

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie
Civil
Option : Géotechnique

Thème

*Etude de l'évolution de module de
cisaillement en fonction de la déformation.*

Présenté par :

LAZALI Hanifa

Devant le jury composé de :

Mr MERAKEB.S	Maitre assistant (B) à l'UMMTO	Président.
Mme MOBAREK.H	Maitre assistante (A) à l'UMMTO	Examinatrice.
Mme BELHASSANI.O	Maitre assistante (A) à l'UMMTO	Promotrice.

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu
DIEU Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour
achever ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma
promotrice M^{me} Belhassani Ouarda pour ses conseils judicieux, sa patience, la
disponibilité dont elle a toujours fait preuve à mon égard et pour la qualité de
son encadrement exceptionnel.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres du jury pour l'intérêt
qu'ils ont porté à mon travail et qui me feront l'honneur de l'examiner.*

*Je tiens également à remercier, ma famille, mes proches, mes amis et tous
ceux qui de près ou de loin, m'ont apporté leurs soutiens à l'élaboration de ce
travail.*

DEDICACES

C'est avec l'expression de ma reconnaissance que je dédie ce travail

accompagné d'un profond amour ;

A ma promotrice M^{me} Belhassani Ouerda;

A mes chers parents pour leur soutien, leur patience et leur encouragement

durant mon parcours ;

A mes sœurs et frères ainsi à toute ma famille ;

A tous mes amis ;

Et à toute la promotion géotechnique 2019/2020.

Lazali Biba

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA REDUCTION DES MODULES DE DEFORMATION

I- 1. Introduction	2
I-2. Différents types de module de déformation	2
I-3. Les paramètres qui influencent le module de cisaillement G	3
I-3-1. Types de sol.....	4
I-3-1-1. Le sable et le gravier	4
I-3-1-2. Les Argiles	6
I-4. Influence des différents paramètres de sol sur $f(G)$	7
I-4-1. Densité (Indice des vides)	7
I-4-2. Indice de plasticité.....	8
I-4-3. La contrainte effective moyenne	9
I-4-4. La contrainte de confinement.	10
I-5. L'amortissement dans le sol D	10
I-5-1. Les paramètres qui ont influence sur l'amortissement.....	11
I-5-2. L'effet de la contrainte de confinement σ_0 sur l'amortissement (D).....	11
I-5-3. Relation entre l'indice des vides et l'amortissement D	13
I-5-4. L'influence de l'indice de plasticité sur l'amortissement	13
I-6. Conclusion.....	14

CHAPITRE II : DETERMINATION DES MODULES DE DEFORMATION

II-1. Introduction	15
II-2. Détermination des modules de déformation.....	15
II-2-1. Essais de laboratoire	16
II.2.1.1. Jauges locales	17
II.2.1.2. Bender éléments.....	17
II.2.1.3. la colonne résonnante	18
II.2.1.4. L'essai triaxial	19

II.2.2. Les essais in situ	19
II.2.2.1. Essai Cross-Hole.....	20
II.2.2.2. Essai Down-Hole	20
II.2.2.3. Cône et dilatomètre plat sismiques	21
II.2.2.4 Analyse spectrale des ondes de surface	21
II.2.2.5. L'essai de pressiomètre Menard	21
II.2.2.6. L'essai triaxial in situ	22
II.3. Comparaison entre les essais in situ et les essais de laboratoire	22
II.4. Présentation d'un exemple de détermination de G à partir de différents essais	23
II.5. CONCLUSION	25

CHAPITRE III : EVOLUTION DES MODULES DE DEFORMATION A PARTIR DES ESSAIS

III-1. Introduction	26
III-2. Détermination des modules de cisaillement à partir de la colonne résonnante	26
III-3. Détermination des modules de cisaillement à partir de l'essai pressiométrique.....	28
III-4. Comparaison des résultats expérimentaux avec la courbe théorique de Darendeli	29
III-5. Projection des modules déterminés à partir des essais sur les courbes de dégradation de G de référence	31
III-5-1. Sur la courbe de VUCITIC	31
III-5-2. Sur la courbe de SEED et IDRISSE.....	32
III- 6. Conclusion.....	33

CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE AVEC MOHR-COULOMB ET HSS

IV-1. Introduction.....	34
IV-2. Présentation du code de calcul en éléments finis « PLAXIS ».....	34
IV-3. Modèles de comportement.....	34
IV-3.1 .Le modèle de Mohr Coulomb.....	35
IV-3.2. Le modèle Hardening-Soil –Small	35
IV-4. Détermination de la courbe de dégradation de module de cisaillement avec le modèle HSS.....	36
IV-4-1. Interprétation des résultats.....	38
IV-5. Modélisation numérique d'une fondation superficielle	38

IV-5-1. Présentation du cas d'étude	38
IV-5-2. Présentation des résultats numériques obtenus par PLAXIS pour les deux modèles de comportement.....	40
IV-5.2-1. Modélisation avec modèle Mohr coulomb (sans la présence de nappe d'eau)	40
IV-5.2-2. Modélisation avec le modèle HSS (sans la présence de nappe d'eau)	41
IV-5.2-3. Modélisation avec les modèles Mohr coulomb et HSS (en présence d'une nappe d'eau)	43
IV-6. Conclusion	44

CONCLUSION GENERALE

Liste des tableaux

CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE AVEC MOHR-COULOMB ET HSS

Tableau IV.1 : Les valeurs des différents paramètres des argiles choisies utilisés dans le modèle HS-Small.	36
Tableau IV.2 : Les valeurs des paramètres des couches de sol sous la fondation utilisés.	39

Liste des figures

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA REDUCTION DES MODULES DE DEFORMATION

Figure I. 1 Différents types de module de déformation.	3
Figure I. 2 Rigidité du sol sous différentes phases de déformations et leur détermination (Atkinson et Salfors, 1991 ; Mair, 1993).	3
Figure I. 3 Variation du module de cisaillement en fonction de la déformation en cisaillement pour les sables (D'après Seed et Idriss 1970).....	4
Figure I. 4 Courbes de dégradation du module pour les sables (Seed et Idriss, 1970) et pour les graviers (Seed et al, 1986).....	5
Figure I. 5 La dégradation de module de cisaillement des sables de (Hamaoka, santa Monica et Tayoura) en fonction de ϵ	5
Figure I. 6 La dégradation de module de cisaillement des argiles de Detroit et de Led en fonction de ϵ	6
Figure I. 7 courbes de dégradation de module de cisaillement en fonction de l'indice des vides présentés par (Sun et al (1988) pour l'argile de Mexico.	8
Figure I. 8 Effet de l'indice de plasticité sur le module G/G_{max} (Vucetic et Dobry, 1991) et (Sun et al, mexico City).	9
Figure I. 9 Effet de l'indice de plasticité sur le module G/G_{max} (Vucetic et Dobry, 1991) et (Sun et al, mexico City).	10
Figure I. 10 Variation des paramètres cycliques G et D avec la distorsion γ	11
Figure I. 11 Influence de la contrainte de confinement sur l'évolution de D (Iwasaki, 1978) 12	12
Figure I. 12 Résultat expérimental de la variation du coefficient d'amortissement D en fonction de la distorsion γ pour un sable de Toyoura (Kokusho 1980).	12
Figure I. 13 Influence de l'indice de plasticité sur le coefficient d'amortissement.	13

CHAPITRE II : DETERMINATION DES MODULES DE DEFORMATION

Figure II.1 : Courbe de réduction du module de cisaillement avec la déformation pour les différentes plages de déformations propres aux ouvrages et aux essais de laboratoire et in situ (modifié d'après Atkinson et Salfors, 1991 ; Mair, 1993 ; Tani, 1995 ; Reiffsteck, 2002). ...	16
Figure II.2 : Schéma de principe du dispositif « Bender éléments ».	18
Figure II.3: Les Bender elements implantés dans les embases de la cellule triaxiale.	18
Figure II.4: Dispositif de l'essai triaxial cyclique.	19
Figure II.5 : Schéma des principales méthodes dynamiques pour mesurer la rigidité du sol in situ.	20

Figure II.6: Dispositif pressiométrique.	22
Figure II.7 : Courbes schématiques de réduction du module en conditions in situ et de laboratoire.....	23
Figure II.8 : Présentation sous la forme d'un diagramme déformation-module de cisaillement (G) des résultats des essais sur l'argile des Flandres pour une profondeur d'environ 4m (Reiffsteck et al. 2006 ; Ali, 2010) avec le résultat de la campagne géophysique de 2014.	24

CHAPITRE III : EVOLUTION DES MODULES DE DEFORMATION A PARTIR DES ESSAIS

Figure III.1 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour le sol limoneux de Bussy-Saint-Georges avec un $I_p=19$ et pour un confinement effectif de 60 kPa.	27
Figure III.2 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour les deux essais (Argile cr_1 et Argile cr_2) sur le sol argileux de Bussy-Saint-Georges.....	27
Figure III.3 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour les deux essais sur le sol sableux de Bussy-Saint-Georges avec un $I_p=4$	28
Figure III.5 : Courbe normalisée de la réduction du module de cisaillement pour le sol limoneux obtenue à la colonne résonnante.....	30
Figure III.6 : Courbes normalisées de la réduction du module de cisaillement pour le sol argileux obtenue à la colonne résonnante.....	30
Figure III.7 : Courbes normalisées de la réduction du module de cisaillement pour le sol sableux obtenue à la colonne résonnante.	31
Figure III.8 : les résultats d'essais d'odomètre et d'essai pressiomètre.	32
Figure III.9 : Courbes de calage de sable du site de BEJAIA sur les fuseaux de Seed et Idriss (1970) pour les sables.....	32

CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE AVEC MOHR-COULOMB ET HSS

Figure IV.1 : Courbe de dégradation de G selon HSS.	36
Figure IV-2 : Courbes numériques de dégradation de G en fonction de γ obtenues avec le modèle HSS (Argile).	37
Figure IV-3 : Courbes numériques de dégradation de G en fonction de γ obtenues avec le modèle HSS (Sable).	38
Figure IV.4 : Présentation du cas d'étude.	39
Figure IV.5 : Déformations.	40
Figure IV.6. Déformations totales.....	40

Figure IV.7 : déplacement vertical en fonction de la charge (Mohr-Coulomb).....	41
Figure IV.8 : Déplacement vertical en fonction de la charge (HSS).....	41
Figure IV.9 : déplacement totaux (HSS).	42
Figure IV.10 : Déplacement vertical en fonction de la charge obtenu pour le deux modèles (Mohr-Coulomb et HSS).	42
Figure IV.11 : Présentation du cas d'étude en présence d'eau.....	43
Figure IV.12 : Déplacement vertical en fonction de la charge obtenu pour le deux modèles (Mohr-Coulomb et HSS) en présence d'eau.	43

Liste des symboles

- ν : Coefficient de poisson.
- D, ξ : Amortissement.
- G : Module de cisaillement.
- σ'_m, σ'_0 : La contrainte de confinement.
- e : Indice des vides.
- IP : Indice de plasticité.
- E : Module élastique.
- V_s : Vitesse des ondes de cisaillement.
- f_n : Fréquence propre de l'échantillon.
- ρ : Masse volumique de l'éprouvette.
- L : Hauteur de l'éprouvette.
- TM : Décrément logarithmique.
- P : Ondes sismiques de compression.
- S : Ondes sismiques de cisaillement.
- Q_c : La réaction du sol à l'enfoncement du cône, et aussi la charge de fonçage qui agit sur le cône.
- α : Coefficient rhéologique des sols.
- τ : Contrainte de cisaillement.
- τ_{max} : Contrainte de cisaillement maximale.
- K_0 : Coefficient de la poussée des terres au repos.
- σ'_v : Contrainte verticale effective.
- p' : Contrainte moyenne effective.
- c' : Cohésion du sol.
- ϕ' : Angle de frottement interne du sol.
- G_0 : Le module maximal de cisaillement.
- ε : Déformation radiale du bord d'une cavité cylindrique.

Introduction générale

Les ouvrages géotechniques appliquent des différentes charges sur les massifs des sols qui induisent des déformations importantes sur ces derniers, elles engendrent parfois des déplacements, tassements et parfois la destruction complète de la structure. Ces déformations dépendent d'une part des propriétés du sol, et d'autre part des différents chargements appliqués.

Afin de connaître le comportement du sol, quelle que soit la sollicitation à laquelle il sera soumis, il s'avère nécessaire de connaître la variation des modules de déformabilité en fonction de la déformation pour mieux comprendre la réponse des sols et de réussir à les modéliser de manière réaliste, en prenant en compte tous les paramètres qui affectent leur comportement.

Les paramètres qui caractérisent la déformabilité des sols sont ; le module de déformation et l'amortissement.

Ces paramètres peuvent être utilisés dans les calculs de plusieurs ouvrages géotechniques. Les modules de déformation, plus précisément le module de cisaillement des sols peut être déterminé expérimentalement en laboratoire, sur des échantillons prélevés de terrain, ou directement en place, ou d'essais in-situ.

Une difficulté réside dans la détermination de la courbe de l'évolution de module de cisaillement en fonction de la déformation dans des différentes gammes de déformations avec un seul essai, quoiqu'il ait été réalisé en laboratoire ou in-situ et la nécessité de connaître le comportement de sol de petites déformations aux grandes déformations, impliquent l'utilisation des modèles de comportement qui permettent de prendre en compte le comportement des sols en petites déformations et l'aspect dégradé des modules.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, on a subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Chapitre I : est consacré à la présentation des modules de déformation et les paramètres qui influencent ces derniers.

Chapitre II : présente les différents essais in-situ et les essais en laboratoire qui servent à déterminer les modules de déformations dans les différents ordres de déformations de 10^{-6} à 10^{-1} (de petites déformations aux grandes déformations).

Chapitre III : présente les courbes d'évolution de module de cisaillement des sols à partir des essais in situ et des essais de laboratoire tirés des travaux de plusieurs chercheurs, ainsi que des comparaisons entre les modules déterminés à partir d'essais in situ sur sols Algériens avec des courbes théoriques dans les différentes gammes de déformation.

Chapitre IV : présente les résultats de la simulation numérique d'une fondation superficielle sur un sol hétérogène avec les modèles Hardening soil Small (HS-Small) et Mohr coulomb réalisée avec le logiciel PLAXIS2D, en utilisant des paramètres qui ont permis de tracer la courbe de dégradation de module de cisaillement G donnée par la loi de Hardin et Drenvich.

Chapitre I

Étude bibliographique sur la réduction des modules de déformation

I- 1. Introduction

Dans la pratique géotechnique, on associe un type d'ouvrage à une gamme admissible de déformations (déplacements, tassements) du sol. Or, d'une part, ces déformations dépendent de plusieurs facteurs : les propriétés du sol lui-même et sa composition, la nature des sollicitations agissantes, et d'autre part des différents matériels de mesure ne concernent que certaines plages de déformation.

Afin de connaître le comportement du sol, quelle que soit la sollicitation à laquelle il sera soumis, il s'avère nécessaire de connaître la variation des modules de déformation (G , E) en fonction de la déformation.

Atkinson et Sallfors (1991) ont défini trois phases de déformations : les très petites (0,001% ou moins), les petites (entre 0,001 et 1%) et grandes déformations (plus que 1%).

I-2. Différents types de module de déformation

D'une courbe $\sigma=f(\varepsilon)$ plusieurs modules peuvent être déterminés et sont associés aux différents intervalles de déformation.

En très petites déformations, le comportement de sol est considéré linéaire, le module de déformation est noté généralement par (E_{\max}) ou (E_0) et par le module de cisaillement G_{\max} qui est en lien directe avec la vitesse des ondes de cisaillement V_s .

Dans la plage suivante de déformation, le comportement de sol est non linéaire et hystérétique, le module diminue avec la déformation, pour les chargements monotones il est décrit par un module sécant déterminé dans la courbe par la pente de la droite reliant l'origine au point actuel est un module «tangent» (E_{tan}) déterminé par la pente de la courbe dans un voisinage du point.

Cependant dans les essais où le chargement est cyclique, le module de déformation est noté (E_{cyc}), il est déterminé par la pente de la droite reliant les deux points d'inversion du sens de la déformation (figure 1.1).

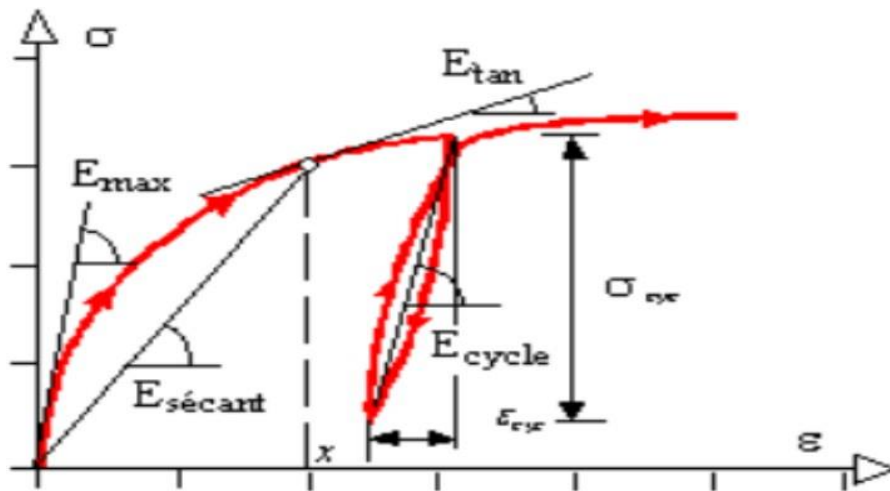


Figure I.1 Différents types de module de déformation.

Les chercheurs (Seed et Idriss 1963) ont trouvés que G (il est d'usage de l'exprimer aussi par le rapport G/G_{max}) suit une courbe de dégradation en fonction de « γ » il est de la forme d'un « S » (figure I.2). Cependant cette courbe ou ce module est influencé par plusieurs facteurs, notamment la plasticité des sols, de la densité, du niveau de confinement et de la granulométrie des sols (Hardin et Richart, 1963 ; Boelle, 1983 ; Hicher, 1985 ; Lo Presti, 1987).

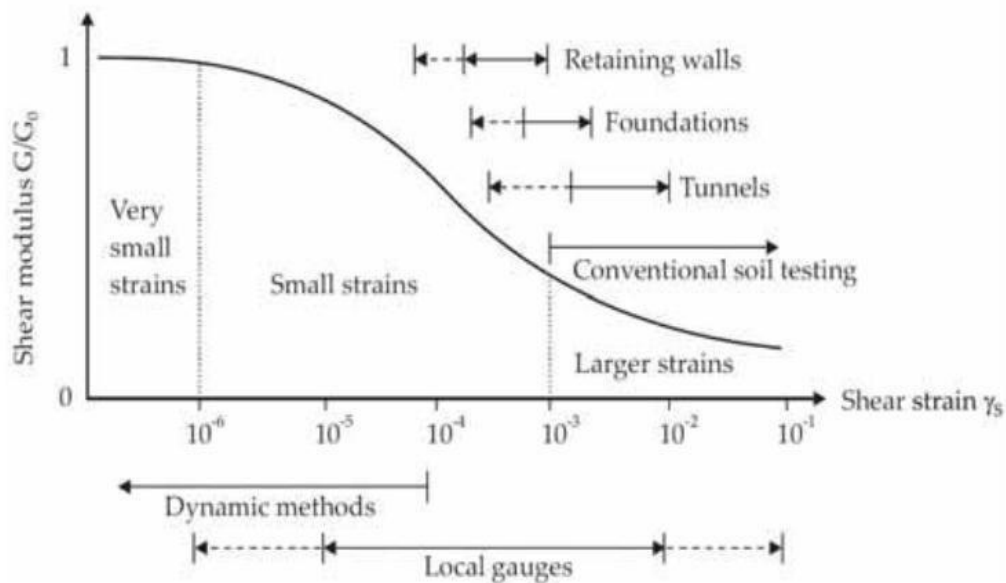


Figure I.2 Rigidité du sol sous différentes phases de déformations et leur détermination (Atkinson et Salfors, 1991 ; Mair, 1993).

I-3. Les paramètres qui influencent le module de cisaillement G

Les principaux facteurs influençant les modules de déformation des sols décrits dans la littérature sont très nombreux. Tatsuoka et shibuya (1991) ont énuméré les principaux facteurs intervenant sur les propriétés des sols :

- La non homogénéité du matériau ;

- La pression moyenne ;
- La granulométrie de sol ;
- Contrainte de confinement ;
- L'indice de plasticité ;
- densité

I-3-1. Types de sol

Dans un sol, la variation de la grandeur du domaine élastique dépend principalement du type de sol (Jardine et al.1984). Après ce domaine la valeur du module G tend à diminuer avec l'augmentation de la déformation en cisaillement (γ). Le taux de cette réduction du module diffère selon le type de sol (Seed et Idriss ,1970 ; Hardin, 1978 ; Iwasaki et al ,1978 ; Seed et al ,1986 ; Vucetic ,1994 ; Lanzo ,1997). Afin de mettre en évidence l'importance du type de sol, Seed et Idriss (1970) ont proposé l'utilisation des courbes de variation de G/G_{max} en fonction de γ . Plusieurs auteurs ont étudiés les paramètres qui influent sur les formes de ces courbes soit pour les argiles, soit pour les sables.

I-3-1-1. Le sable et le gravier

D'après les travaux réalisés (Seed et Idriss, 1970 ; Iwasaki et al, 1978 ; Kokusho ,1980 ; Seed et al. 1986) sur l'étude de la variation du module de cisaillement normalisé G/G_{max} en fonction de la déformation en cisaillement γ , montrent que toutes les courbes se retrouvent en général dans le faisceau proposé par Seed et Idriss (1970) (Figure I.3).

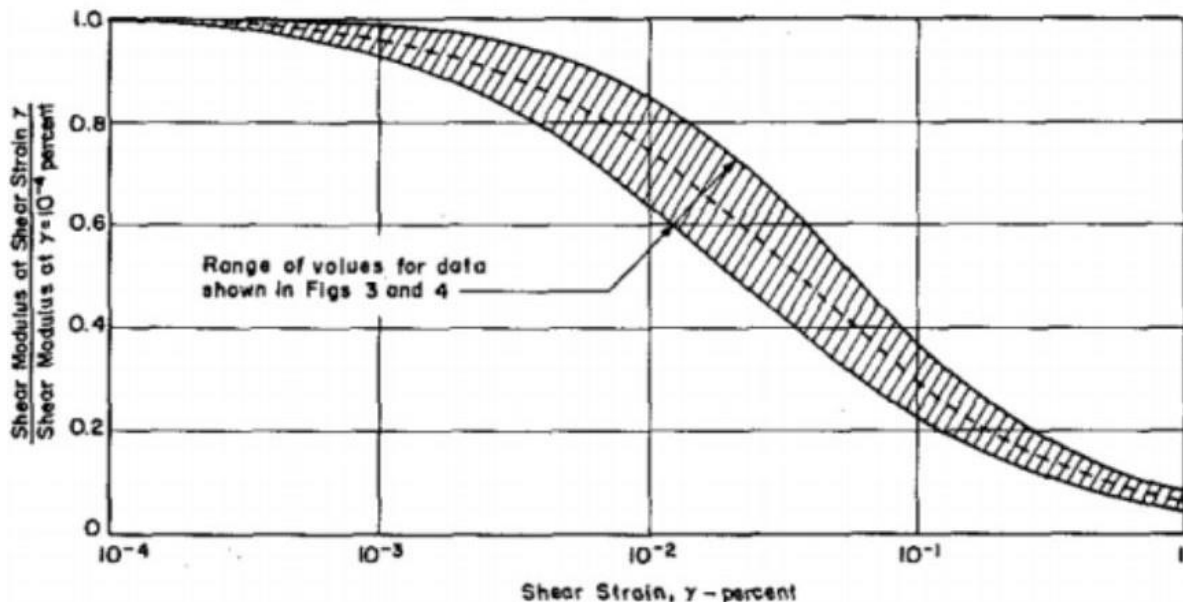


Figure I. 3 Variation du module de cisaillement en fonction de la déformation en cisaillement pour les sables (D'après Seed et Idriss 1970).

En fait avec l'augmentation de la déformation de cisaillement, le module de cisaillement diminue pour tous les différents matériaux. La figure I.4 montre les travaux de Seed et Idriss (1970) sur le sable et le gravier suivant l'amplitude de distorsion. Il apparaît que le gravier présente une dégradation du module plus importante que le sable, ce qui montre l'effet du type de sol sur ce comportement du sol en fonction de la distorsion.

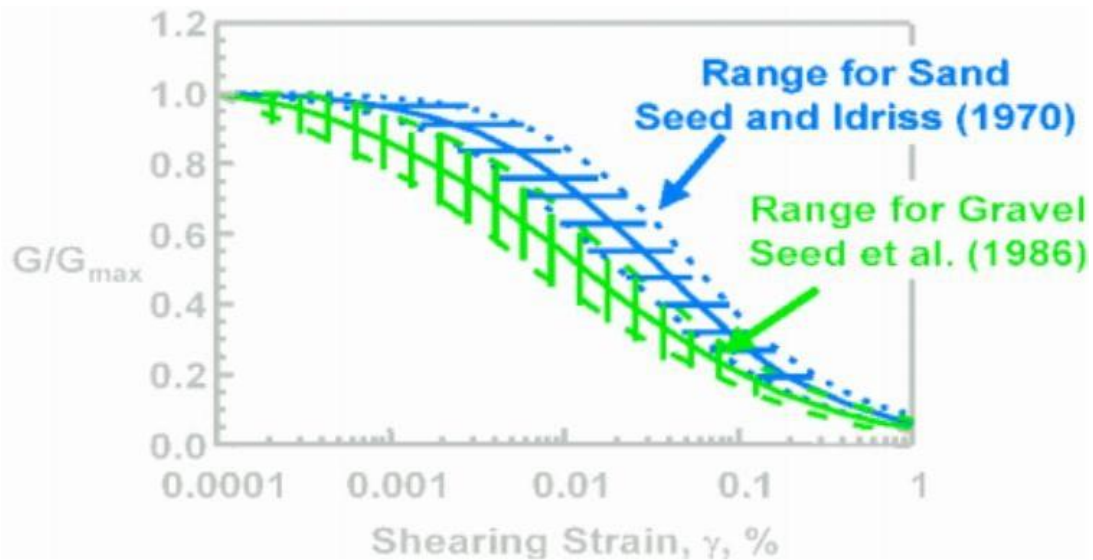


Figure I. 4 Courbes de dégradation du module pour les sables (Seed et Idriss, 1970) et pour les graviers (Seed et al, 1986)

La figure (I.5) présente les travaux de Shibuya, Iwazaki sur des sables différents, où on constate que le module G se dégrade avec la déformation, cette dégradation est différente entre les trois sables, cette différence revient à la granulométrie des différents échantillons, à la forme des grains, à la densité minimum et maximum de ces sables.

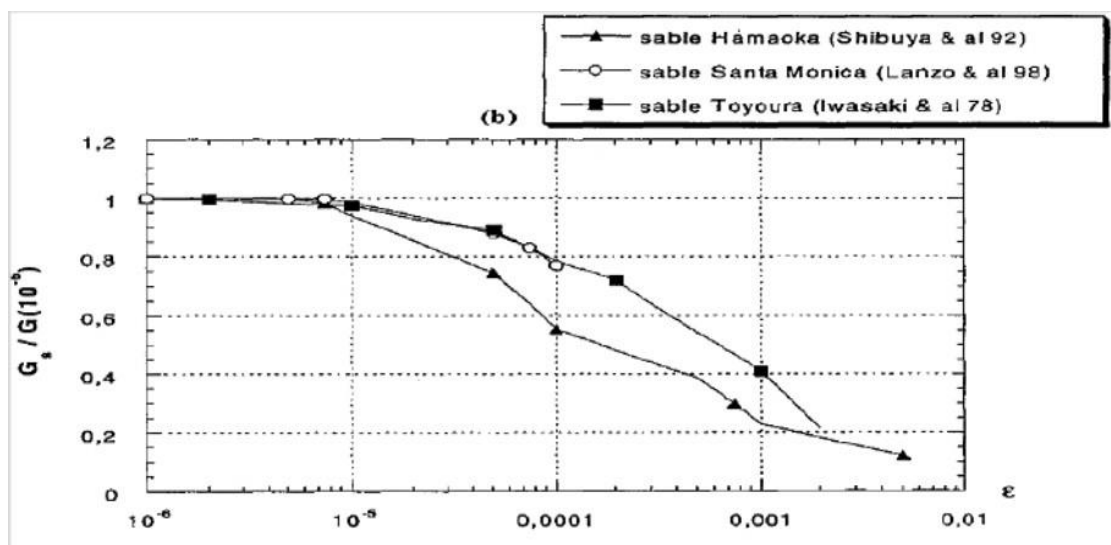


Figure I. 5 La dégradation de module de cisaillement des sables de (Hamaoka, santa Monica et Tayoura) en fonction de ϵ .

Hicher (1985) a proposé la relation suivante à partir de résultats obtenus à l'Ecole Centrale de Paris, Pour des sables, des agrégats et des argiles avec une faible limite de liquidité ($w_L < 50\%$).

Où p' est la pression effective moyenne.

$$E_{\max}/P'^{1/2} = 450/e \quad (1.1)$$

1-3-1-2. Les Argiles

Le module cisaillement des sols fins dépend aussi d'une multitude de paramètres physiques. Outre les facteurs d'influences vus dans le sable, on compte les effets de surconsolidation, de la cimentation, de plasticité et de l'âge géologique, avec lesquels le module G augmente. Cependant dans les argiles normalement consolidé ou faiblement surconsolidée le module G diminue avec l'indice des vides et augmente avec la contrainte effective moyenne.

Hicher aussi proposa une autre relation sur les argiles (d'une limite de liquidité plus élevée) en fonction de la densité

$$E_{\max}/P'^{1/2} = 750/e \quad (1.2)$$

Les chercheurs (Anderson & Richart 1976) et (Iwasaki & al. 1978, Shibuya & al. 1992 et Lanzo & al. 1997) ont réalisés des essais sur les argiles de (détroit, de led) figure I.6, les résultats obtenus sont présentées par la figure suivante :

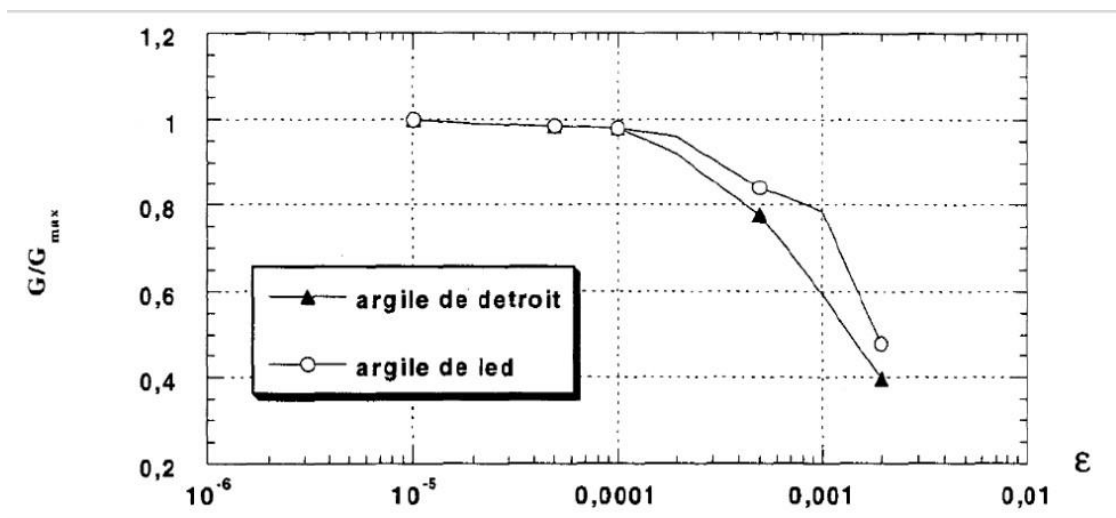


Figure I. 6 La dégradation de module de cisaillement des argiles de Detroit et de Led en fonction de ϵ .

On peut remarquer de ces résultats que deux parties de comportement sont apparues, le premier ;

Est caractérisé par la stabilité de module de cisaillement ce qui signifie le comportement quasi-linéaire des argiles étudiées, par la suite la deuxième partie de graphe où le module G se dégrade différemment ce qui explique l'influence de type de matériau sur le module.

Si on compare les travaux sur les sables figure (I.5) et sur les argiles figure (I.6), on constate une large différence entre l'évolution de la rigidité des deux types de sol.

Cependant on constate deux domaines de comportement, le premier est caractérisé par un niveau constant de module de cisaillement ce qui signifie le comportement quasi-linéaire de sol, le seuil de ce domaine coïncide avec le niveau de déformation d'ordre 10^{-4} pour les argiles et de l'ordre 10^{-5} pour le sable. Par la suite on note une réduction du module avec le niveau de déformation dans le deuxième domaine, en fait la dégradation de sable est plus importante que dans les argiles. Ce qui implique que le rapport de réduction dépens de matériau.

I-4. Influence des différents paramètres de sol sur f (G)

I-4-1. Densité (Indice des vides)

L'influence de la densité (l'indice des vides) est tout aussi bien établie, selon Jardine, la rigidité élastique d'un sol sédimenté augmente systématiquement lorsque la densité du sol augmente, c'est-à-dire l'indice des vides diminue. Afin de comparer le module de cisaillement de quelques échantillons avec des densités différentes, plusieurs auteurs (Hardin et Richart, 1963 ; Hardin et Black, 1969 ; Kokusho et al, 1982 ; Jamiolkowski et al, 1995 ; Porovic, 1995 ; Shibuya et al, 1997) ont proposé la normalisation par certaines fonctions.

Les premières études étaient basées sur des mesures de propagation d'ondes et avaient mis en évidence une relation linéaire entre la vitesse c de propagation et l'indice des vides pour une pression de confinement constante P_c (Hardin et Richart 1963) :

$$c = a (b - e) P_c^{n/2} \quad (1.3)$$

Et comme la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée du rapport entre le module (de cisaillement) et la densité du sol, on obtient :

$$E_{max} = A [(b - e)^2 / (1 + e)] \quad (1.4)$$

Où A et b dépendent du sol.

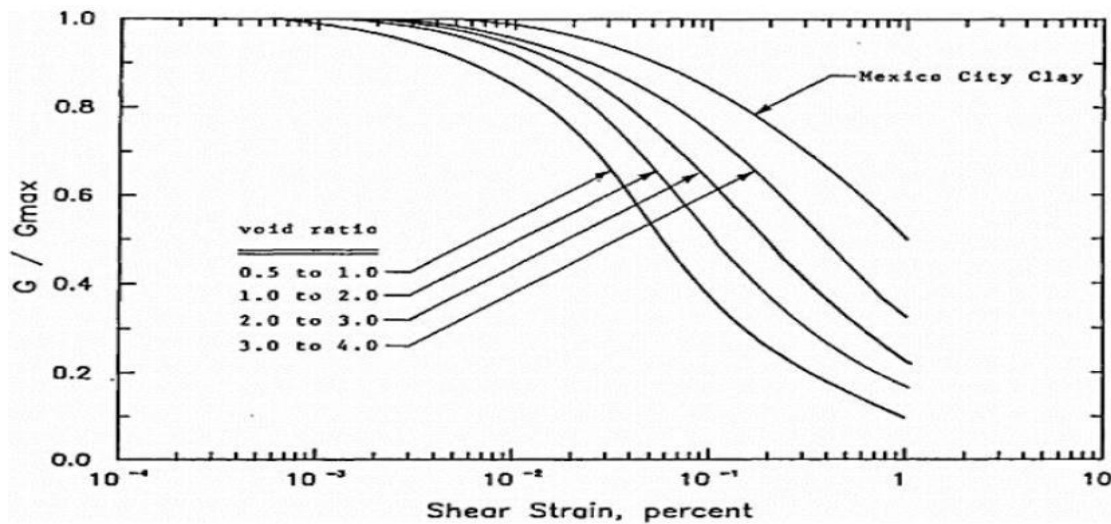


Figure I. 7 courbes de dégradation de module de cisaillement en fonction de l'indice des vides présentés par (Sun et al (1988) pour l'argile de Mexico.

I-4-2. Indice de plasticité

L'indice de plasticité I_p et l'indice des vides e ont une influence significative sur les courbes $G/G_{max}-\gamma$, les résultats expérimentaux ont montré que lorsque I_p et e augmentent, l'étendu de la courbe où G/G_{max} reste constant augmente et la dégradation de la courbe diminue (Seed et Idriss, 1970 ; Sun et al. ,1988 ; Vucetic et Dobry, 1991 ; Vucetic, 1994 ; Lanzo ,1997 ;Kramer, 1996) . Les résultats d'une partie de ces études sont présentés sur la figure (I.8).

Sun et al (1991) ont élaboré pour les argiles de Mexico city un fuseau de courbe de dégradation de G en fonction de γ :

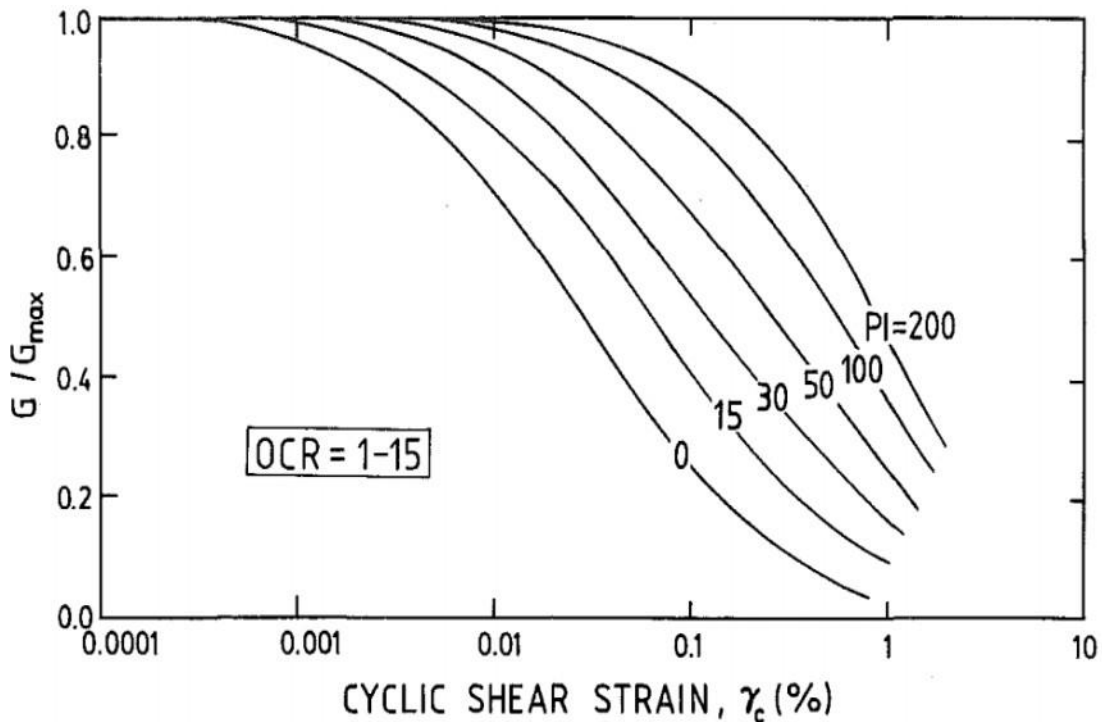


Figure I. 8 Effet de l'indice de plasticité sur le module G/G_{max} (Vucetic et Dobry, 1991) et (Sun et al, Mexico City).

On remarque de la figure précédente que les sols à faibles plasticités montrent une dégradation rapide de module de cisaillement que les sols à forte plasticité. On conclue donc que plus l'indice de plasticité IP augmente plus le module de cisaillement croit.

I-4-3. La contrainte effective moyenne

D'après les études expérimentales, il existe plusieurs hypothèses pour constater que la contrainte effective moyenne et la densité sont, les facteurs les plus déterminants.

Le module en petite déformation augmente avec la contrainte moyenne, selon une loi de puissance dont l'exposant est proche de 0,5 pour les sols pulvérulents, lorsque l'indice des vides est constant. Les mêmes résultats ont été observés avec les sols fins, testées avec le même indice des vides et le même rapport de surconsolidation.

La formule proposée par la plupart des auteurs pour les sols granulaires est de la forme ;

$$E_{max} = K \cdot p_a \cdot F(e) \cdot [p'/p_a]^n \quad (1.5)$$

Avec :

K dépend du matériau.

n est généralement voisin de 0,5.

p_a est la pression atmosphérique,

p' est la contrainte effective moyenne et e est l'indice des vides.

I-4-4. La contrainte de confinement.

Dans les relations établies par différentes recherches et qui relient le module de cisaillement G_{max} aux paramètres les plus influents, la contrainte est apparue systématiquement.

L'effet de la contraintes de confinement manifeste son influence sur le module beaucoup plus dans les sols pulvérulents que dans les sols fins plastique.

Iwasaki (1987) et El Horsi(1984) ont cependant proposé des courbes normalisées en fonction de la distorsion.

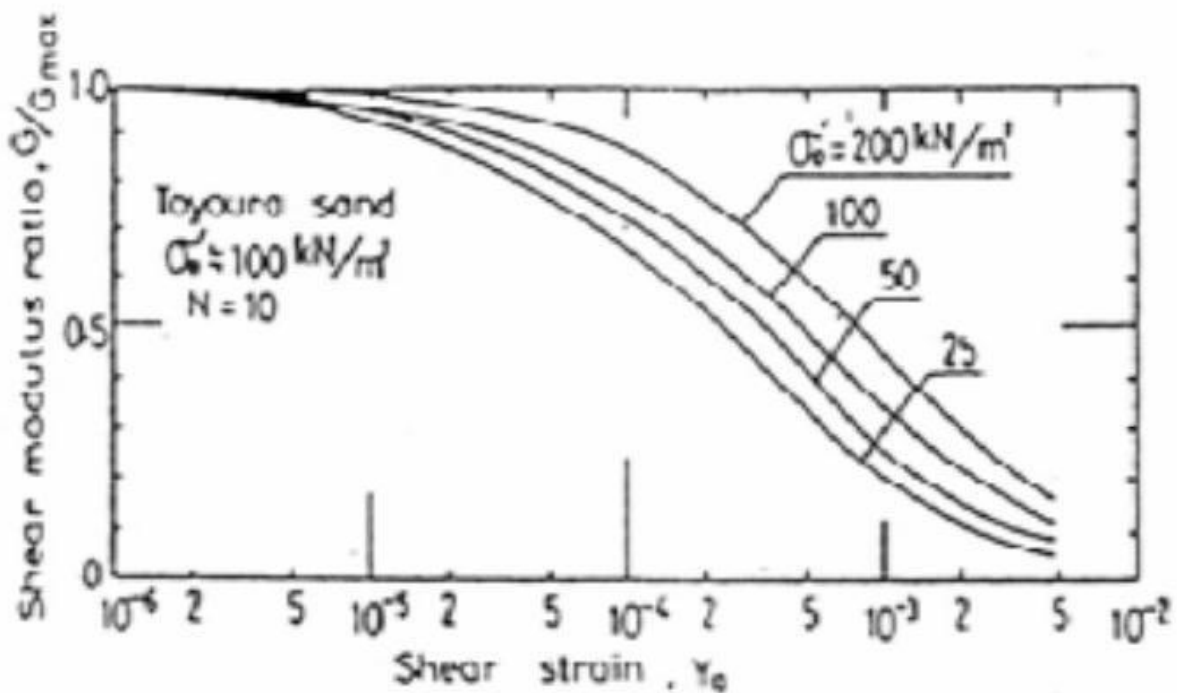


Figure I. 9 Effet de l'indice de plasticité sur le module G/G_{max} (Vucetic et Dobry, 1991) et (Sun et al, Mexico City).

I-5. L'amortissement dans le sol

L'amortissement est une grandeur fondamentale dans l'étude des phénomènes vibratoires des matériaux.

Il s'agit du paramètre responsable de la dissipation de l'énergie des matériaux, donc ce paramètre doit être représentatif de ce qui amorti le mouvement de matériaux et dissipe l'énergie.

On distingue deux types d'amortissement dans le sol, qui ont pour fonction la dissipation de l'énergie amenée par le mouvement de la structure : **un amortissement hystérique (matériel)** dû aux non linéarités qui se présentent dans le sol, et **un amortissement radiatif** dû aux rayonnements des ondes dans le sol.

Il est évident que le phénomène d'amortissement dans les sols réels est un problème beaucoup plus complexe.

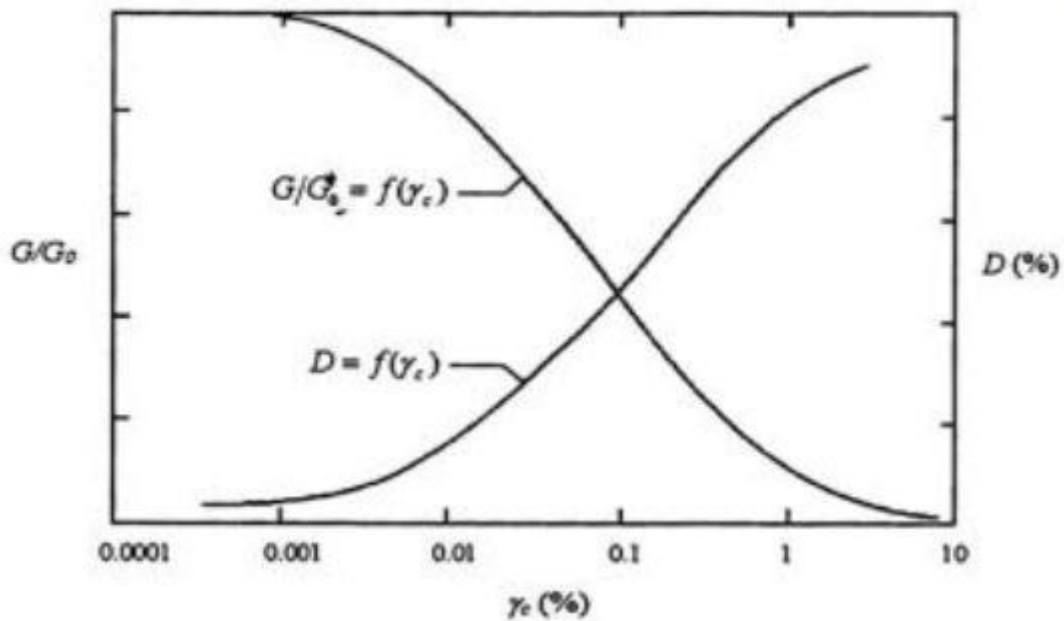


Figure I. 10 Variation des paramètres cycliques G et D avec la distorsion γ .

I-5-1. Les paramètres qui influence l'amortissement

L'amortissement et le taux G/G_{max} sont deux facteurs inséparables du comportement cyclique du sol, les facteurs ayant une influence sur le module sont identiques à ceux de module de cisaillement. Plusieurs chercheurs tels que (Seed et Idriss ,1970 ; Iwasaki et al ,1978 ; Kokusho ,1980 ; Seed et al ,1986 ; Vucetic et Dobry, 1991 ; Ishibashi (1992) ; Vucetic ,1994) ont étudié l'évolution de l'amortissement (D) en fonction de la déformation de cisaillement et les facteurs influençant, Il est montré que la fréquence de chargement et le nombre de cycles de chargement ont une influence importante sur cette caractéristique du matériau.

I-5-2. L'effet de la contrainte de confinement σ_0 sur l'amortissement (D)

Constantino (1988) a constaté que la contrainte de confinement n'a que peu d'influence sur le coefficient d'amortissement dans l'intervalle de pression utilisé. Il a trouvé, la même augmentation du coefficient d'amortissement pour le sable mélangé à plus faibles densité ($e = 0.52$).

Il a constaté aussi que lorsque l'on représente le coefficient d'amortissement en fonction de la contrainte de confinement pour des chargements isotropes différents (Figures I.9 et I.10), il retrouve que l'histoire des contraintes subie par l'échantillon n'a pas d'effet sur celui-ci. Ceci indépendamment de la densité initiale et de la taille des particules du matériau.

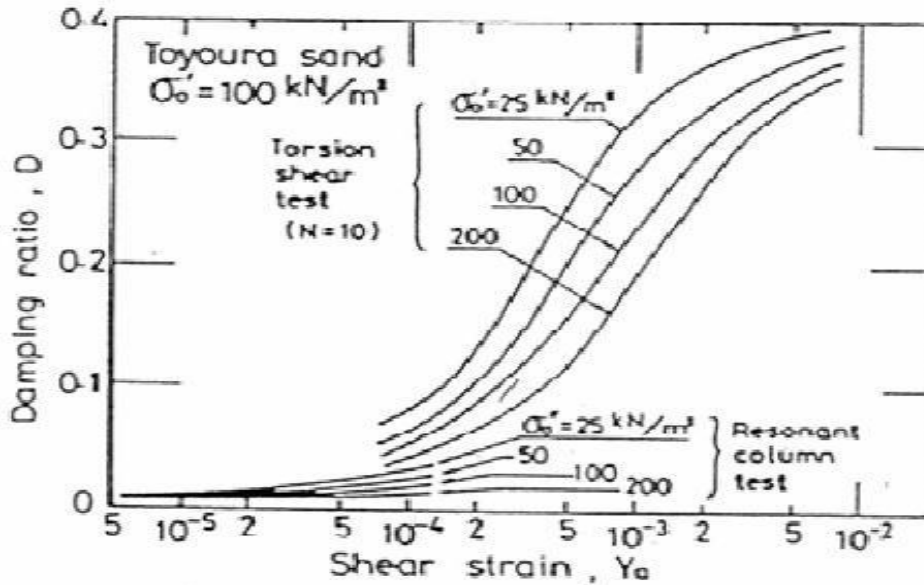


Figure I. 11 Influence de la contrainte de confinement sur l'évolution de D (Iwasaki, 1978)

I-5-3. Relation entre l'indice des vides et l'amortissement D

D'après les travaux d'Iwasaki et al. (1978), Tatsuoka et al. (1978) et Kokusho (1980) sur le sable de Toyoura, on constate que pour le même niveau de contrainte initiale, la variation de de l'amortissement (D) en fonction de(γ) semble être indépendante de l'indice des vides (e) et donc de la densité relative (Figure I.10).

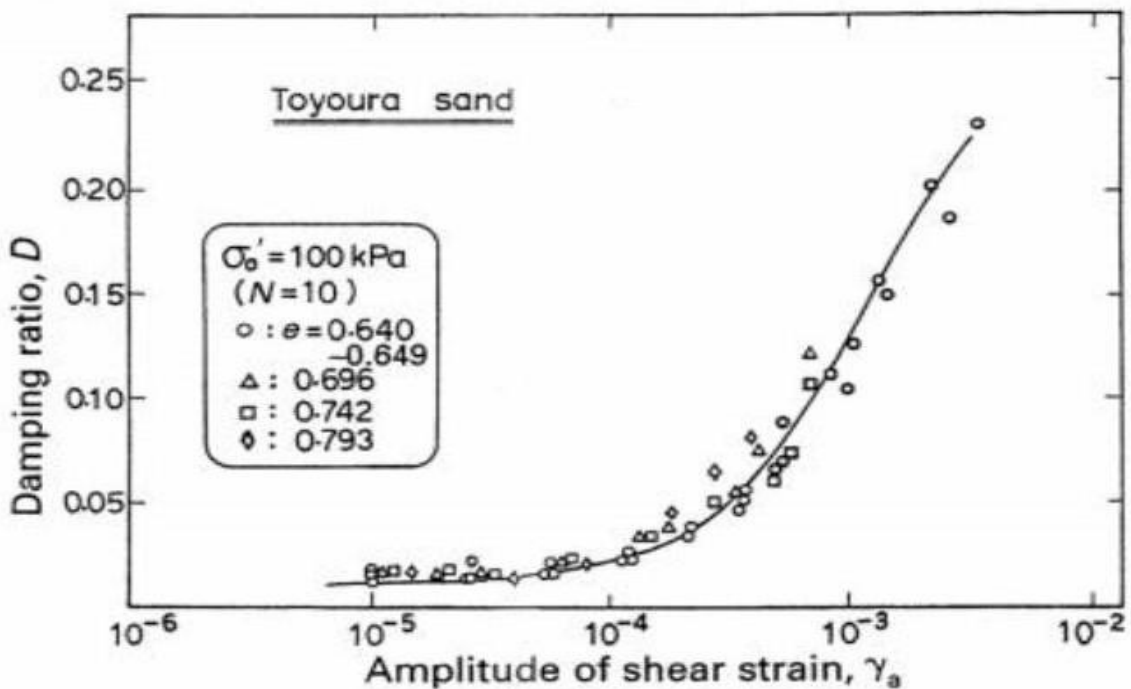


Figure I. 12 Résultat expérimental de la variation du coefficient d'amortissement D en fonction de la distorsion γ pour un sable de Toyoura (Kokusho 1980).

I-5-4. L'influence de l'indice de plasticité sur l'amortissement

Selon Zhang et Al (2005), Stokoe (1994) et Vucetic (1998), l'amortissement D augmente avec l'augmentation de l'indice de plasticité IP . Cependant en grandes déformations, l'amortissement diminue avec l'augmentation de IP . En 1995 Stokoe a donné une explication liée aux dissipations d'énergie des équipements pour les mesures d'amortissement dans les essais de laboratoire, au final il est conseillé que la caractéristique D soit mesuré aux fréquences et nombres de cycles proches des conditions de chargement réelles.

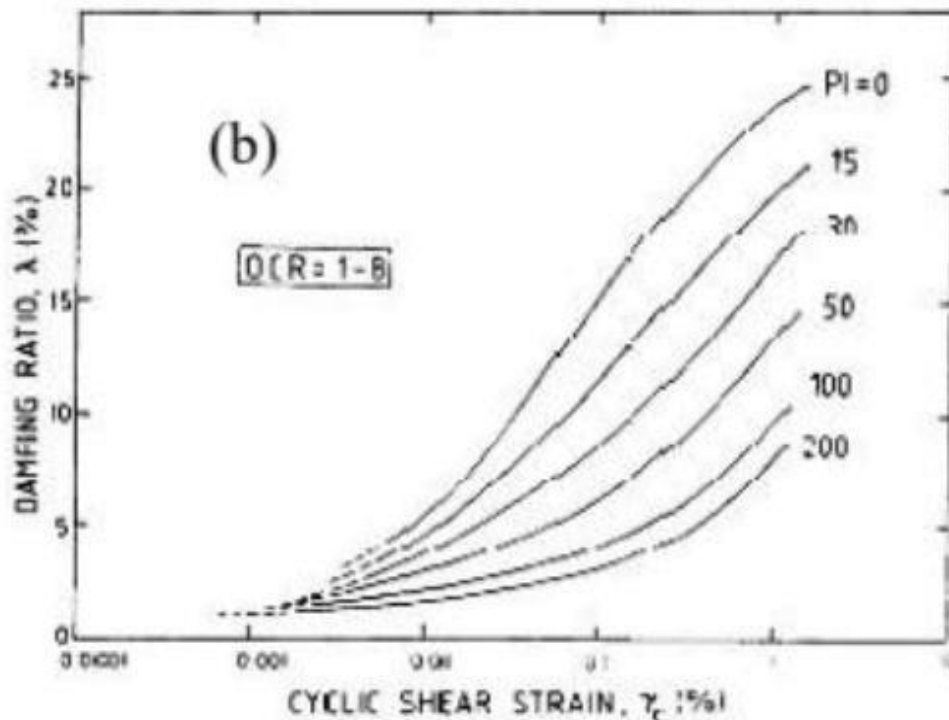


Figure I. 13 Influence de l'indice de plasticité sur le coefficient d'amortissement.

I-6. Conclusion

Le comportement d'un sol est caractérisé par un grand nombre de paramètres, qui diffèrent d'un matériau à un autre, ces paramètres sont les modules de déformation (E , G) et l'amortissement (D). Cependant leur détermination correcte est une tâche complexe et dépend de plusieurs facteurs. Il est d'ailleurs important de tenir compte de ces facteurs lors de la simulation du comportement de sol.

De nombreuses recherches ont montré la variation des modules de déformation en fonction de la déformation où il a été établi que ces modules suivent une réduction lorsque la déformation augmente, ces études ont mis en évidence l'influence de plusieurs facteurs sur ces modules, parmi ces facteurs, on cite ; la densité, la contrainte de confinement, l'indice de plasticité et bien d'autres.

Il a été remarqué que l'amortissement et le rapport G/G_{max} sont deux facteurs inséparables du comportement de sol, il est montré que les facteurs important contrôlant l'amortissement du sol sont identique à ce de module de cisaillement ou le rapport G/G_{max} .

Chapitre II

Détermination des modules de déformation

II-1. Introduction

La détermination des paramètres de comportement des sols, notamment des modules de déformation et la connaissance de leur évolution durant les différentes plages de déformations, et de leur variation suivant les chemins de contraintes devient un enjeu important dans les études géotechniques (le dimensionnement des ouvrages, les dallages et les tunnels...). Afin d'étudier la variation de module de cisaillement, on fera appel aux essais in situ et les essais au laboratoire.

Le module de cisaillement à très petites déformations peut être mesuré en laboratoire par l'essai à la colonne résonnante (Nguyen Pham, 2008) ou en employant la technique des Bender Eléments (Lee et Santa marina, 2005). Les caractéristiques de rupture d'un sol ainsi que son comportement à grandes déformations peuvent être déduites à partir des essais géotechniques à l'appareil triaxial. L'ajout d'essais plus spécifiques, de type colonne résonnante et triaxial cyclique, permet de décrire le comportement du sol entre les faibles et les moyennes déformations.

In situ ce module de cisaillement peut être obtenu par mesures géophysiques, notamment par l'utilisation de la vitesse des ondes de cisaillement.

Dans ce chapitre, on présentera une synthèse des différents essais permettant la détermination des modules de déformation.

II-2. Détermination des modules de déformation

Les travaux de Atkinson et Salfors, Mair, Tani, Reiffsteck, illustrés par la courbe de la figure (II.1), montrent que le module de cisaillement G se dégrade en fonction de la déformation.

Cette courbe est divisée en différentes plages de déformation ; petites, moyennes et grandes. Le module de cisaillement est déterminé dans chaque plage par des essais différents, par exemple, la détermination du module G en petites déformations nécessite des essais qui permettent de décrire le comportement du sol dans la phase de petites déformations (élasticité), comme la colonne résonnante (en laboratoire) et le down-hole (in-situ).

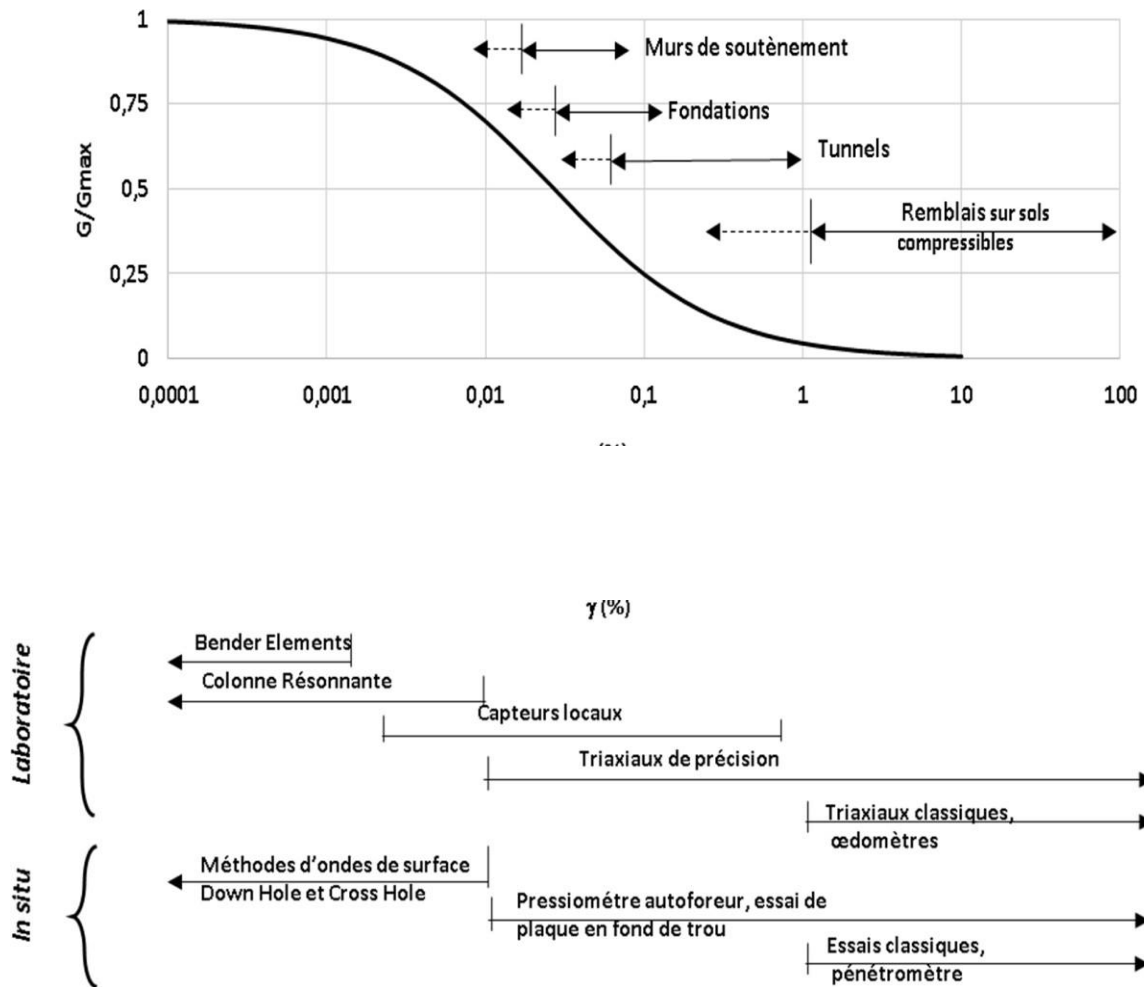


Figure II.1 : Courbe de réduction du module de cisaillement avec la déformation pour les différentes plages de déformations propres aux ouvrages et aux essais de laboratoire et in situ (modifié d'après Atkinson et Salfors, 1991 ; Mair, 1993 ; Tani, 1995 ; Reiffsteck, 2002).

Comme il a été cité, plusieurs essais permettent la détermination des modules de déformation, ces essais peuvent être réalisés au laboratoire ou in situ.

II-2-1. Essais de laboratoire

La technique consiste à prélever des échantillons « éprouvettes » de sol de terrain et les transporter au laboratoire où ils seront soumis à des essais.

Ces essais doivent toujours être comparés et corrélés aux essais in situ car ils présentent le désavantage le plus important, qui est l'impossibilité de garder le sol prélevé dans son état intact.

Les essais de laboratoire généralement sont menés pour déterminer les paramètres de déformabilités (essais triaxiaux), et décrire le comportement des sols entre les faibles et les

grandes déformations (Essais à la colonne résonante et essais triaxiaux cycliques) ; en distingue trois catégories selon le type de vibration appliqué:

- a) Les essais de vibration libre : l'échantillon subit une très faible déformation imposée d'ordre 10^{-6} et laisse en régime de vibration amortie. (ex : l'essai aux éléments piézoélectriques).il permet de déterminé le module de cisaillement G_{max} .
- b) Les essais de vibration entretenue (essai de résonance) : l'échantillon subit des faibles déformations *périodiques* ou l'amplitude est d'ordre 10^{-4} . avec ajustement de l'excitation chargement jusqu'à la résonance, qui permet l'obtention de module de cisaillement (G), ensuite laissé en régime de vibration libre amortie pour obtenir l'amortissement 'D'.
- c) Les essais de vibration forcée (chargement cyclique) : dans cette catégorie l'échantillon subit un chargement cyclique généralement alterne avec la possibilité de balayer un large intervalle de déformations et atteindre éventuellement la rupture.
Le module de déformation et l'amortissement sont déduits en fonction des amplitudes. Les essais cycliques de laboratoire les plus courants sont l'essai à l'appareil triaxial, l'essai de cisaillement rectiligne et l'essai sur cylindre creux.

Jauges locales

Au-delà de 0,1% de déformation, la rigidité sécante peut être mesurée avec une précision raisonnable lors de l'essai triaxial en utilisant des jauges de déplacements locales montées d'une manière conventionnelle à l'extérieur de la cellule. La précision de mesure peut être améliorée par la réduction de l'erreur concernant l'appui, l'installation de l'échantillon et le mauvais alignement (Gasparre, 2005). Seules les jauges locales attachées directement à l'échantillon sont capables de donner des mesures fiables à la rigidité entre 0,001% et 0,1% de déformations (Jardine et al, 1984).

Bender éléments

Les « Bender éléments » ont été mis au point pour mesurer la vitesse des ondes de cisaillement qui traversent le sol tendre (Shirley & Hampton, 1978; Dyvik & Madshus, 1985). Les éléments ont été modifiés et mis au point pour tester le sol raide et la roche tendre par Viggiani et Atkinson (1995) et Jovicic (1997).

La distance effective parcourue par l'onde de cisaillement est la distance entre les deux pointes des éléments (Gasparre, 2005). Par rapport aux jauges locales, l'inconvénient évident des Bender éléments est leur restriction aux très petites déformations (environ 10^{-6}).

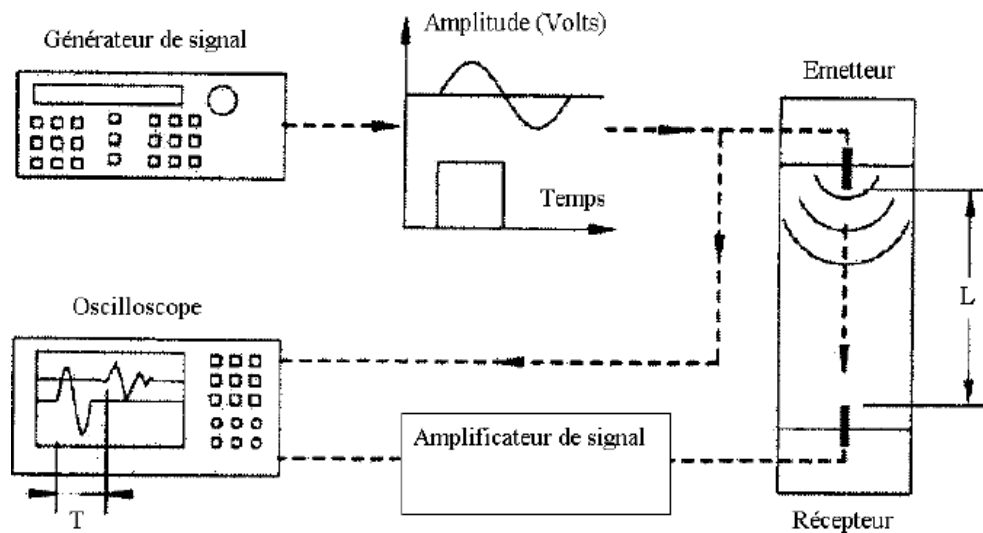


Figure II.2 : Schéma de principe du dispositif « Bender éléments ».

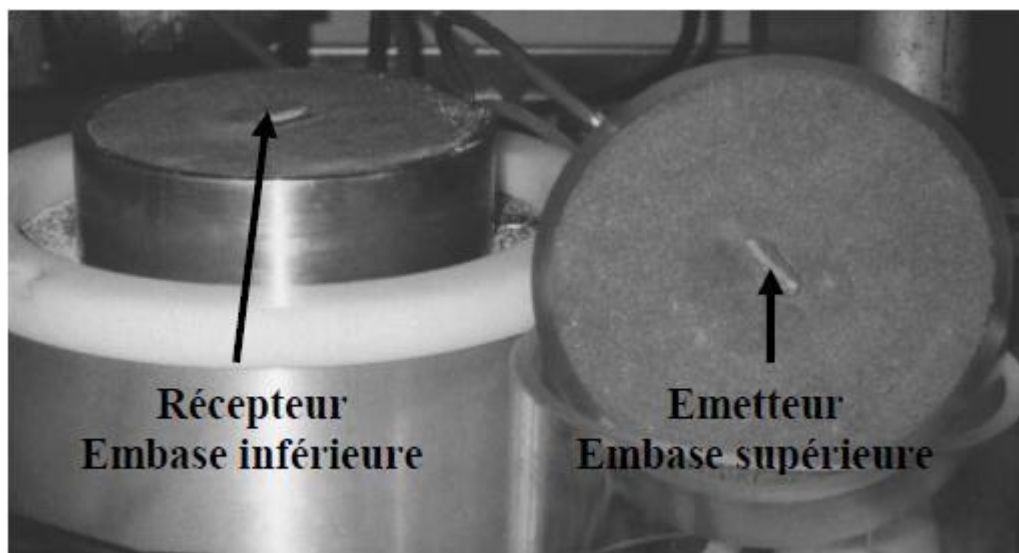


Figure II.3: Les Bender elements implantés dans les embases de la cellule triaxiale.

la colonne résonnante

Les essais à la colonne résonnante ont eu comme objectif la caractérisation et l'évolution du module de cisaillement à faibles déformations.

Grâce à ce type d'essais, on peut appliquer des forces de cisaillement en plus des forces axiales couramment appliquées dans l'appareil triaxial.

Les essais à la colonne résonnante sont cycliques ; Un échantillon cylindrique confiné axialement est ramené à un mode fondamental de vibration, au moyen d'excitation de torsion ou longitudinale. Une fois le mode fondamental de la fréquence de résonance établi, la mesure

de la fréquence de résonance peut être liée à la rigidité de la colonne à la base de la théorie de l'élasticité, qui permet l'obtention d'une réponse satisfaisante sous très petites déformations.

L'essai triaxial

Les contraintes et les déformations mesurées lors des essais triaxiaux cycliques peuvent être utilisées dans le calcul du module de cisaillement (G) et de l'amortissement (D). L'appareil triaxial se compose d'une presse supportant la cellule, un système de contrôle multiaxial permettant de contrôler le chargement axial, la contrainte de confinement et la contre pression utilisés en phase de saturation et consolidation de l'échantillon, un vérin pour appliquer le chargement sous forme d'une pression, et un micro-ordinateur équipé d'un logiciel pour regrouper les données et calcul/affichage des résultats.



Figure II.4: Dispositif de l'essai triaxial cyclique.

Les essais in situ

Le principe de mesure de la rigidité maximale du sol in situ est fortement basé sur la géophysique. Les essais in situ ont l'avantage principal de dispenser de l'extraction des échantillons représentatifs du sol. Ils sont en outre moins coûteux, généralement plus rapides et enfin plus simples à réaliser que ceux au laboratoire.

Les essais in situ se subdivisent en général en deux grandes catégories :

- la première est celle des essais en surface, dans lesquels la génération des ondes se fait en surface et les géophones (récepteurs) d'ondes sont placés de surface, ce type d'essais se base sur la propagation d'onde R Rayleigh.
- la deuxième catégorie regroupe les essais nécessitant un forage dans lequel la génération des ondes se fait, soit en surface ou à l'intérieur du forage, et les géophones sont placés soit en surfaces ou en forage, ce type d'essais se base sur la

propagation des ondes volumiques P et S. les essais de forage sont plus coûteux que ceux en surface du fait qu'ils nécessitent la réalisation préalable des forages.

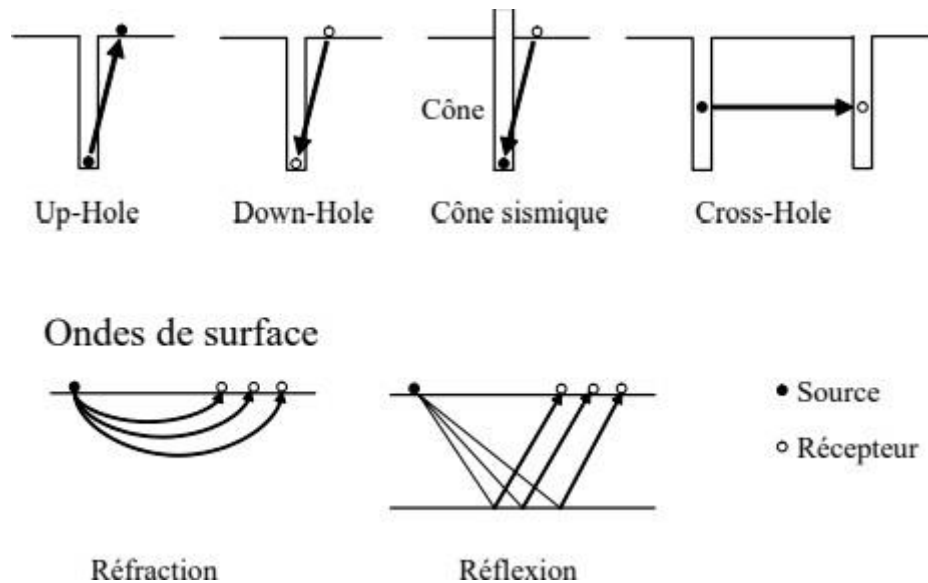


Figure II.5 : Schéma des principales méthodes dynamiques pour mesurer la rigidité du sol *in situ*.

Essai Cross-Hole

L'essai de type Cross-Hole sismique est sans doute l'essai le plus fiable pour déterminer la rigidité du sol sous très petites déformations, mais il est aussi le plus coûteux. Il nécessite au moins deux trous de forage dans l'un desquels on installe le géophone triaxial tandis qu'on met l'autre sous tension. La source d'énergie doit être capable de générer des ondes élastiques à haute fréquence et riche en énergie. L'onde arrive au récepteur et on détermine la vitesse de propagation des ondes horizontales. La rigidité horizontale du sol traversé par le signal peut ensuite être déterminée.

Essai Down-Hole

L'essai de type Down-Hole sismique ne nécessite qu'un seul forage vertical dans lequel une chaîne de récepteurs est mise en place. La méthode consiste à prévoir la source d'énergie (généralement un coup de marteau contre une plaque d'acier) à la surface du trou de forage. On utilise des géophones notamment assemblés à cinq composants, pour être calés et fixés sur des profondeurs progressivement croissantes contre la paroi d'un puit convenablement conditionné, en dynamisant le sol en surface du sol et en mesurant les temps d'arrivée de la première impulsion au géophone, cet essai permet de mesurer la rigidité verticale du sol, la vitesse et les modules élasto-dynamiques des différents types de roches rencontrées dans le forage.

Cône et dilatomètre plat sismiques

Les cônes et les dilatomètres plats sismiques disponibles sont hybrides. Ils combinent respectivement l'essai de type Down-Hole sismique avec forage et le dilatomètre plat. Au lieu de placer les récepteurs sismiques dans un trou pré-foré, ils sont poussés dedans et la source énergétique est située à la surface comme dans l'essai Down-Hole sismique. L'intérêt d'utiliser la version sismique de ces essais est de mesurer la rigidité de sol sous très petites déformations qui n'est pas mesurable directement par les essais standards.

II.2.2.4 Analyse spectrale des ondes de surface

Dans cette technique, la source et les récepteurs se situent à la surface. Au lieu d'analyser le temps parcouru par les ondes sismiques P et S comme dans la plupart des autres techniques, cette technique utilise le caractère de dispersion des ondes de surface dans un milieu.

Une onde plus longue à basse fréquence pénètre le milieu plus profondément qu'une onde à haute fréquence. La facilité et la rapidité de cette technique sur site combinée avec un traitement automatisé des données acquises et l'analyse inverse rendent probablement cette technique la plus efficace pour mesurer la rigidité de sol in situ sous très petites déformations.

A tout ces essais in situ nécessitant l'application d'ondes sismiques, s'ajoute les essais ; au pressiomètre, au pénétromètre et l'essai triaxial in situ.

L'essai de pressiomètre Menard

L'objectif de l'essai est de fournir des caractéristiques mécanique permettant soit de dimensionner des ouvrages de génie civil, soit de procéder à des recherches dans le but de développer nos connaissances sur le comportement des sols, dont il faut rechercher les paramètres du comportement rhéologique du sol.

Cet essai consiste à mesurer la pression 'P' nécessaire pour provoquer le gonflement d'une sonde cylindrique placée à l'intérieur d'un trou d'un forage. Le dispositif pressiométrique comprend un contrôleur pression-volume (CPV), des tubulures, un réservoir de gaz, une sonde (sonde tri-cellulaire) et un enregistreur.

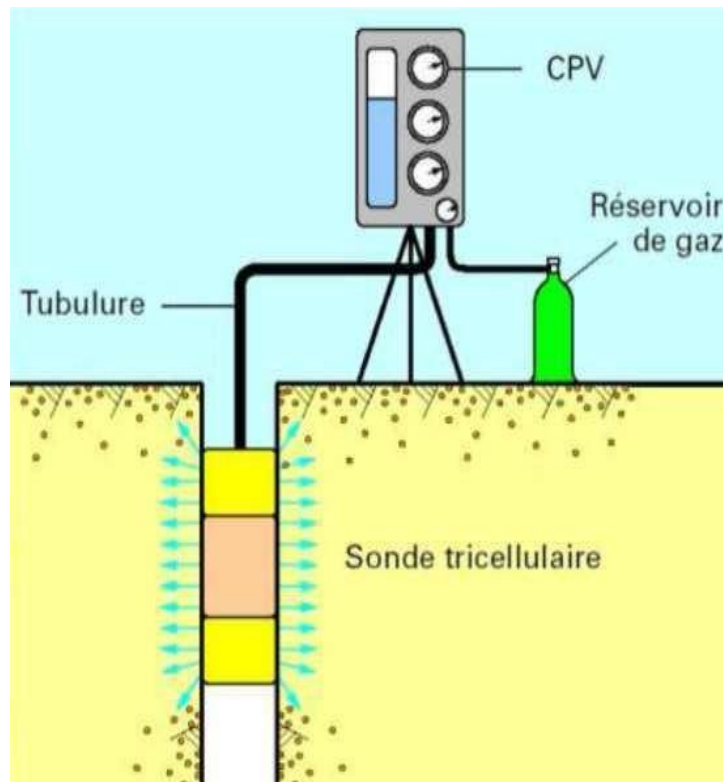


Figure II.6: Dispositif pressiométrique.

L'essai triaxial in situ

L'idée de base de l'essai triaxial in situ est de reproduire les conditions de chargement d'un essai triaxial de laboratoire dans le sol intact en place où on peut supposer que l'échantillon testé n'a pas été remanié. Les jauges locales associées rendent l'essai apte à détecter les petites déformations (entre 0,001% et 0,1%) mesurées en laboratoire. Néanmoins, les premières validations de l'essai in situ montrent qu'il reste encore des difficultés à franchir avant que cet essai prenne sa place dans les essais in situ.

Comparaison entre les essais in situ et les essais de laboratoire

Une différence est souvent constatée au niveau des faibles déformations entre le module maximal déterminé en conditions de laboratoire et *in situ* (Stokoe et al. 1994 ; Benz, 2007). Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs ;

Le module de cisaillement maximal mesuré au laboratoire tient compte des facteurs suivants, qu'on ne rencontre pas dans la mesure *in situ* ;

- la perturbation due au prélèvement de l'échantillon.
- la perturbation due à la préparation de l'éprouvette.
- la perturbation due à l'installation de l'éprouvette.
- l'impossibilité de reproduire au laboratoire les mêmes conditions de contraintes qu'*in situ*.

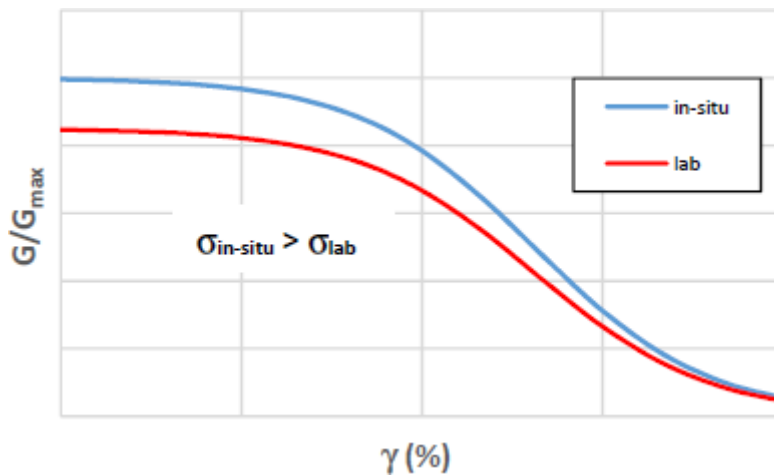


Figure II.7 : Courbes schématiques de réduction du module en conditions in situ et de laboratoire.

L'utilisation du module de cisaillement maximal obtenu en conditions *in situ* est encouragée et privilégiée (Stokoe et al., 2004) puisque l'essai in situ ;

- n'est pas sujet de perturbations (Borel et Reiffsteck, 2006 ; Ferber, 2003) ;
- est représentatif du site, les essais sismiques sur site concernent un large volume de sol, or les essais de laboratoire ne concernent que des éprouvettes de petites tailles (Foti, 2012) ;
- non soumis aux effets secondaires du temps, comme le vieillissement.

Présentation d'un exemple de détermination de G à partir de différents essais

Nous présentons des résultats des essais de laboratoire et in situ réalisés sur l'argile de Flandres sous la forme d'un diagramme G en fonction de la déformation, ainsi que les courbes de réduction de module déjà proposées pour ce sol par Canépa et al (2002) et Borel et Reiffsteck (2006) et Ali(2010).

On note que les résultats obtenus par essais de propagation d'ondes sont à une déformation égale à 10^{-6} .

La légende de la figure II.8 faisant référence aux résultats des essais suivants est :

- a) TRIAX : essai triaxial non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU+u) ;
- b) BE : essais par éléments piézo-électriques (Bender Element)
- c) DH : essais Down Hole ;
- d) SASW : analyse spectrale des ondes de surface ;
- e) SC : essais au sismo-cône ;
- f) PMT : essais au pressiomètre ;
- g) CPM : essais au pressio-pénétrromètre ;
- h) STAF : essais au système de tubage auto-foré ;

- i) PAF : essais au pressiomètre auto-foreur ;
- j) POINTE : essais de chargement de pointe ;
- k) $G_{max}(\mu)$: analyse multicanaux des ondes de surface (dans le cadre du présent travail, campagne de 2014). Ce résultat est présenté avec les écarts : $G_{max} + \sigma$ et $G_{max} - \sigma$.

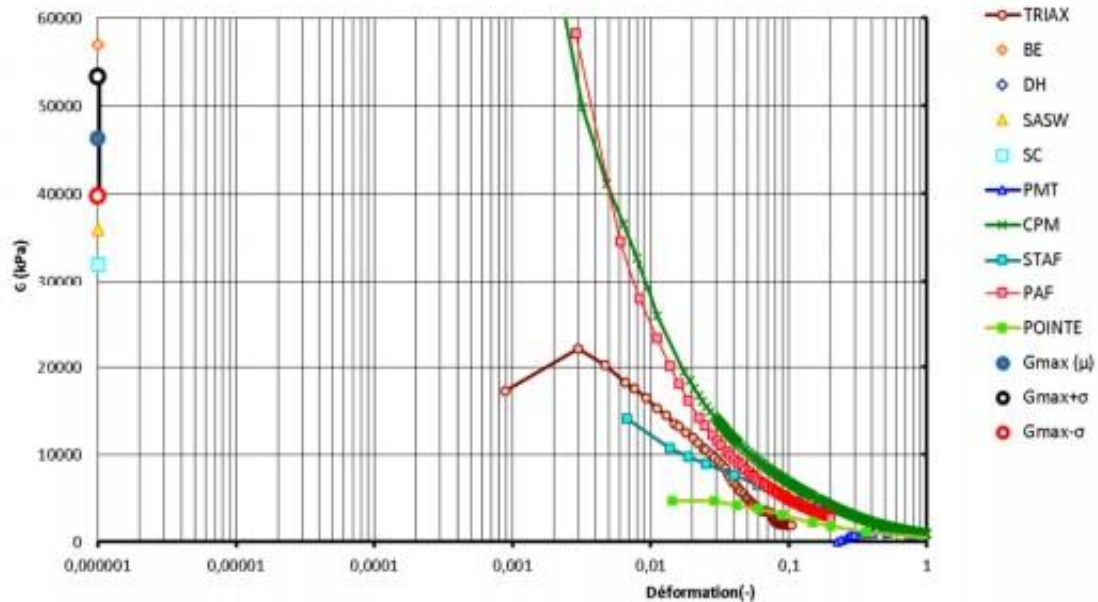


Figure II.8 : Présentation sous la forme d'un diagramme déformation-module de cisaillement (G) des résultats des essais sur l'argile des Flandres pour une profondeur d'environ 4m (Reiffsteck et al. 2006 ; Ali, 2010) avec le résultat de la campagne géophysique de 2014.

De la figure, on peut voir que les résultats mettent en évidence une grande variété dans l'ensemble des essais et surtout à une large plage de déformation.

En ce qui concerne les résultats d'essais de propagation d'ondes, on note une variation de la valeur de G . Nous pouvons ainsi dire que les essais in situ de propagation d'ondes (MASW, SASW, DH et SC) produisent des résultats qui sont proches et différents du résultat obtenu en laboratoire par l'essai Bender Element.

Nous constatons également que les résultats des autres essais PAF et CPM produisent des résultats similaires mais différents des autres essais in situ (PMT, STAF, PAF et POINTE) et de l'essai en laboratoire à l'appareil triaxial (TRIAX). Nous remarquons aussi, sur la figure que les essais PAF et CPM montrent une réduction plus rapide du module que les autres essais (PMT, STAF, PAF, POINTE et TRIAX) surtout entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-2}$.

CONCLUSION

Selon la précision des mesures recherchée, des moyens diversifiés de mesures existent. Les mesures en laboratoire ont l'avantage de contrôler les conditions aux limites, le drainage, les chargements appliqués et la nature du sol. Ce type de mesure permet de révéler les différents aspects isotropes ou non et d'étudier les différents facteurs qui dominent le comportement. Dans certaines conditions, les essais in situ en vraie grandeur sont nécessaires pour estimer les caractéristiques du sol, ont l'avantage de facilité d'application et sont moins coûteux. Cependant, les conditions initiales et le chemin de sollicitations restent mal connus et peu maîtrisés.

Malgré la diversité des méthodes de mesure de module de déformation qu'il existe, il existe un certain nombre de difficultés qui limitent pour l'instant l'utilisation des caractéristiques des sols en petites ou très petites déformations dans les codes de calculs et dans la pratique de l'ingénieur, tel que :

- ✓ Les difficultés de mesures en laboratoire et in situ.
- ✓ Le manque de retour d'expérience.
- ✓ Les difficultés d'ordre rhéologique

Chapitre III

Evolution des modules de déformation à partir des essais

III-1. Introduction

Plusieurs essais ont été réalisés dans les sols pour déterminer le module G , malheureusement aucun d'eux ne permet d'obtenir directement la courbe complète G en fonction de (ε) . Mais plutôt obtenir une relation entre le module de cisaillement du sol et la déformation de l'échantillon.

La représentation de module est donc une courbe typiquement d'une forme en S avec au début un plateau jusqu'à des déformations inférieures à 10^{-5} , puis une chute brutale jusqu'à 10^{-3} .

Ces courbes ont été établies d'abord à partir d'essais dynamiques à la colonne résonnante, où on mesure le module de cisaillement sécant G_s sur des boucles d'hystérésis.

Avec l'amélioration des triaxiaux dans les années 80, on a pu établir ces mêmes courbes pour des essais statiques, ce qui a donné lieu à de nombreuses comparaisons et discussions.

Seed et Idriss (1970), Vucitic (1990) et Darendeli (2001) ont effectué plusieurs études pour décrire la réduction des modules de déformation en fonction de la déformation, alors un fuseau de courbes expérimentales moyennes utilisables pour des argiles et des sables a été proposé par SEED et IDRIS, et des courbes types par Vucitic et Darendeli .

III-2. Détermination des modules de cisaillement à partir de la colonne résonnante

Afin de caractériser le comportement de module de cisaillement dans un site homogène nous présentons des résultats des échantillons provenant du site de Bussy-Saint-Georges qui ont été testés à la colonne résonnante. Trois matériaux ont été considérés, avec des contraintes de confinement allant de 60 à 100kPa.

Les figures III.1, III.2 et III. 3, montrent l'évolution de G en fonction de la distorsion $(\gamma-G)$.

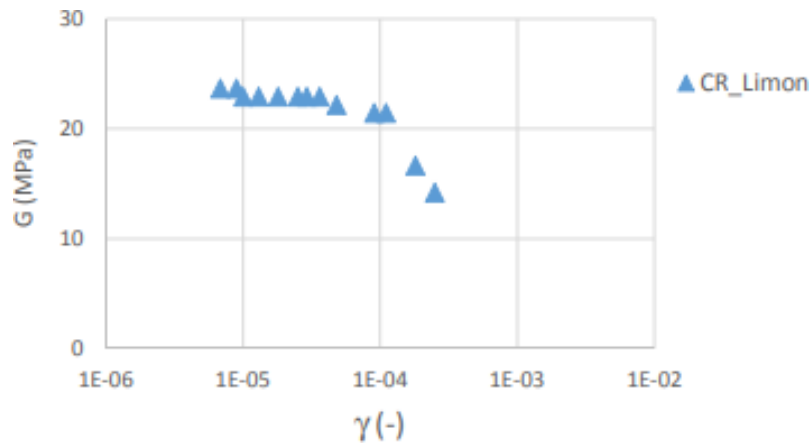


Figure III.1 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour le sol limoneux de Bussy-Saint-Georges avec un $I_p=19$ et pour un confinement effectif de 60 kPa.

Le comportement du sol limoneux soumis à des sollicitations à l'appareil de colonne résonnante (figure III.1) montre que le module G varie légèrement en petite déformation, ensuite on observe une « chute » rapide du module pour une déformation (γ) de l'ordre de 10^{-4} .

La figure III.2 présente le comportement du module de cisaillement avec la déformation (γ) pour les deux essais aux colonnes résonnantes réalisées sur le sol argileux (CR_Argile_1 et CR_Argile_2) de Bussy-Saint-Georges.

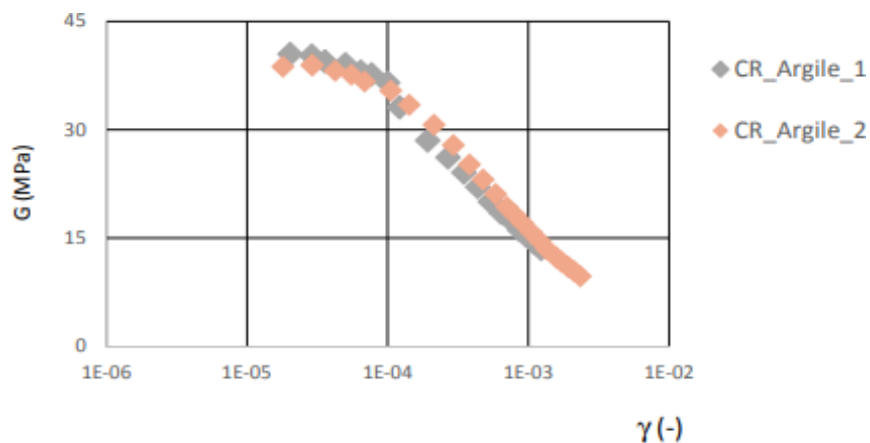


Figure III.2 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour les deux essais (Argile cr_1 et Argile cr_2) sur le sol argileux de Bussy-Saint-Georges.

La réduction du module pour le sol argileux décrite sur la figure III.2 montre des variations de G sur un intervalle de déformation allant de $0,2 \cdot 10^{-4}$ à 10^{-3} .

Les plus petites déformations enregistrées pour ce sol sont de l'ordre de $0,2 \cdot 10^{-4}$.

La figure III.3, montre les résultats obtenus pour deux essais à la colonne résonnante (CR_Sable_1 et CR_Sable_2) en termes de déformation de cisaillement (γ) et d'ordre de grandeur de module de cisaillement (G) pour les sols sableux prélevés sur le site de Bussy-Saint-George

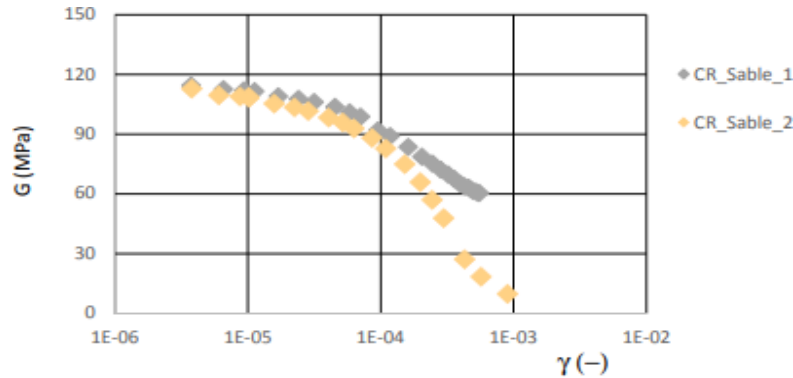


Figure III.3 : Réduction du module de cisaillement avec la déformation de cisaillement pour les deux essais sur le sol sableux de Bussy-Saint-Georges (avec un $I_p=4$).

La réduction du module pour le sol sableux (figure III.3) montre une grande variation avec l'augmentation de la déformation de cisaillement, qui s'étale sur un intervalle très large, allant des petites aux grandes déformations (10^{-6} , 10^{-3}).

On constate aussi qu'il y a différence entre le sable 1 et le sable 2, ce qui est du probablement à leur degré de saturation.

III-3. Détermination des modules de cisaillement à partir de l'essai pressiométrique

Afin de pouvoir mettre l'accent sur l'évolution du module de cisaillement avec la déformation pour les différentes profondeurs nous présentons des résultats d'un essai pressiométrique sur un site hétérogène (site Cachan).

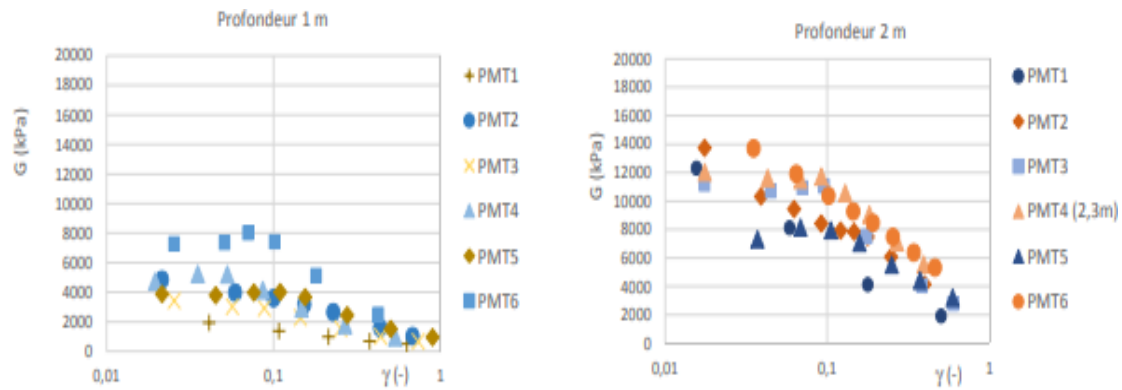


Figure III.4 Modules de cisaillement en fonction de la déformation de cisaillement pour les essais pressiométrique à 1 et 2 m de profondeur.

Les déformations générées par les essais pressiométrique sur ce site se trouvent bien dans la plage usuelle de déformations de l'essai pressiométrique. Cependant ces résultats donnés à titre d'exemple mettent en évidence une grande variation de valeurs. Ainsi pour les essais réalisés à un mètre de profondeur les valeurs initiales du module il est entre 2 MPa et 8 MPa, et entre 8 et 14 MPa pour deux mètres de profondeur.

On remarque à partir de ces résultats, que les essais à la colonne résonnante ou le pressiomètre, permettent de voir l'évolution du module de cisaillement à différents niveaux de déformation ;

Ces résultats montrent aussi que chaque essai, donne ces modules dans des plages de déformation spécifique pour chaque essai ;

Les essais montrent que les paramètres de sol ont un effet sur le comportement du sol en fonction de la distorsion.

III-4. Comparaison des résultats expérimentaux avec la courbe théorique de Darendeli

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des essais à la colonne résonnante pour les différents matériaux provenant du site de Bussy-Saint-Georges comparés aux courbes de référence (voir figure III.5), de réduction de module recommandées par Darendeli (2001).

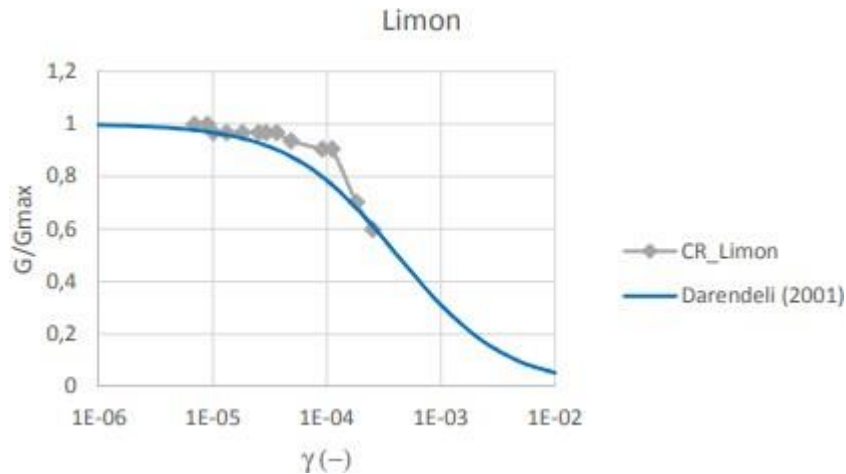


Figure III.5 : Courbe normalisée de la réduction du module de cisaillement pour le sol limoneux obtenue à la colonne résonnante.

Sur la figure III.5, nous constatons une différence de comportement en ce qui concerne les résultats de l'essai pour le sol limoneux surtout pour une déformation de l'ordre de 10^{-4} , qui précède une réduction plus rapide du module par la suite, avant de rejoindre la courbe de référence. A faibles déformations, entre $6,8 \cdot 10^{-6}$ et $1,8 \cdot 10^{-5}$, les résultats obtenus concordent avec la courbe recommandée.

La figure (III.6), présente les résultats obtenus des essais à la colonne résonnante sur les échantillons de sol argileux et la courbe normalisée de la réduction du module de cisaillement proposée par Darendeli (2001) pour les mêmes conditions de confinement effectif et le même indice de plasticité.

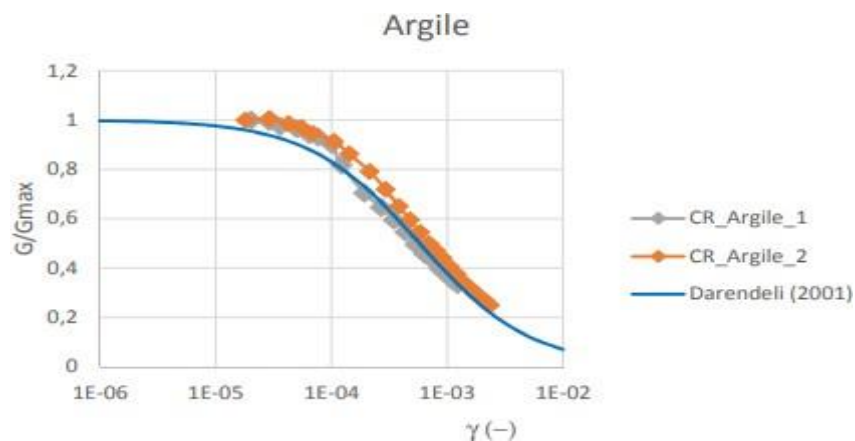


Figure III.6 : Courbes normalisées de la réduction du module de cisaillement pour le sol argileux obtenue à la colonne résonnante.

Les résultats des essais à la colonne résonnante sur les sols argileux, figure III.6, montrent une réduction plus tardive du module pour une déformation inférieure à 10^{-4} et qui semble « englober » la courbe recommandée pour des déformations supérieures à 10^{-4} . Le module

obtenu pour les deux essais (CR_Argile_1 et CR_Argile_2) est supérieur à la courbe recommandée par Darendeli (2001) pour des déformations inférieures à 10^{-4} .

La figure III.7 montre les résultats des essais à la colonne résonnante pour les échantillons de sol sableux et la courbe normalisée de la réduction du module de cisaillement pour les mêmes conditions de confinement effectif et le même indice de plasticité.

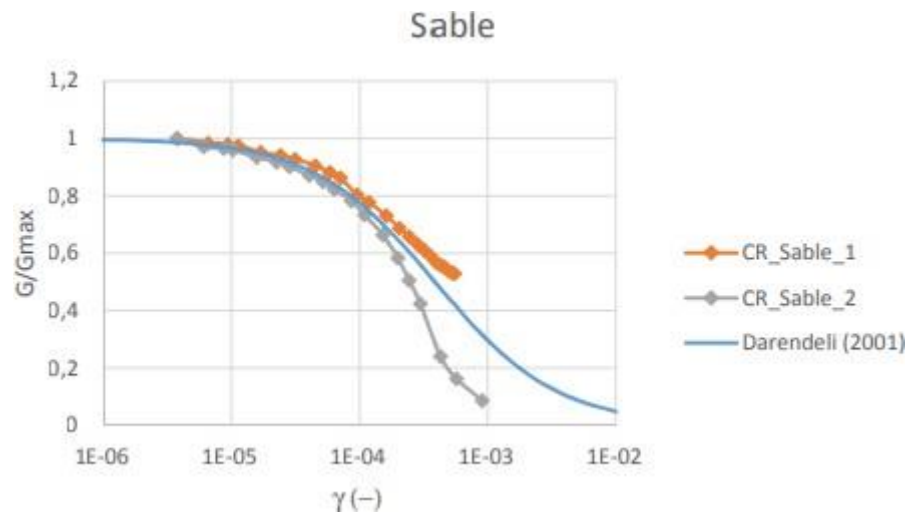


Figure III.7 : Courbes normalisées de la réduction du module de cisaillement pour le sol sableux obtenue à la colonne résonnante.

Les résultats obtenus pour le sol sableux (figure III.7) montrent une très bonne concordance avec la courbe recommandée pour des déformations inférieures à 10^{-4} , au-delà de cette valeur, on observe une différence, nous constatons toutefois que dans l'ensemble, les résultats obtenus sont cohérents avec les courbes proposées par Darendeli (2001).

III-5. Projection des modules déterminés à partir des essais sur les courbes de dégradation de G de référence

III-5-1. Sur la courbe de VUCETIC

Pour mieux comprendre le comportement des sols à différents niveaux de déformation, on présente dans ce qui suit, la variation de différentes valeurs des modules de déformation d'une argile déterminées à partir de l'oedomètre et du pressiomètre, qui seront projetés sur les courbes de dégradation de G de référence, de VUCETIC (1991) et de SEED et IDRIS (1970).

La figure (III.8), présente les résultats des essais à l'oedomètre et de prosimètre Menard pour les échantillons d'une argile provenant du site de SI AMAR ELGHAZAOUAT à ORAN sur une profondeur comprise entre 1 et 3m, comparés aux courbes de réduction de module de cisaillement recommandées par VUCETIC (1991).

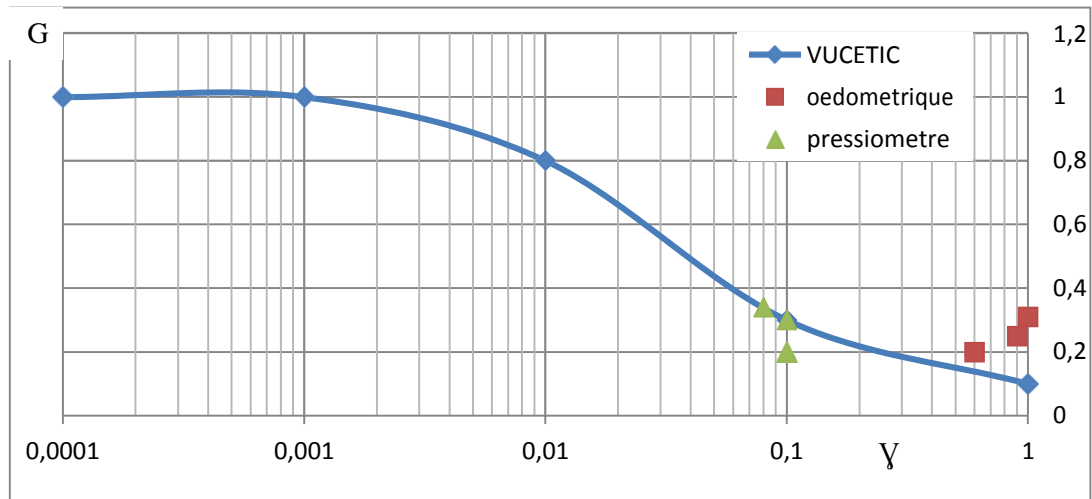


Figure III.8 : les résultats d'essais d'odomètre et d'essai pressiomètre.

Nous constatons sur la figure (III.8) que les valeurs expérimentales qui sont issue de l'essai pressiométrique semblent bien caler avec la courbe de VUCETIC (1991), par contre on observe que les résultats obtenus par l'essai œdométrique sont loin de la courbe recommandée, il faut souligner que ces résultats se trouvent dans l'intervalle de confiance « intervalle usuelle » de l'essai, cette différence peut être attribuée au montage de l'éprouvette et des dimensionnements de l'éprouvette elle-même.

III-5-2. Sur la courbe de SEED et IDRISSE

La figure (III.9), présente les résultats des essais de pénétromètre dynamique et de pressiomètre Menard pour les échantillons d'un sable provenant du site de BEJAIA à une profondeur comprise entre 1et 10m, comparés aux courbes de réduction de module de cisaillement recommandées par SEED et IDRISSE (1970).

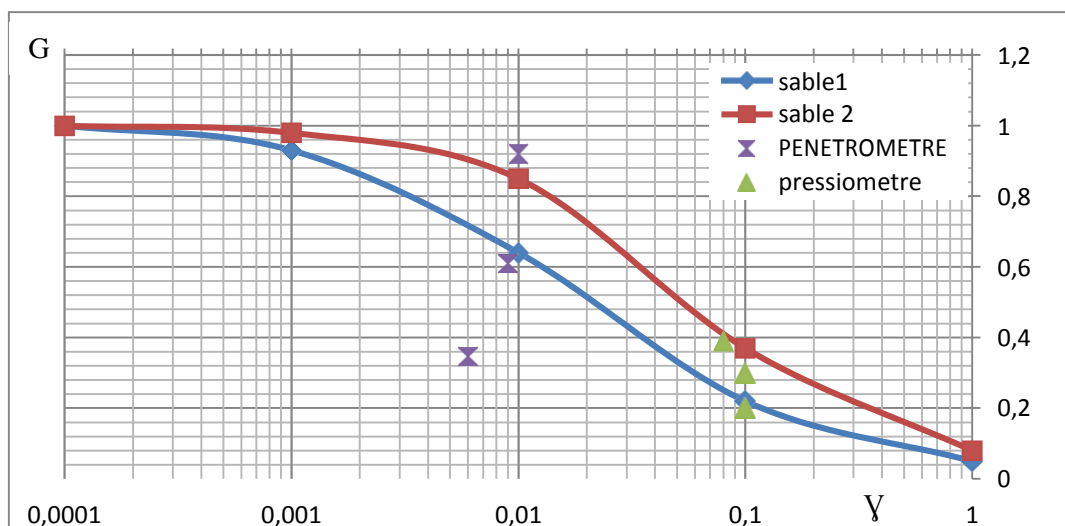


Figure III.9 : Courbes de calage de sable du site de BEJAIA sur les fuseaux de Seed et Idriss (1970) pour les sables.

Les résultats obtenus pour les sols sableux (figure 3.10) montre une très bonne concordance avec la courbe recommandée dans les différentes plages de déformation, seulement une exception était marquée dans les résultats de l'essai pénétromètre un peu loin de la courbe de (Seed, Idriss). dans l'ensemble nous constatons toutefois que les résultats sont cohérents avec le fuseau recommandé.

III- 6. Conclusion

Les essais géotechniques cités dans ce chapitre sur le site de Bussy-Saint-Georges ont permis de décrire leur comportement entre les faibles et les grandes déformations ainsi différents types d'essais sont nécessaires afin de pouvoir couvrir toute la gamme des déformations.

Les résultats obtenus montrent une diminution non linéaire du module avec la déformation

Les travaux expérimentaux ont montré que le type de sol a une influence significative sur les valeurs de module de cisaillement et le comportement de ce sol.

Plusieurs chercheurs ont essayé de décrire, la réduction de module de cisaillement en fonction de la déformation, cela a été réalisé par l'établissement de fuseaux et des courbes types pour des matériaux différents (SEED, VUCETIC, et Darendeli).

De nombreux auteurs ont cherché à modéliser la relation module - déformation par une fonction mathématique simple (Hardin et Drnevich 1972, Seed et Idriss 1970). Donc pour caractériser l'évolution de ce module, la démarche consiste à admettre une fonction de celle proposée dans la littérature qui pouvait s'appliquer au sol testé et à caler sur les modules mesurés lors d'essais c'est en fait la manière la plus simple de représenter mathématiquement la courbe en S.

Chapitre IV

Modélisation numérique avec Mohr-Coulomb et HSS

IV-1. Introduction

Avant les années 1980, la pratique de la prédiction des déformations de sol sous sollicitations d'exploitation était fondée sur l'hypothèse de l'élasticité linéaire pour représenter le comportement du sol. Dans la théorie de l'état caractéristique, qui a été utilisée avec succès pour la prédiction du comportement des sols en général, car le comportement du sol à l'intérieur de la surface de charge est supposé élastique.

Toutefois, l'évolution considérable de l'instrumentation en laboratoire et in situ a révélé que le comportement du sol (surtout surconsolidé) est fortement non linéaire et peu élastique. Au cours des deux dernières décennies, la compréhension relative du comportement de sol sous petites déformations s'est considérablement développée et il est maintenant bien connu qu'il existe une grande variété de facteurs qui affectent la rigidité du sol sous petites et grandes déformations.

La simulation numérique d'ouvrages géotechniques comme les problèmes de fondation, de stabilité de talus et de creusement des ouvrages souterrains est un problème complexe. Il présente notamment des difficultés d'ordre géométrique et géo mécanique, ce qui nécessite un outil numérique bien adapté.

Dans ce chapitre, le code de calcul des éléments finis (PLAXIS), a été utilisé pour la modélisation numérique d'une fondation superficielle, tout en utilisant deux modèles de comportement élastoplastique, avec élasticité linéaire et non linéaire.

IV-2. Présentation du code de calcul en éléments finis « PLAXIS »

PLAXIS est un code de calcul en éléments finis en deux dimensions conçu spécialement pour la réalisation des analyses de déformation et de stabilité pour les différents types d'application géotechnique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

La modélisation par Plaxis 2D consiste à subdiviser le modèle en éléments polygonaux (mailles) et de faire ensuite des calculs à partir des données introduites par l'utilisateur. La version utilisée dans ce travail est la version 2020.

IV-3. Modèles de comportement

Le code en éléments finis PLAXIS comprend des lois de comportement à différents niveaux de complexité allant de l'élasticité linéaire jusqu'à un modèle permettant de tenir compte de la raideur du sol sous très petites déformations.

Deux modèles sont utilisés dans le cadre de ce travail afin de représenter le comportement élastique linéaire parfaitement plastique et le comportement élastique non linéaire.

IV-3.1 .Le modèle de Mohr Coulomb

C'est un modèle linéaire élastique-parfaitement plastique. Il comporte 5 paramètres :

- E et ν paramètres élastiques linéaires isotropes.
- Φ et C paramètres de rupture.
- Ψ angle de dilatance

IV-3.2. Le modèle Hardening-Soil –Small

Le modèle HSS, est dérivé du modèle hyperbolique de Duncan et Chang (1970), où une amélioration a été apportée pour reprendre le comportement des sols sous les petites déformations lors de la modélisation numériques d'ouvrages géotechniques. Cette modification porte sur les formulations hyperboliques qui ont été adoptées, il s'agit de la relation de Hardin et Drenevich (1972).

Ces derniers ont construit un modèle de comportement, on se basant sur un essai de cisaillement en torsion, en mettant l'expression hyperbolique proposé par Kondner (1963) sous la forme d'une relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et la déformation de cisaillement (γ),

$$G_s/G_0 = 1 / (1 + (\gamma/\gamma_{ref}))$$

Le modèle HSS comporte 10 paramètres :

- G_0 : le module en très petites déformations $G = \rho V_s^2$
- $\gamma_{7,0}$: le niveau des déformations où le module de cisaillement est réduit à 70% de sa valeur initiale Benz(2007).
- m : un paramètre d'ajustement qui dépend du type du sol ;
- E_{50ref} : module d'Young sécant de référence, à 50% du déviateur à la rupture, sous une contrainte de confinement $\sigma_3 = p^{ref} = 100$ kPa ;
- $E_{oed^{ref}}$: Module oedométrique de référence pour $\sigma_3 = p^{ref}$;
- $E_{ur^{ref}}$: module de déchargement de référence ;
- ν_{ur} : coefficient de Poisson en chargement-déchargement ;
- c, ϕ et ψ : paramètres plastiques de Mohr-Coulomb.

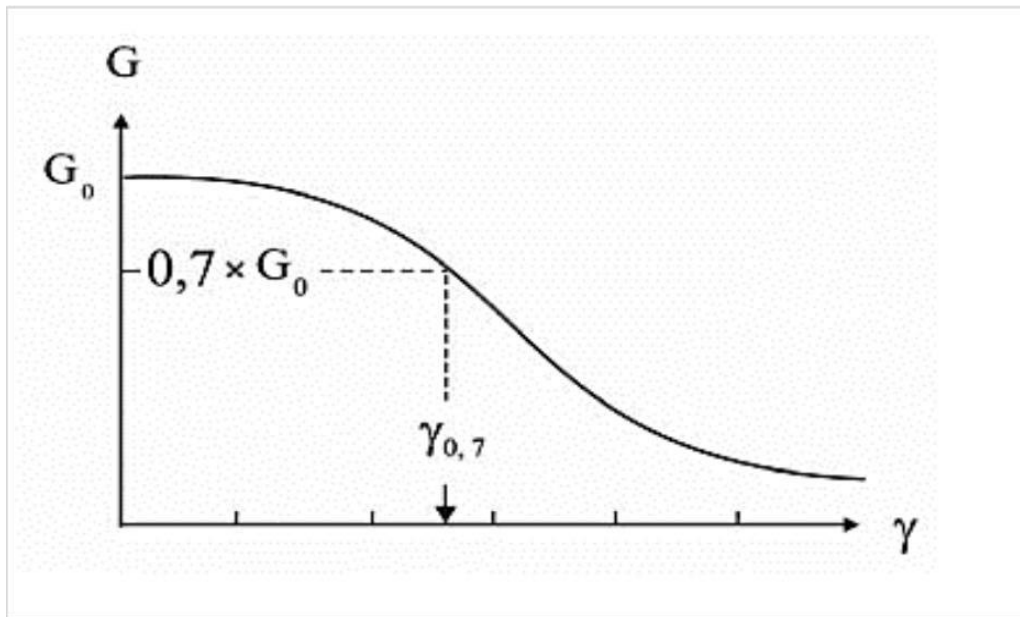


Figure IV.1 : Courbe de dégradation de G selon HSS.

IV-4. Détermination de la courbe de dégradation de module de cisaillement avec le modèle HSS

Le modèle HSS permet d'établir la courbe de réduction de G en fonction de la déformation, grâce au modèle hyperbolique de Hardin et Drenevich, où une simulation d'une couche de sol a été effectuée pour obtenir ces courbes. Deux matériaux ont été considérés, une argile et un sable limoneux, les paramètres introduits sont donnés dans le tableau suivant [IV.1]. On rappelle que les résultats des essais in situ de ces deux matériaux ont permis d'approcher les courbes théoriques de Vucetic et de Seed et Idriss, réalisé dans le chapitre III.

Tableau IV.1 : Les valeurs des différents paramètres des argiles choisies utilisés dans le modèle HS-Small.

Paramètre	E_{50} (KN/m ²)	E_{oed} (KN/m ²)	E_{ur} (KN/m ²)	G_0 (KN/m ²)
Argile caillouteuse 18-20m	45.27 ^{e3}	81.50 ^{e3}	138.8 ^{e3}	172.80 ^{e3}
Sable limon 17-18m	46.27 ^{e3}	29120	138.8 ^{e3}	1.156 ^{e6}
Argile marneuse 4-15 m	66.89 ^{e3}	82.39 ^{e3}	148.8 ^{e3}	1.2399 ^{e6}

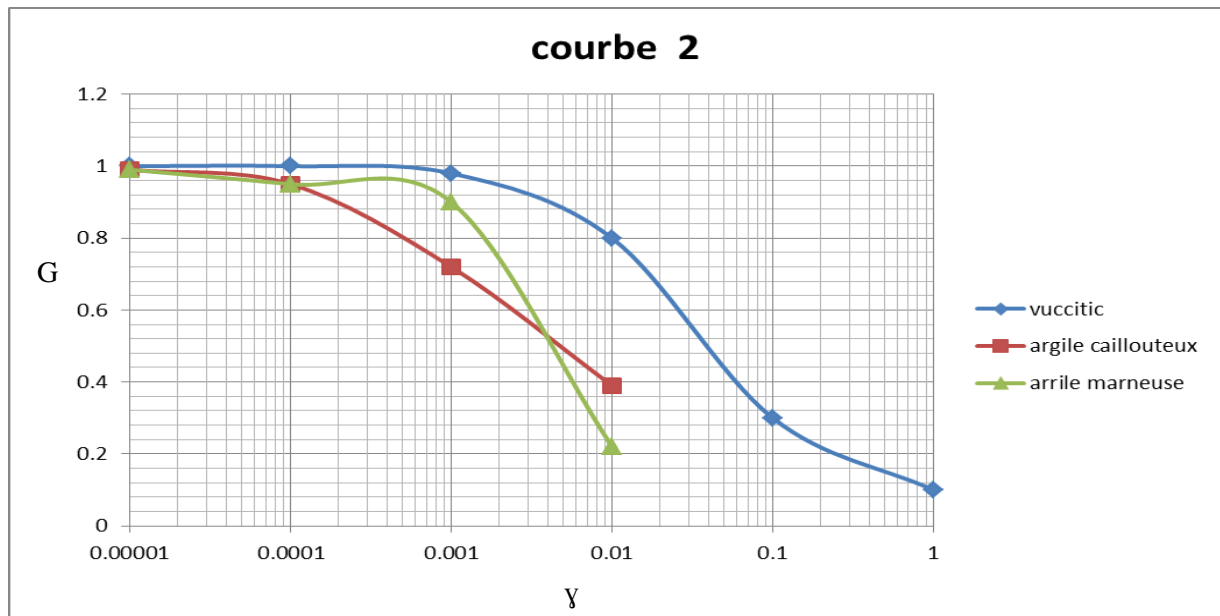


Figure IV-2 : Courbes numériques de dégradation de G en fonction de γ obtenues avec le modèle HSS (Argile).

A partir de la figure IV-2, nous constatons que les courbes de variation de G en fonction de γ obtenues en utilisant le modèle Hardening Soil small pour les deux matériaux présentent une allure qui ressemble à la courbe proposée par Vucetic (1990), où G se dégrade avec la distorsion.

On remarque aussi que la dégradation de G est presque linéaire pour des déformations inférieures à 10^{-5} , ensuite pour des déformations supérieures à 10^{-5} la courbe d'argile caillouteuse s'éloigne de la courbe de référence. Dans la plage de 10^{-5} à 10^{-4} , le module de cisaillement varie fortement, nous pouvons remarquer que le module G de l'argile caillouteuse se réduit plus rapidement que celui obtenu pour l'argile marneuse.

Au-delà d'une déformation de $3 \cdot 10^{-4}$, la courbe de G de l'argile caillouteuse se réduit plus lentement alors que celle de l'argile marneuse commence sa réduction.

La figure suivante, présente les résultats obtenus pour un sable du site d'Alger (Bab Ezzouar) compare à la courbe recommandée par Seed et Idriss(1970) :

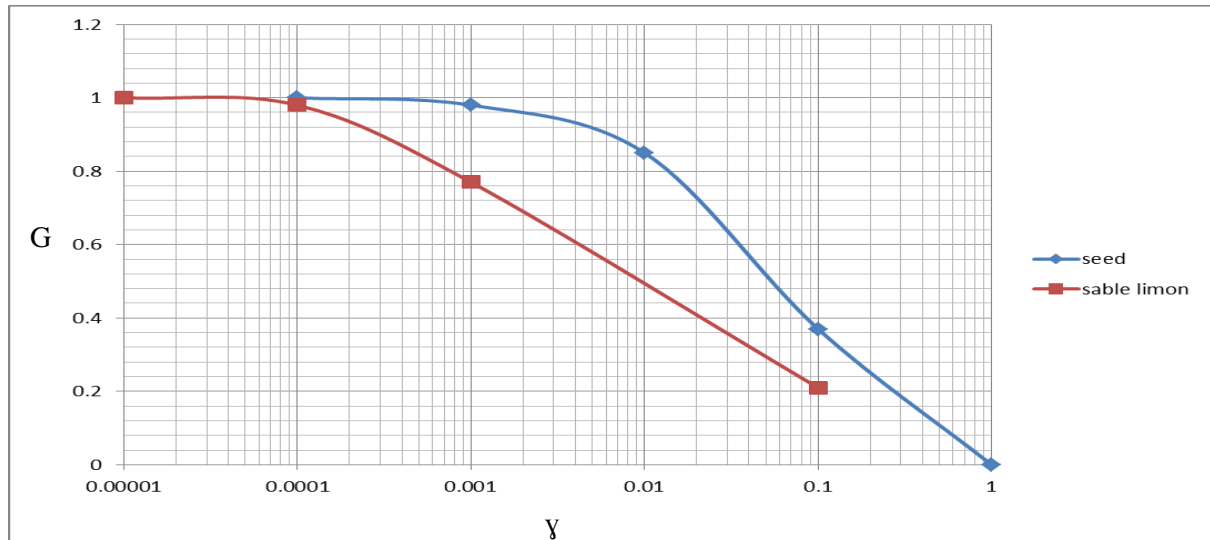


Figure IV-3 : Courbes numériques de dégradation de G en fonction de γ obtenues avec le modèle HSS (Sable).

Nous constatons de la figure IV-3 que la courbe $G=f(\gamma)$ obtenue pour le sable, en utilisant le modèle Hardening Soil small est bien calée sur la courbe proposée par Seed et Idriss pour les très petites déformations (inférieures à 10^{-5}), par la suite on remarque une chute brute de module de cisaillement jusqu'à ce qu'il s'arrête au niveau d'une déformation d'ordre 0.1, en s'éloignant de la courbe de référence.

IV-4-1. Interprétation des résultats

Les courbes de réduction de module de cisaillement en fonction de la déformation obtenues en utilisant le modèle Hardening Soil small, montrent un rapprochement de la courbe de référence, dans le domaine des petites déformations, ensuite un décalage au-delà d'une déformation d'ordre 10^{-4} .

Cela peut être expliqué par le fait que le modèle ne prend pas en considération les différents paramètres qui influencent cette courbe, comme la densité, l'indice de plasticité et bien d'autres. Cependant, on peut dire que ce modèle permet de décrire le comportement des sols dans le domaine des petites déformations.

IV-5. Modélisation numérique d'une fondation superficielle

L'objectif de cette étude est de faire une modélisation numérique d'une fondation superficielle posée sur un multicouche de sol hétérogène de 100m de longueur et de 20m de hauteur avec deux modèles de comportement différents ; Mohr coulomb et le modèle HSS.

IV-5-1. Présentation du cas d'étude

Le modèle étudié est une grille de $100 \times 20 \text{ m}^2$, composé de quatre couches de sol différentes, les conditions aux limites imposées sont ; déplacements nuls selon x et y à la base, et nuls selon x sur les deux cotés, les contraintes initiales sont calculées en fonction de k_0 .

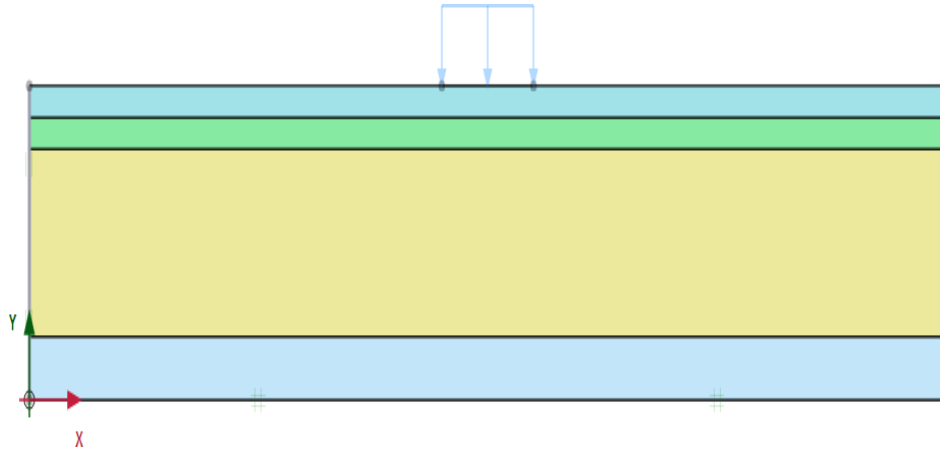


Figure IV.4 : Présentation du cas d'étude.

Les différents paramètres des quatre couches de sol, sont déterminés à partir d'essais de laboratoire et in situ réalisés sur le site d'Alger (chapitre III), les résultats ont été tirés des travaux de Saci.L. Les caractéristiques de sol en place sont indiquées sur le Tableau suivant :

Tableau IV.2 : Les valeurs des paramètres des couches de sol sous la fondation utilisés.

Sol-paramètre	Argile caillouteuse 18-20m	Sable limon 16-18m	Argile marneuse 04-16m	Limon argile -4m
$\gamma_{\text{nonsature}}$	20	22	20	22
γ_{sat}	23	24	23	25
ν	0.4	0.4	0.4	0.4
ϕ	25	15	8	26
E	4480270	1490580	7014300	510080
G	1728720	3831350	2737800	184960
E_{50}	$46.27E^3$	$46.24E^3$	$66.89E^3$	$14.4E^3$
E_{oed}	$81.50E^3$	$29.120E^3$	$82.39E^3$	$14.40E^3$
E_{ur}	$138.8E^3$	$138.8E^3$	$148.8E^3$	$28.9E^3$
$\gamma_{0.7}$	0.001	0.001	0.001	0.001
G_0	$1.068E^6$	$1.156E^6$	$1.2399E^6$	$13.354112E^4$
C	25	40	23	25

IV-5-2. Présentation des résultats numériques obtenus par PLAXIS pour les deux modèles de comportement

IV-5.2-1. Modélisation avec modèle Mohr coulomb (sans la présence de nappe d'eau)

Une fois le modèle est introduit, les valeurs des paramètres du sol sont donnés (paramètres de Mohr-Coulomb), deux phases de calculs sont exécutées, une phase initiale, sous le poids propre et une deuxième en introduisant une valeur de la charge appliquée, les résultats obtenus sont illustrés par le figures suivantes.

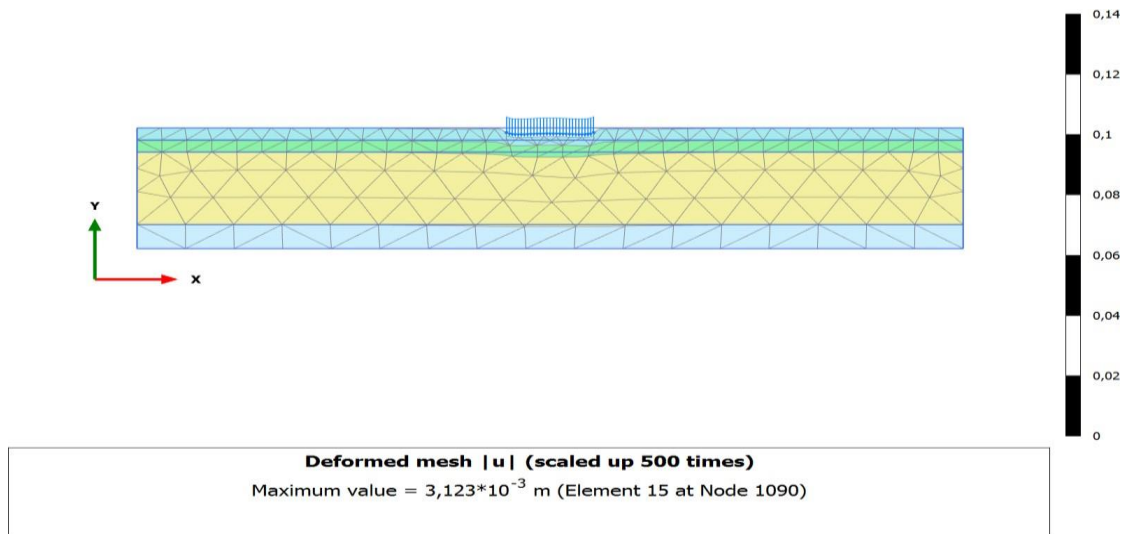


Figure IV.5 : Déformations.

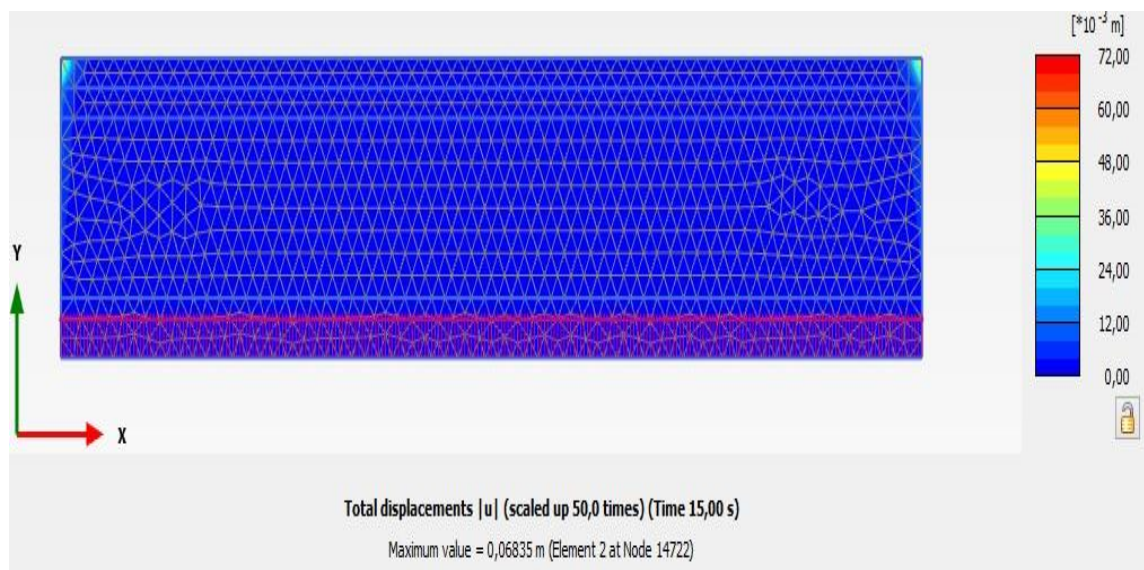


Figure IV.6. Déplacements totales.

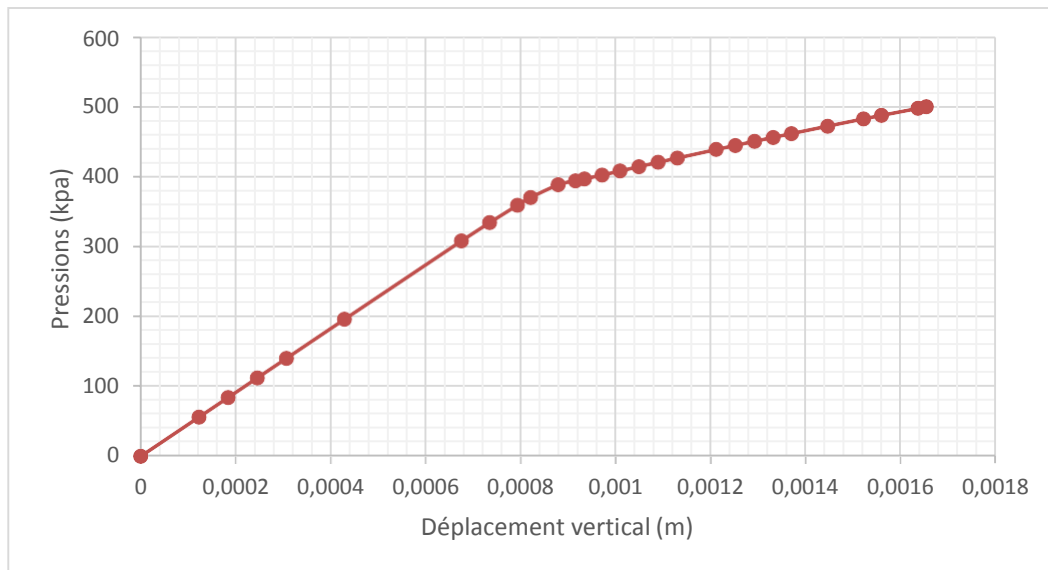


Figure IV.7 : déplacement vertical en fonction de la charge (Mohr-Coulomb).

IV-5.2-2. Modélisation avec le modèle HSS (sans la présence de nappe d'eau)

La même modélisation de la fondation a été effectuée avec le modèle HSS, sans introduction de la nappe, les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes.

Courbe de déplacement d'après le modèle HSS.

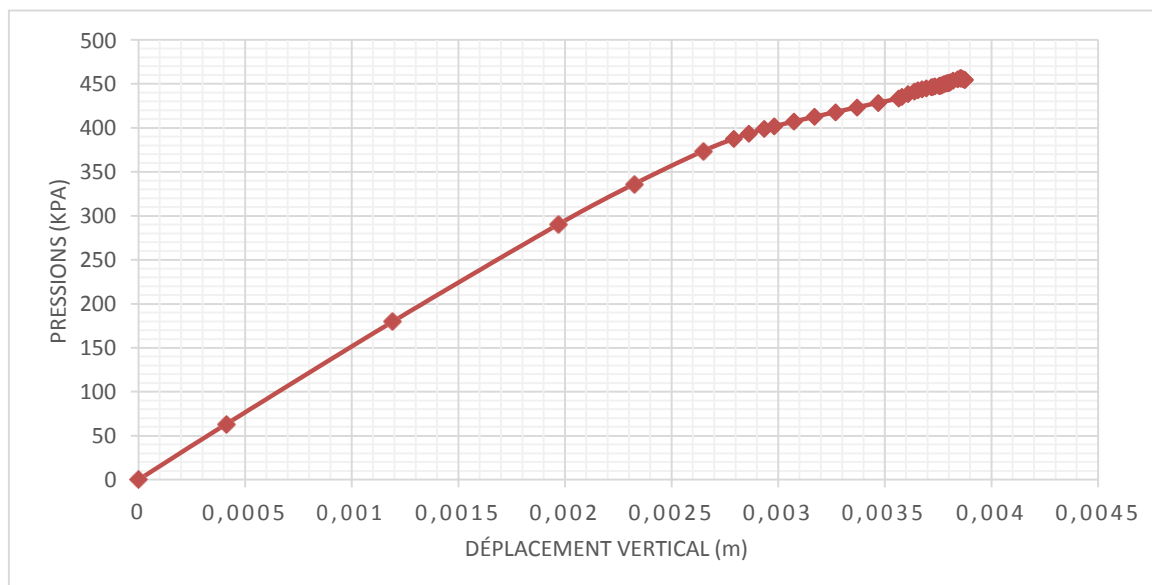


Figure IV.8 : Déplacement vertical en fonction de la charge (HSS).

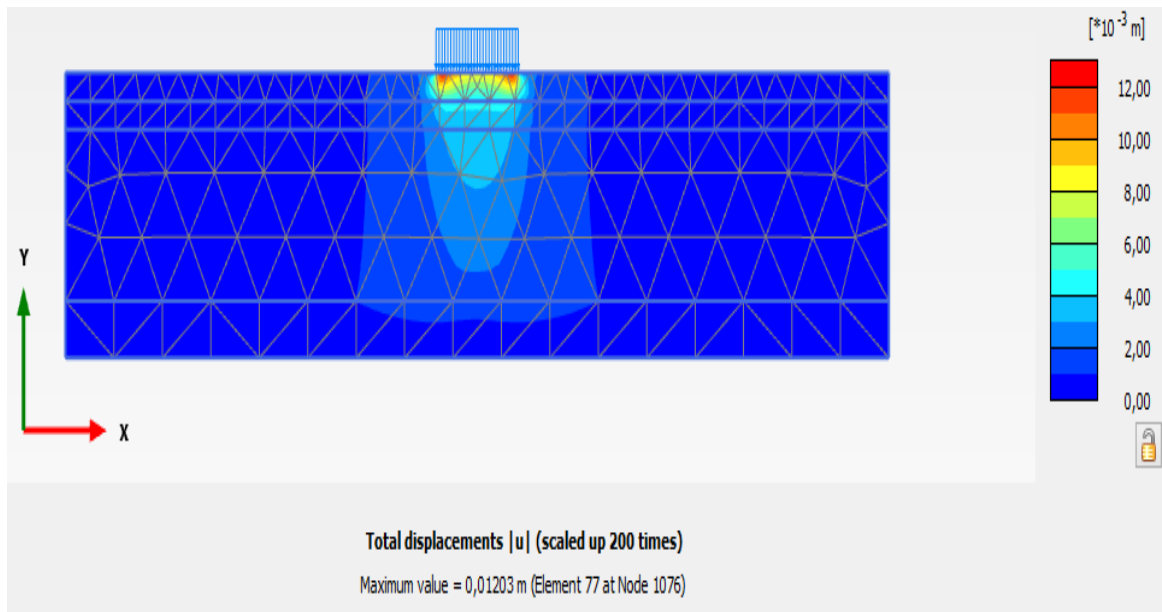


Figure IV.9 : déplacement totaux (HSS).

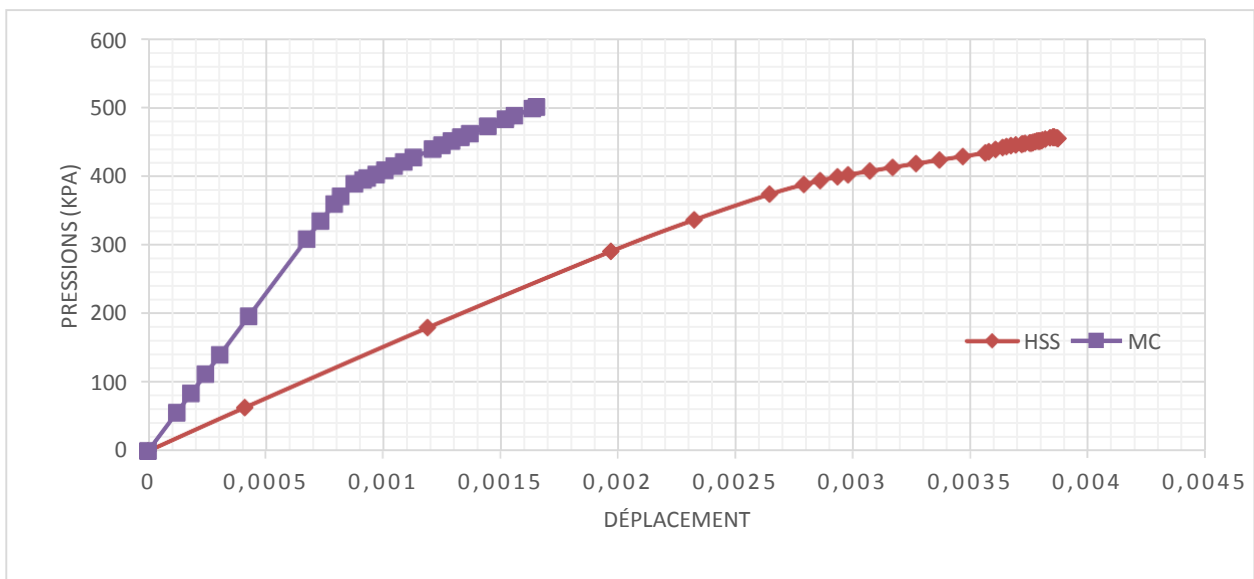


Figure IV.10 : Déplacement vertical en fonction de la charge obtenu pour les deux modèles (Mohr-Coulomb et HSS).

On remarque une grande différence de déplacement entre les deux modèles, où le déplacement selon Mohr-Coulomb atteint 1,7mm pour une charge de 500kPa, alors que pour une charge inférieure, le modèle HSS donne une valeur de 3,9 mm, on remarque aussi que le domaine élastique est très petit dans le cas de Mohr-Coulomb.

IV-5.2-3. Modélisation avec les modèles Mohr coulomb et HSS (en présence d'une nappe d'eau)

Les mêmes étapes précédentes seront suivies, mais on introduisant une nappe d'eau à 10m de profondeur (figure IV.9), les tassements obtenus pour les deux modèles sont donnés par la figure (IV.10).



Figure IV.11 : Présentation du cas d'étude en présence d'eau.

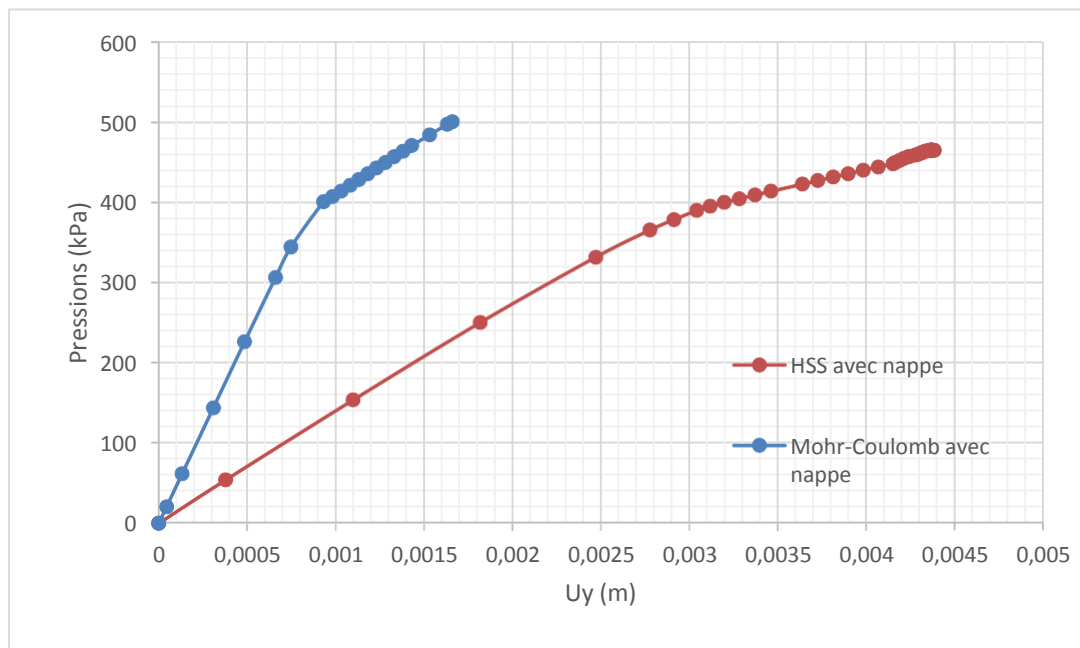


Figure IV.12 : Déplacement vertical en fonction de la charge obtenu pour les deux modèles (Mohr-Coulomb et HSS) en présence d'eau.

A partir de ces résultats, on remarque une légère variation des déplacements en présence d'eau pour le modèle HSS, où les déplacements ont augmenté de 3,9mm à 4,4mm pour la même valeur de

charge, alors qu'il n'y a aucune variation pour le modèle de Mohr-Coulomb, on constate toujours que la réponse de sol avec Mohr-Coulomb montre qu'il rentre en plasticité plus rapidement que le HSS.

Cette différence de comportement revient aux relations qui traduisent le comportement en petites déformations qui sont différentes pour les deux modèles.

Cette différence peut être expliquée aussi par le fait que chaque modèle est bien adapté pour des matériaux spécifiques.

IV-6.Conclusion

La modélisation numérique d'un ouvrage géotechnique, réalisée à l'aide d'un code de calcul aux éléments finis, est une approche simplifiée de la réalité. Les propriétés les plus importantes vis-à-vis de la prédiction des contraintes et des déformations doivent être étudiées et prises en compte lors de la modélisation d'un problème particulier.

Le problème majeur que rencontre les géotechniciens est les choix du modèle de comportement des sols ainsi que leurs paramètres, où le choix doit prendre en compte tous les facteurs qui influencent le comportement des sols, parmi ces paramètres les modules de déformation. Où l'étude menée dans ce chapitre a montré que le modèle HSS prend en considération l'aspect dégradable de G. Cependant, on remarque une grande différence entre les résultats donnés par Mohr-Coulomb et HSS, ce qui exige de prendre le modèle avec beaucoup de précautions.

Références Bibliographiques

Ali BOUAFIA. (2010). Introduction à la dynamique des sols, Tome 1, principe de base.

Claude Plumelle. (2013). Théorie et pratique de la géotechnique.

Filali Kamel. (2018). Modélisation numérique de la réponse sismique d'un sol et évaluation des effets induits, thèse de doctorat, université de Skikda.

Hassan Ali. (2010). Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piézo-cône. Application au calcul des fondations profondes, thèse de doctorat, université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand.

HEJAZI Yousef. (2010). Influence de la prise en compte des modules en petites déformations des sols sur la modélisation numérique d'ouvrages géotechniques, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées.

Melbouci Bachir. (2009). Méthode de calcul de stabilité des fondations, des talus et d'ouvrages de soutènement.

Kastriot Çami. (2017). Imagerie du module de cisaillement in situ du sol par méthodes d'ondes de surface et essais géotechniques caractérisation des petites aux grandes déformations, thèse de doctorat, université Paris-Est.

Saci LiLa. (2001). Etude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols en fonction d'essais géotechniques, mémoire de magister, UMMTO.

Sophie Coquillay. (2005). Prise en compte de la non linéarité du comportement des sols soumis à de petites déformations pour le calcul des ouvrages géotechniques, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées.

Vincent Robitaille, Denis Tremblay. (1997). Mécanique des sols, théorie et pratique.

YOUNES Ahmad. (1999). Etude à l'appareil triaxial du comportement de déformations des sols, thèse de doctorat, école universitaire d'Ingénieurs de Lille.

Conclusion générale

La résolution des problèmes de la déformabilité des sols sous les différentes sollicitations appliquées impliquent la détermination des différents modules de déformation notamment le module de cisaillement des sols.

Afin de connaître le comportement du sol, quelle que soit la sollicitation à laquelle il sera soumis, il s'avère nécessaire de connaître la variation des modules de déformabilités en fonction de la déformation.

Le module de cisaillement des sols varie très fortement entre le domaine des très petites déformations et les grandes déformations. L'expérience montre qu'on ne parvient pas à estimer correctement les déplacements des ouvrages sans prendre en compte ces variations.

Le premier chapitre, nous permet de voir les différents paramètres qui influent sur les modules de déformabilité où les différentes études effectuées ont montré l'influence de type de sol, de la densité, de la contrainte de confinement et de l'indice de plasticité sur le l'évolution du module de cisaillement. Cette étude bibliographique a permis de conclure que les modules de déformabilité (G et E) suivent une courbe de dégradation en fonction de la déformation.

Le deuxième chapitre été consacré à la détermination des modules de déformation à partir des différents essais de laboratoire et in situ, cette partie a montré que chaque essai permet la détermination de ces modules dans des plages de déformation bien précises où on a constaté que les essais dynamiques donnent les modules dans le domaine de petites déformations, alors que les essais in situ comme le pressiomètre les donnent en grandes déformations.

Dans le troisième chapitre, on a rassemblé des essais déjà réalisés à la colonne résonnante où on a constaté que le module G suit une réduction mais qui ne dépasse pas les déformations moyennes. Ensuite une projection de modules déterminés sur des sols Algériens sur des courbes $G = f(\gamma)$ a permis d'approcher les courbes de référence de Vucetic et de Seed et Idriss, ce qui permet de dire qu'on peut tracer des courbes d'évolution de module du cisaillement des sols à partir des essais in situ et des essais de laboratoire dans les différentes gamme de déformation.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique, deux modèles de comportement ont été présentés, à savoir le modèle Mohr coulomb et le modèle de Hardening Soil Small dans la simulation d'une fondation superficielle sur un sol hétérogène avec et sans la présence d'une nappe phréatique. Le modèle HSS a permis en première simulation de tracer la dégradation de G en fonction de la distorsion, même si que les résultats ne sont pas très satisfaisants.

Les résultats obtenus ont permis de voir la réponse que donne chaque modèle, ce qui laisse dire que les modèles hyperboliques doivent être utilisés avec beaucoup de précautions.

Afin de construire la courbe de réduction de module de cisaillement une description de la variation du module par plages de déformation propres à chaque essai s'impose. Ainsi, le module de cisaillement en très petites déformations et en grandes déformations peut être mesuré en laboratoire ou in situ, ainsi par les modélisations numériques en utilisant des modèles qui prennent en considération la variation de ce module en fonction de la déformation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

1. **YOUNES Ahmad.** (1999). Etude à l'appareil triaxial du comportement de déformations des sols, thèse de doctorat, école universitaire d'Ingénieurs de Lille.
2. **Filali Kamel.** (2018). Modélisation numérique de la réponse sismique d'un sol et évaluation des effets induits, thèse de doctorat, université de Skikda.
3. **Kastriot Çami.** (2017). Imagerie du module de cisaillement in situ du sol par méthodes d'ondes de surface et essais géotechniques caractérisation des petites aux grandes déformations, thèse de doctorat, université Paris-Est.
4. **Saci LiLa.** (2001). Etude de l'évolution des paramètres dynamiques des sols en fonction d'essais géotechniques, mémoire de magister, UMMTO.
5. **Hassan Ali.** (2010). Caractérisation amélioré des sols par l'essai de chargement de pointe au piézo-cône. Application au calcul des fondations profondes, thèse de doctorat, université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand.
6. **Sophie Coquillay.** (2005). Prise en compte du la non linéarité du comportement des sols soumis à de petites déformations pour le calcul des ouvrages géotechniques, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées.
7. **HEJAZI Yousef.** (2010). Influence de la prise en compte des modules en petites déformations des sols sur la modélisation numérique d'ouvrages géotechniques, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées.
8. **Ali BOUAFIA.** (2010). Introduction à la dynamique des sols, Tome 1, principe de base.
9. **Vincent Robitaille, Denis Trembly.** (1997). Mécanique des sols, théorie et pratique.
10. **Claude Plumelle.** (2013). Théorie et pratique de la géotechnique.
11. **Melbouci Bachir.** (2009). Méthode de calcul de stabilité des fondations, des talus et d'ouvrages de soutènement