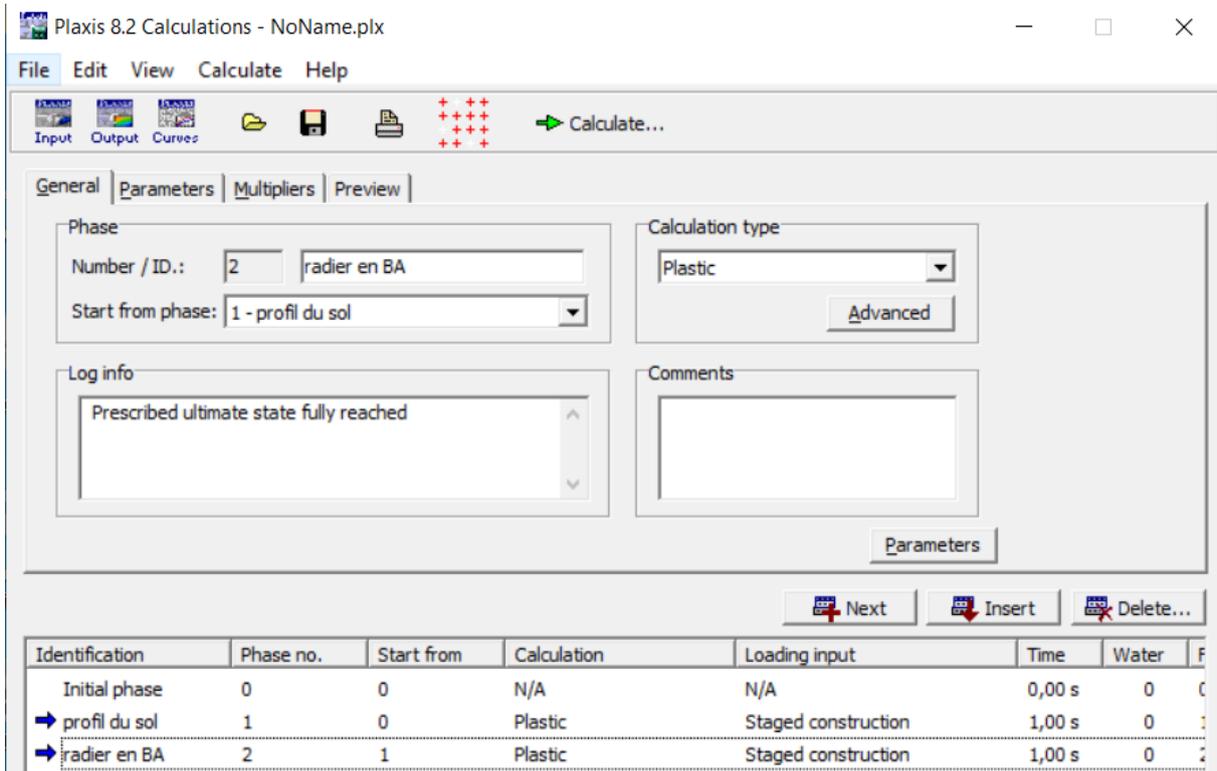


Figure 31 : définition des phases plastiques de profil du sol et le radier

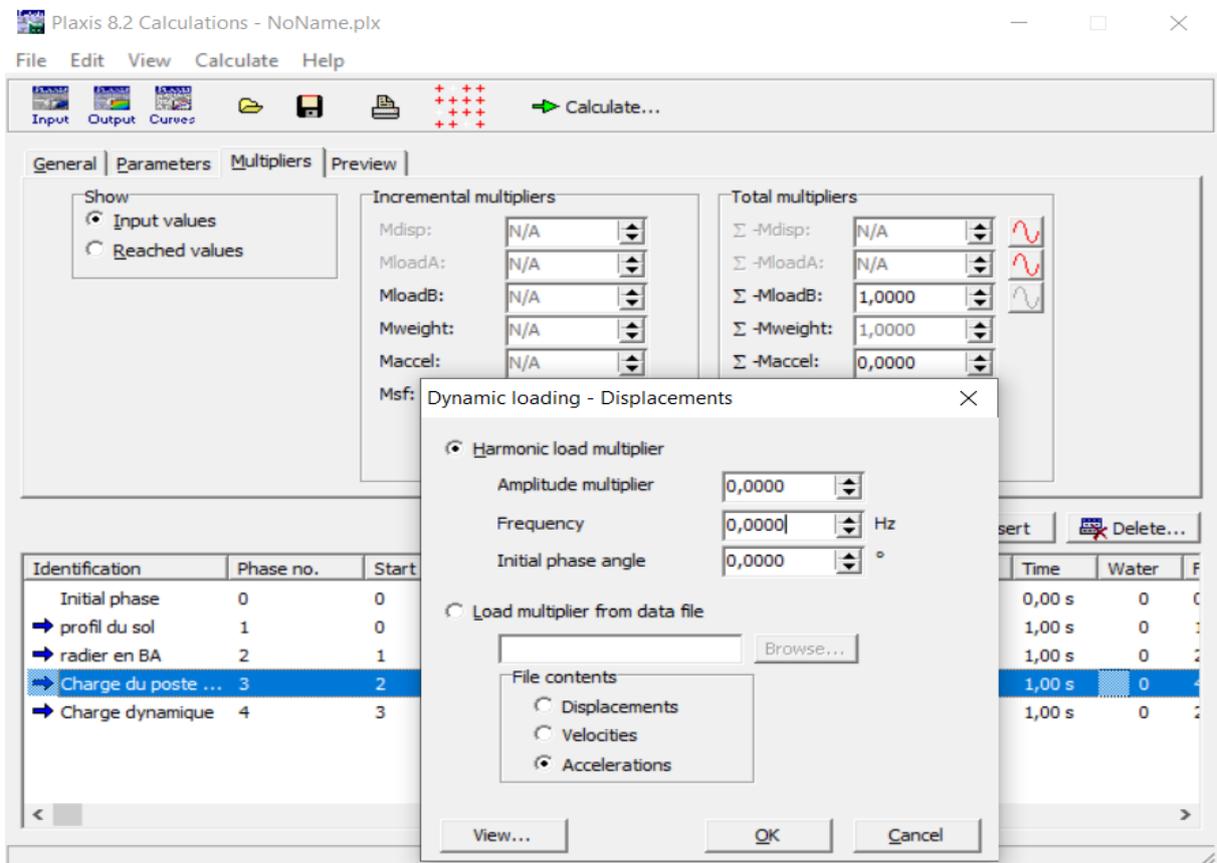


Figure 32: définir la charge de poste électrique

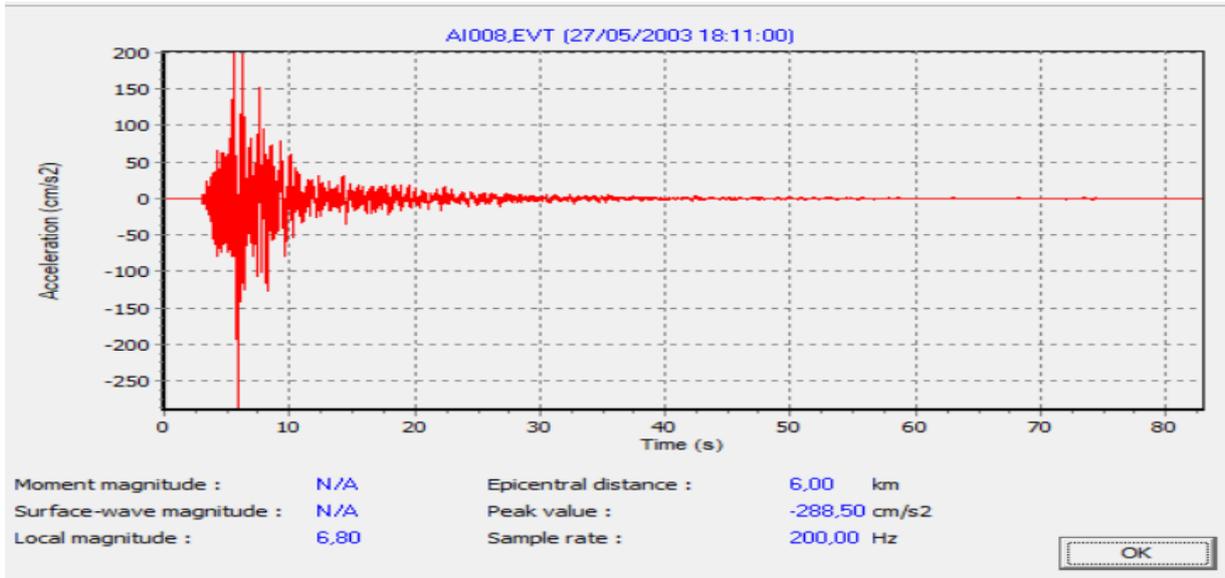


Figure 33: l'accélérogramme de séisme de Boumerdès de l'année Mai 2003 2003 (Strong Motion CD-ROM SMC de Boumerdès)

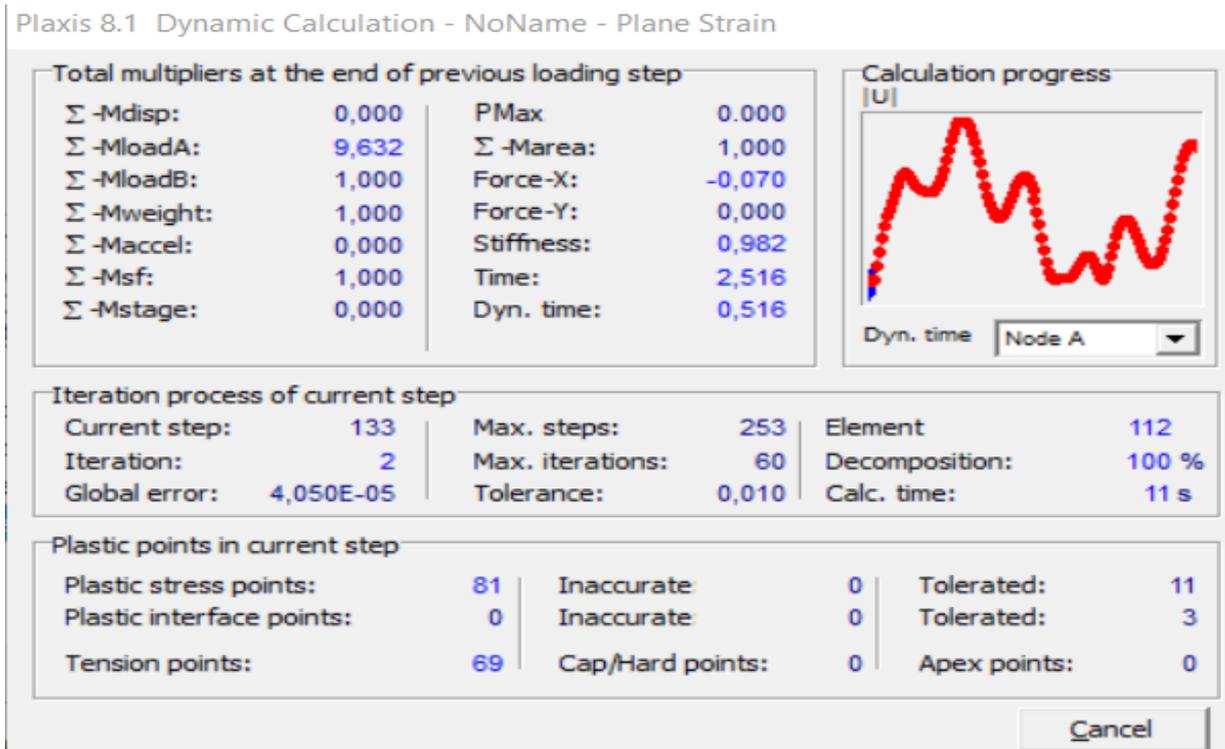


Figure 34: la phase de calcul

V.7. Résultat dans le cas de référence

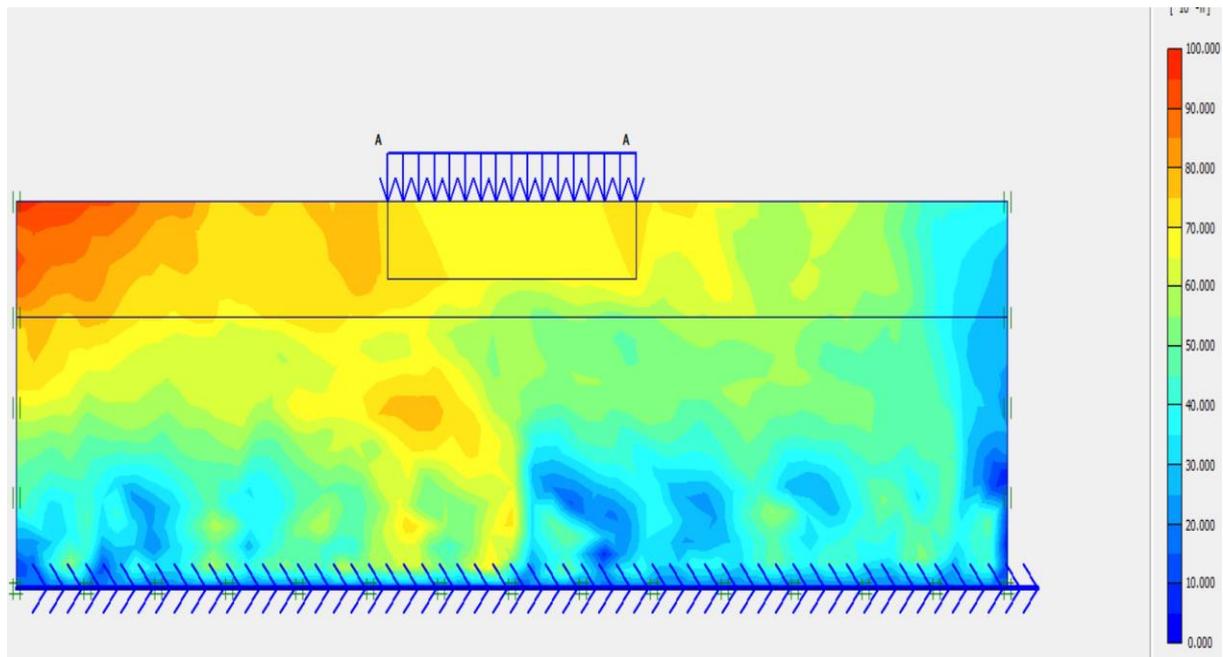


Figure 35 : déplacement total

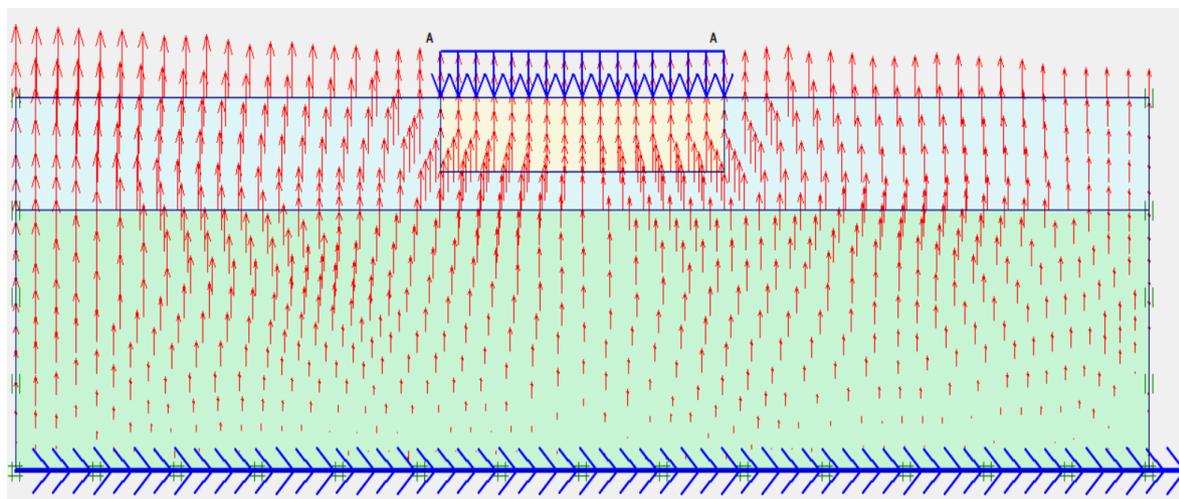


Figure 36 : le champ de déplacement vertical

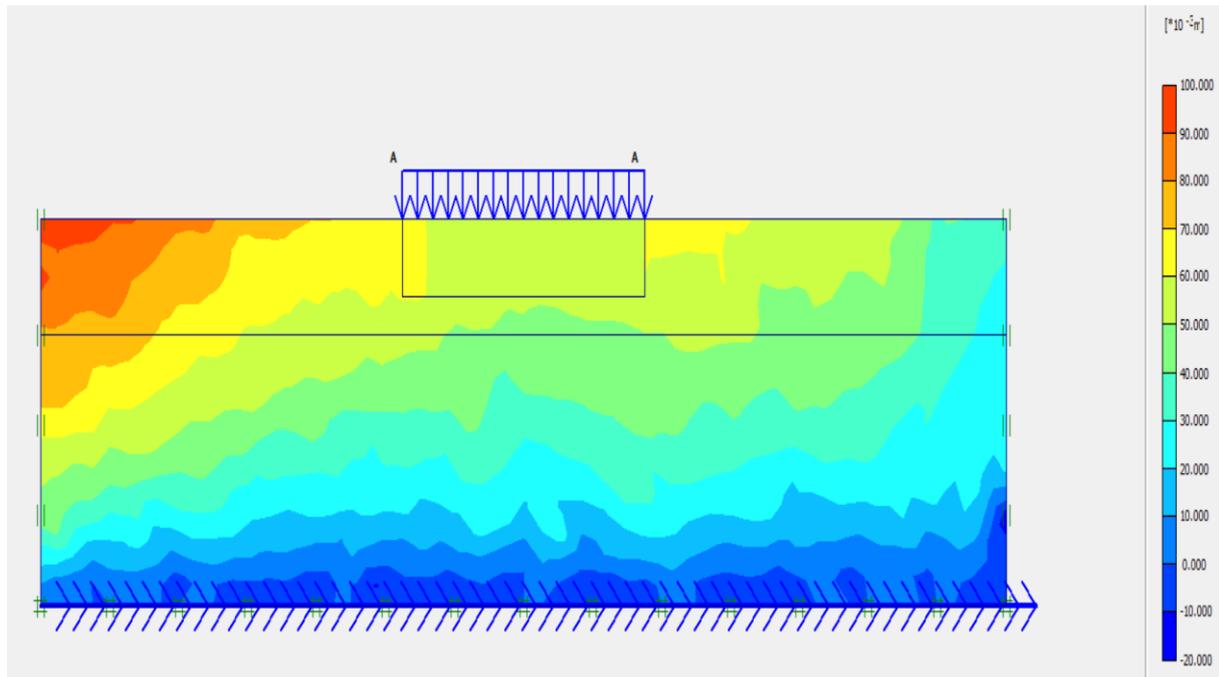


Figure 37 : le champ de déplacement vertical (shading)

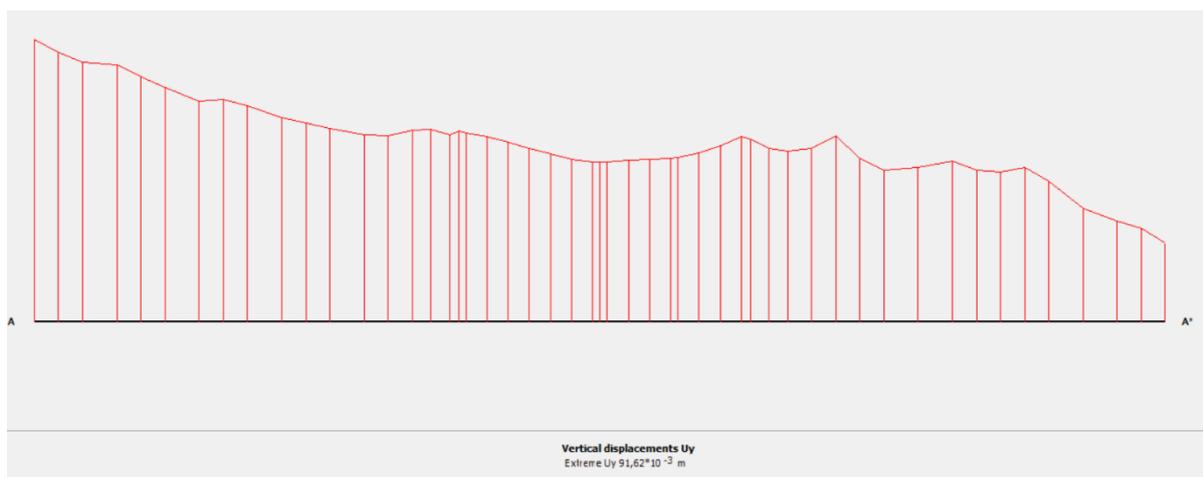
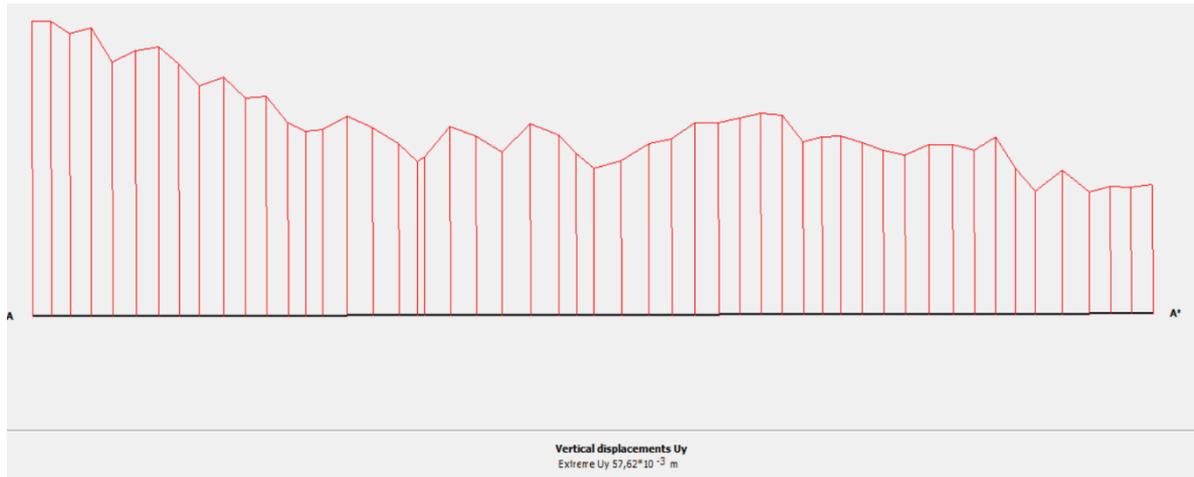


Figure 38 : le champ de déplacement vertical dans le sol argileux



*Figure 39 : le champ de déplacement dans le sol sableux*

**a- Résultats et constats**

On remarque que le champ de déplacement s’oriente vers le haut sur tout le profil de sol comme le montre la figure 36, et dans la couche d’argile ou le sable le déplacement vertical s’oriente toujours dans le coté haut mais d’après les résultats obtenus on déduit que la valeur de déplacement vertical se diminue dans la couche de sable par rapport à l’argile d’après les figures 38 et 39.

les déplacements du sol dans une couche d’argile sont souvent plus élevés par rapport à une couche de sable en raison des propriétés géotechniques distinctes de ces matériaux. Les argiles ont une capacité plus importante à se déformer sous charge en raison de leur texture fine et de leur sensibilité à l’eau, tandis que les sables, avec leurs particules plus grossières et leur perméabilité plus élevée, ont généralement des déformations moins significatives sous des charges similaires.

*Tableau 6 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour chaque couche*

Couche	Déplacement vertical
Couche d’argile	9,162 cm
Couche de sable	5,762 cm

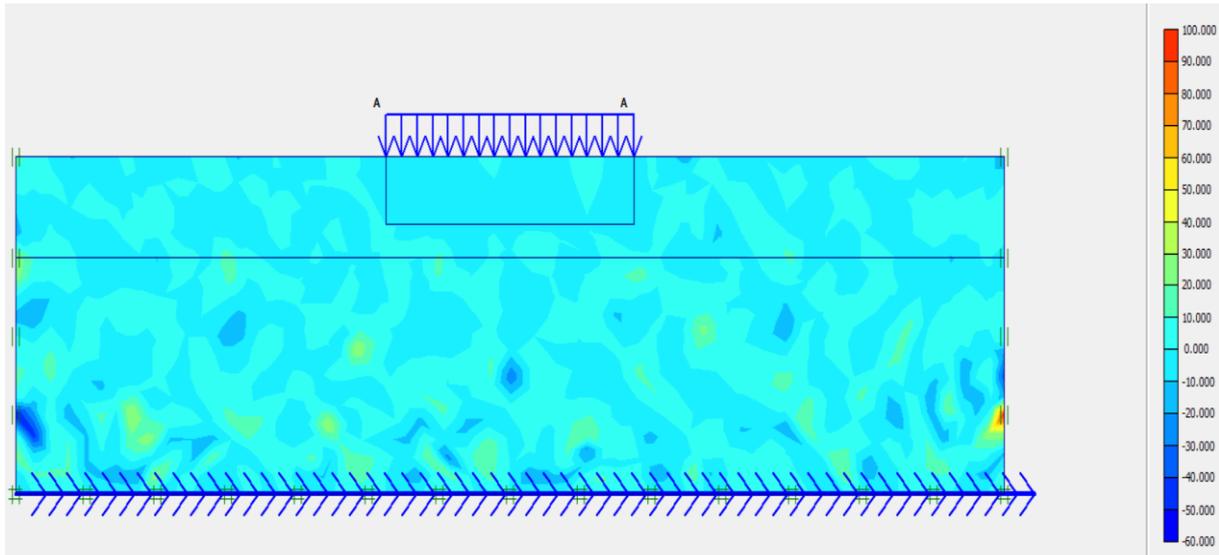


Figure 40 : l'accélération verticale

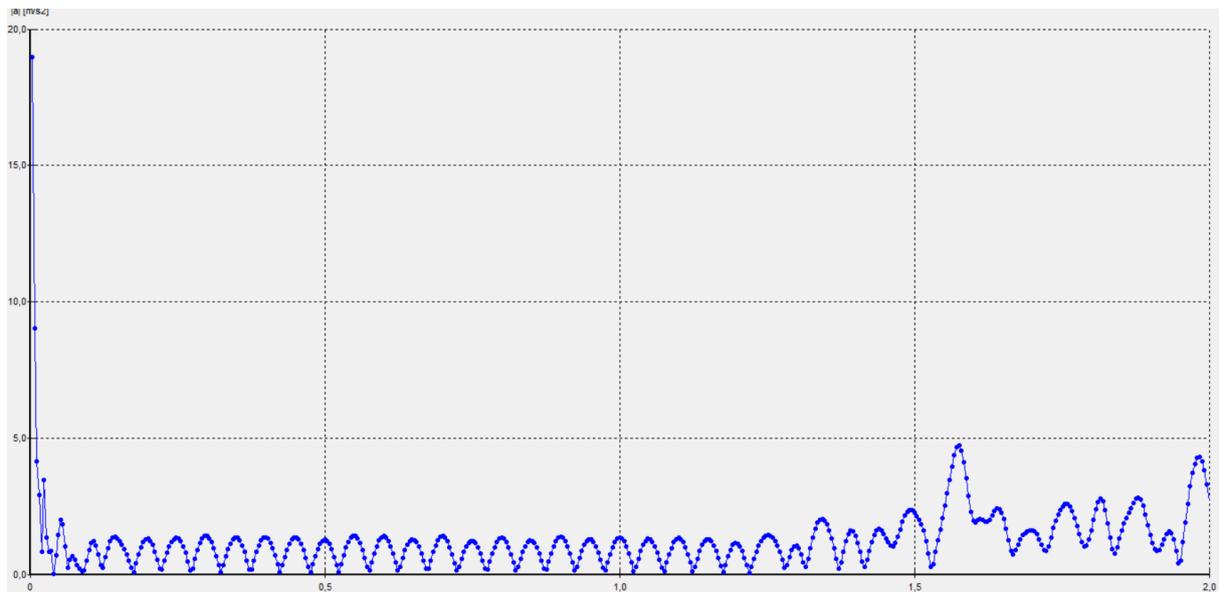


Figure 41 : accélération dans la surface de radier

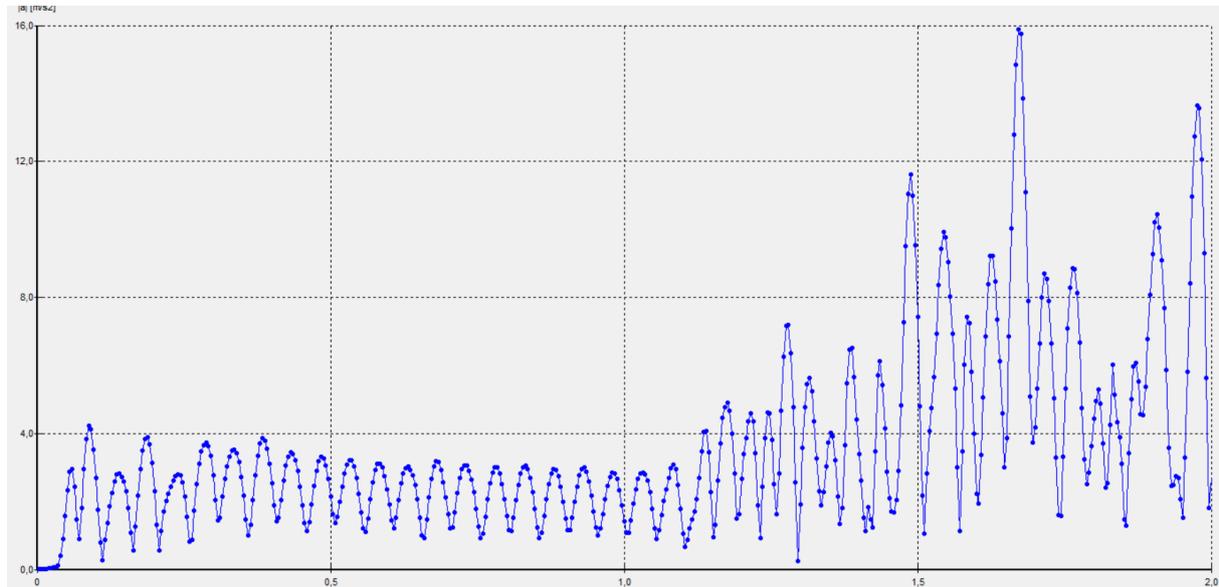


Figure 42 : accélération dans la couche d'argile

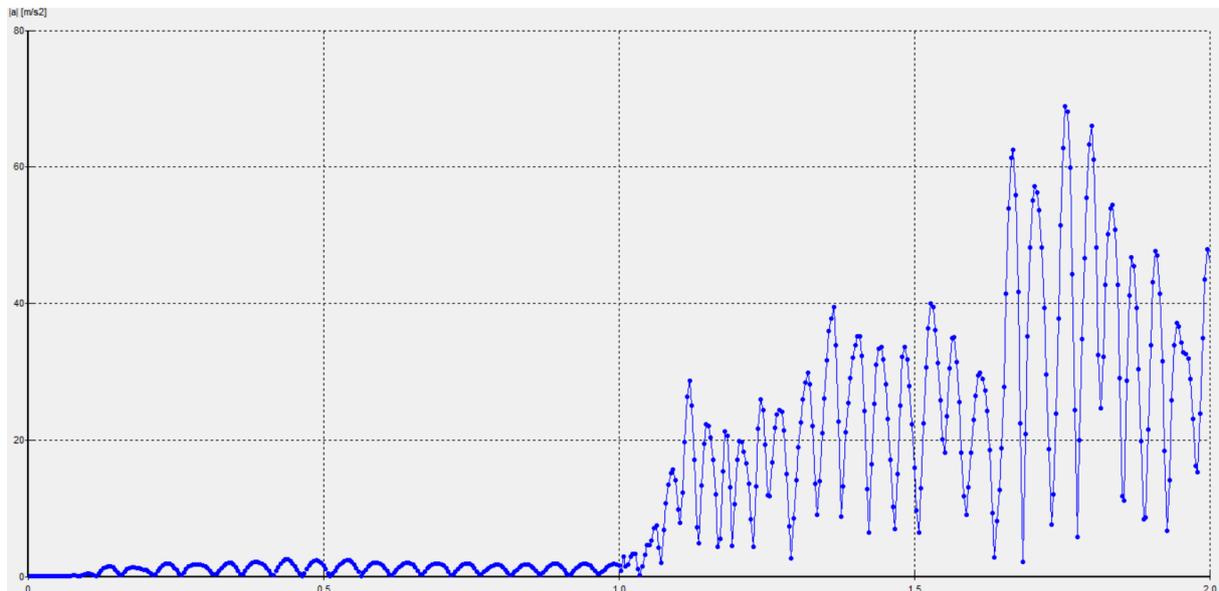


Figure 43: accélération dans la couche de sable

**b- Résultat et constat de l'accélération :**

D'après les courbes illustrés on a distingué que les ondes amplifiées d'une manière progressive et variable de la surface de radier jusqu'à le fond de profile du sol.

### V.8. Résultats Dans le cas d'augmentation de l'amortissement

Dans le code de calcul dynamique en élément finit, l'amortissement est simulé avec la formule de Rayleigh :

$$C = \alpha M + \beta k$$

C : l'amortissement

M : la masse

K : la rigidité

Les coefficients d'amortissement de Rayleigh  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent être déterminés à partir au moins de deux données du taux d'amortissement  $\zeta$  qui correspond à deux fréquences de vibration  $W_i$ , la relation entre  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $W_i$ ,  $\zeta$

$$\alpha + \beta W_i^2 = W_i \zeta$$

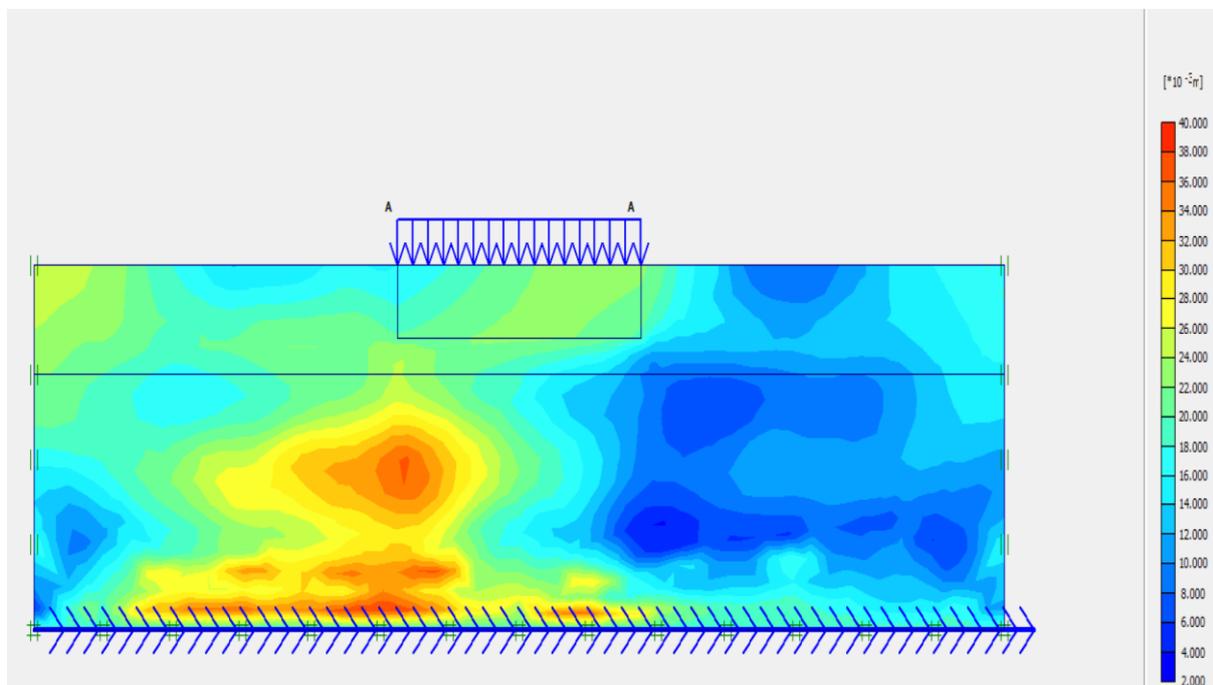


Figure 44 : Total déplacement dans le cas d'augmentation d'amortissement

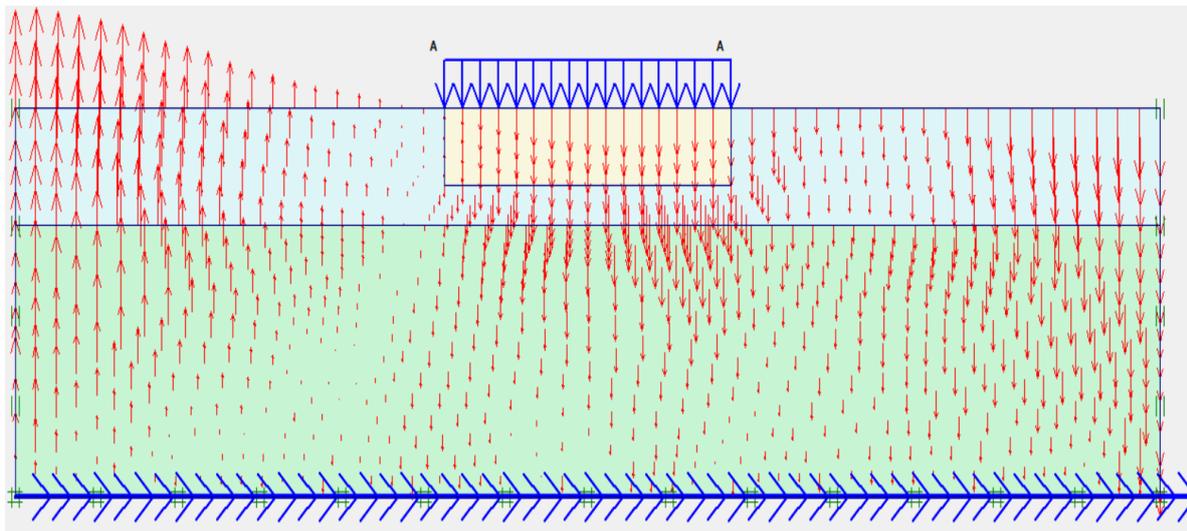


Figure 45 : Le déplacement vertical dans le cas d'augmentation d'amortissement (arrows)

### b-Résultat et constat

On a perçu une orientation des déplacements verticaux vers le haut dans le côté gauche de profil du sol, au-dessous de radier les déplacements verticaux s'orientent d'une manière dense vers le bas et dans le côté droite de la couche de sol, on remarque aussi une orientation de déplacement verticale vers le bas et la valeur de déplacement vertical atteint la valeur 2,575cm et le déplacement total est de 3,802 cm présenté par les deux figure 44 et 45

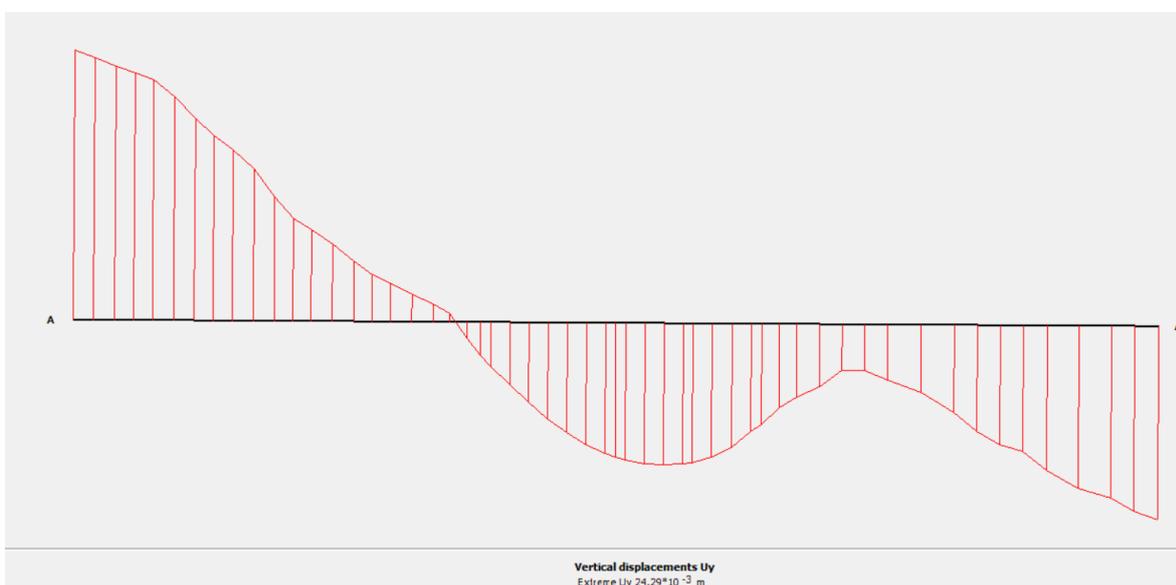


Figure 46 : le champ de déplacement vertical dans le sol argileux

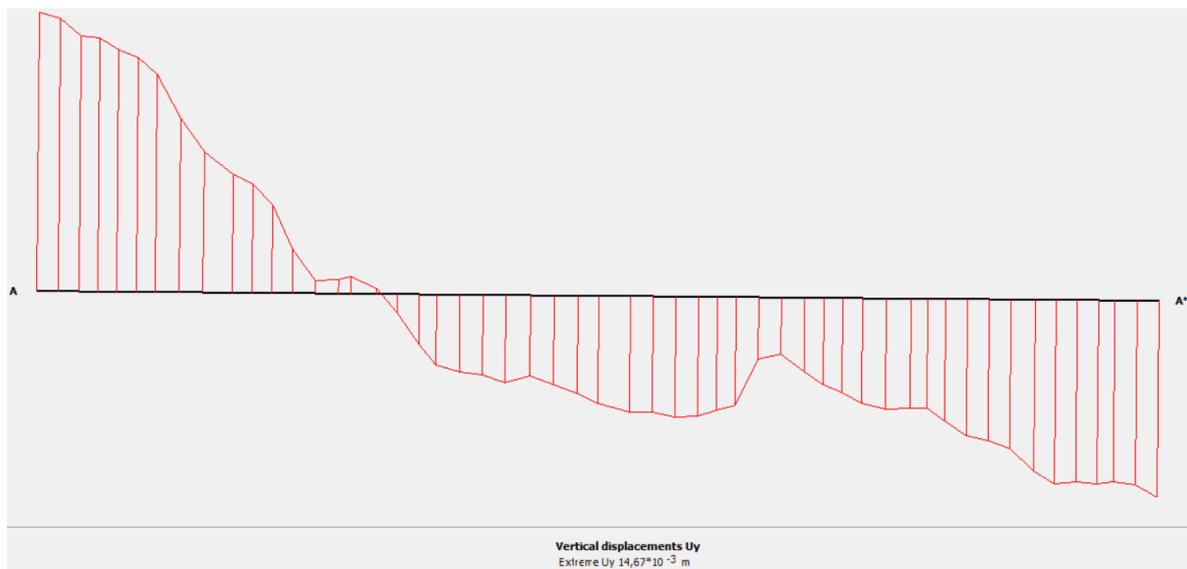


Figure 47 : le champ de déplacement vertical dans le sol sableux

**b- Résultat et constat (les déplacements verticaux dans les différentes couches)**

Dans les deux couches constituant le profil du sol soit la couche du sable ou la couche d'argile on distingue une orientation de déplacement vertical vers le haut dans le côté gauche de la couche mais au milieu, et dans le côté droit il y'a une orientation vers le bas. D'après les résultats obtenus on déduit qu'il y'a une diminution de la valeur de déplacement vertical dans la couche de sable par rapport à la couche d'argile comme le montre la figure 46 et 47.

Tableau 7 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour chaque couche

Couche	Déplacement vertical
La couche d'argile	2,429 cm
La couche de sable	1,467 cm

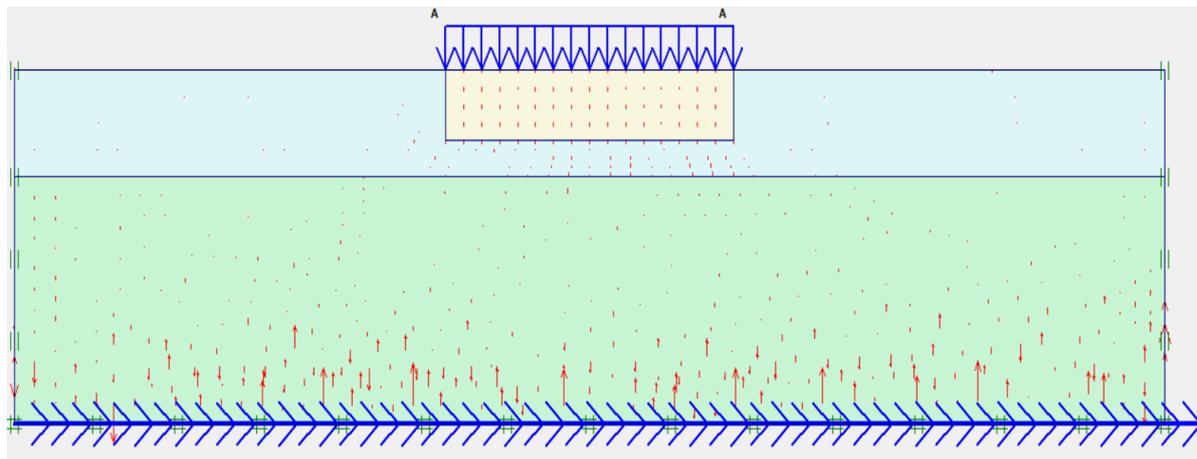


Figure 48 : L'accélération verticale

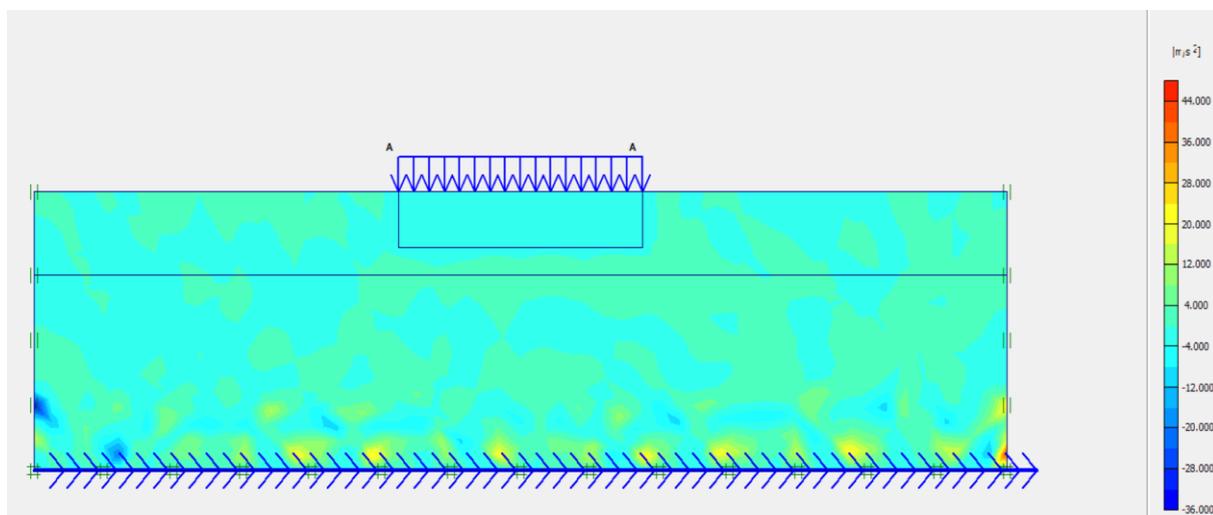


Figure 49: l'accélération verticale (shading)

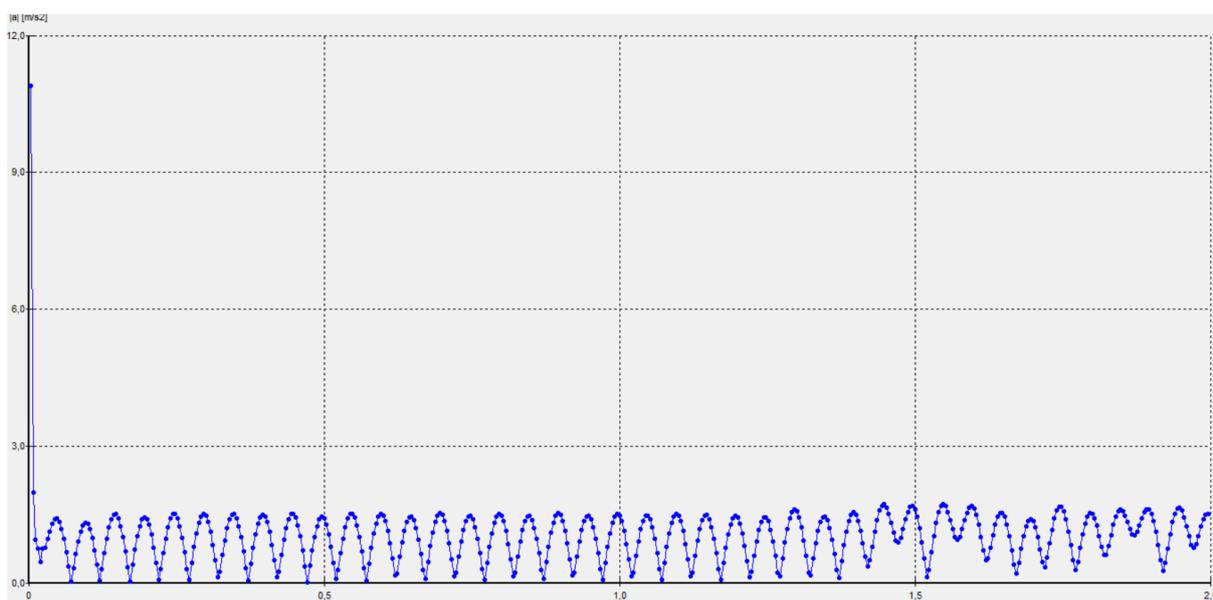


Figure 50: accélération dans la surface de radier

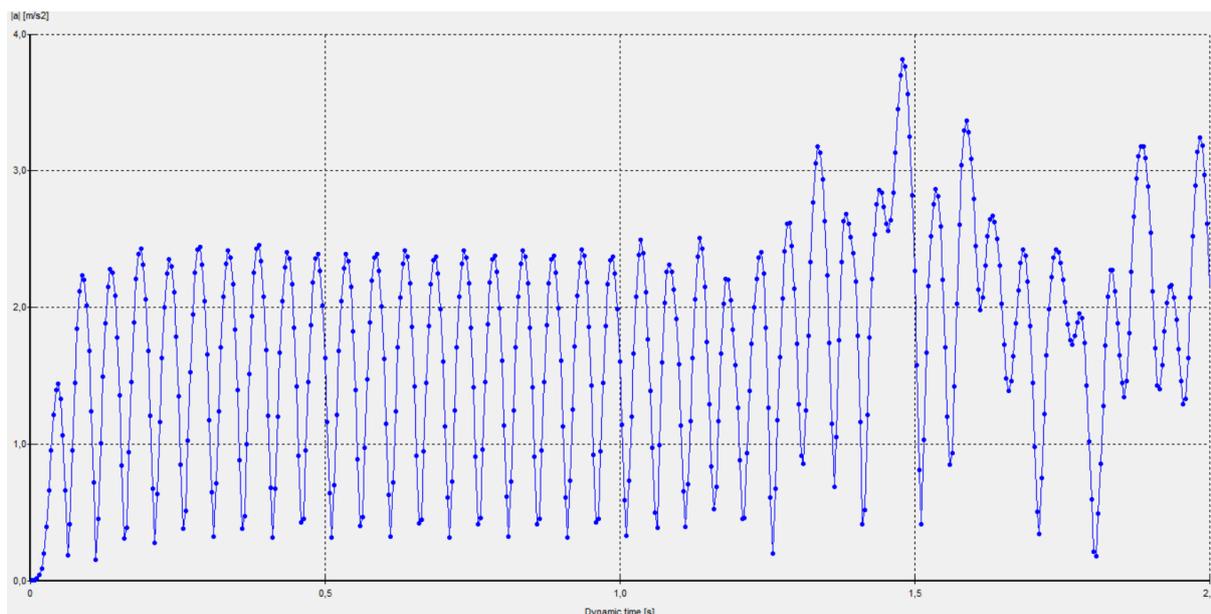


Figure 51: accélération dans la couche d'argile

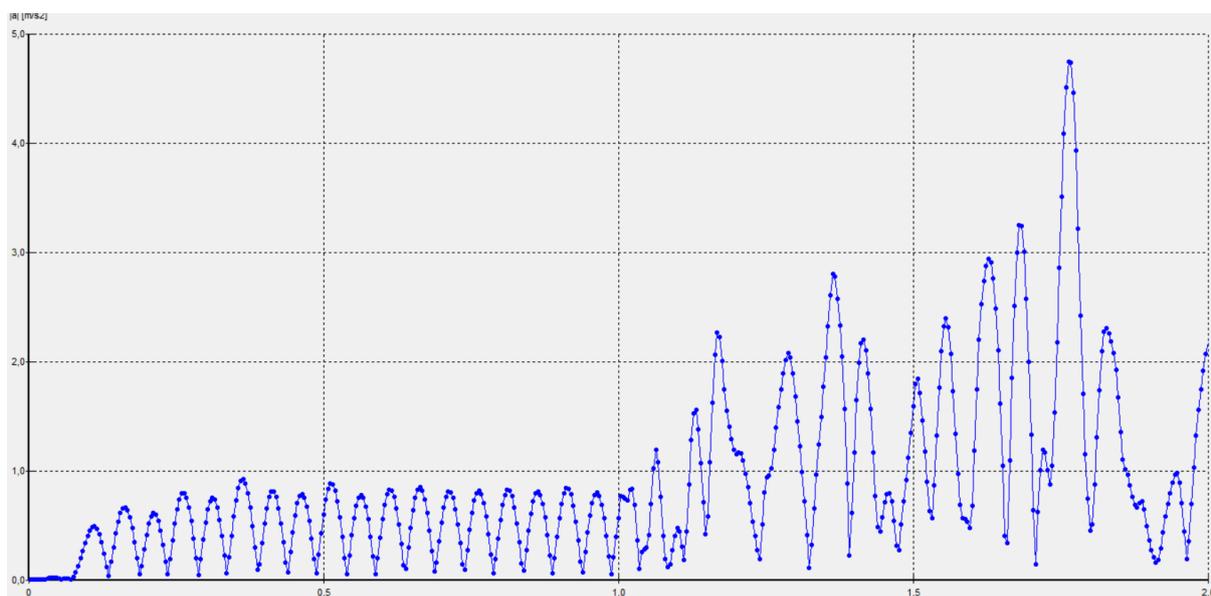


Figure 52: accélération dans la couche de sable

### c-Résultat et constat de l'accélération

Lors de la variation de l'amortissement les courbes et les résultats obtenus présente une forte réduction par rapport aux cas de référence, par ailleurs les ondes sont amplifiées progressivement de haut vers le bas dans le massif de sol.



### V.8.1. Comparaison des résultats de modèle de référence avec l'augmentation de l'amortissement

#### a- Courbe de déplacement verticale

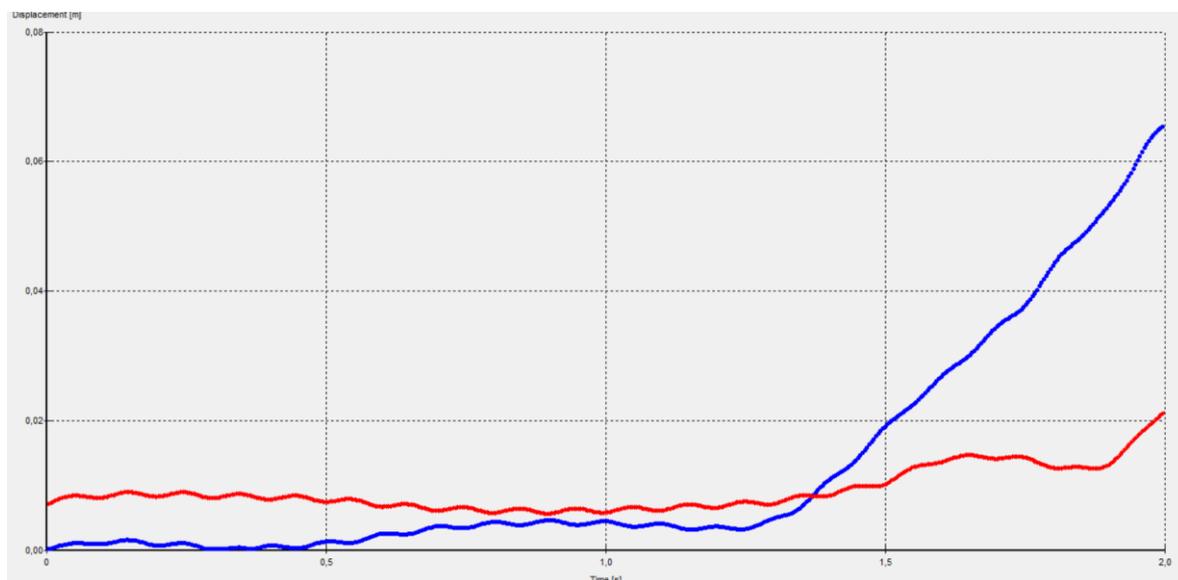


Figure 53 : Courbe de déplacement verticale dans la surface de radier

Déplacement dans le modèle de référence (la courbe bleu)

Déplacement dans l'augmentation d'amortissement (la courbe rouge)

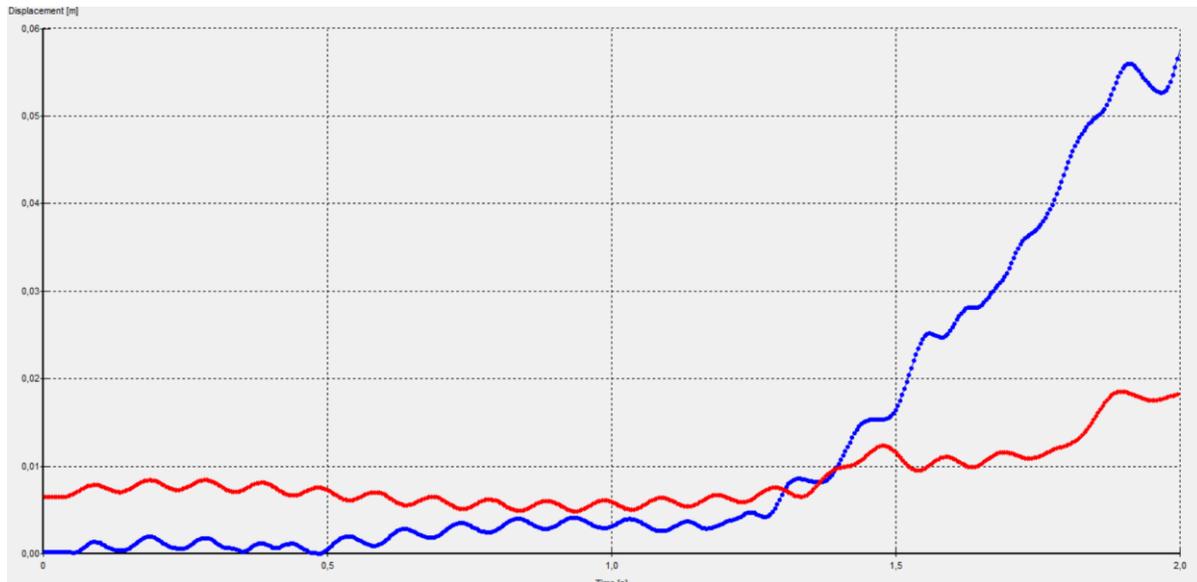


Figure 54 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile

Déplacement dans le modèle de référence (courbe bleu)

Déplacement dans l'augmentation d'amortissement (courbe rouge)

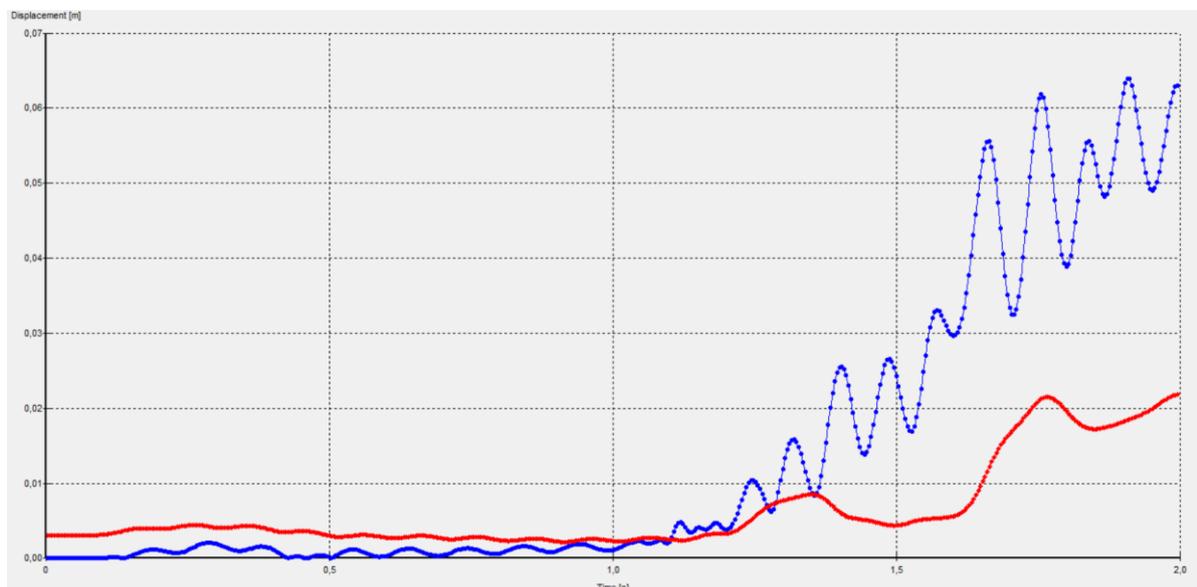


Figure 55 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable

Déplacement dans le modèle de référence (courbe bleu)

Déplacement dans l'augmentation d'amortissement (courbe rouge)

**a- Résultat et constat des déplacements verticaux**

On remarque que d'après les figures 53,54 et 55 la valeur de pique de déplacement vertical se diminue dans tous les points du massif du sol. Dans la courbe figuré dans la figure 53 on a vu que la valeur de pique de déplacement vertical dans la surface de radier dans le cas de référence est de 6,5cm, et cette dernière se diminue par rapport à l'accroissement de l'amortissement a la valeur de 2,1cm. Ce qui concerne la courbe présenté dans la figure 54 on distingue que la valeur de pique de déplacement vertical dans la surface de la couche d'argile dans le cas de référence est de 5,6cm, et cette dernière se réduit par rapport à l'augmentation de l'amortissement a la valeur de 1,8cm, la courbe illustrée dans la figure 55 présente une valeur maximale de déplacement verticale dans la surface de la couche de sable et dans le cas de référence est de 6,4cm, une réduction considérable par rapport à l'augmentation de l'amortissement a la valeur de 2,2cm Cela veut dire que le déplacement est inversement proportionnel à l'amortissement, c'est-à-dire que plus le coefficient d'amortissement augmente, plus les déplacements du sol diminuent en raison d'absorption d'énergie des vibrations sismiques ou des charges dynamiques.

*Tableau 8 : Tableau de déplacement vertical dans cas de référence par rapport à l'augmentation d'amortissement*

Couche du sol	Cas du référence déplacement (cm)	Augmentation d'amortissement déplacement (cm)
Surface de radier	6,5	2,1
Couche d'argile	5,6	1,8
Couche de sable	6,4	2,2

### **b- Résultat et constat d'accélération :**

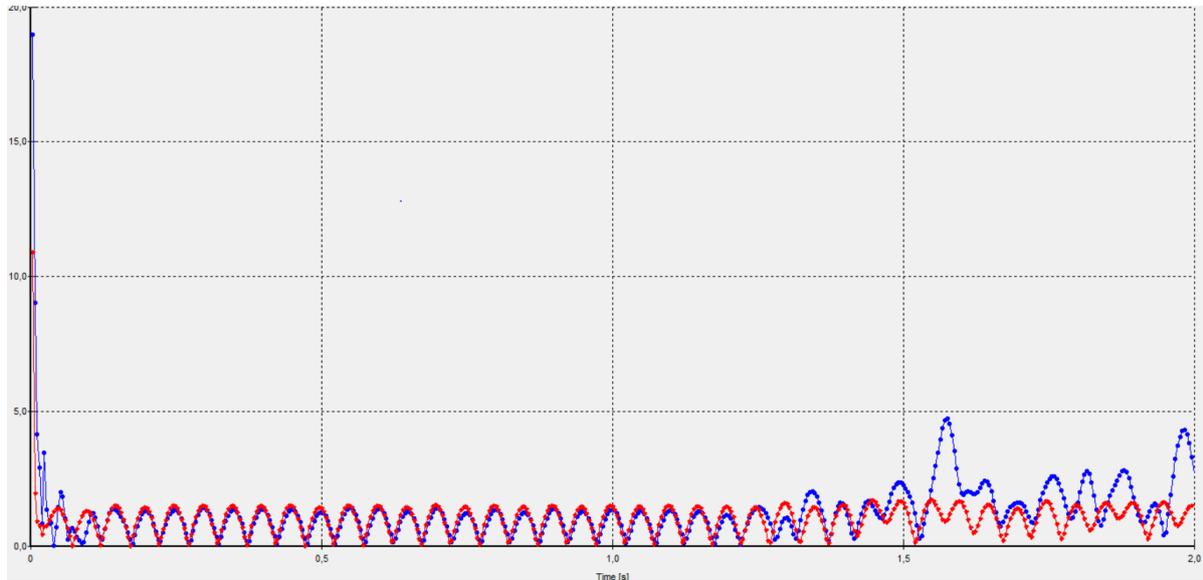


Figure 56 : Courbe de l'accélération dans la surface libre

L'accélération dans le modèle de référence (courbe bleu)

L'accélération dans l'augmentation d'amortissement (courbe rouge)

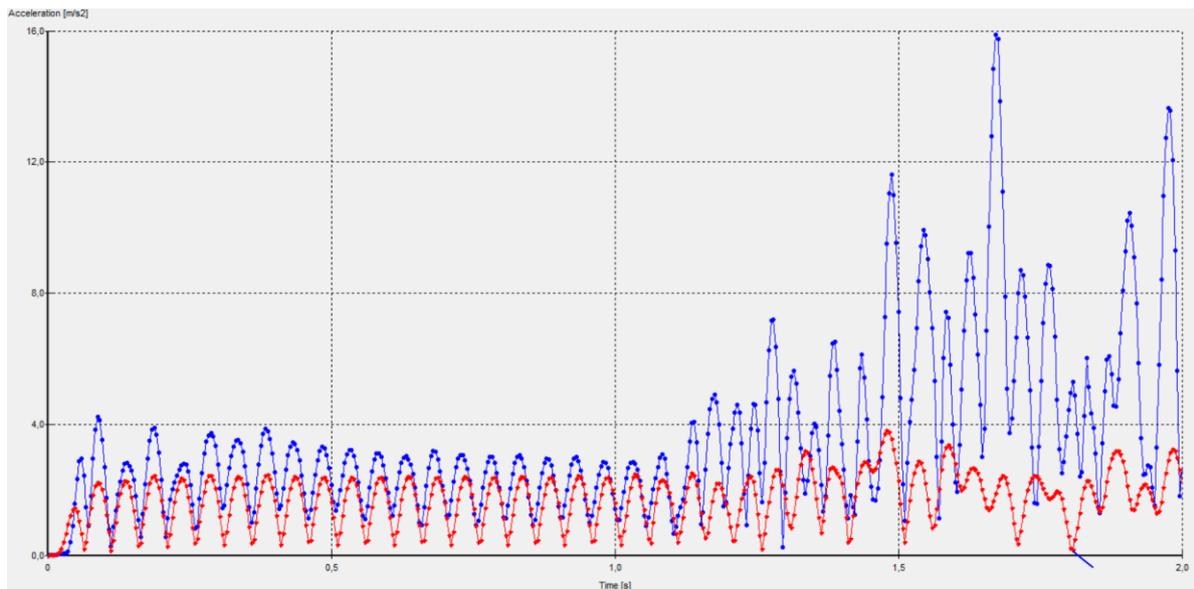


Figure 57 : Courbe de l'accélération dans la couche d'argile

L'accélération dans le modèle de référence (courbe bleu)

L'accélération dans l'augmentation d'amortissement (courbe rouge)

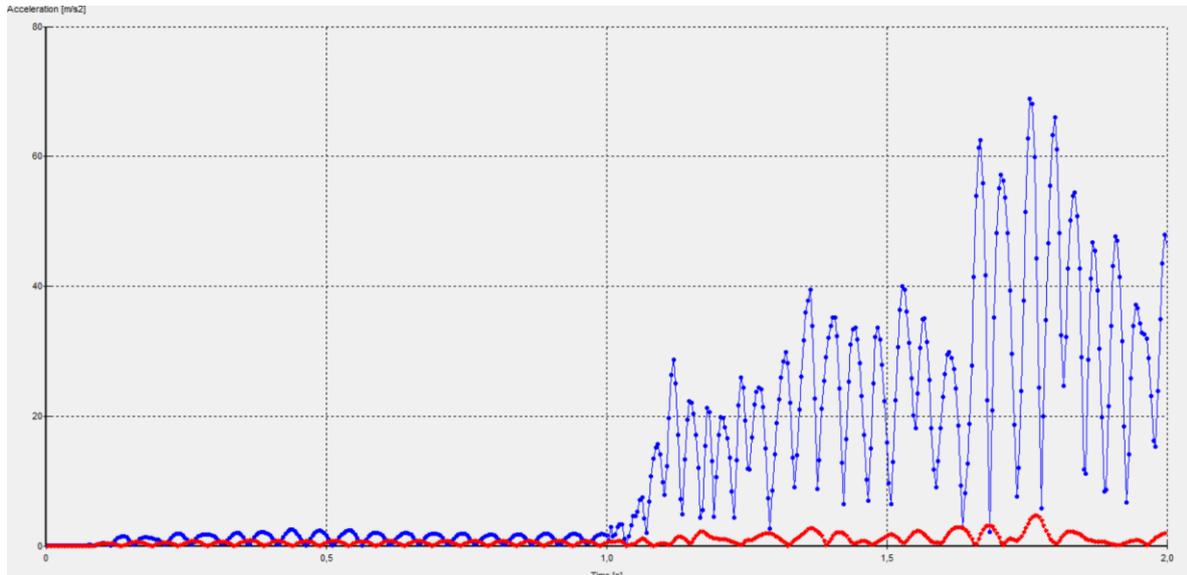


Figure 58 : Courbe de l'accélération dans la couche de sable

L'accélération dans le modèle de référence (courbe bleu)

L'accélération dans l'augmentation d'amortissement (courbe rouge)

**b-Résultat et constat des accélérations :**

Il est observé que les valeurs des pics de l'accélération dans le cas standard sont plus amplifiées que celles obtenues dans le cas de la variation de l'amortissement par une augmentation comme montré les figure 56, 57, et 58.

Ce qui concerne la courbe de la figure 56, on distingue que la valeur de l'accélération vertical dans la surface libre dans le cas de référence (standard) commence par 20m/s<sup>2</sup> est et cette dernière se diminue par rapport à l'augmentation de l'amortissement a la valeur de de 10 m/s<sup>2</sup> et la valeur de pique de l'accélération vertical dans la surface du radier avec le temps dans le cas de référence est de 4,746 m/s<sup>2</sup> et cette dernière se diminue par rapport à l'augmentation de l'amortissement a la valeur de 1,651 m/s<sup>2</sup>, et dans la courbe de la figure 57, on a perçue que la valeur de pique de l'accélération vertical dans la surface de la couche d'argile dans le cas de référence (standard) est de 16 m/s<sup>2</sup> et une réduction enregistré lors de l'accroissement de l'amortissement à la valeur de 3,814 m/s<sup>2</sup> et le même observation marqué dans la courbe de la figure 58 où la valeur maximale enregistré dans le cas de référence est de 68,896 m/s<sup>2</sup> et cela diminue à la valeur de 4,742 m/s<sup>2</sup> pendant l'amplification de l'amortissement.

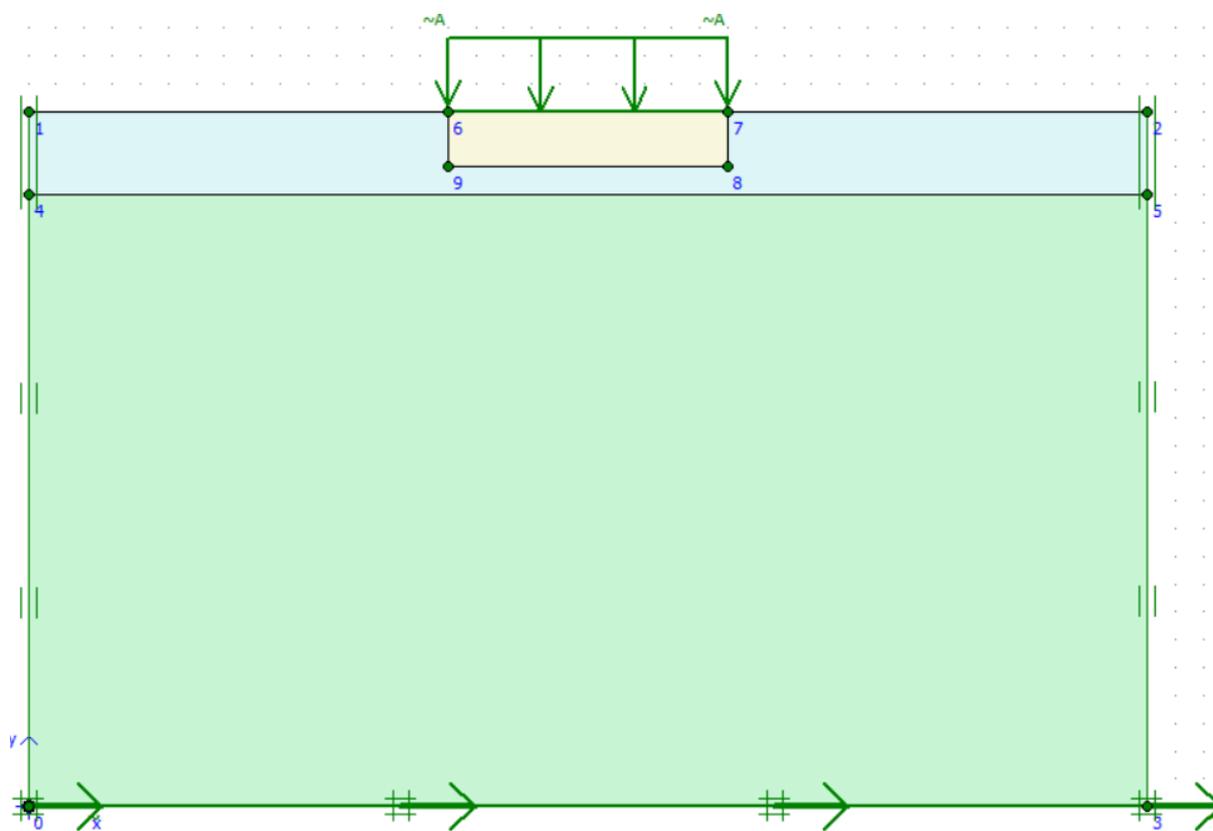
Tableau 9 : comparaison des résultats d'accélération

Couche du sol	Cas du référence accélération m/s <sup>2</sup>	Augmentation d'amortissement accélération m/s <sup>2</sup>
---------------	---	--

Surface de radier	4,746	1,651
Couche d'argile	16	3,814
Couche de sable	68,896	4,742

**V.9. Les résultat lors de l'augmentation de la profondeur (hauteur) de la couche du sol**

Un paramètre essentiel et crucial dans l'étude de la propagation des ondes dans le profil du sol est la hauteur des couches de sol. Dans cette section, nous allons démontrer l'influence de la variation de la hauteur des couches sur les résultats des déplacements et des accélérations. En modifiant la hauteur des différentes couches, nous pourrons observer comment les caractéristiques des ondes sismiques, telles que leur amplitude et leur vitesse de propagation, sont affectées, et ainsi comprendre l'impact direct de la stratification du sol sur le comportement dynamique global.



*Figure 59 : Modèle d'augmentation de la profondeur de couche de sol*

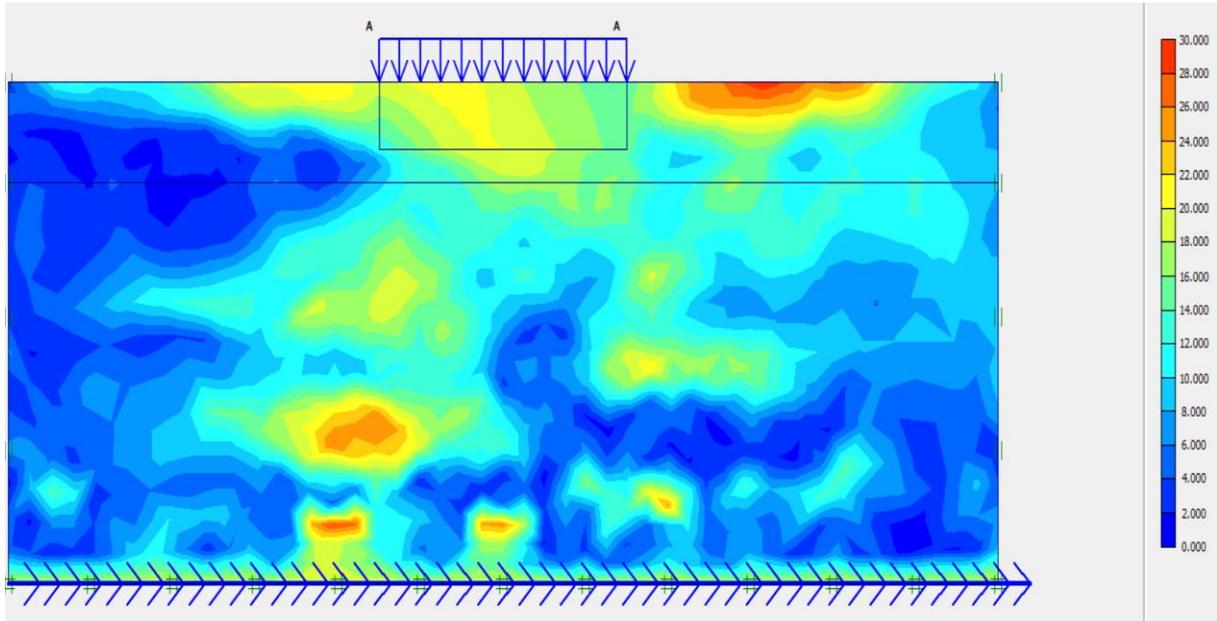


Figure 60 : Le déplacement total (shading )

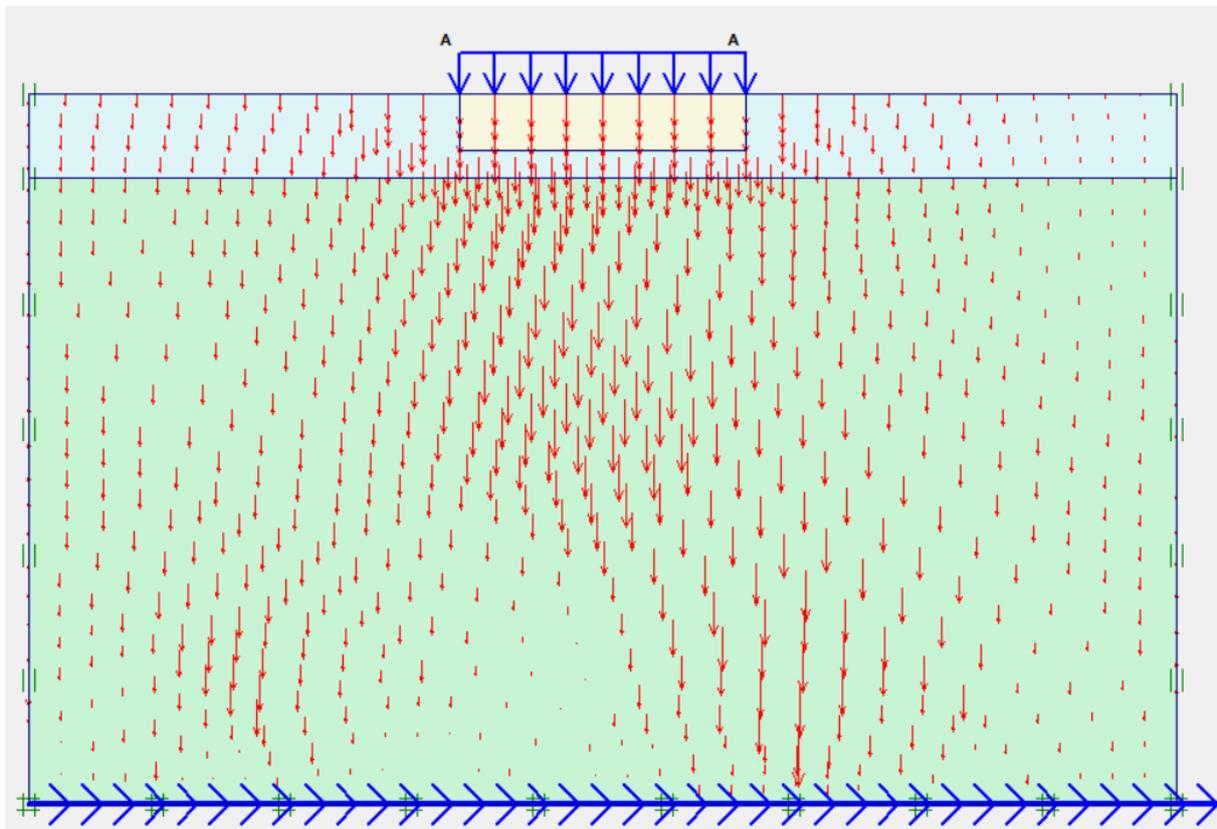


Figure 61 : Le déplacement vertical ( arrows )

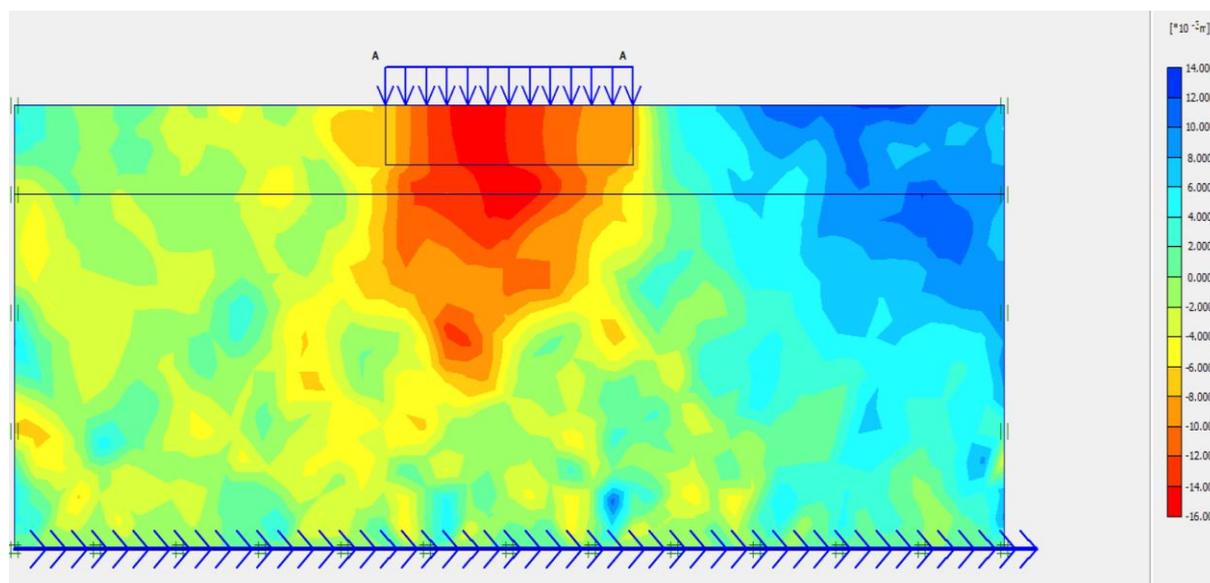


Figure 62 : Le déplacement vertical ( shading )

#### a-Résultat et constat

Dans le cas de l'augmentation de la profondeur de la couche la valeur de déplacement total enregistré est de 11,303 cm (figure 60), en revanche, on observe une orientation de déplacement vertical vers le bas sur tout le profil du sol , dans le coté gauche et droit du profil du sol le déplacement vertical sont legére par rapport au milieu du profil du sol ou on aperçoit un déplacement vertical trop fort comme il est illustré dans les figures 61 et 62

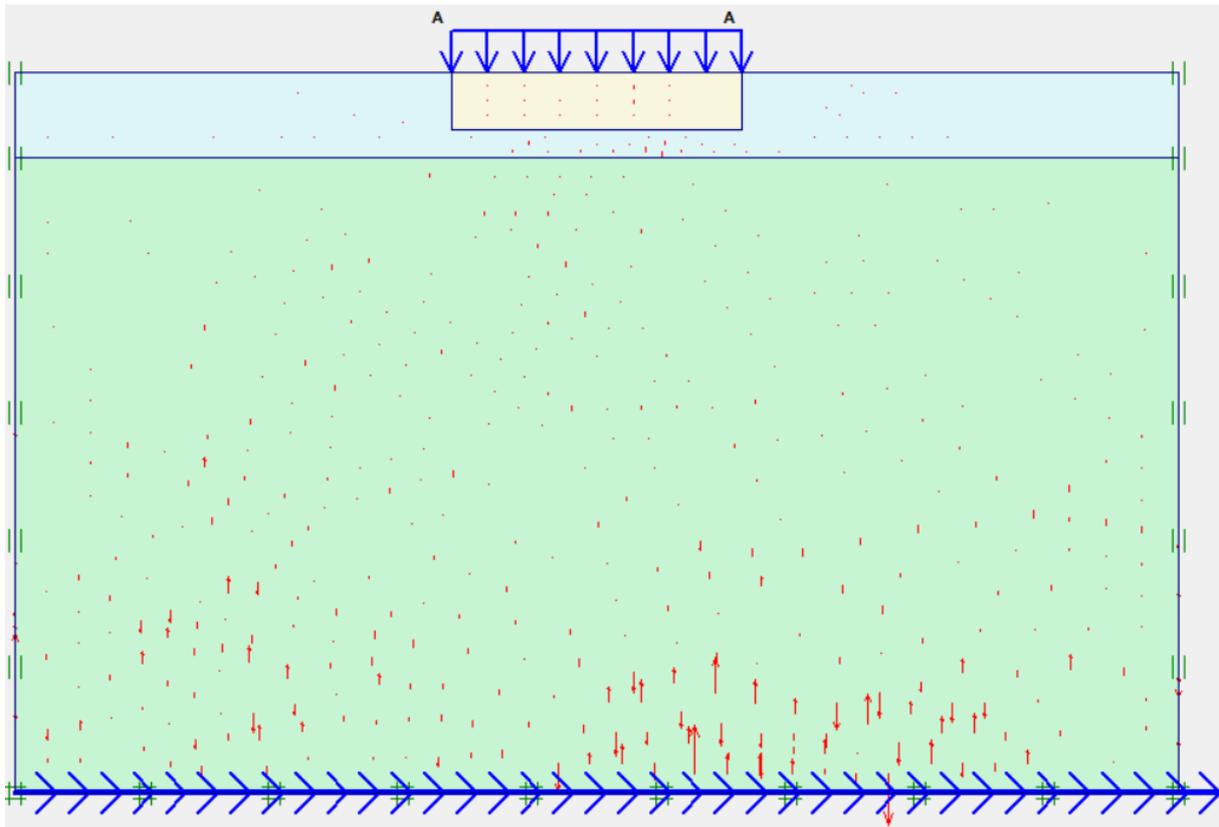


Figure 63 : L'accélération vertical

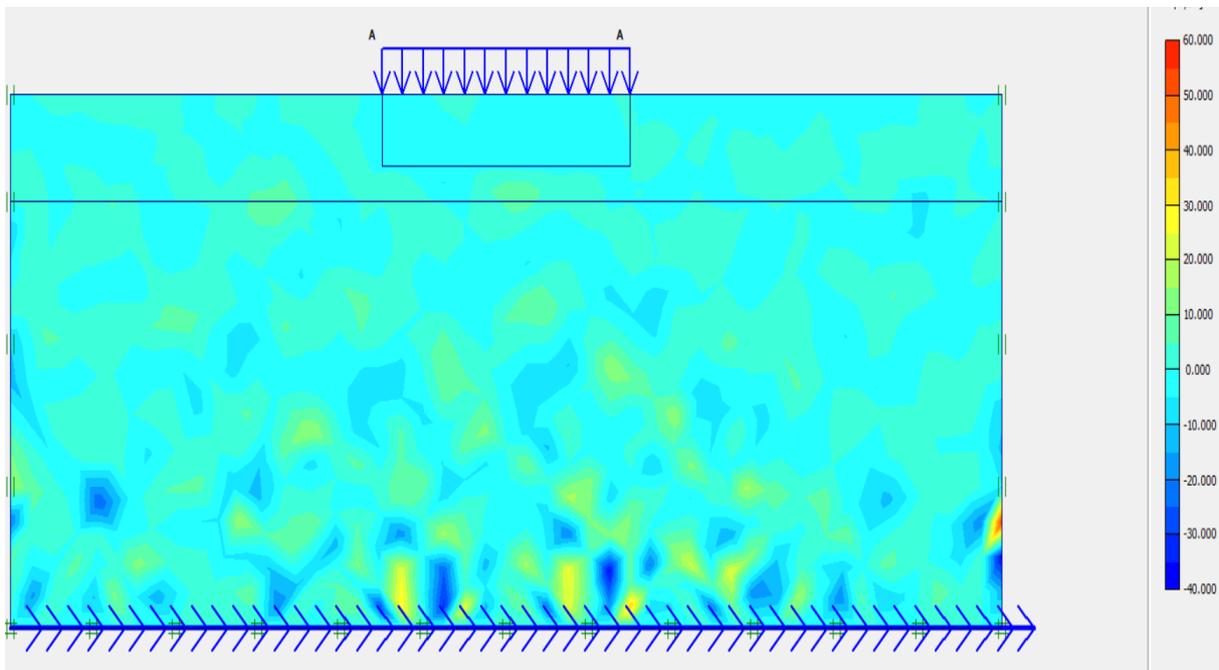


Figure 64: accélération vertical (shading)

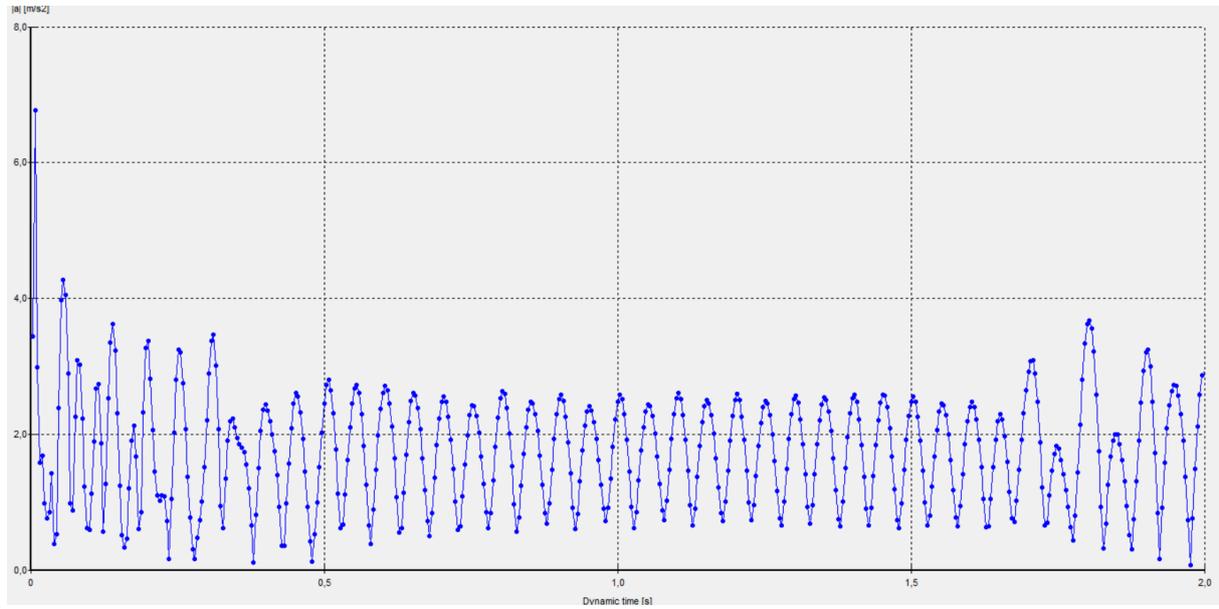


Figure 65: accélération dans la surface de radier

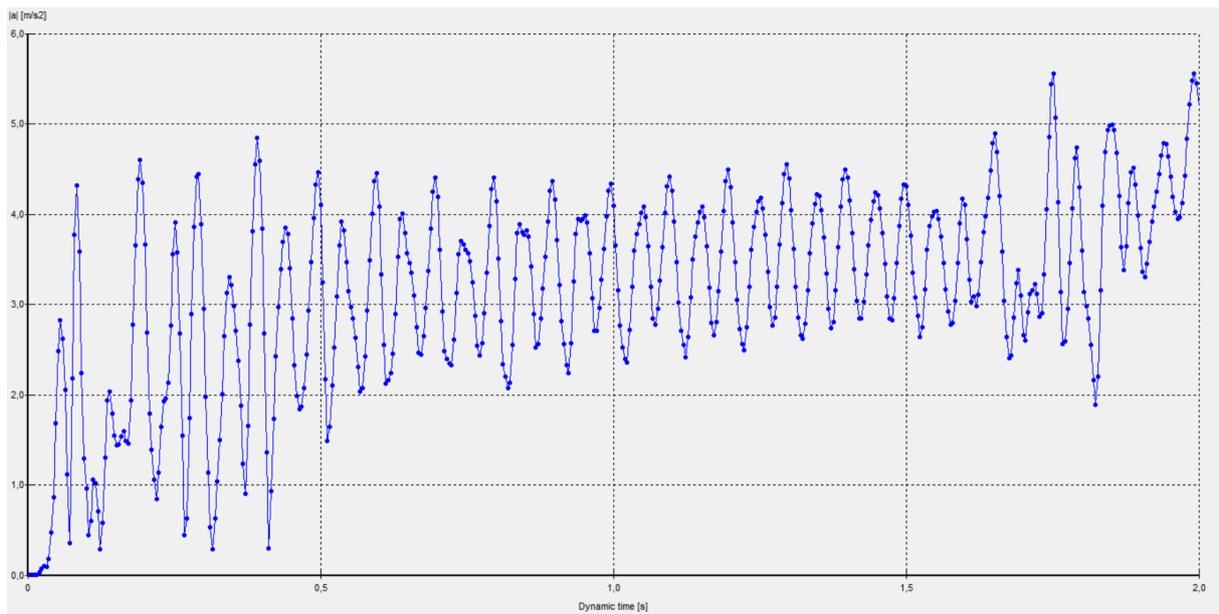


Figure 66: accélération dans la couche d'argile

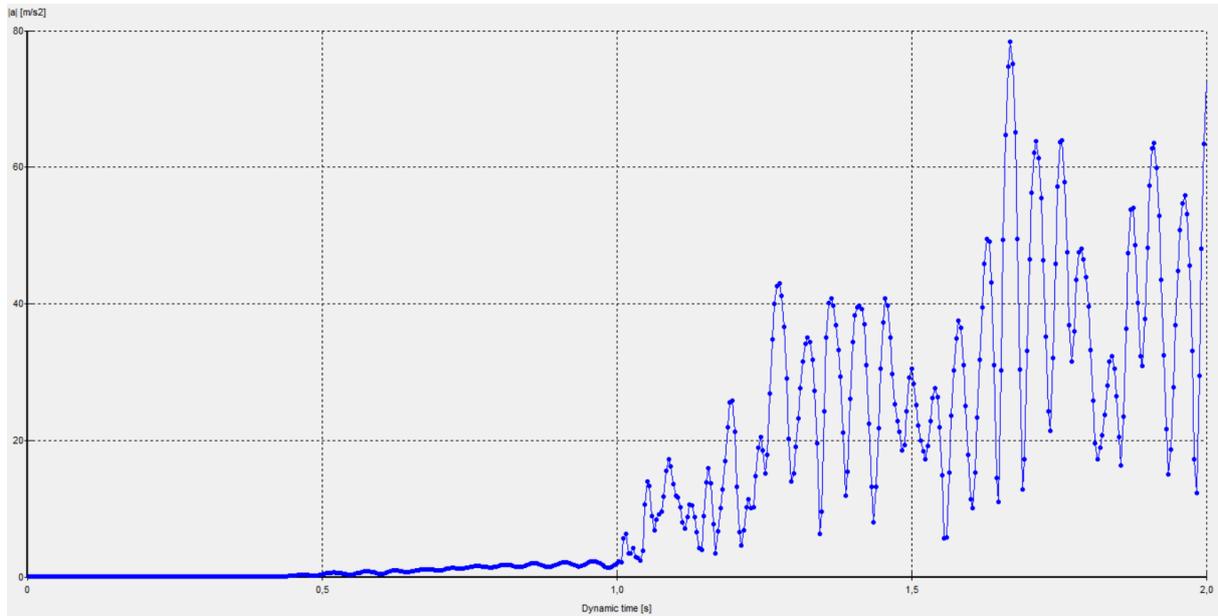


Figure 67: accélération dans la couche de sable

### b-Résultats et constat des courbes d'accélérations

on étudiant ces trois courbe on distingue que les ondes d'accélération augmente au fil de temps , en revanche on remarque que les valeurs de pique d'accélération augmente d'une façon remarquable de haut vers le bas de profil du sol ce qui veut dire qu'a chaque fois que la couche soit plus épaisse on aura une augmentation d'accélération.

V.9.1. Comparaison des résultats de modèle de référence avec l'augmentation de la hauteur de la couche  
a-courbe de déplacement

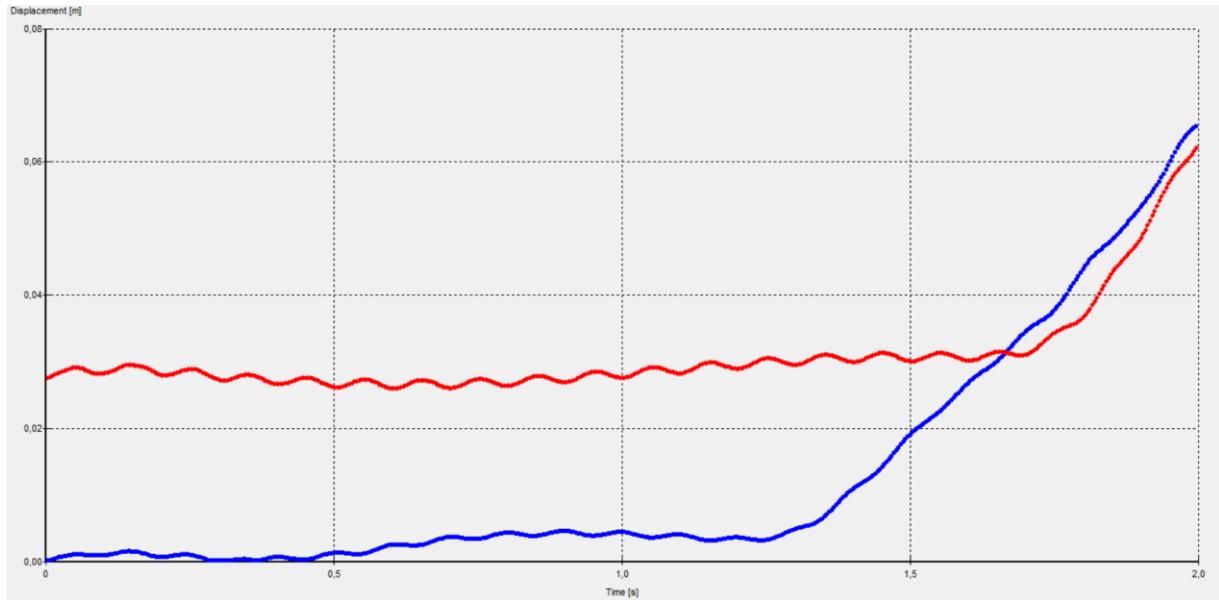


Figure 68 : Courbe de déplacement vertical dans la surface libre

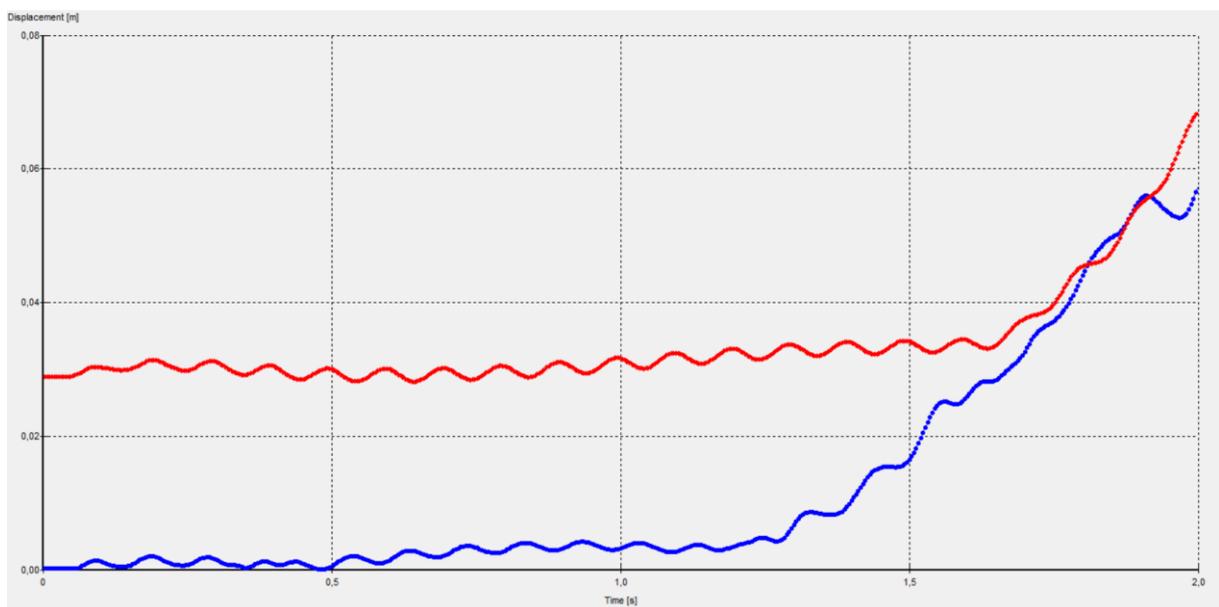


Figure 69 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile

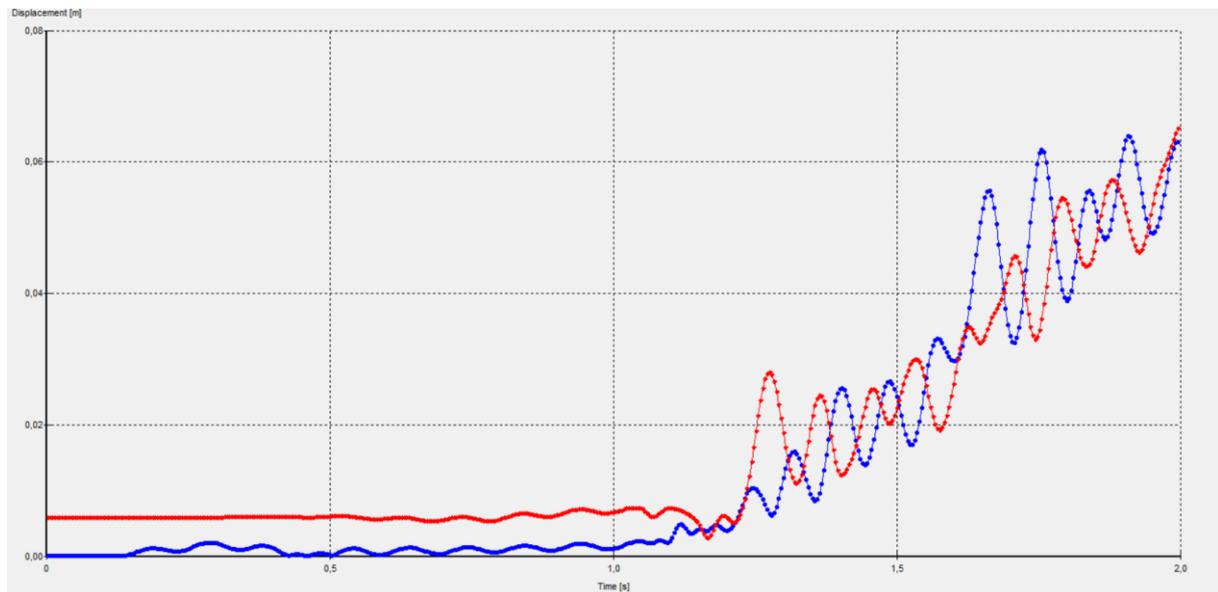


Figure 70 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable

### Observation des résultats de déplacement vertical

L'augmentation de la hauteur de la couche entraîne une légère diminution des résultats de champ de déplacement à la surface du radier, par contre au milieu de la première couche et en profondeur du profil de sol on a aperçu une augmentation de déplacement vertical, ce constat est illustré dans les figures figure 68, 69 et 70.

#### 1ère courbe : Surface libre

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical atteint 6,5 cm (courbe bleu).
- Avec augmentation de la profondeur, le pic diminue à 6,2 cm (courbe rouge).

#### 2ème courbe : Surface de la couche d'argile

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical atteint 5,6 cm (courbe bleu).
- Avec augmentation de la profondeur, le pic augmente à 6,8 cm (courbe rouge).

#### 3ème courbe : Surface de la couche de sable

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical maximal atteint 6,4 cm (courbe bleu).
- Avec augmentation de la profondeur, le pic augmente à 6,6 cm (courbe rouge).

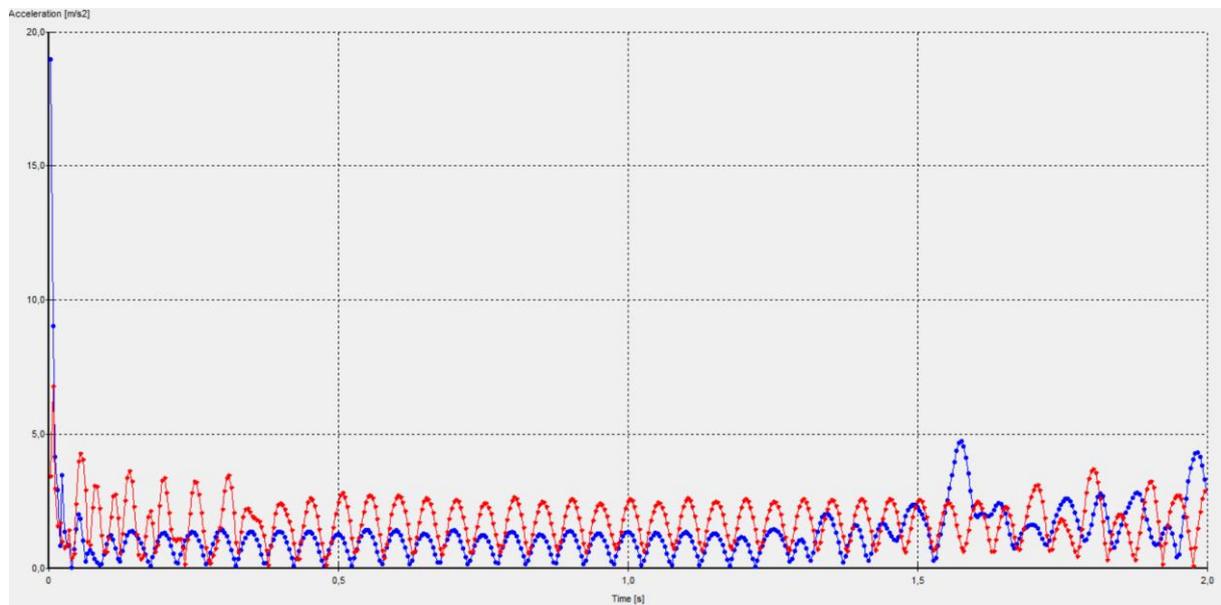
*Tableau 10 : Tableau de déplacement vertical dans cas de référence par rapport à l'augmentation de la couche*

Couche du sol	Cas du référence déplacement (cm)	Augmentation de la hauteur de la couche déplacement (cm)
Surface de radier	6,5	6,2
Couche d'argile	5,6	6,8
Couche de sable	6,4	6,6

**b-courbe d'accélération**

Cas de référence : courbe bleu

Augmentation de la profondeur : courbe rouge



*Figure 71 : courbe de l'accélération dans la surface libre*

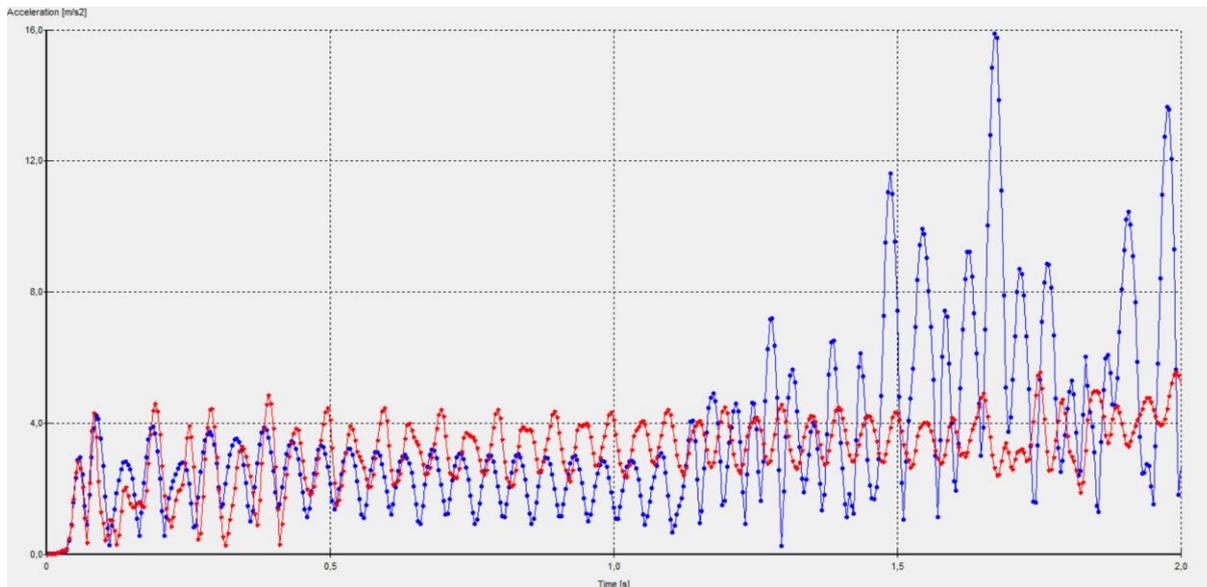


Figure 72 : courbe de l'accélération dans la couche d'argile

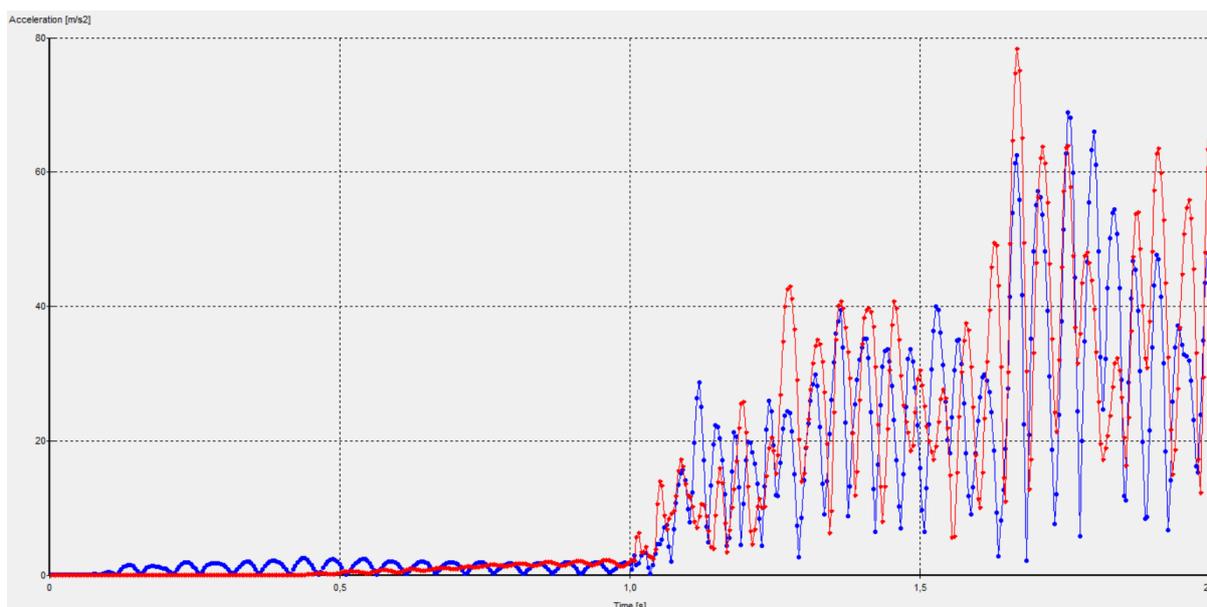


Figure 73 : courbe de l'accélération dans la couche de sable

### Observation des résultats d'accélération

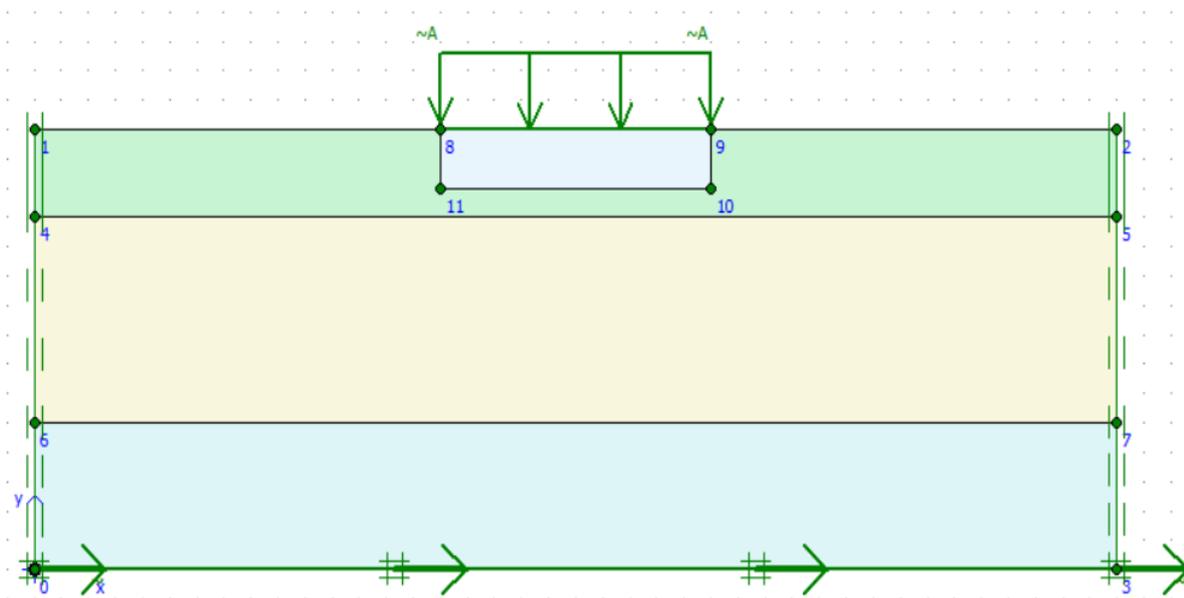
Les figures présentées illustrent une augmentation systématique du pic de l'accélération vertical pour toutes les surfaces analysées dans le massif du sol étudié lors d'augmentation de la hauteur de la couche comme représenté sur les figures 71,72 et 73. Par contre, une diminution remarquable des ondes qui se propagent le long d'intervalle de temps au niveau de milieu de profil du sol observer dans la courbe 71 et augmente en profondeur dans les courbes 72 et 73.

*Tableau 11 : comparaison des résultats d'accélération*

Couche du sol	Cas du référence accélération (m/s <sup>2</sup> )	Augmentation de la hauteur de la couche accélération (m/s <sup>2</sup> )
Surface de radier	4,746	4,274
Couche d'argile	16,88	5,552
Couche de sable	68,89	78,420

**V.10. Résultat d'augmentation de nombre de couche**

Le nombre de couches de sol joue un rôle crucial dans l'analyse de la propagation des ondes dans le profil du sol. Dans cette partie, nous allons montrer comment l'accroissement du nombre de couches affecte les résultats des mouvements et des accélérations. En ajustant le nombre de couches, il sera possible d'observer la variation des déplacements et des accélérations et de déterminer si ces paramètres augmentent ou diminuent en fonction des changements apportés à la stratification du sol.



*Figure 74 : modèle d'augmentation de nombre de couches*

Dans la figure 74 on a fait une augmentation de nombre de couche de profil du sol alors il sera constitué de trois couche du sol, la première c'est une couche l'argile à une profondeur de 3 m, et la deuxième c'est une couche Sable à une profondeur de 7m et la troisième couche c'est la marne de 5 m

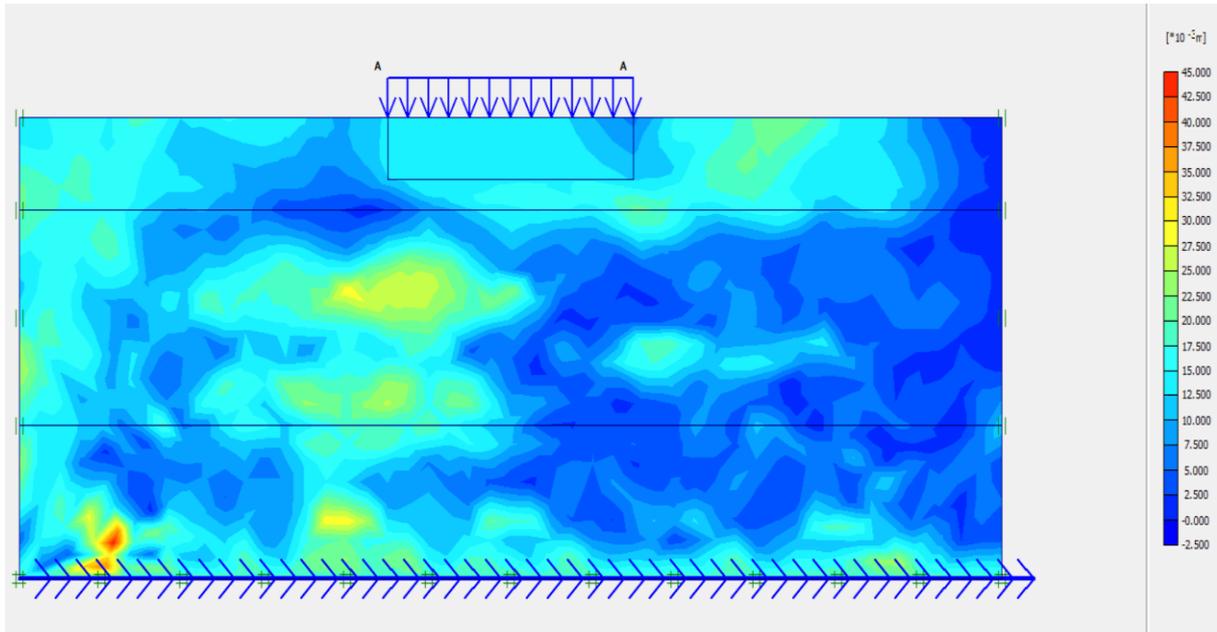


Figure 75 : le déplacement total

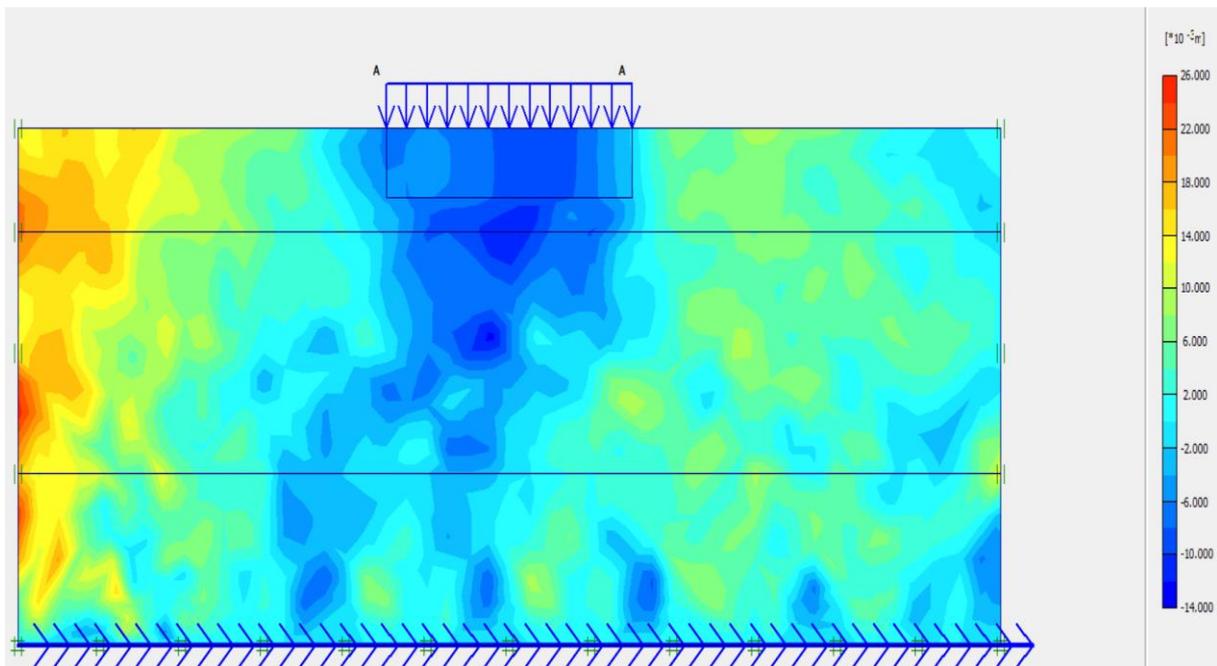


Figure 76 : le déplacement vertical (shading)

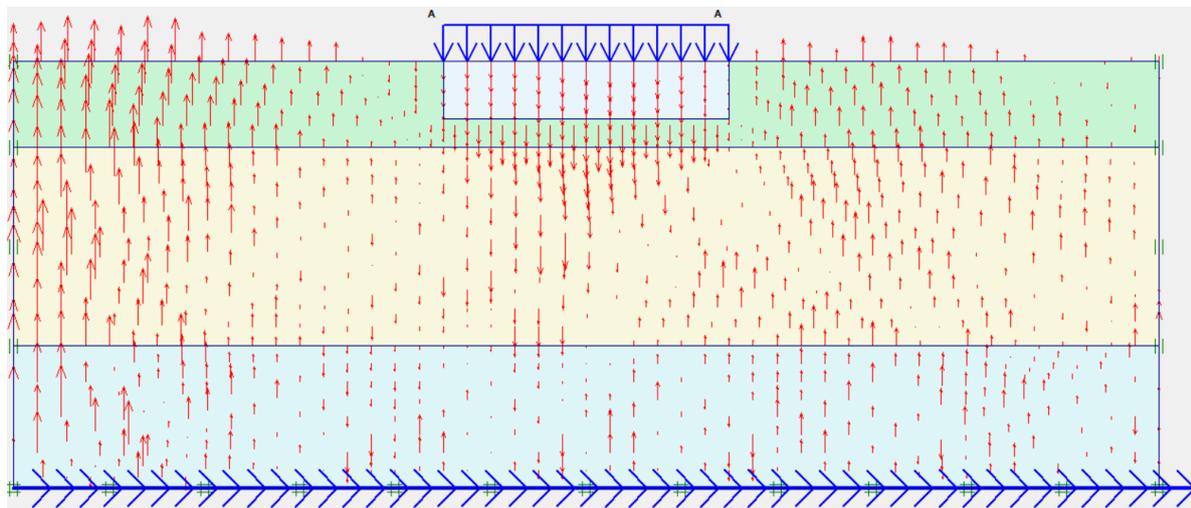


Figure 77 : le déplacement vertical (arrows)

### a-Résultat et constat des déplacements

Une orientation de déplacement vertical d'une façon dense vers le haut dans le côté gauche de profil du sol, sous le radier et le milieu de profil du sol, les déplacements verticaux s'orientent vers le bas et dans le côté droit le long de profil du sol, le déplacement vertical s'oriente vers le haut et sa valeur est de 2,51cm, ce constat figurant sur les figures 76 et 77.

On remarque aussi que la valeur de déplacement total est de 4,471cm (Figure 75).

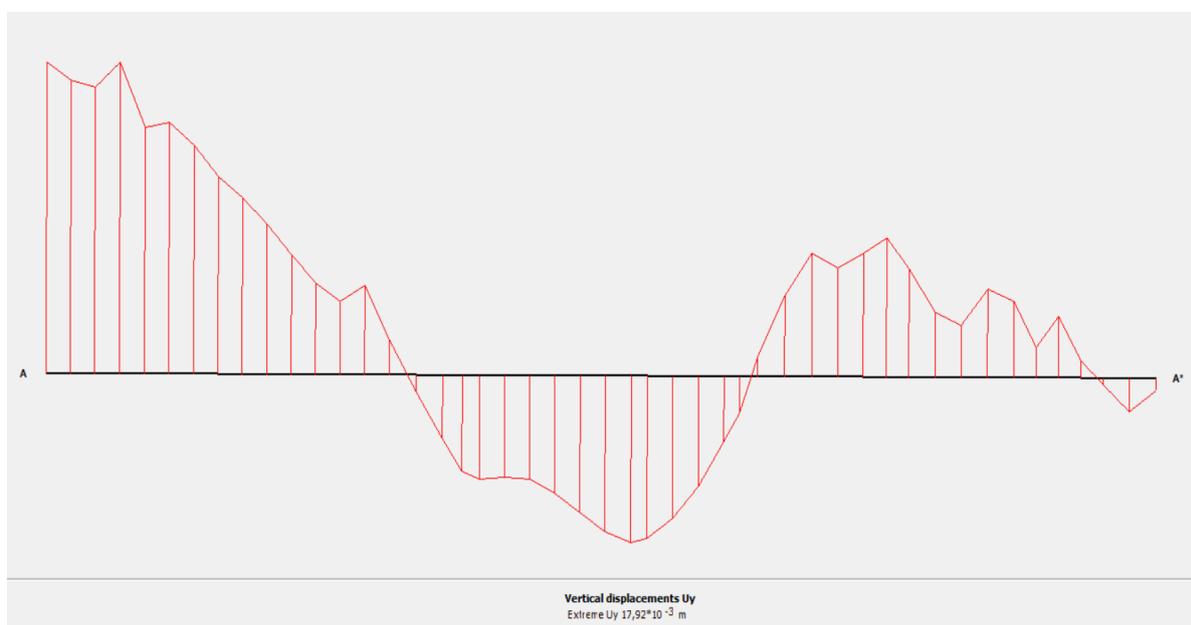
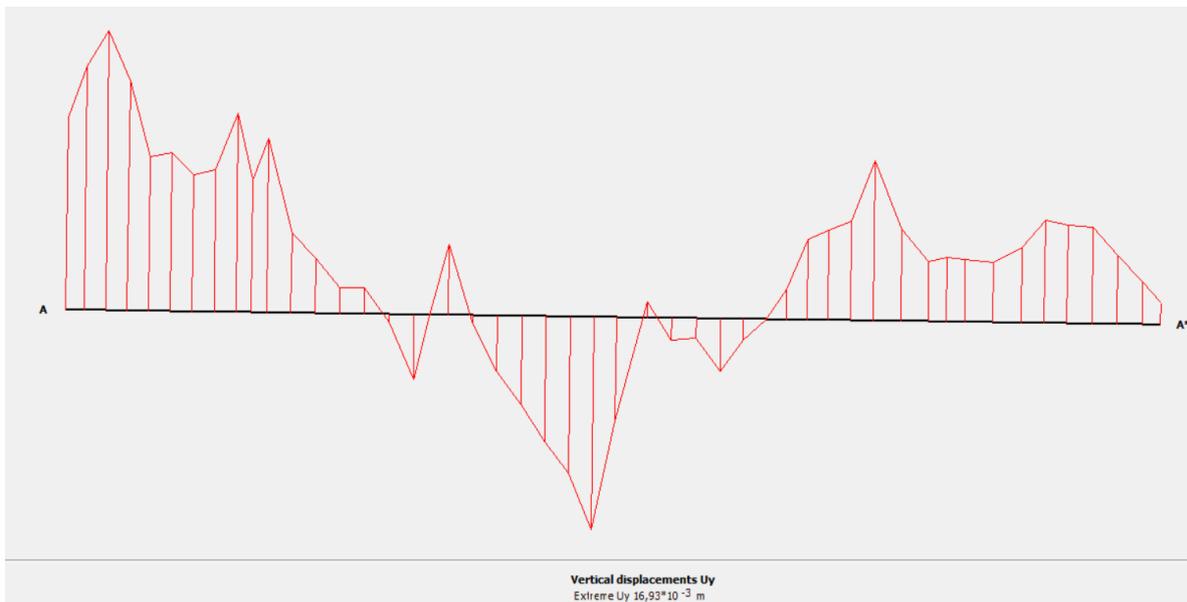
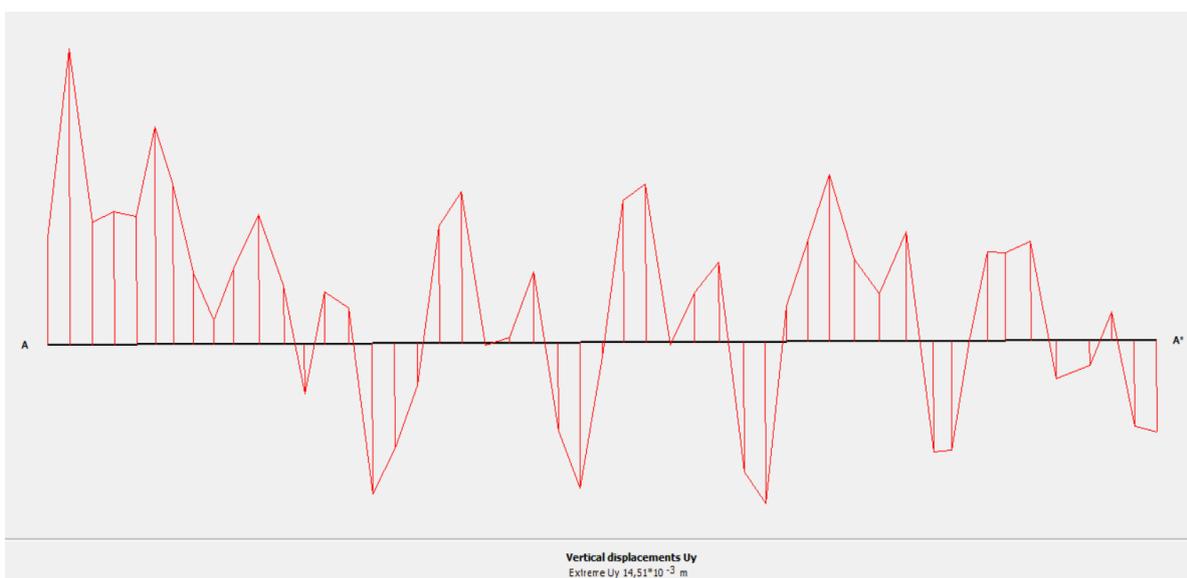


Figure 78 : le déplacement vertical dans la couche d'argile



*Figure 79 : le déplacement vertical dans la couche de sable*



*Figure 80 : le déplacement vertical dans la couche de marne*

**b-Résultat et constat des déplacements verticaux dans les différentes couches**

Dans les figures 78,79 et 80 on observe que la valeur de déplacement vertical présente une diminution dans toutes les couches de sol comme il est représenté dans le tableau suivant (8) :

*Tableau 12 : Comparaison des résultats de déplacement vertical pour les trois couches*

Les couches de sol	Le déplacement vertical
L'argile	1,792 cm
Le sable	1,693 cm
La marne	1,451 cm

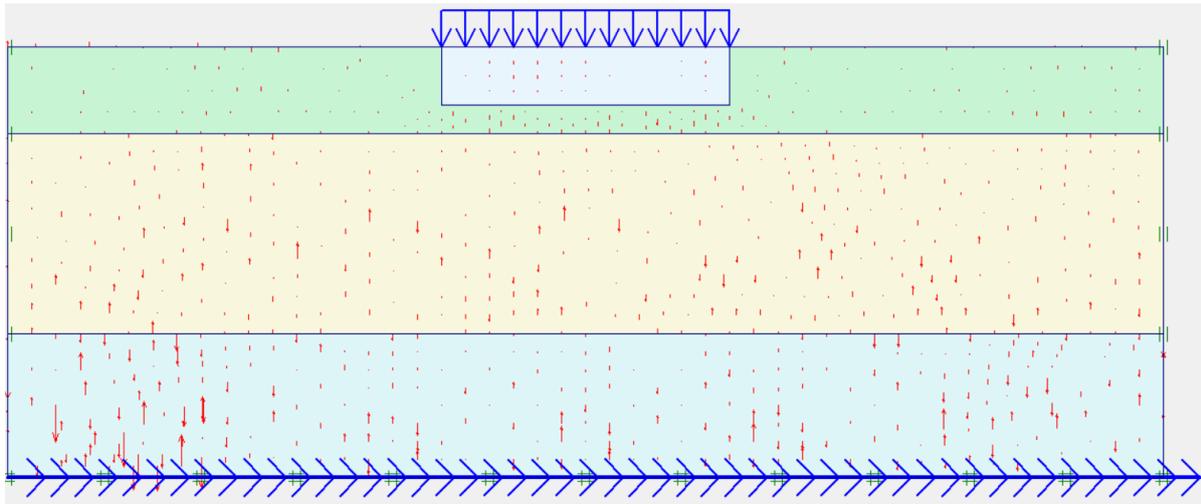


Figure 81 : l'accélération vertical

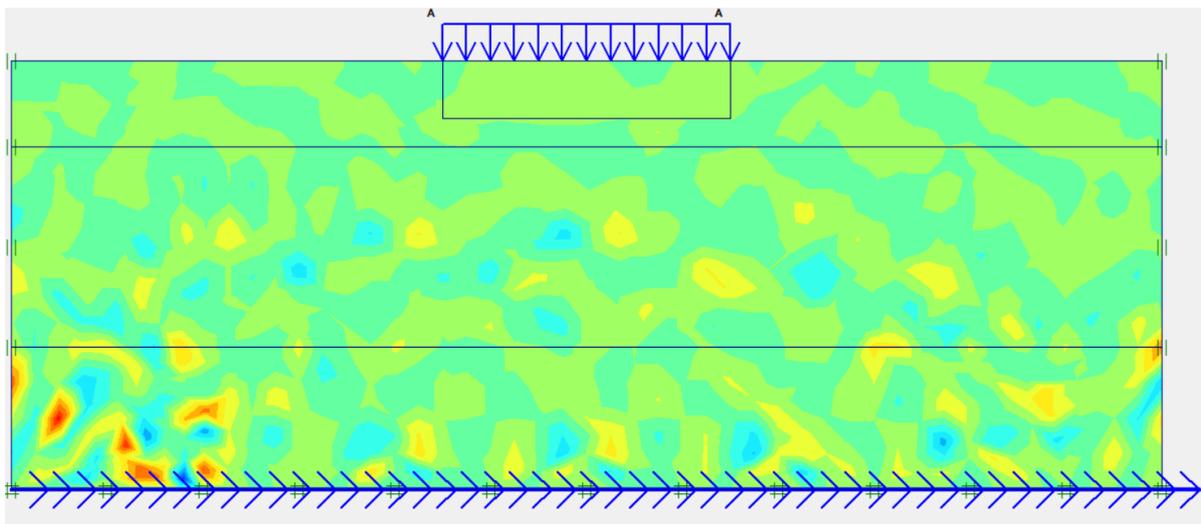


Figure 82: accélération vertical (shading)

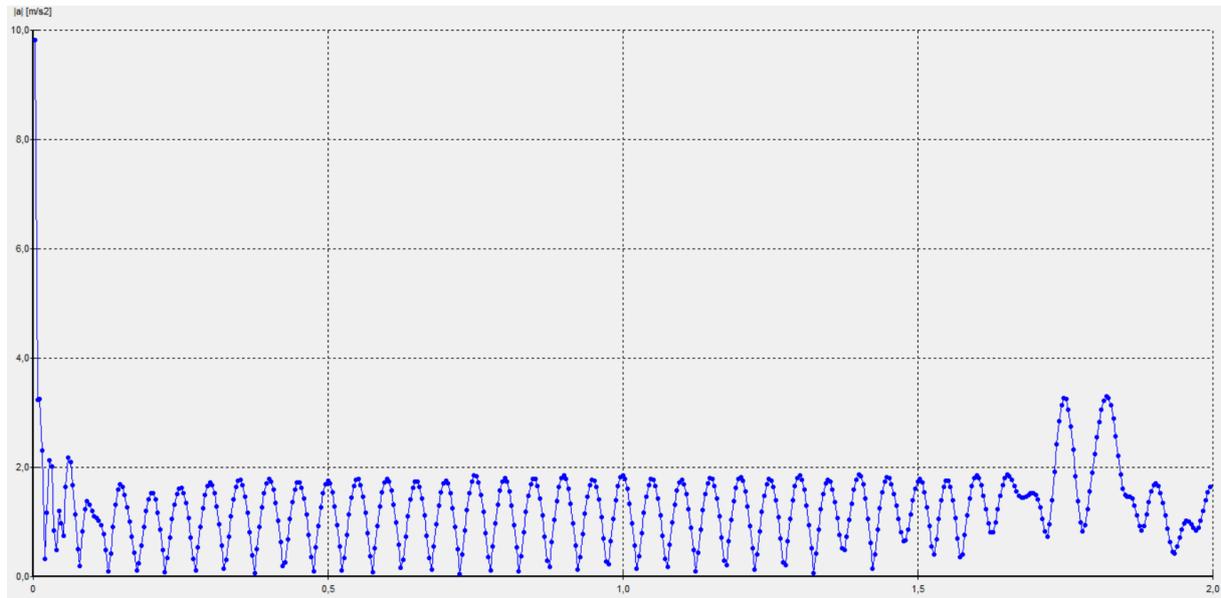


Figure 83: accélération dans la surface de radier

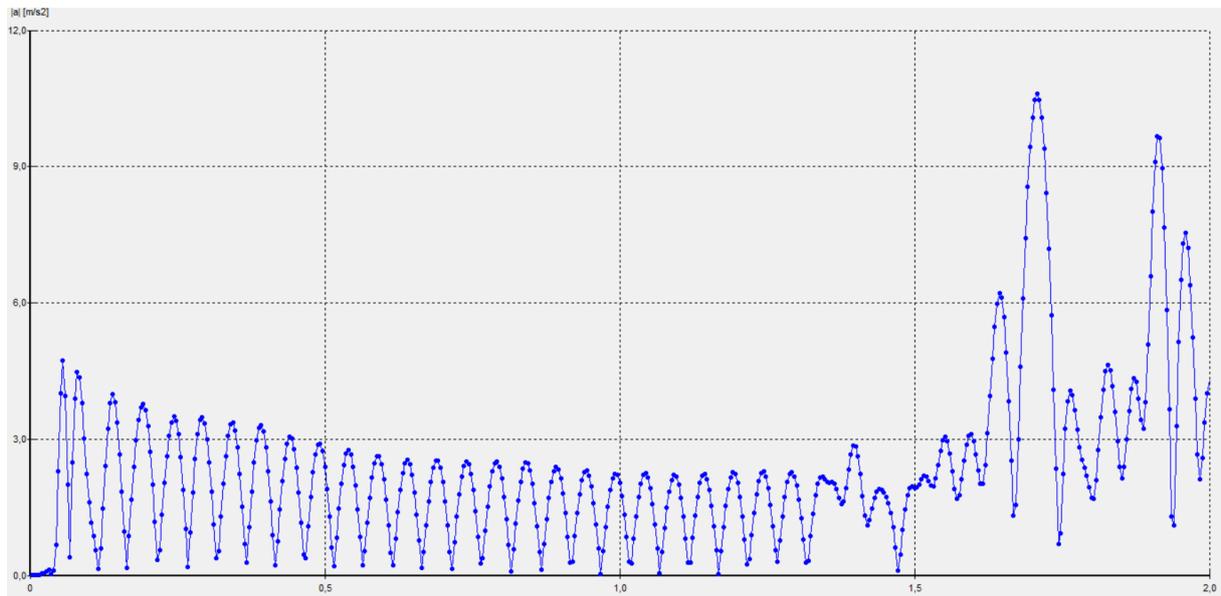


Figure 84: accélération dans la surface d'argile

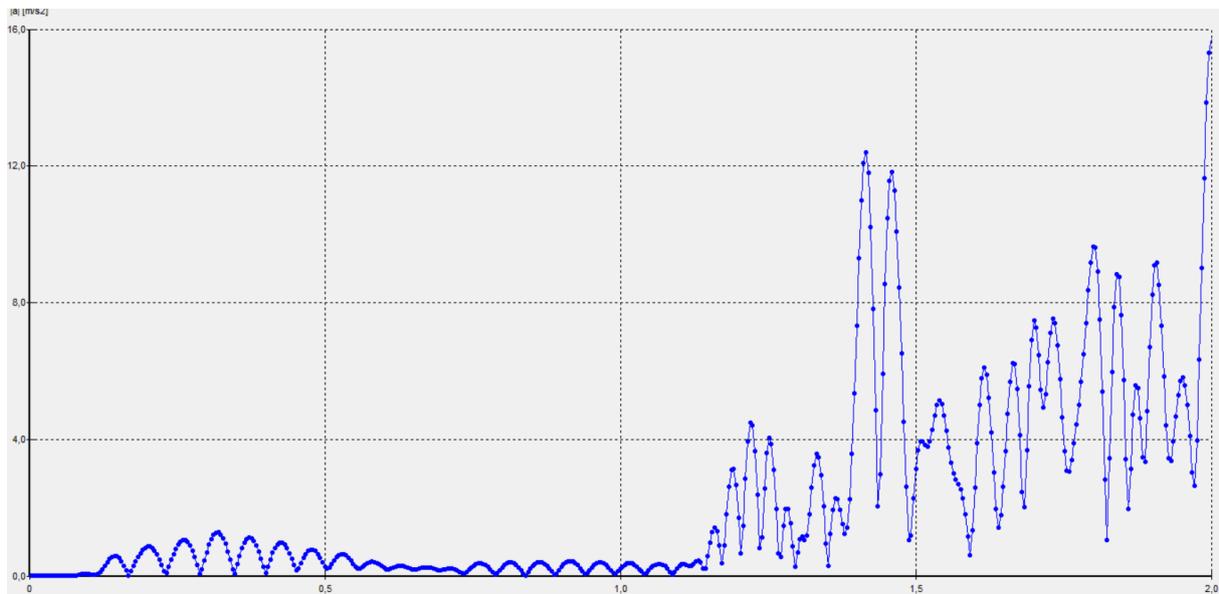


Figure 85: accélération dans la couche de sable

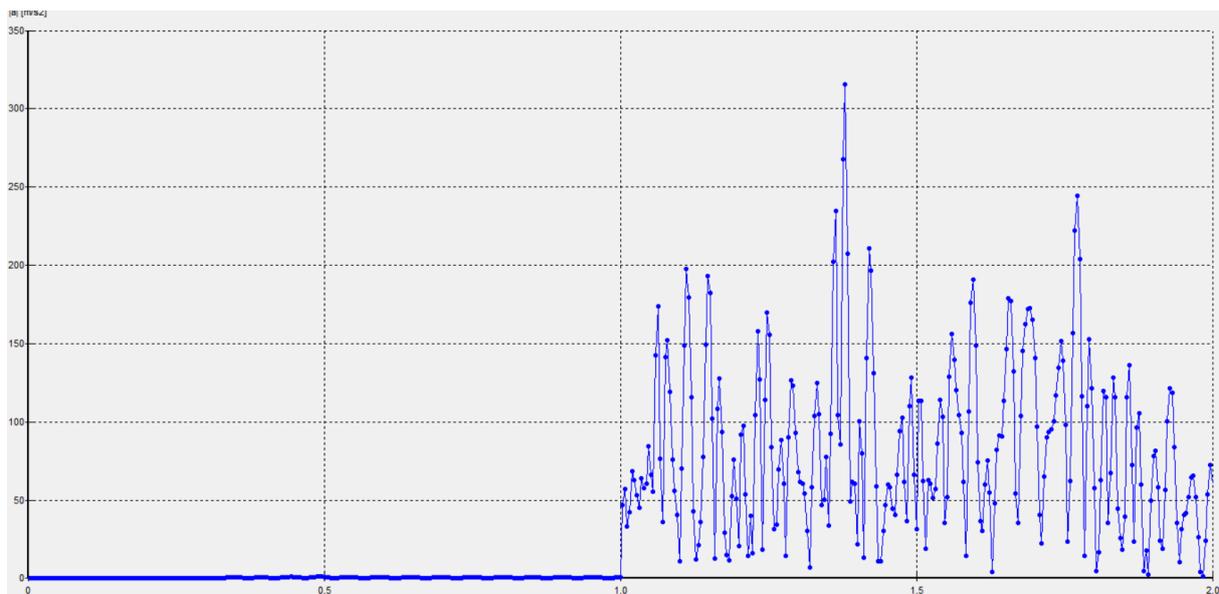


Figure 86: accélération dans la couche de marne

### c- Résultat et constat de l'accélération

Dans la première courbe concernant la surface de radier on peut voir que la propagation des ondes d'accélération sont constant, a un certain temps ces dernier vont augmenter légèrement Concernant la surface d'argile les valeurs de pique d'accélération se diminue d'une façon légère ensuite il y'aura un accroissement, par contre dans la surface de sable a un temps initial on voit une petite propagation des ondes qui vont augmenter avec le temps , dans la couche de marne l'accélération est nul et aucune propagation des onde au moment initial par contre a un temps final il y'aura une forte propagation des ondes avec une valeur de pique d'accélération trop élevé par rapport aux autre couche.

V.10.1. Comparaison des résultats cas de références avec l'augmentation de nombre de couche

a-courbe de déplacement

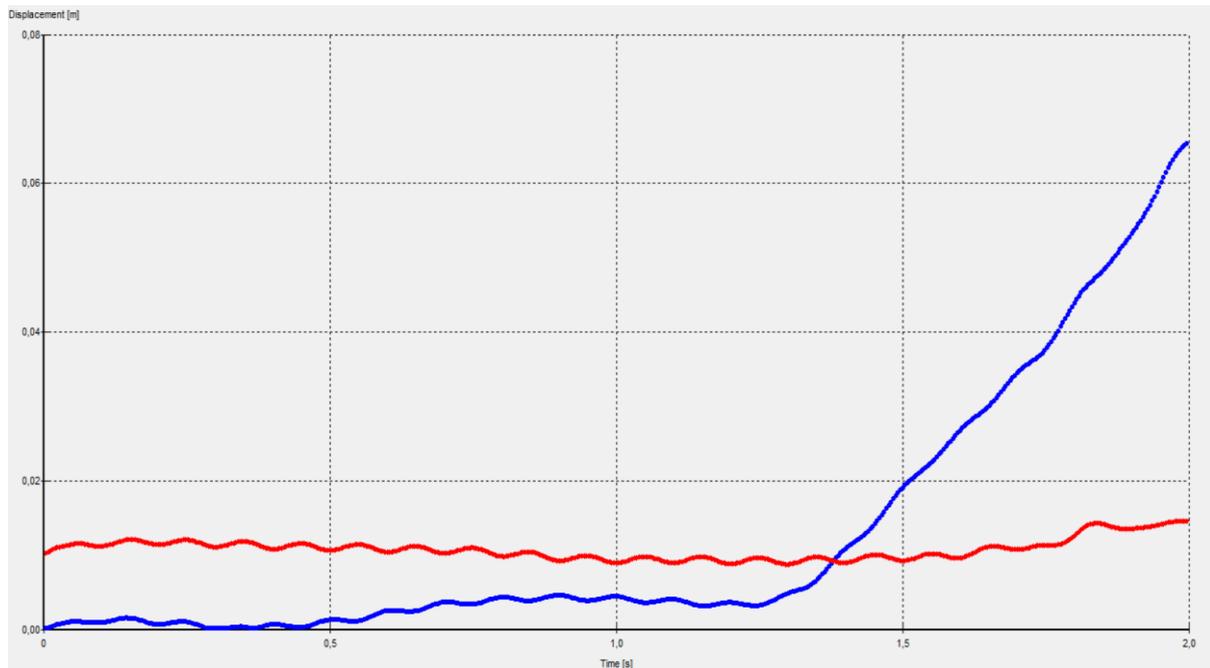


Figure 87 : Courbe de déplacement vertical dans la surface de radier

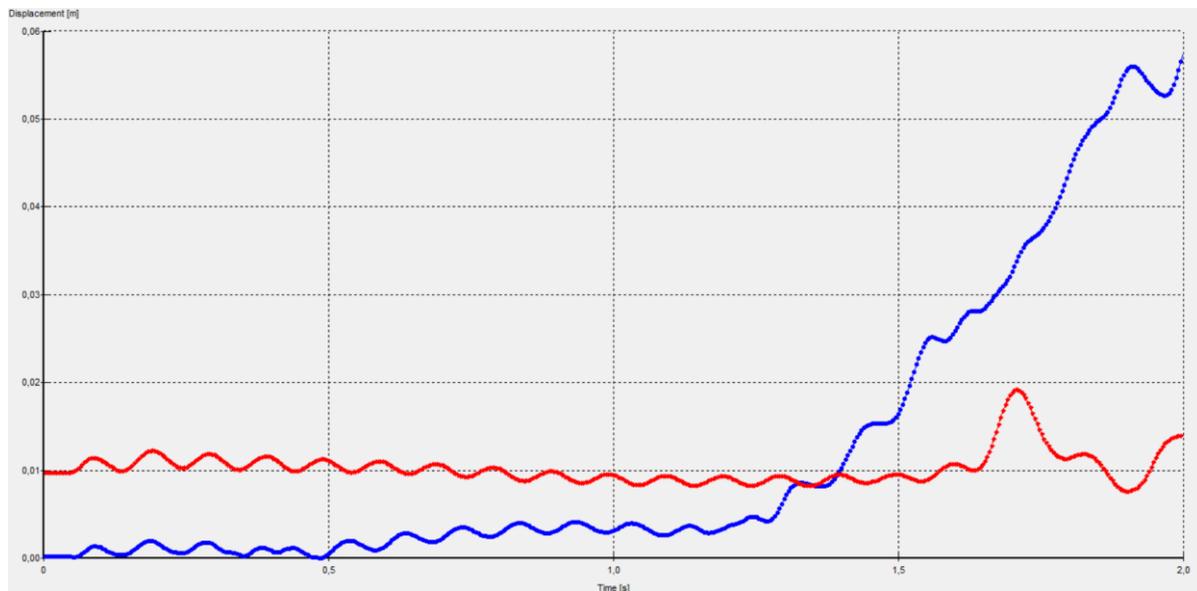


Figure 88 : Courbe de déplacement vertical dans la couche d'argile

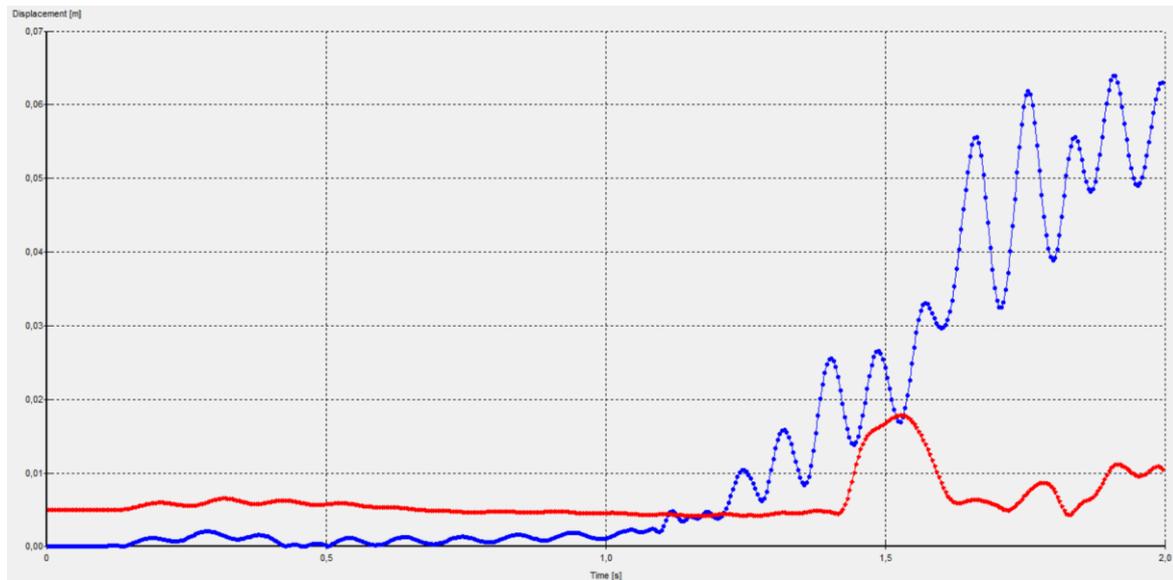


Figure 89 : Courbe de déplacement vertical dans la couche de sable

### Observation des résultats des déplacements verticaux

Les figures 87, 88 et 89 montrent une réduction systématique du pic de déplacement vertical pour toutes les surfaces analysées et le long du profil du sol.

#### ❖ Première courbe : Surface de radier

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical atteint 6,5 cm (courbe bleu).
- Avec l'augmentation de nombre de la couche : le pic diminue à 1,4 cm (courbe rouge).

#### ❖ Deuxième courbe : milieu de profil de sol

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical atteint 5,6 cm (courbe bleu).
- Avec l'augmentation de nombre de la couche : le pic diminue à 1,9 cm (courbe rouge).

#### ❖ Troisième courbe : en profondeur de profil du sol

- Cas de référence : Le pic de déplacement vertical maximal atteint 6,4 cm (courbe bleu) alors que dans l'augmentation de nombre de couche vas diminuer à 1,8 cm (c. rouge).

Tableau 13 : comparaison de déplacement dans le cas de référence par rapport à l'augmentation de nombre de couche

Couche du sol	Cas de référence déplacement (cm)	Augmentation de nombre de couche - déplacement (cm)
Surface de radier	6,5	1,4
Milieu de profil de sol	5,6	1,9
profondeur de profil du sol	6,4	1,8

b-courbe d'accélération

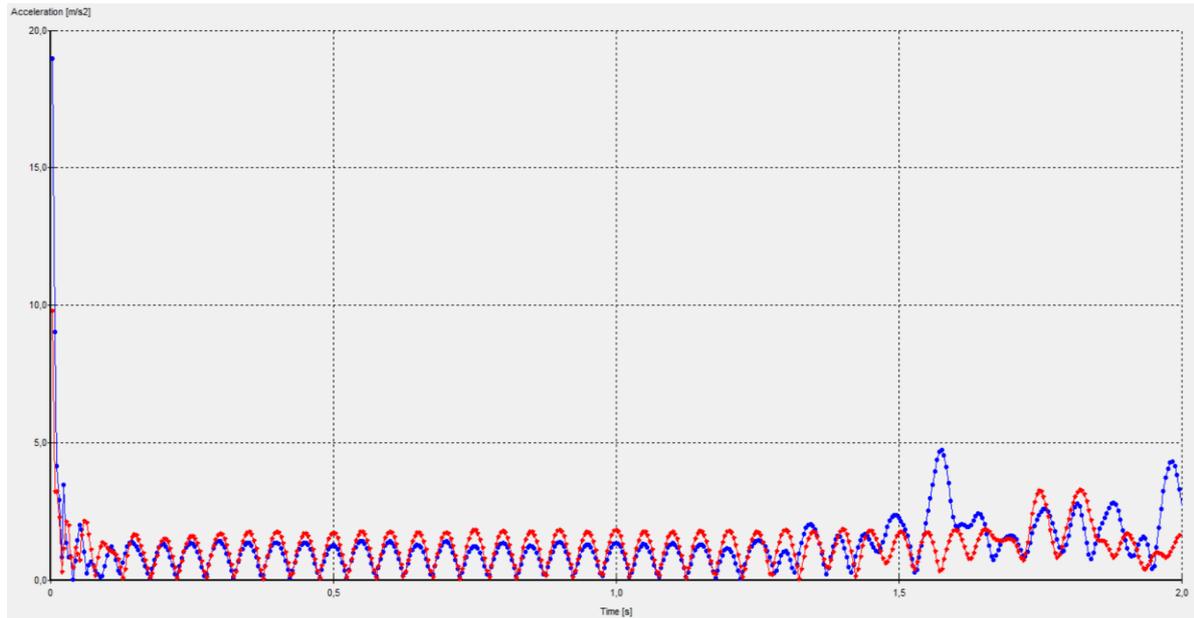


Figure 90 : Courbe de l'accélération dans la surface de radier

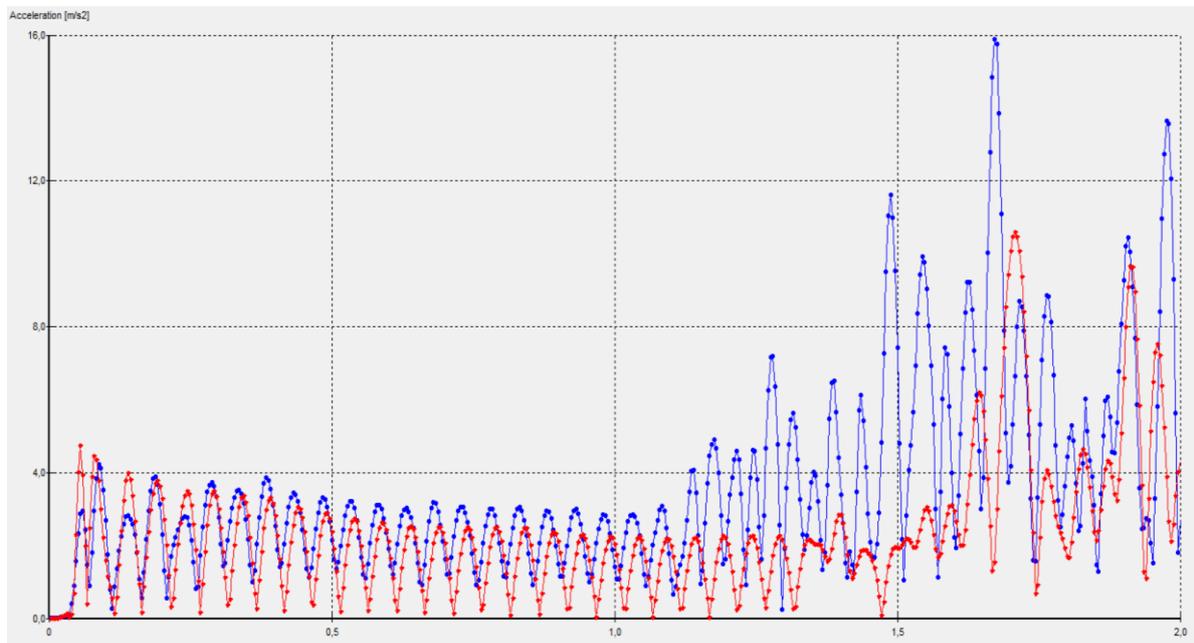


Figure 91 : Courbe de l'accélération au milieu

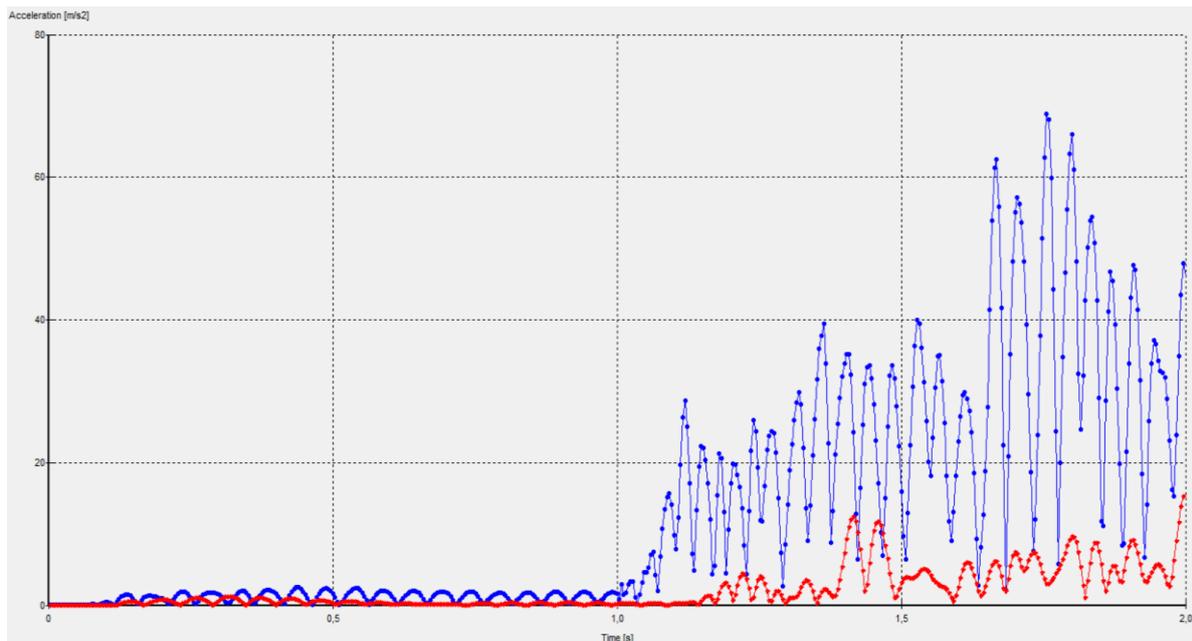


Figure 92 : Courbe de l'accélération dans la profondeur

### Résultat et démarche

En étudiant les courbes de l'accélération, Il est remarquable que les valeurs maximales de l'accélération dans le cas de références qui est constitué de deux couches de sol soient plus amplifiées que celles obtenues dans le cas d'augmentation du nombre de couches (trois couche) figures 90, 91 et 92.

On remarque aussi que les valeurs de piques dans chaque courbe sont différentes, à chaque fois qu'on descend à une profondeur de plus en plus on observe que les valeurs de sommet de l'accélération augmentent comme ils sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau 14 : comparaison de l'accélération dans le cas de référence par apport a l'augmentation de nombre de couche

Les courbes d'accélération	Cas de deux couches Accélération (m/s <sup>2</sup> )	Cas de trois couches Accélération (m/s <sup>2</sup> )
Dans la surface de radier	4,746	3,293
Au milieu de profil de sol	16,88	10,60
Profondeur de profil de sol	68,89	15, 31

## V.11. Interprétation et discussion des résultats

### V.11.1. Influence de l'amortissement

#### a- Interprétation des déplacements :

Une réduction perçue sur les résultats de champ de déplacement à la surface de radier, au milieu de la première couche et en profondeur de profil du sol engendré par l'augmentation de l'amortissement qui peut diminuer l'amplitude des oscillations de profil du sol ce qui se traduit par des déplacements moins importants du sol en raison d'absorption d'énergie des vibrations sismiques ou des charges dynamiques. On outre, l'accroissement de l'amortissement entraîne une augmentation du temps de réponse, alors un sol plus amorti aura un temps de réponse plus long aux sollicitations vibratoires, ce qui signifie qu'il faudra plus de temps pour que les vibrations atteignent leur amplitude maximale et se dissipent.

#### b-Interprétation de l'accélération :

On a fait varier l'amortissement et on essaye de voir l'influence de ce dernier sur le comportement d'un massif de sol qui supporte une fondation superficielle présentée par un radier d'un poste électrique de la zone industrielle située à la commune oued el Berdi wilaya de Bouira, on compare les courbes qui représentent des accélérations à la surface libre et aux milieux des couches du profil du sol pour différentes valeurs d'amortissement relatif par la variation des coefficients de Rayleigh et on les compare à celle de cas de référence (standard) . Les valeurs des pics de l'accélération dans le cas standard sont plus amplifiées par rapport à celle obtenue du cas variable pour les deux coefficients de Rayleigh, on distingue aussi que les valeurs des pics obtenus diminuent d'une manière proportionnelle au milieu et en profondeur de profil du sol. Cela explique que l'accélération lors de la propagation des ondes sismiques a subi une légère atténuation celle-ci est due généralement au phénomène d'absorption d'énergie.

### V.11.2. L'influence de la nature du terrain sur la variation d'amortissement

L'amortissement se réfère à la capacité du terrain à absorber et à dissiper l'énergie des vibrations ou des charges appliquées :

- **Sols granulaires (sable, gravier) :** l'effet de l'amortissement sur les vibrations dans les sols granulaires est moins important que dans les sols cohésifs. Cependant, l'augmentation de l'amortissement peut toujours contribuer à réduire les vibrations, en particulier pour les vibrations de haute fréquence, les sols rocheux peuvent avoir une capacité d'amortissement encore plus faible.

- **Sols cohésifs (argile, limon) :** l'augmentation de l'amortissement dans les sols cohésifs a généralement un effet positif sur la réduction des vibrations, car ces sols ont tendance à dissiper l'énergie vibratoire plus efficacement que les sols granulaires.

Cela explique que l'accélération lors de la propagation des ondes sismiques a subi une légère atténuation celle-ci est due généralement au phénomène d'absorption d'énergie.

### **V.11.3. Influence d'augmentation de la profondeur (hauteur) de la couche de sol**

#### **a- Interprétation des déplacements et des accélérations :**

Une couche de sol plus épaisse exerce une charge plus importante sur le sol, ce qui provoque des déplacements plus importants. Une couche plus épaisse peut se comporter de manière plus élastique ce qui entraîne des déplacements élevés.

Plus la profondeur est grande plus la dissipation d'énergie est importante ce qui veut dire plus que le trajet parcouru par l'onde sismique est grand plus il dissipe beaucoup d'énergie ce qui augmente le déplacement de sol et l'accélération.

### **V.11.3. Augmentation de nombre de couche de sol**

#### **a- Interprétation des déplacements :**

**Répartition des contraintes :** Augmenter le nombre de couches dans un profil de sol peut aider à répartir les contraintes de manière plus uniforme à travers la profondeur du sol. Cela peut réduire les déplacements locaux dans certaines couches, mais cela dépendra de la nature et des propriétés de chaque couche.

**Dissipation de l'énergie :** Un nombre accru de couches peut améliorer la dissipation de l'énergie des ondes sismiques, ce qui peut réduire les déplacements totaux. Les différentes couches peuvent agir comme amortisseurs, réduisant l'amplitude des déplacements dus aux vibrations.

#### **b-Interprétation de l'accélération**

En cas d'augmentation de nombre de couches (trois couches) les valeurs maximales obtenus sont moins importantes que celle de cas de référence (deux couches), ce que signifie que on augmentant le nombre de couches les amplitudes de l'accélération sont plus faibles, puisque le nombre de couches influent d'une manière considérable sur la dissipation de l'énergie des ondes sismiques qui perdent les amplitudes élevées, surtout si en rapproche à la surface de massif du sol, ce que démontre, que le profil du sol a perdu une partie de quantité d'énergie pour les ondes les plus amplifiées tout en réduisant également l'accélération.

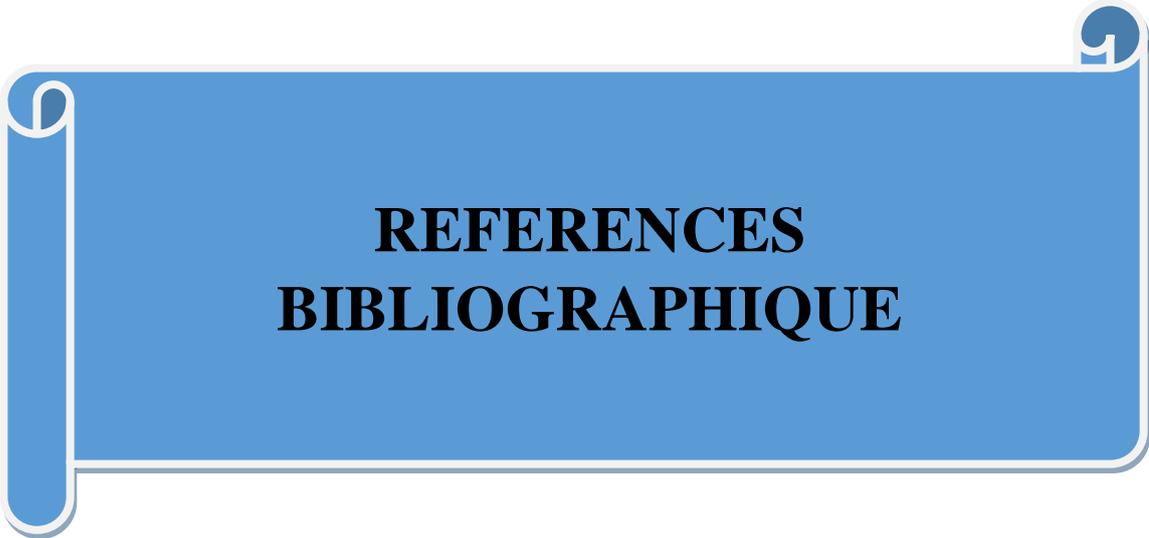


## **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

L'analyse approfondie du comportement dynamique des sols s'avère cruciale pour garantir la stabilité et la sécurité des structures construites sur ceux-ci, notamment face aux sollicitations sismiques et aux charges dynamiques. En effet, ces événements peuvent engendrer des vibrations, des ondes sismiques et d'autres forces dynamiques susceptibles d'affecter significativement l'intégrité du profil de sol. Recourir à la méthode des éléments finis, outil numérique puissant, permet d'explorer en détail le comportement du massif de sol soumis à de telles sollicitations. Le logiciel PLAXIS 2D s'impose comme un choix judicieux dans ce contexte, offrant une modélisation précise des propriétés géométriques et mécaniques du sol, ainsi que des conditions aux limites réalistes. L'étude présentée met en lumière l'importance de prendre en compte les caractéristiques des matériaux constituant le profil de sol lors de l'évaluation de sa réponse dynamique. En effet, les paramètres tels que la nature du sol, sa densité, sa cohésion et son angle de frottement interne influencent considérablement sa résistance aux vibrations et aux ondes sismiques. L'analyse menée s'est concentrée sur l'étude du comportement dynamique d'un profil de sol, différents cas de figure ont été explorés, en faisant varier des paramètres clés tels que le coefficient d'amortissement, la hauteur de la couche de sol et le nombre de couches composant le massif.

Les résultats obtenus révèlent des informations précieuses sur l'influence de ces paramètres sur les déplacements et l'accélération du sol. Il ressort clairement que l'accroissement de l'amortissement et l'augmentation de nombre de couches de sol contribuent à réduire significativement les déplacements et l'accélération du sol en cas de sollicitations dynamiques. Ce phénomène s'explique par l'absorption d'énergie favorisée par ces configurations, permettant ainsi d'améliorer la stabilité globale du profil de sol. Par contre, l'augmentation de la hauteur de la couche participe directement à augmenter les amplitudes de déplacements et des accélérations dus aux vibrations sismiques, ce qu'explique que la hauteur de la couche influe sur la dissipation de l'énergie des ondes sismiques le long du profil de sol qui à une quantité d'énergie excédentaire pour les ondes tout en augmentant également les amplitudes des déplacements et les accélérations. Comme perspectives, il est judicieux de faire suivre cette étude par une analyse des ondes sismiques, en utilisant des instruments afin d'identifier et connaître mieux les différentes variations des ondes sismiques dans un profil du sol.



**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUE**

### Références bibliographique

- [01] Scholz, C. H. (2019). "The Mechanics of Earthquakes and Faulting." Cambridge University Press.
- [02] Meghraoui, M., & Doumaz, F. (1996). "Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El Asnam, Algeria, earthquake." *Journal of Geophysical Research*.
- [03] McKenzie, D., & Parker, R. L. (1967). "The North Pacific: An example of tectonics on a sphere." *Nature*.
- [04] King, G., et al. (1983). "The evolution of vertical faults in the Earth." *Journal of Geophysical Research*.
- [05] Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1956). "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration." *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [06] Hough, S. E. (2003). "Richter's Scale: Measure of an Earthquake, Measure of a Man." Princeton University Press.
- [07] Wood, H. O., & Neumann, F. (1931). "Modified Mercalli Intensity Scale of 1931." *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [08] Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1942). "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration." *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [09] Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). "Modern Global Seismology." Academic Press.
- [10] Lee, W. H. K., et al. (2003). "International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology." Academic Press.
- [11] Richter, C. F. (1958). "Elementary Seismology." W.H. Freeman.
- [12] Bull, L. J., & Kirkby, M. J. (2002). *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Wiley.
- [13] Valentin, C., & Bresson, L. M. (1992). Morphology, genesis and classification of soil crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55(3-4), 225-245.
- [14] Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- [15] Skempton, A. W., & Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Géotechnique*, 44(3), 449-460.

- [16] Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313.
- [17] Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176.
- [18] Cruden, D.M. & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation*, 247, 36-75.
- [19] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- [20] Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley.
- [21] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley.
- [22] <https://www.strongtie.com/resources/cause-cracks-concrete-structures>
- [23] <https://theconstructor.org/geotechnical/causes-types-cracks-soil/15940/>
- [24] Shen, Y., Zhang, J., & Li, X. (2021). Measurement and analysis of vibration amplitude in civil structures. *Journal of Structural Engineering*, 147(3), 04021020.
- [25] Wang, L., & Sun, H. (2022). Period analysis of seismic waves in structural health monitoring. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(5), 1101-1115.
- [26] Zhang, P., & Chen, S. (2023). Frequency response characteristics in high-rise buildings. *Journal of Vibration and Control*, 29(2), 150-163.
- [27] Liu, J., & Zhou, Q. (2022). Phase analysis of vibration signals in bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(8), e2965.
- [28] Xu, Y., & Li, D. (2021). Free vibration analysis of coupled beam systems. *Applied Mathematical Modelling*, 99, 538-554.
- [29] Zhang, L., & Wu, T. (2023). Forced vibration analysis of multi-degree-of-freedom systems under harmonic excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 188, 109965.
- [30] Chen, R., & Li, W. (2022). Vibration systems and their applications in civil engineering. *Journal of Sound and Vibration*, 529, 116996.
- [31] Yang, B., & Li, J. (2022). Mass, stiffness, and damping characteristics in building structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(6), 04022041.
- [32] Zhao, F., & Wang, S. (2023). Resonance phenomena in structural dynamics. *Journal of Structural Engineering*, 149(1), 04022267
- [33] Smith, G., & Brown, T. (2022). Material fatigue under vibrational loads. *International Journal of Fatigue*, 158, 106765.

- [34] Johnson, M., & Lee, Y. (2021). Structural damage assessment due to vibrations. *Structural Health Monitoring*, 20(4), 1901-1915.
- [35] Wang, Q., & Zhang, X. (2023). Vibration source identification using machine learning techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 189, 110024.
- [36] ASTM International. (2021). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-21)*.
- [37] AASHTO. (2022). *Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing (AASHTO M 145-22)*.
- [38] IUSS Working Group WRB. (2022). *World reference base for soil resources 2022: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. FAO.
- [39] Chan, T., & Zhang, Y. (2021). Laboratory testing methods for dynamic soil properties. *Geotechnical Testing Journal*, 44(4), 752-767.
- [40] Santos, J., & Silva, M. (2022). In situ testing techniques for dynamic soil characterization. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107183.
- [41] Li, X., & Zeng, L. (2023). Advanced methods for determining dynamic soil properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(5), 04023019.
- [42] Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves M. B. Darendeli 2001 (Thèse de doctorat University of Texas at Austin)
- [43] Documentation de base pour la vérification des ouvrages d'accumulation aux séismes G. Darbre, J. Hammer, et al. 2003( Rapports de l'OFEG, série Eaux Version: 1.2)
- [44] Manual on Soil Mechanics and Foundation Engineering International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2015 CRC Press
- [45] le livre intitulé Geotechnical Earthquake Engineering Steven L. Kramer
- [46] Dynamic Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology J. Krahn 2004
- [47] le livre intitulé "DynamicSoil-Structure Interaction" (Interaction dynamique sol structure) de H
- [48] livre Physics for Scientists and Engineers, Volume 1 Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr., Charles A. Vuille 2014 Cengage Learning
- [49] le livre intitulé "Principles of Geotechnical Engineering" (Principes de l'ingénierie géotechnique) de Braja M
- [50] livre Physics for Scientists and Engineers, Volume 1 Raymond A. Serway, John W.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Jewett, Jr., Charles A. Vuille 2014 Cengage Learning