

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme
de MASTER en TRAVAUX PUBLICS
Option : Matériaux & Structures

Thème

**Propagation des ondes sismiques dans un milieu
poro-élastique**

Encadré par :

Dr Y.M. MEHIAOUI HADJEBAR

Présenté par :

LANABI Housseem Eddine

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Mme Y.M. MEHIAOUI HADJEBAR, pour ses appréciations compétentes, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nous remercions vivement ma famille LANABI pour leur aide matérielle et morale durant toute la période de ma vie.

Je tiens également à exprimer mon gratitude envers tous les Enseignants et le personnel administratif de l'ENSTP qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail



بسم الله الرحمن الرحيم

DEDICACE

*Je dédie ce travail a Ma famille et
A tous ceux qui ont
contribué de loin ou de près à la
réalisation de ce mémoire.*

LANABI Houssem Eddine



SOMMAIRE

CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE

I.1.INTRODUCTION:.....	01
I.2.ORGANISATION DU RAPPORT	02

CHAPITRE II ETAT DE L'ART

II.1. INTRODUCTIONI.....	03
II.2. TRAVAUX ANTERIEURS.....	03
II.3. CONCLUSION.....	08

CHAPITRE III MODELISATION ET EQUATIONS DE BASE

III.1. INTRODUCTION.....	09
III.2. MODELISATION MACROSCOPIQUE	09
III.3. FORMULATION DES EQUATIONS DE BASE ET RESOLUTION.....	12
III.4. CONCLUSIO.....	29

CHAPITRE IV PRESENTATION DU LOGICIEL DE CALCUL

IV.1- INTRODUCTION.....	30
IV.2- PRESENTATION DU LOGICIEL	30
IV.3. CONCLUSION	34

CHAPITRE V REPOSE DYNAMIQUE D'UN DEMI-ESPACE PORO-ELASTIQUE

V.1. INTRODUCTION.....	35
V.2. EXEMPLES NUMERIQUES.....	35
V.3. CONCLUSION.....	53

CONCLUSION GENERALE

RESUME

Les problèmes de propagation des ondes sismique a travers un site donné en considérant le sol comme un milieu poreux présente un intérêt certain par rapport à la modélisation classique du sol en milieu continu.

Le travail présenté dans cette thèse consiste à utiliser un modèle poro-élastique du sol basé sur la théorie de Biot afin de procéder à une analyse paramétrique de la propagation des différents types d'ondes sismiques dans le sol. Le cas étudié est celui du semi-espace. Une résolution analytique a permis de mettre en évidence bon nombre de paramètres géophysiques et géomécaniques exerçant une certaine influence sur le comportement dynamique du sol.

ABSTRACT

the problems of propagation of seismic waves through the different layers considered the soil as a porous medium is of interest in relation to the classical model of the soil continuum.

The work presented in this thesis is to use a Poroelastic soil model based on Biot theory to conduct a parametric analysis of the spread of different types of seismic waves in the ground. The case study is that of the semi-space. An analytical solution helped highlight many geophysical and geomechanical parameters exerting some influence on the dynamic behavior of the soil.

ملخص

تعتبر مشاكل انتشار الموجات الزلزالية من خلال طبقات مختلفة في وسط مسامي مهمة للنموذج الكلاسيكي لدراسات التربة.

العمل المقدم في هذه الأطروحة هو استخدام نموذج التربة المسامية المقامة على نظرية بيوت لإجراء تحليل حدودي لانتشار أنواع مختلفة من الموجات الزلزالية في الأرض. الحالة المدروسة هي حالة نصف الفضاء. ساعد التحليلي الحسابي على تسليط الضوء على العديد من المعالم الجيوفيزيائية والجيوميكانيكية لممارسة بعض التأثير على السلوك الديناميكي للتربة.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Introduction:

Le sol constituant les différentes couches d'un site donné est, de part sa nature propre, un matériau poreux dont l'espace interstitiel est saturé par un ou plusieurs fluides (eau, air,...). Un milieu poreux saturé peut être considéré comme la superposition de deux milieux continus en interaction. L'un des deux milieux est le fluide interstitiel qui sature l'espace poreux connecté par l'intermédiaire duquel s'effectuent les échanges de masse fluide. L'autre milieu est le squelette. Celui-ci est le matériau qui serait obtenu en extrayant du milieu poreux tout le fluide interstitiel précédant. Il est ainsi constitué de la matrice et de l'espace poreux connecté vidé de son fluide.

Le problème de la propagation des ondes sismiques à travers les différentes couches constituant un site donné en considérant le sol comme milieu poreux biphasique présente un intérêt certain par rapport à la modélisation classique du sol en milieu continu à une phase.

En effet, la modélisation du sol en tant que milieux poreux a permis de mettre en évidence l'existence d'une seconde onde de compression, appelée P_2 [N° ref Biot]. Par ailleurs, la prise en compte des propriétés physico-mécaniques du fluide interstitiel ainsi que l'interaction entre la phase solide et la phase fluide, rend le schéma de propagation d'ondes, à travers le sol, beaucoup plus complexe. De ce fait, le problème de la propagation des ondes sismiques à travers les milieux poro-élastiques a suscité,

ces dernières années, un intérêt certain chez la communauté scientifique en raison de sa relation étroite avec les problèmes de liquéfaction du sol.

Dans le cadre de ce projet de master, l'intérêt est porté sur la prise en compte du caractère poreux du sol afin d'essayer d'en identifier l'apport dans les études de dynamique des sols. A cet effet, une analyse de la réponse dynamique des sols poro-élastiques a été menée pour le cas du demi-espace à travers une approche analytique basée sur une modélisation déterministe.

1.2. Organisation du rapport

Après une introduction générale donnée au chapitre I, nous résumons, dans le chapitre II, les principaux travaux menés dans le domaine de la poro-élasticité.

Dans le IIIème chapitre, nous présentons les équations de base servant à la résolution analytique du problème de propagation d'ondes dans un milieu poro-élastique.

Ensuite, nous exposons, dans le chapitre IV, le programme numérique que nous avons élaboré et utilisé pour l'étude paramétrique présentée dans le chapitre V

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale ainsi que quelques suggestions pour les travaux futurs.

CHAPITRE II

ETAT DE L'ART

2.1. Introduction:

Dans ce qui suit, sont résumés les principaux travaux menés sur la propagation d'ondes dans un milieu poro-élastique. Plusieurs méthodes de résolution, basées sur la théorie de Biot^[1], ont été proposées afin d'évaluer la réponse du sol poro-élastique à la propagation des ondes. Certaines de ces méthodes étaient purement analytiques [7,9,16,17,12,13] alors que d'autres étaient numériques faisant appel à la méthode des éléments finis [7,10,12,15,20,21], à la méthode des couches minces^[8] ou encore à la méthode des intégrales aux frontières^[22].

2.2. Travaux antérieurs

B. R. Simon, O. C. Zienkiewiz et D. K. Paul – 1984

Une formulation analytique des équations régissant la réponse transitoire d'un milieu poro-élastique a été développée^[9] mettant en évidence l'influence de la compressibilité du fluide et du solide.

Pour des conditions matérielles spécifiques créant une « compatibilité dynamique », les auteurs proposent une solution analytique exacte du problème unidimensionnel pour différents degrés de compressibilité du milieu soumis à plusieurs types de tractions surfaciques. Les résultats obtenus fournissent les caractéristiques générales

de la propagation d'ondes dans un milieu poreux et donnent un point de repère pour les solutions numériques.

O. C. Zienkiewiz et T. Shiomi – 1984

Sur la base des équations de Biot, les auteurs ont proposé plusieurs formulations [14] discrétisées du problème en procédant à des changements de variables et à des approximations relatives aux caractéristiques des deux milieux dont la compressibilité du fluide et la perméabilité du sol. Par la suite, ils ont discuté de l'efficacité de la résolution numérique du problème à travers les différentes formulations notamment dans le cas de l'excitation sismique et des problèmes de consolidation lente du sol pour lesquels deux formulations ont été utilisées. La première appelée « formulation forfaitaire » ne prend pas en compte la compressibilité du fluide et donne de bons résultats dans la plage de fréquence où se situaient les deux exemples, quant à la seconde, appelée « forme compressible » et valable pour toutes les fréquences, elle aboutit aux mêmes résultats que la première méthode mais avec l'introduction d'un léger amortissement numérique.

A. P. S. Salvadurai et R. Karpurapu – 1989

Les auteurs ont proposé de modéliser le problème avec un couplage d'éléments finis et d'éléments infinis [10]. L'intégration de Gauss-Legendre se fait avec moins de points pour les éléments infinis que pour les éléments finis. Les éléments utilisés doivent impérativement assurer la compatibilité entre les variations de pressions et celles des contraintes effectives.

Les résultats obtenus pour des fondations flexibles et rigides reposant sur un semi-espace élastique saturé, pour le cas drainé et le cas non drainé, indiquent que le maillage mixte donne d'aussi bons résultats que le maillage éléments finis par rapport à la solution analytique mais avec beaucoup moins d'éléments et de calculs numériques.

T. Nogami et M. Kazama – 1992

Les auteurs ont modélisé le phénomène en utilisant la méthode des couches minces [7]. Leurs investigations sur la réponse dynamique d'un sol poro-élastique ont indiqué qu'en cas de saturation, la présence du fluide augmente la rigidité du sol et engendre

un couplage entre les deux phases solide et liquide. Ces effets sont affectés par la vitesse de chargement et les conditions aux limites (sol drainé ou non drainé) ainsi que par la perméabilité du sol. Il est à noter que plus le mouvement du fluide est important plus l'amortissement est élevé. De plus, lorsque le sol est saturé et submergé sous le niveau de l'eau, la réponse dynamique est réduite de manière significative.

J. Tabatabaie Yazdi, S Valliappan et C. Zhao – 1994

Les auteurs ont proposé une solution analytique et une solution numérique aux éléments finis, des équations de Biot pour le cas bidimensionnel^[10]. Les solutions ont été appliquées à un sol monocouche reposant sur un substratum rocheux et supportant une fondation excitée par une charge verticale harmonique. La résolution par éléments finis donne des valeurs très proches de la solution exacte.

S. Valliappan, J. Tabatabaie Yazdi et C. Zhao – 1995

En utilisant la transformée de Fourier, les auteurs ont établi une solution analytique sur la base des équations de Biot, pour la cas bidimensionnel de propagation d'ondes dans un semi-espace saturé, soumis à une excitation verticale harmonique en surface[11].

Ils ont étudié le rôle de la compressibilité, du degré de saturation et de la perméabilité du sol, et ont trouvé que l'effet de la pression interstitielle est dominant uniquement dans le cas des sols très saturés avec des grains solides incompressibles et une faible perméabilité.

Pour le cas des sols partiellement saturés, compressibles ou très perméables, les contraintes sont principalement transmises à la partie solide et de ce fait les pressions interstitielles sont faibles.

T. Akiyoshi, X. Sun et K. Fuchida – 1998

Les auteurs ont utilisé des frontières absorbantes pour étudier le problème dans le cas isotrope et anisotrope. Afin de faciliter la résolution[1], ils ont introduit les constantes équivalentes de Lamé.

Les résultats numériques ont indiqué que les frontières absorbantes proposées sont efficaces et qu'elles permettent de bien modéliser le champ lointain.

N. Khalili, M. Yazdchi et S. Valliapan – 1999

Les auteurs ont utilisé un maillage couplé éléments finis-éléments infinis pour modéliser une couche de sol saturée, latéralement infinie, reposant sur un semi-espace imperméable.

Les résultats [6] comparés à ceux obtenus par l'utilisation d'un grand nombre d'élément finis et à ceux donnés par la résolution analytique (cas unidimensionnel), ont révélé l'efficacité du maillage couplé.

J. Bo et L. Hua – 1999

Les auteurs ont traité le cas de la réponse dynamique verticale d'un disque reposant sur un semi-espace élastique saturé et partiellement drainé^[3]. La résolution des équations est obtenue analytiquement par une nouvelle procédure dans laquelle les équations intégrales gouvernant le problème sont réduites à un système d'équations intégrales Fredholm du second ordre, en appliquant la transformée d'Abel.

J. Bo et L. Hua – 2000

En suivant la même méthodologie que pour le calcul de la réponse verticale d'un disque reposant sur un semi-espace saturé, les auteurs ont évalué^[4] l'effet lacet et ont trouvé que la différence entre le semi-espace saturé et le semi-espace élastique est inférieure à 18% et peut de ce fait légitimement négligée.

J. Yang et T. Sato – 2000

Les auteurs ont étudié l'effet du degré de saturation sur les déplacements verticaux et horizontaux d'une interface séparant un substratum rocheux d'un sol poro-élastique partiellement saturé soumis à une onde incidente SV[13]. Pour cela, ils ont développé une formulation basée sur les équations de Biot et le concept de fluide interstitiel homogène.

Pour l'exemple étudié (un sable), les déplacements de l'interface sont exprimés en fonction du degré de saturation, de l'angle d'incidence et de la fréquence d'excitation. Les résultats obtenus indiquent que même proche de 100%, le degré de saturation a une influence considérable sur les déplacements ainsi que sur le rapport de leurs amplitudes. Cette influence est fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence.

Les auteurs concluent sur l'importance de la prise en compte du degré de saturation dans les études de propagations d'ondes notamment celles basées sur les observations de champs sismiques.

J. Yang – 2000

De la même façon que dans l'étude précédente, Yang a évalué^[12] l'influence du degré de saturation sur les déplacements verticaux et horizontaux d'une interface séparant un substratum rocheux d'un sol poro-élastique partiellement saturé soumis à une onde incidente P, en fonction de l'angle d'incidence et de la fréquence d'excitation.

De même que pour les ondes *SV*, le degré de saturation exerce une certaine influence sur les déplacements. De manière générale, une saturation partielle proche des 100% engendre un rapport d'amplitude entre les déplacements horizontaux et verticaux.

M. Mehiaoui et M. Hadid – 2005

Les réponses dynamiques de sol multicouche poroélastique sont évaluées en utilisant la formulation de matrice de rigidité exacte basée sur la théorie de Biot. Le sol non linéarité est prise en compte par le modèle équivalent linéaire viscoélastique. Une étude paramétrique étudier l'effet du taux de vide et la densité relative sur la fonction d'amplification est présenté ici pour les ondes de propagation P et SV. Les résultats montrent que l'influence de la variation relative de masse volumique est beaucoup plus importante que les effets de rapport de vide. Dans le cas de deux cas linéaires et non linéaires, la réponse dynamique du multicouche profil de sol saturé semble dépendre principalement sur le degré de consolidation.

M. Mehiaoui, M. Hadid et W. Kouici – 2008

Dans cet article, la réponse dynamique d'un sol poroélastique multicouches avec des paramètres stochastiques est étudiée à travers une formulation de matrice de rigidité exacte basée sur la théorie de Biot. Le module de cisaillement ainsi que la perméabilité et le degré de saturation sont simulés par la méthode de Monte Carlo.

Alors que les modules de cisaillement suivent une distribution log-normale, les simulations de la porosité et le degré de saturation sont effectuées en utilisant une distribution bêta.

Certaines amplifications de profil du sol poroélastiques multicouche ainsi qu'une étude paramétrique sont présentés afin d'analyser l'effet des paramètres stochastiques sur la réponse du site. Les résultats montrent que les effets de module de cisaillement et la variation de degré de saturation sont aussi importants que ceux de la porosité dans le cas de l'onde l'incidence inclinée P1 ou SV.

Conclusion

La réponse dynamique du sol poro-élastique a suscité l'intérêt d'un bon nombre de chercheurs. Plusieurs méthodes de modélisation et de résolution ont été utilisées. Dans le cas de notre étude, nous avons opté pour une résolution analytique avec une approche déterministe.

CHAPITRE III

MODELISATION ET EQUATIONS DE BASE

3.1.Introduction :

L'étude de la propagation d'ondes en milieux poreux est un sujet d'importance dans de nombreux domaines en mécanique. Les premières approches théoriques traitant de la propagation d'ondes en poro-élastique d'un point de vue macroscopique ont été développées par Biot[1]. Le sol est modélisé par un milieu continu à deux phases composé d'un squelette solide poreux déformable élastique et d'une particule fluide.

3.2. Modélisation macroscopique :

Lorsque l'on aborde l'étude des milieux poreux, une des premières questions qui se pose est celle de l'échelle spatiale d'analyse : deux échelles d'espace sont en effet envisageables.

La première est l'échelle microscopique. A ce niveau, la partie solide d'une part, et la ou les parties fluides d'autre part, occupent des domaines géométriques distincts dans un volume élémentaire de milieu poreux^[23,24,26,27]. Un point géométrique se trouve donc à un instant donné dans une des phases solide ou fluides bien identifiée. Cette échelle microscopique a la dimension du pore. C'est à cette échelle qu'est écrit l'ensemble des équations mécaniques, physiques et/ou chimiques régissant les comportements des phases et les interactions entre celles-ci. C'est donc naturellement

l'échelle adaptée à la résolution des problèmes de "taille microscopique.

Dans un milieu poreux, la porosité se scinde en deux parties distinctes. D'une part, la porosité connectée correspondant à l'espace interstitiel continu, ou connecte, où s'effectue l'écoulement de la ou des phases fluides. Deux points appartenant à un même fluide sont alors reliés par un trajet interne continu. D'autre part, la porosité occluse, saturée de fluide ou non, piégée dans la matière, n'est quand à elle le lieu d'aucun écoulement fluide.

La matrice du milieu poreux est alors constituée de la partie matérielle solide du volume élémentaire et de sa porosité occluse. La porosité est dans la suite assimilée à la porosité connectée et est notée n . Elle correspond au ratio volume de l'espace connecté sur volume total élémentaire.

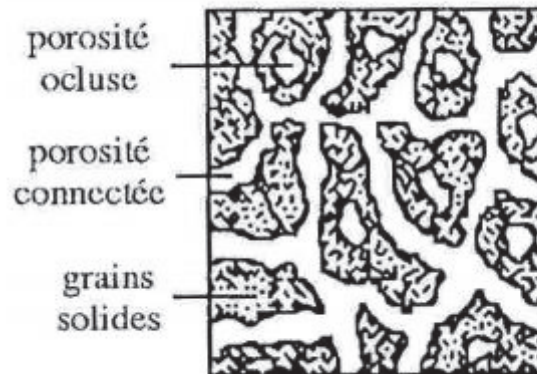


Figure 3.1 : Définitions de la matrice et des différentes porosités à l'échelle microscopique

Si un unique fluide occupe totalement l'espace poreux, alors le milieu est saturé. Notons cependant que ce fluide n'est pas nécessairement homogène, il peut présenter plusieurs composantes, un solvant et plusieurs solutés par exemple. Dans le cas où la saturation est partielle, plusieurs fluides distincts coexistent : le cas le plus courant est celui où une troisième phase de type gazeuse est prise en compte, l'air par exemple.

Plusieurs phases fluides différentes apparaissent alors dans l'étude des milieux poreux non saturés.

La seconde approche se place au niveau macroscopique. Cette échelle macroscopique est adaptée à l'étude des problèmes "à taille humaine" tels que ceux rencontrés en mécanique des sols et des structures, en géomécanique ou bien encore en sismologie.

L'étude des problèmes d'ingénierie au sens large en géosciences nécessite donc de travailler à cette échelle.

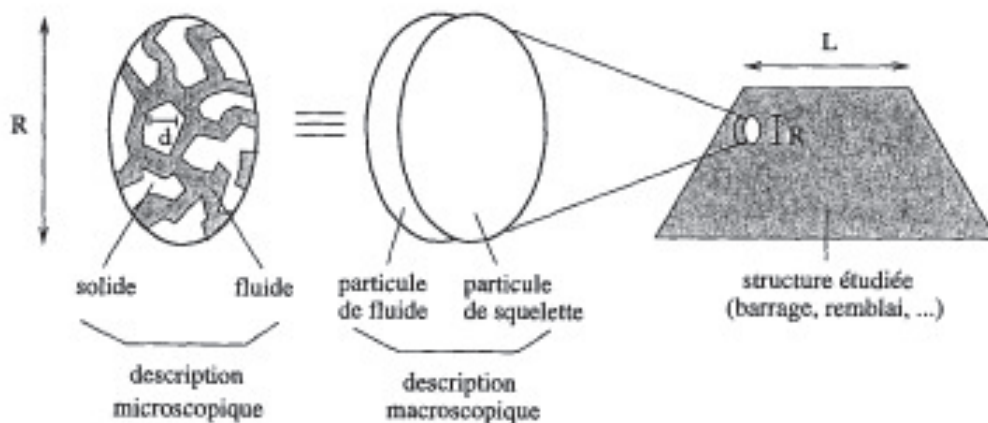


Figure 3.2 : Les différentes échelles spatiales du milieu poreux

Au niveau macroscopique, le volume élémentaire est modélisé par la superposition de plusieurs particules matérielles occupant aux mêmes instants les mêmes points géométriques mais avec des cinématiques a priori différentes.

Le choix de la taille du volume élémentaire doit répondre à deux objectifs. D'une part, il doit être représentatif du milieu poreux, et donc, il doit être d'un ordre de grandeur suffisamment grand spatialement pour fournir une modélisation pertinente de l'ensemble des phénomènes physiques microscopiques. On parle de V.E.R. pour volume élémentaire représentatif. D'autre part, son étendue spatiale doit être très inférieure à la dimension du problème macroscopique posé, permettant ainsi une description continue de la matière.

Si l'on désigne par L la taille caractéristique du système étudié, par R l'ordre de grandeur de l'étendue spatiale du volume élémentaire représentatif et par d la dimension caractéristique des pores, cf. figure 1.2, les conditions précédentes sur les différentes échelles de perception d'un milieu poreux se résument de la façon

suivante : $d \ll R \ll L$. Le milieu poreux est donc traité par une description continue de la matière, et est considéré comme un milieu continu classique mais généralise à plusieurs phases, c'est-à-dire comme une superposition de plusieurs milieux continus. Le squelette est défini macroscopiquement comme l'addition de la matrice, qui en constitue la partie matérielle, et de l'espace poreux connecté : c'est la phase solide coïncidant avec la ou les phases fluides occupant l'espace poreux connecté, cf. figure 1.3. Précisons que le milieu poreux a un caractère de milieu ouvert de par l'existence des mouvements différentiels entre les différentes phases. Les équations poro-élastiques propres et de couplage sont alors écrites pour les différentes phases moyennées solide et fluides^[23,26,27]. Notons bien que l'on ne se soucie plus ici de la géométrie réelle du milieu poreux élémentaire qui relève de l'approche microscopique.

Enfin, pour conclure, historiquement, c'est au niveau de cette échelle macroscopique que les premières études concernant les écoulements dans les milieux poreux (Darcy) et l'étude du comportement mécanique des milieux poreux (Terzaghi, Biot) ont été menées^[26,27].

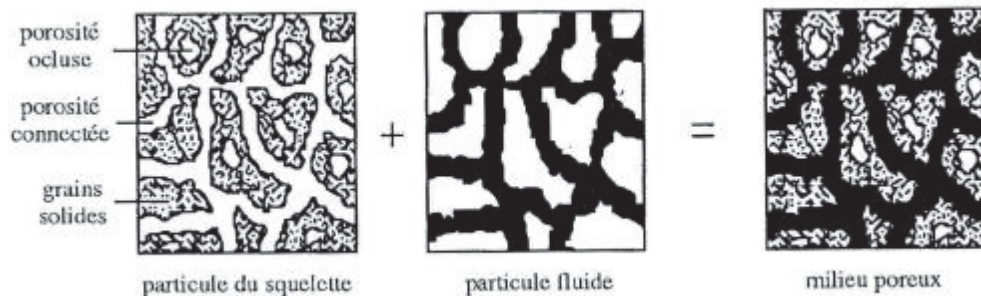


Figure 1.3 : Présentation des différentes phases du milieu poreux

3.3. Formulation des équations de base et résolution :

Dans ce qui suit, l'indice s sera utilisé pour désigner le solide et l'indice f pour désigner le fluide. On introduit le mouvement relatif du fluide par rapport au squelette solide : $w = n(U - u)$, U et u étant les déplacements du solide et du fluide et n la porosité

définie par

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.1)$$

où V_v représente le volume des vides et V_t le volume total.

3.3.1. Conservation de la quantité de mouvement

L'équilibre d'un élément de volume du milieu biphasique s'exprime par:

$$\nabla \sigma + \rho g = (1-n)\rho_s \ddot{u} + n\rho_f \ddot{U} \quad (3.2)$$

Avec

\ddot{u} : accélération du solide.

\ddot{U} : accélération du fluide.

ρ_s : masse volumique de la phase solide.

ρ_f : masse volumique de la phase fluide.

$\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$: masse volumique du mélange solide-fluide.

En introduisant l'accélération relative du fluide par rapport au solide \ddot{w} , l'équation d'équilibre devient :

$$\nabla \sigma + \rho g = (1-n)\rho_s \ddot{u} + n\rho_f \ddot{w} \quad (3.3)$$

3.3.2. Equilibre dynamique du fluide

L'équilibre du fluide sous l'action des forces de gravité et des forces d'inertie est régi par la loi de Darcy généralisée

$$-\nabla P + \rho_f g = \rho_f \ddot{U} + \frac{\rho_f g}{K} \dot{w} \quad (3.4)$$

mettant en évidence l'existence de forces résistantes visqueuses dépendant de la perméabilité cinématique K (m/s^2) du sol.

Compte tenu de la définition du mouvement relatif du fluide par rapport au solide, cette équation devient :

$$-\nabla P + \rho_f g = \rho_f \ddot{u} + \frac{\rho_f}{n} \dot{w} + \frac{\rho_f g}{K} \dot{w} \quad (3.5)$$

3.3.3. Loi de comportement

Les relations reliant les contraintes, la pression interstitielle et les déformations sont les suivantes

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} P_f \quad (3.6)$$

$$P_f = M \zeta - \alpha M e \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.8)$$

Avec

σ_{ij} : le tenseur des contraintes totales.

P_f : la pression interstitielle.

$e = \text{div } u$: les déformations volumiques associées au squelette solide

$\zeta = -\text{div } w$: l'incrément volumique du fluide.

ε_{ij} : le tenseur des déformations.

δ_{ij} : le symbole de Kronecker.

λ et μ : les coefficients de Lamé.

$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_s}$ et $M = \frac{K_s^2}{K_d - K_b}$: sont les constantes de Biot qui permettent de prendre en

compte la compressibilité des grains solides et du fluide avec K_s et K_b sont les modules d'incompressibilité des grains solides et du squelette respectivement.

$$K_d = K_s \left[1 + n \left(\frac{K_s}{K_f} - 1 \right) \right] \text{ et } K_f = \frac{1}{\frac{1}{K_w} + \frac{1 - S_r}{P_a}}$$

K_f et K_w sont les modules d'incompressibilité du fluide interstitiel et de l'eau et P_a est la pression atmosphérique.

3.3.4. Equations de mouvement

En réécrivant les équations (3.3) et (3.5) en fonction des déplacements u et w uniquement et en tenant compte des lois de comportement, on aboutit au système d'équations couplées suivant :

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) \nabla e - \alpha M \nabla \zeta = \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w} \quad (3.9)$$

$$\alpha M \nabla e - M \nabla \zeta = \rho_f \ddot{u} + \frac{\rho_f}{n} \ddot{w} + \frac{\eta}{k} \dot{w} \quad (3.10)$$

η est la viscosité du fluide et k la perméabilité en m^2 , reliée à la perméabilité cinématique par la relation :

$$k = K \frac{\eta}{\rho_f g} \quad (3.11)$$

En utilisant la décomposition de Helmholtz pour le champ de déplacement telle que

$$u = \nabla \varphi_s + \text{rot} \psi_s \quad (3.12)$$

$$w = \nabla \varphi_f + \text{rot} \psi_f \quad (3.12)$$

dans laquelle φ_s et ψ_s sont les potentiels associés à la phase solide et φ_f et ψ_f les potentiels associés à la phase fluide, les équations de mouvement (3.9) et (3.10) deviennent

$$\begin{bmatrix} \rho & \rho_f \\ \rho_f & \rho_f/n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\varphi}_s \\ \ddot{\varphi}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varphi}_s \\ \dot{\varphi}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu + \alpha^2 M & \alpha M \\ \alpha M & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla^2 & 0 \\ 0 & \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} \rho & \rho_f \\ \rho_f & \rho_f/n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\psi}_s \\ \ddot{\psi}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\psi}_s \\ \dot{\psi}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla^2 & 0 \\ 0 & \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi_s \\ \psi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

avec $b = \eta/k$

Les équations (3.13) et (3.14) représentent la propagation d'ondes de compression et de cisaillement dans le milieu poreux.

3.3.5. Vitesse de propagation des ondes sismiques

Les équations (3.13) et (3.14) décrivent la propagation d'ondes de compression et de cisaillement dans un milieu poreux. En supposant que la solution générale à ce problème s'écrit sous la forme suivante

$$\{\varphi\} = \begin{Bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_s \exp[i(\omega t - \vec{l}_p \cdot \vec{r})] \\ A_f \exp[i(\omega t - \vec{l}_p \cdot \vec{r})] \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\{\psi\} = \begin{Bmatrix} \psi_s \\ \psi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_s \exp[i(\omega t - \vec{l}_s \cdot \vec{r})] \\ B_f \exp[i(\omega t - \vec{l}_s \cdot \vec{r})] \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

avec \vec{l}_p et \vec{l}_s représentant les vecteurs d'ondes et \vec{r} le vecteur coordonnées.

En introduisant les équations (3.15) et (3.16) dans les équations de mouvement (3.13) et (3.14), on obtient les équations caractéristiques suivantes

$$\begin{vmatrix} \rho\omega^2 - (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M)l_p^2 & \rho_f\omega^2 - \alpha M l_p^2 \\ \rho_f\omega^2 - \alpha M l_p^2 & (\rho_f/n)\omega^2 - M\rho_f\omega^2 - \alpha M l_p^2 - ib\omega \end{vmatrix} = 0 \quad (3.17)$$

$$\begin{vmatrix} \rho\omega^2 - \mu l_s^2 & \rho_f\omega^2 \\ \rho_f\omega^2 & (\rho_f/n)\omega^2 - ib\omega \end{vmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

La résolution de ce système d'équations met en évidence l'existence de trois types d'ondes dans le milieu poreux, à savoir deux ondes de compression P1 et P2 et une

onde de cisaillement S.

Ainsi, a partir de la relation (3.18), l'expression de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement est

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu(ibn - \omega\rho_f)}{\omega(\rho_f^2 n - \rho\rho_f) + i\rho bn}} \quad (3.19)$$

Avec $\rho = \rho_s(1-n) + \rho_f n$

Pour ce qui est des vitesses de propagation des ondes P_1 et P_2 , leur détermination passe par la résolution de l'équation suivante du quatrième degré

$$l_p^4 [M(\lambda + 2\mu)] + l_p^2 \left[M\omega^2 (2\rho_f \alpha - \rho) + (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) \left(ib\omega - \frac{\rho_f}{n} \omega^2 \right) \right] + \omega^4 \left(\rho \frac{\rho_f}{n} - \rho_f^2 \right) - ib\rho\omega^3 = 0 \quad (3.20)$$

Ces ondes sont dispersives. Les vitesses de propagation associées à chacune d'elles sont fonction de la fréquence d'excitation et des propriétés du milieu considéré.

A partir des mêmes équations caractéristiques, il est possible de tirer les rapports entre les amplitudes des potentiels associés aux mouvements du solide et ceux associés aux mouvements de fluide.

$$\left[\rho\omega^2 - (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) l_p^2 \right] A_s + \left[\rho_f \omega^2 - \alpha M l_p^2 \right] A_f = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{(\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) l_p^2 - \rho\omega^2}{\rho_f \omega^2 - \alpha M l_p^2} \quad (3.22)$$

et

$$\left[\rho\omega^2 - \mu l_s^2 \right] B_s + \left[\rho_f \omega^2 \right] B_f = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{B_s}{B_f} = \frac{\mu l_s^2 - \rho\omega^2}{\left[\rho_f \omega^2 \right]} \quad (3.24)$$

3.3.6. Formulation des déplacements :

Dans le cas d'une propagation d'ondes incidentes inclinées $P_1 ; P_2$ ou SV dans un milieu poro-élastique, quatre potentiels satisfèront l'équation du mouvement. Le déplacement et la contrainte peuvent être exprimés en fonction de ces quatre potentiels $\varphi_s, \varphi_f, \Psi_s$ et Ψ_f .^[26,27]

Les déplacements suivant la direction des axes Ox et Oz sont fonction du type d'onde incidente générée au niveau de la source (P_1, P_2 ou SV).

Les potentiels de l'onde incidente P_1 (ou P_2 ou SV) dans la couche j sont donnés par

$$\varphi_s = \varphi_{s1} + \varphi_{s2} = [A_{11} e^{-iq_1z} + A_{21} e^{-iq_2z} + A_{12} e^{iq_1z} + A_{22} e^{iq_2z}] e^{-ipx} e^{i\omega t} \quad (3.25)$$

$$\varphi_f = \varphi_{f1} + \varphi_{f2} = [\delta_1 A_{11} e^{-iq_1z} + \delta_2 A_{21} e^{-iq_2z} + \delta_1 A_{12} e^{iq_1z} + \delta_2 A_{22} e^{iq_2z}] e^{-ipx} e^{i\omega t} \quad (3.26)$$

$$\psi_s = \psi_{s1} + \psi_{s2} = [B_{s1} e^{-iq_3z} + B_{s2} e^{iq_3z}] e^{-ipx} e^{i\omega t} \quad (3.27)$$

$$\psi_f = \psi_{f1} + \psi_{f2} = [B_{s1} e^{-iq_3z} + B_{s2} e^{iq_3z}] \delta_3 e^{-ipx} e^{i\omega t} \quad (3.28)$$

L'indice j est omis pour ne pas encombrer l'écriture des deux formules, $\varphi_{s1}, \varphi_{f1}, \psi_{s1}$ et ψ_{f1} représentent les ondes réfractées, $\varphi_{s2}, \varphi_{f2}, \psi_{s2}$ et ψ_{f2} représentent les ondes réfléchies, et

$$q_1 = k_1 \cos \phi_1 \quad (3.29)$$

$$q_2 = k_2 \cos \phi_2 \quad (3.30)$$

$$q_3 = k_3 \cos \phi_3 \quad (3.31)$$

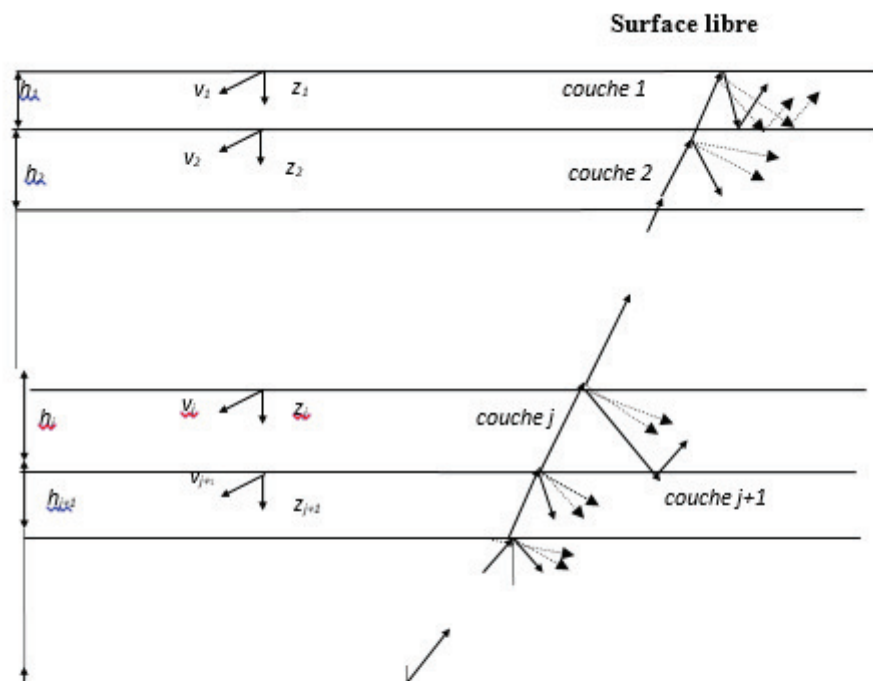


Figure 3.4: Réfraction et réflexion des ondes SV incidentes dans un profil de sol multicouches

k_1 , k_2 et k_3 sont les nombres d'ondes associés aux ondes P_1 , P_2 et SV , respectivement donnés par

$$k_1 = \frac{\omega}{v_{p1}}, k_2 = \frac{\omega}{v_{p2}}, k_3 = \frac{\omega}{v_s} \quad (3.32)$$

La loi de Snell donne

$$p = k_i \sin \phi_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.33)$$

δ_1 , δ_2 et δ_3 sont les rapports entre les amplitudes tels que (voir équations 3.23 et 3.24)

$$\delta_1 = \frac{l_{p1}^2 (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) - \rho \omega^2}{\rho_f \omega^2 - \alpha M l_{p1}^2} \quad (3.34)$$

$$\delta_2 = \frac{l_{p2}^2 (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) - \rho \omega^2}{\rho_f \omega^2 - \alpha M l_{p2}^2} \quad (3.35)$$

$$\delta_3 = \frac{l_s^2 (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) - \rho \omega^2}{\rho_f \omega^2 - \alpha M l_s^2} \quad (3.36)$$

et

$$l_i^2 = p^2 + q_i^2 \quad i = 1, 2 \quad (3.37)$$

$$l_s^2 = p^2 + q_3^2 \quad (3.38)$$

En omettant le facteur $e^{i(-px+\alpha x)}$, les équations (3.1) à (3.4) s'écriront

$$\varphi_s = \varphi_{s1} + \varphi_{s2} = [A_{11} e^{-iq_1 z} + A_{21} e^{-iq_2 z} + A_{12} e^{iq_1 z} + A_{22} e^{iq_2 z}] \quad (3.39)$$

$$\varphi_f = \varphi_{f1} + \varphi_{f2} = [\delta_1 A_{11} e^{-iq_1 z} + \delta_2 A_{21} e^{-iq_2 z} + \delta_1 A_{12} e^{iq_1 z} + \delta_2 A_{22} e^{iq_2 z}] \quad (3.40)$$

$$\psi_s = \psi_{s1} + \psi_{s2} = [B_{s1} e^{-iq_3 z} + B_{s2} e^{iq_3 z}] \quad (3.41)$$

$$\psi_f = \psi_{f1} + \psi_{f2} = [B_{s1} e^{-iq_3 z} + B_{s2} e^{iq_3 z}] \delta_3 \quad (3.42)$$

A partir des équations (3.25-3.28), nous obtenons

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial x} = -ip \varphi_s \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial x} = -ip \psi_s \quad (3.44)$$

En utilisant les équations (3.39), (3.40), (3.41) et (3.42), les composantes u et w du déplacement sont données par

$$u_x = \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} - \frac{\partial \psi_s}{\partial z} = -ip \varphi_s - \frac{\partial \psi_s}{\partial z}$$

$$u_x = -ip(A_{11} + A_{12}) \cos q_1 z - p(A_{11} - A_{12}) \sin q_1 z \quad (3.45)$$

$$-ip(A_{21} + A_{22}) \cos q_2 z - p(A_{21} - A_{22}) \sin q_2 z$$

$$-q_3(B_{s1} + B_{s2}) \sin q_3 z - iq_3(B_{s1} - B_{s2}) \cos q_3 z$$

et

$$u_z = \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} + \frac{\partial \psi_s}{\partial z} = -ip \varphi_s + \frac{\partial \psi_s}{\partial z}$$

$$u_z = -q_1(A_{11} + A_{12}) \sin q_1 z - iq_1(A_{11} - A_{12}) \cos q_1 z \quad (3.46)$$

$$-q_2(A_{22} + A_{21}) \sin q_2 z - iq_2(A_{21} - A_{22}) \cos q_2 z$$

$$-ip(B_{s1} + B_{s2}) \cos q_3 z - p(B_{s1} - B_{s2}) \sin q_3 z$$

$$w_z = \frac{\partial \varphi_f}{\partial x} + \frac{\partial \psi_f}{\partial z} = -ip\varphi_f + \frac{\partial \psi_f}{\partial z}$$

$$w_z = -\delta_1 q_1 (A_{11} + A_{12}) \sin q_1 z - i\delta_1 q_1 (A_{11} - A_{12}) \cos q_1 z \quad (3.47)$$

$$- \delta_2 q_2 (A_{22} + A_{21}) \sin q_2 z - i\delta_2 q_2 (A_{21} - A_{22}) \cos q_2 z$$

$$- i\delta_3 p (B_{s1} + B_{s2}) \cos q_3 z - p\delta_3 (B_{s1} - B_{s2}) \sin q_3 z$$

Les contraintes de cisaillement sont données par

$$\sigma_{zz} = (\lambda + \alpha^2 M) \nabla^2 \varphi_s + 2\mu \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial z \partial x} + \alpha M \nabla^2 \varphi_f$$

$$\sigma_{zz} = -(A_{11} + A_{12}) \cos q_1 z [l_1^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_1) + 2\mu q_1^2]$$

$$+ (A_{11} - A_{12}) i \sin q_1 z [l_1^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_1) + 2\mu q_1^2]$$

$$- (A_{21} + A_{22}) \cos q_2 z [l_2^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_2) + 2\mu q_2^2]$$

$$+ (A_{21} - A_{22}) i \sin q_2 z [l_2^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_2) + 2\mu q_2^2]$$

$$+ 2\mu i p q_3 \sin q_3 z (B_{s1} + B_{s2}) - 2\mu p q_3 \cos q_3 z (B_{s1} - B_{s2}) \quad (3.48)$$

$$\tau_{xz} = 2\mu \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial z \partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \psi_s}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_s}{\partial z^2} \right)$$

$$\tau_{xz} = i2\mu p q_1 \sin q_1 z (A_{11} + A_{12}) - 2\mu p q_1 \cos q_1 z (A_{11} - A_{12}) + \quad (3.49)$$

$$i2\mu p q_2 \sin q_2 z (A_{21} + A_{22}) - 2\mu p q_2 \cos q_2 z (A_{21} - A_{22}) +$$

$$\mu (q_3^2 - p^2) \cos q_3 z (B_{s1} + B_{s2}) - i\mu (q_3^2 - p^2) \sin q_3 z (B_{s1} - B_{s2})$$

$$P_f = M (\nabla^2 \varphi_f + \alpha \nabla^2 \varphi_s)$$

$$P_f = -(\delta_1 + \alpha) M l_1^2 \cos q_1 z (A_{11} + A_{12}) + i(\delta_1 + \alpha) M l_1^2 \sin q_1 z (A_{11} - A_{12}) + \quad (3.50)$$

$$-(\delta_2 + \alpha) M l_2^2 \cos q_2 z (A_{21} + A_{22}) + (\delta_2 + \alpha) M l_2^2 \sin q_2 z (A_{21} - A_{22})$$

Les déplacements et les contraintes au bas de la couche j , c-à-d, à $z_j = h_j$ peuvent être

écrits sous la forme matricielle suivante

$$\begin{pmatrix} u_x(h_j) \\ u_z(h_j) \\ w_z(h_j) \\ Pf(h_j) \\ \tau_{xz}(h_j) \\ \sigma_{zz}(h_j) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -ipC_{p_1} & -pS_{p_1} & -ipC_{p_2} & -pS_{p_2} & -q_3S_s & -iq_3C_s \\ -q_1S_{p_1} & -iq_1C_{p_1} & -q_2S_{p_2} & -iq_2C_{p_2} & -ipC_s & -pS_s \\ -\delta_1q_1S_{p_1} & -\delta_1iq_1C_{p_1} & -\delta_2q_2S_{p_2} & -\delta_2iq_2C_{p_2} & -\delta_3ipC_s & -\delta_3pS_s \\ -l_1^2D_1C_{p_1} & il_1^2D_1S_{p_1} & -l_2^2D_2C_{p_2} & il_2^2D_2S_{p_2} & 0 & 0 \\ 2iN_1S_{p_1} & -2N_1C_{p_1} & 2iN_2S_{p_2} & -2N_2C_{p_2} & N_4C_s & -iN_4S_s \\ -H_1C_{p_1} & iH_1S_{p_1} & -H_2C_{p_2} & iH_2S_{p_2} & 2iN_3S_s & -2N_3C_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

où

$$C_p = \cos(k_{pz}h_j), \quad C_s = \cos(k_{sz}h_j) \quad (3.52a)$$

$$S_p = \sin(k_{pz}h_j), \quad S_s = \sin(k_{sz}h_j) \quad (3.52b)$$

$$\zeta = \rho c_s^2 (k^2 - k_{sz}^2), \quad \xi = 2\rho c_s^2 k \quad (3.52c)$$

$$D_1 = (\delta_1 + \alpha)M, \quad D_2 = (\delta_2 + \alpha)M \quad (3.52d)$$

$$N_1 = \mu p q_1, \quad N_2 = \mu p q_2, \quad N_3 = \mu p q_3, \quad N_4 = \mu (q_3^2 - p^2) \quad (3.52e)$$

$$H_1 = l_1^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_1) + 2q_1^2 \mu, \quad H_2 = l_2^2 (\lambda + \alpha^2 M + \alpha M \delta_2) + 2q_2^2 \mu \quad (3.52f)$$

Cette matrice peut être notée par

$$\mathbf{X}_j(h_j) = \mathbf{J}_j(h_j) \mathbf{Y}_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.53)$$

Avec

$\mathbf{X}(H_j)_j$: le vecteur contrainte - déplacement

\mathbf{Y}_j : le vecteur potentiel

$\mathbf{J}(H_j)_j$: la matrice de propagation qui est évaluée à partir des propriétés de chaque couche j , en effet pour $z = z_j$ on écrit

$$\mathbf{X}_j(z_j) = \mathbf{J}_j(z_j) \mathbf{Y}_j \quad 0 \leq z_j \leq h_j \quad (3.54)$$

Les conditions aux limites aux interfaces entre la couche j et la couche $j-1$ donnent

$$\mathbf{X}_{j-1}(h_{j-1}) = \mathbf{X}_j(0) = \mathbf{J}_j(0) \mathbf{Y}_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.55)$$

$\mathbf{J}(0)_j$ est obtenue en remplaçant $h_j = 0$ dans les équations de $C_p, C_s, S_p, S_s, \zeta, \xi$ et le vecteur contrainte déplacement sera écrit comme suit

$$\begin{Bmatrix} u_x(h_{j-1}) \\ u_z(h_{j-1}) \\ w_z(h_{j-1}) \\ P_f(h_{j-1}) \\ \tau_{xz}(h_{j-1}) \\ \sigma_z(h_{j-1}) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -ip & 0 & -ip & 0 & 0 & iq_3 \\ 0 & -iq_1 & 0 & -iq_2 & -p & 0 \\ 0 & -\delta_1 iq_1 & 0 & -\delta_2 iq_2 & -i\delta_3 p & 0 \\ -l_1^2 D_1 & 0 & -l_2^2 D_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2N_1 & 0 & -2N_2 & N_4 & 0 \\ -H_1 & 0 & -H_2 & 0 & 0 & -2N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{Bmatrix} \quad (3.56)$$

Donc

$$\begin{Bmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{Bmatrix}_j = \mathbf{J}_j^{-1}(0) \begin{Bmatrix} u_x(h_{j-1}) \\ u_z(h_{j-1}) \\ w_z(h_{j-1}) \\ P_f(h_{j-1}) \\ \tau_{xz}(h_{j-1}) \\ \sigma_z(h_{j-1}) \end{Bmatrix}_{j-1} \quad (3.57)$$

$$\mathbf{Y}_j = \mathbf{J}_j^{-1}(0) \mathbf{X}_{j-1}(h_{j-1}) \quad j = 1, 2, \dots, n+1 \quad (3.58)$$

En substituant l'équation (3.34) dans (3.29), on obtient

$$\mathbf{X}_j(h_j) = \mathbf{a}_j \mathbf{X}_{j-1}(h_{j-1}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.59)$$

avec

$$\mathbf{a}_j = \mathbf{J}_j(h_j) \mathbf{J}_j^{-1}(0) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.60)$$

Par récurrence, en appliquant l'équation (3.35), le vecteur déplacement-contrainte de la couche j est lié à celui de la surface libre à travers la relation suivante

$$\mathbf{X}_j(h_j) = \mathbf{a}_j \mathbf{a}_{j-1} \dots \mathbf{a}_1 \mathbf{X}_1(0) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.61)$$

$\mathbf{X}_1(0)$ est le vecteur déplacement contrainte à la surface libre, donné par

$$X_1(0) = \begin{Bmatrix} u_{x0} \\ u_{z0} \\ w_{z0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.62)$$

u_{x0} , u_{z0} et w_{z0} sont respectivement les déplacements horizontal et vertical du solide et le déplacement vertical du fluide à la surface libre. A partir des équations (3.31) et (3.38) pour $j=n$, le vecteur déplacement-contrainte au sommet du demi-espace est donné par

$$X_{n+1}(0) = X_n(h_n) = \mathbf{a}_n \mathbf{a}_{n-1} \dots \mathbf{a}_1 X_1(0) = \bar{\mathbf{A}} X_1(0) \quad (3.63)$$

A partir de l'équation (3.39), nous avons

$$\begin{cases} u_{xn} = \bar{A}_{11} u_{x0} + \bar{A}_{12} u_{z0} + \bar{A}_{13} w_{z0} \\ u_{zn} = \bar{A}_{21} u_{x0} + \bar{A}_{22} u_{z0} + \bar{A}_{23} w_{z0} \\ w_{zn} = \bar{A}_{31} u_{x0} + \bar{A}_{32} u_{z0} + \bar{A}_{33} w_{z0} \end{cases} \quad (3.64)$$

u_{x0} , u_{z0} et w_{z0} sont les déplacements horizontaux et verticaux de l'interface entre l'espace semi- infini et la couche n .

De là, on remarque que les déplacements u_{x0} , u_{z0} et w_{z0} sont couplés. Les coefficients de l'équation (3.40) dépendent de l'angle d'incidence des ondes P_1 , P_2 et SV .

Le vecteur potentiel Y_{n+1} dans le demi-espace est lié au vecteur déplacement-contrainte $X_n(h_n)$ au sommet du demi-espace par l'équation (3.33), d'où

$$Y_{n+1} = \mathbf{J}_{n+1}^{-1}(0) X_n(h_n) \quad (3.65)$$

où

$$Y_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11}^{n+1} + A_{12}^{n+1} \\ A_{11}^{n+1} - A_{12}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} + A_{22}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} - A_{22}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} + B_{s2}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} - B_{s2}^{n+1} \end{Bmatrix} \quad (3.66)$$

A_{ij}^{n+1} et B_{ij}^{n+1} , $i, j = 1-2$ sont les amplitudes des potentiels au niveau de l'espace semi-infini. En substituant l'équation (3.39) dans l'équation (3.41) on obtient

$$Y_{n+1} = \bar{B} X_I(0) \quad (3.67)$$

Où la matrice \bar{B} est donnée par

$$\bar{B} = J_{n+1}^{-1}(0) \bar{A} \quad (3.68)$$

En utilisant les équations (3.43) et (3.44), on définit

$$\begin{cases} A_{11}^{n+1} + A_{12}^{n+1} = \bar{B}_{11} u_{x0} + \bar{B}_{12} u_{z0} + \bar{B}_{13} w_{z0} \\ A_{11}^{n+1} - A_{12}^{n+1} = \bar{B}_{21} u_{x0} + \bar{B}_{22} u_{z0} + \bar{B}_{23} w_{z0} \\ A_{21}^{n+1} + A_{22}^{n+1} = \bar{B}_{31} u_{x0} + \bar{B}_{32} u_{z0} + \bar{B}_{33} w_{z0} \\ A_{21}^{n+1} - A_{22}^{n+1} = \bar{B}_{41} u_{x0} + \bar{B}_{42} u_{z0} + \bar{B}_{43} w_{z0} \\ B_{s1}^{n+1} + B_{s2}^{n+1} = \bar{B}_{51} u_{x0} + \bar{B}_{52} u_{z0} + \bar{B}_{53} w_{z0} \\ B_{s1}^{n+1} - B_{s2}^{n+1} = \bar{B}_{61} u_{x0} + \bar{B}_{62} u_{z0} + \bar{B}_{63} w_{z0} \end{cases} \quad (3.69)$$

3.3.6.1. Propagation de l'onde incidente P_1

Pour ce cas d'incidence avec un potentiel A_{12}^{n+1} , et $A_{22}^{n+1} = B_{s2}^{n+1} = 0$ dans l'équation (3.45), les trois inconnues A_{11}^{n+1} , A_{21}^{n+1} (P_1 et P_2 réfléchies dans l'espace semi infini), B_{s1}^{n+1} (SV réfléchi dans l'espace semi infini) et les trois composantes du déplacement u_{x0} et u_{z0} et w_{z0} à la surface libre peuvent être déterminés en fonction de l'amplitude A_{12}^{n+1} . En résolvant le système d'équation (3.45) avec le vecteur potentiel suivant

$$Y_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} \\ A_{21} \\ B_{s1} \\ B_{s1} \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11}^{n+1} + A_{12}^{n+1} \\ A_{11}^{n+1} - A_{12}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} \end{Bmatrix} \quad (3.70)$$

Ce qui nous donne le système d'équations ci-dessous

$$\begin{cases} 2A_{12}^{n+1} = (\bar{B}_{11} - \bar{B}_{21})u_{x0} + (\bar{B}_{12} - \bar{B}_{22})u_{z0} + (\bar{B}_{13} - \bar{B}_{23})w_{z0} \\ 0 = (\bar{B}_{31} - \bar{B}_{41})u_{x0} + (\bar{B}_{32} - \bar{B}_{42})u_{z0} + (\bar{B}_{33} - \bar{B}_{53})w_{z0} \\ 0 = (\bar{B}_{51} - \bar{B}_{61})u_{x0} + (\bar{B}_{52} - \bar{B}_{62})u_{z0} + (\bar{B}_{53} - \bar{B}_{63})w_{z0} \end{cases} \quad (3.71)$$

Quant aux déplacements au sommet de l'affleurement rocheux, ils sont calculés à partir de la relation

$$Y_f = J_f^{-1}(0)X_f(0) \quad (3.72)$$

avec

$$Y_f = \begin{Bmatrix} A_{11} + A_{12} \\ A_{11} - A_{12} \\ A_{21} \\ A_{21} \\ B_{s1} \\ B_{s1} \end{Bmatrix}_f = \begin{Bmatrix} A_{11}^f + A_{12}^f \\ A_{11}^f - A_{12}^f \\ A_{21}^f \\ A_{21}^f \\ B_{s1}^f \\ B_{s1}^f \end{Bmatrix} \quad (3.73)$$

D'où le système suivant à résoudre

$$\begin{cases} 2A_{12}^f = J_{11}^{-1}u_{xf} - J_{22}^{-1}u_{zf} - J_{23}^{-1}w_{zf} \\ 0 = J_{31}^{-1}u_{xf} - J_{42}^{-1}u_{zf} - J_{43}^{-1}w_{zf} \\ 0 = -J_{61}^{-1}u_{xf} + J_{52}^{-1}u_{zf} - J_{53}^{-1}w_{zf} \end{cases} \quad (3.74)$$

La fonction de transfert du profil est obtenue en effectuant le rapport entre la réponse au sommet du multicouche et la réponse au niveau de l'affleurement rocheux (les potentiels incidents étant supposés être les mêmes).

3.3.6.2. Propagation de l'onde incidente P₂

Pour ce cas d'incidence avec un potentiel A_{22}^{n+1} , et $A_{12}^{n+1} = B_{s2}^{n+1} = 0$ dans l'équation (3.45), les trois inconnues A_{11}^{n+1} , A_{21}^{n+1} (P_1 et P_2 réfléchies dans l'espace semi infini), B_{s1}^{n+1} (SV réfléchi dans l'espace semi infini) et les trois composantes du déplacement u_{x0} et u_{z0} et w_{z0} à la surface libre peuvent être déterminés en fonction de l'amplitude A_{22}^{n+1} . En résolvant le système d'équation (3.45) avec le vecteur potentiel suivant

$$Y_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ A_{11} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} \\ B_{s1} \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11}^{n+1} \\ A_{11}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} + A_{22}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} + A_{22}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} \end{Bmatrix} \quad (3.75)$$

Ce qui nous donne le système d'équations ci-dessous

$$\begin{cases} 0 = (\bar{B}_{11} - \bar{B}_{21})u_{x0} + (\bar{B}_{12} - \bar{B}_{22})u_{z0} + (\bar{B}_{13} - \bar{B}_{23})w_{z0} \\ 2A_{22}^{n+1} = (\bar{B}_{31} - \bar{B}_{41})u_{x0} + (\bar{B}_{32} - \bar{B}_{42})u_{z0} + (\bar{B}_{33} - \bar{B}_{53})w_{z0} \\ 0 = (\bar{B}_{51} - \bar{B}_{61})u_{x0} + (\bar{B}_{52} - \bar{B}_{62})u_{z0} + (\bar{B}_{53} - \bar{B}_{63})w_{z0} \end{cases} \quad (3.76)$$

Les déplacements au sommet de l'affleurement rocheux sont calculés à partir de la relation (3.48) avec le vecteur potentiel suivant

$$Y_f = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ A_{11} \\ A_{21} + A_{22} \\ A_{21} - A_{22} \\ B_{s1} \\ B_{s1} \end{Bmatrix}_f = \begin{Bmatrix} A_{11}^f \\ A_{11}^f \\ A_{21}^f + A_{22}^f \\ A_{21}^f + A_{22}^f \\ B_{s1}^f \\ B_{s1}^f \end{Bmatrix} \quad (3.77)$$

D'où le système suivant à résoudre

$$\begin{cases} 2A_{12}^f = J_{11}^{-1}u_{xf} - J_{22}^{-1}u_{zf} - J_{23}^{-1}w_{zf} \\ 0 = J_{31}^{-1}u_{xf} - J_{42}^{-1}u_{zf} - J_{43}^{-1}w_{zf} \\ 0 = -J_{61}^{-1}u_{xf} + J_{52}^{-1}u_{zf} - J_{53}^{-1}w_{zf} \end{cases} \quad (3.78)$$

La fonction de transfert du profil est obtenue en effectuant le rapport entre la réponse

au sommet du multicouche et la réponse au niveau de l'affleurement rocheux (les potentiels incidents étant supposés être les mêmes).

3.3.6.3. . Propagation de l'onde incidente SV

Pour ce cas d'incidence avec un potentiel B_{s2}^{n+1} , et $A_{12}^{n+1} = A_{22}^{n+1} = 0$ dans l'équation (3.45), les trois inconnues A_{11}^{n+1} , A_{21}^{n+1} (P_1 et P_2 réfléchies dans l'espace semi infini), B_{s1}^{n+1} (SV réfléchi dans l'espace semi infini) et les trois composantes du déplacement u_{x0} et u_{z0} et w_{z0} à la surface libre peuvent être déterminés en fonction de l'amplitude B_{s2}^{n+1} . En résolvant le système d'équation (3.45) avec le vecteur potentiel suivant

$$Y_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ A_{11} \\ A_{21} \\ A_{21} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{Bmatrix} A_{11}^{n+1} \\ A_{11}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} \\ A_{21}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} + B_{s2}^{n+1} \\ B_{s1}^{n+1} - B_{s2}^{n+1} \end{Bmatrix} \quad (3.79)$$

Ce qui nous donne le système d'équations ci-dessous

$$\begin{cases} 0 = (\bar{B}_{11} - \bar{B}_{21})u_{x0} + (\bar{B}_{12} - \bar{B}_{22})u_{z0} + (\bar{B}_{13} - \bar{B}_{23})w_{z0} \\ 0 = (\bar{B}_{31} - \bar{B}_{41})u_{x0} + (\bar{B}_{32} - \bar{B}_{42})u_{z0} + (\bar{B}_{33} - \bar{B}_{53})w_{z0} \\ 2B_{s2}^{n+1} = (\bar{B}_{51} - \bar{B}_{61})u_{x0} + (\bar{B}_{52} - \bar{B}_{62})u_{z0} + (\bar{B}_{53} - \bar{B}_{63})w_{z0} \end{cases} \quad (3.80)$$

Les déplacements au sommet de l'affleurement rocheux sont calculés à partir de la relation (3.48) avec le vecteur potentiel suivant

$$Y_f = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ A_{11} \\ A_{21} \\ A_{21} \\ B_{s1} + B_{s2} \\ B_{s1} - B_{s2} \end{Bmatrix}_f = \begin{Bmatrix} A_{11}^f \\ A_{11}^f \\ A_{21}^f \\ A_{21}^f \\ B_{s1}^f + B_{s2}^f \\ B_{s1}^f - B_{s2}^f \end{Bmatrix} \quad (3.81)$$

D'où le système suivant à résoudre

$$\begin{cases} 0 = J_{11}^{-1}u_{xf} - J_{22}^{-1}u_{zf} - J_{23}^{-1}w_{zf} \\ 0 = J_{31}^{-1}u_{xf} - J_{42}^{-1}u_{zf} - J_{43}^{-1}w_{zf} \\ 2B_{s2}^f = -J_{61}^{-1}u_{xf} + J_{52}^{-1}u_{zf} - J_{53}^{-1}w_{zf} \end{cases} \quad (3.82)$$

La fonction de transfert du profil est obtenue en effectuant le rapport entre la réponse au sommet du multicouche et la réponse au niveau de l'affleurement rocheux (les potentiels incidents étant supposés être les mêmes).

3.4. Conclusion

Les équations de bases servant à la modélisation d'un milieu poro-élastique , selon la théorie de Biot^[1], ont été présentées^[26,27]. De même, la résolution analytique de l'équation de mouvement, permettant de trouver les vitesses de propagation de différents types d'ondes sismiques ainsi que le champ de déplacement induit, a été présentée dans le détail. Les équations exposées dans ce chapitre nous ont servi de base afin d'élaborer un code de calcul permettant d'analyser la réponse dynamique d'un semi-espace poro-élastique. Ce code est présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

PRESENTATION DU LOGICIEL DE CALCUL

4.1. Introduction

La modélisation présentée dans le chapitre 3 a servi de base à l'élaboration d'un logiciel de calcul sous environnement MATLAB. L'objectif de ce chapitre est de présenter ce code de calcul qui effectue les tâches suivantes :

- ❖ Lecture des données à savoir les paramètres géodynamiques du sol
- ❖ Calculer les différentes vitesses de propagation de chacun des trois types d'ondes P_1 , P_2 et S_v
- ❖ Calculer les déplacements horizontaux et verticaux des trois ondes
- ❖ Tracer la vitesse de propagation des ondes en fonction de la saturation
- ❖ Tracer les déplacements horizontaux et verticaux en fonction de l'angle d'incidence
- ❖ Superposer plusieurs graphes et donc permettre une analyse paramétrique rapide des résultats obtenus

4.2. Présentation du logiciel :

Le logiciel se présente sous forme de plate forme interactive telle que présentée dans la figure 4.1. En premier lieu, les données géodynamiques sont introduites. Celles-ci sont :

- ❖ Densité des grains solides (kg/m^3)
- ❖ Porosité
- ❖ Module de cisaillement (Pa)
- ❖ Module de compressibilité du squelette solide (Pa)
- ❖ Module de compressibilité des grains solides (Pa)
- ❖ Module de compressibilité de l'eau interstitielle (Pa)
- ❖ Viscosité du fluide (Ns/m^2)
- ❖ Perméabilité (m^2)
- ❖ Masse volumique de la phase fluide (kg/m^3)
- ❖ Coefficient de Poisson
- ❖ Fréquence d'excitation (s^{-1})
- ❖ Pression atmosphérique (Pa)
- ❖ Saturation

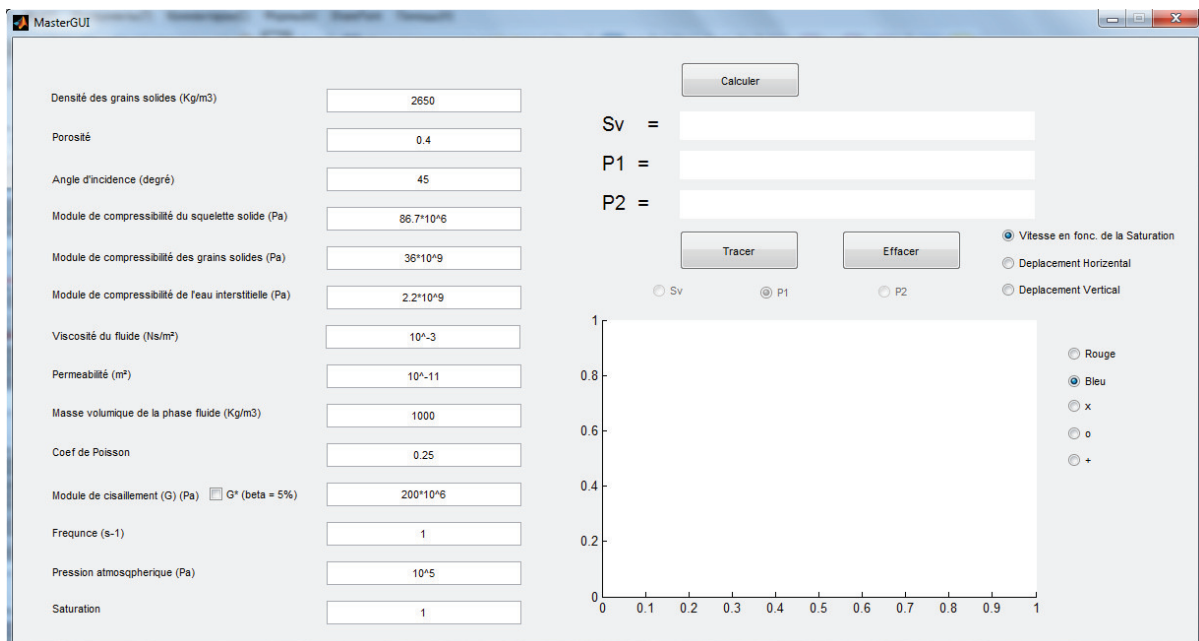


Figure 4.1 : la plateforme du logiciel

Pour calculer les vitesses de propagation des trois ondes P_1 , P_2 et SV , il suffit de cliquer sur l'icône « Calculer », cf fig. 4.2.

Calculer	
Vs =	141.7762
Vp1 =	1661.8118
Vp2 =	5.2578

Figure 4.2 : Les résultats de calcul

Pour tracer les diagrammes des vitesses ou déplacements sur l'emplacement des graphes, en fonction de la saturation, (la saturation varie entre 0 % et 100 %), il est fait appel à une autre icône « Tracer », cf fig. 4.3.

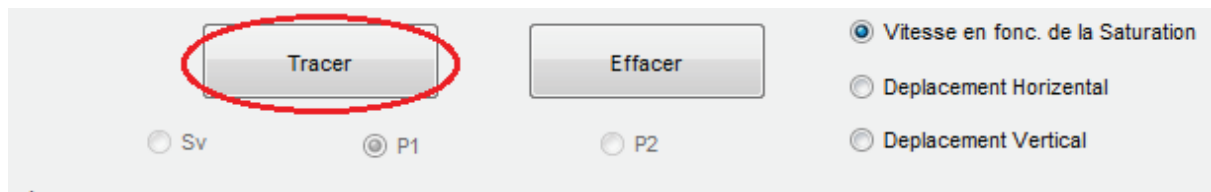


Figure 4.3 Le bouton « tracer »

Si l'on ne désire pas garder les graphes, il est possible de l'effacer tout simplement

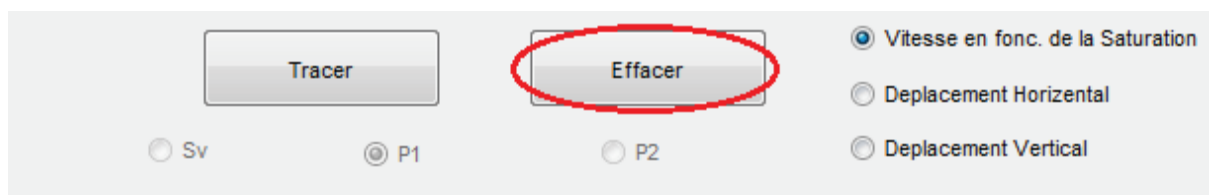


Figure 4.3 Le bouton « Effacer »

Les graphes des vitesses de propagation des trois types d'ondes et les graphes de déplacement horizontaux et verticaux sont dessinés instantanément ?c.f. figure 4.4.

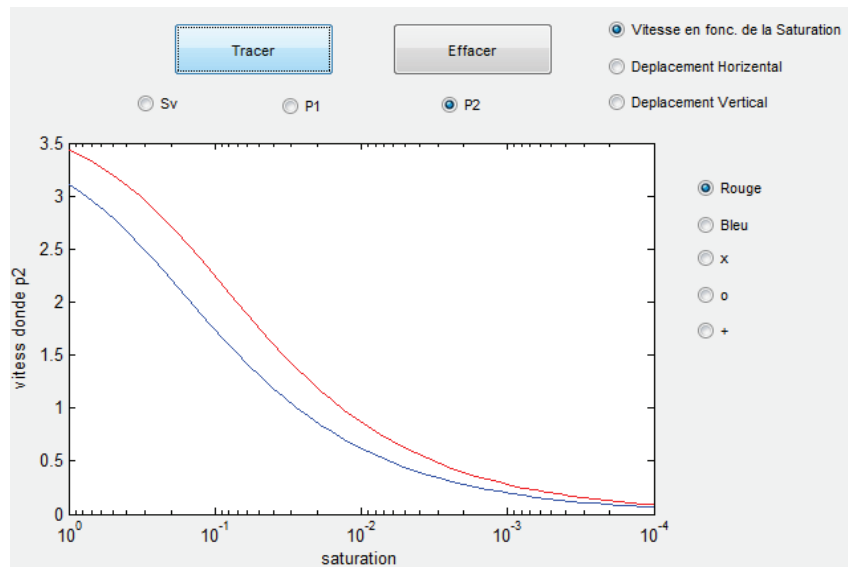


Figure 4.4 Exemple de graphes dessinés

Pour choisir l'incidente, il est nécessaire d'indiquer un choix, cf figure 4.5.

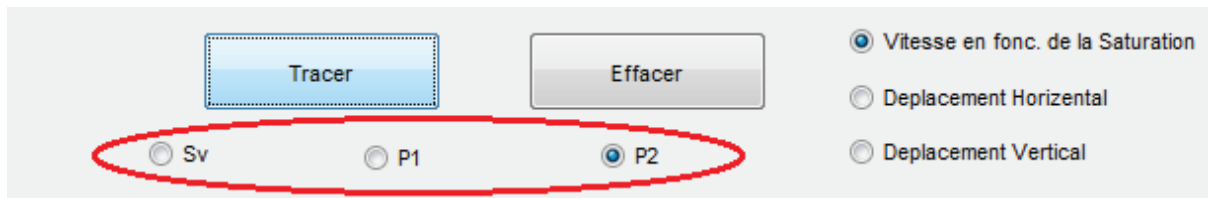


Figure 4.5 Le choix de l'onde

Pour indiquer le graphe à dessiner, il faut faire un autre choix entre, c.f. figure 4.6 :

- ❖ la vitesse de propagation en fonction de la saturation
- ❖ le déplacement horizontal en fonction du degré d'incidence
- ❖ le déplacement vertical en fonction du degré d'incidence

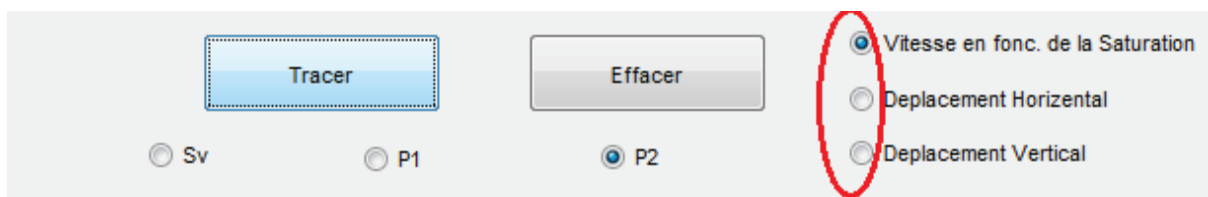


Figure 4.6 Le choix de paramètre à tracer

Evidemment, les paramètres graphique utilisés dans les graphiques sont interactifs tels que le montre la figure 4.7 :

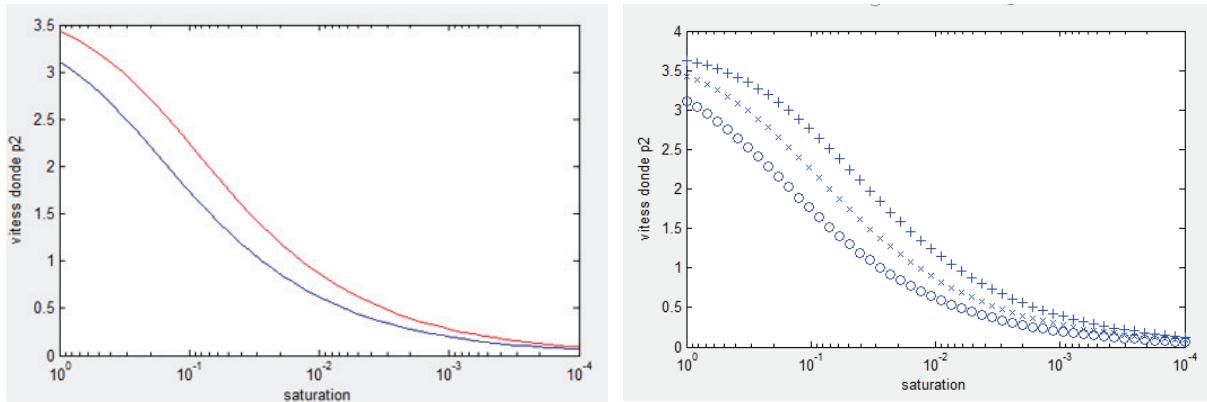


Figure 4.7 Exemple de graphes de différents types

- ❖ Rouge et Bleu signifie la couleur du graphe
- ❖ « x », « o » et « + » signifie la forme du graphe

4.3. Conclusion :

Ce logiciel permet de faire une étude paramétrique rapide et de ce fait, comparer entre les facteurs qui influent dans les vitesses de propagation et les déplacements des ondes sismiques dans un milieu poreux élastique.

CHAPITRE V

REPONSE DYNAMIQUE D'UN DEMI-ESPACE PORO-ELASTIQUE

5.1. Introduction :

Dans le présent chapitre, deux demi-espaces poro-élastiques ont été pris comme exemples afin d'étudier l'influence de certains paramètres géophysiques sur la réponse dynamique des sols poro-élastiques à l'incidence d'ondes P_1 , P_2 et d'ondes SV . Le calcul des déplacements du sol est évalué à l'aide d'un schéma basé sur la méthode de Haskell-Thomson ^[13,18, 19, 25] tel qu'exposé au chapitre 4.

5.2. Exemples numériques

Les caractéristiques de chacun des deux sols considérés sont résumées dans le tableau 5.1

Caractéristiques	Sable	Roche tendre
Densité des grains solides (kg/m^3)	2650	2610
Porosité	0.4	0.3
Module de cisaillement (MPa)	40	600
Module de compressibilité du squelette solide (Mpa)	86.7	1300
Module de compressibilité des grains solides (Gpa)	36	36
Module de compressibilité de l'eau interstitielle (Gpa)	2.2	2.2
Viscosité du fluide (Ns/m^2)	10^{-3}	10^{-3}
Perméabilité (m^2)	10^{-11}	10^{-12}

Tableau 5.1 Exemple de Sable et Roche étudiés

Le but de cette analyse est de mettre le point sur les paramètres qui pourraient ou pas avoir de l'influence sur le comportement dynamique du semi-espace poro-élastique.

5.2.1. Effet du degré de saturation :

5.2.1.1. Vitesses de propagation des ondes élastiques

Les vitesses de propagation des trois types d'ondes, se propageant dans les deux demi-espaces considérés, ont été calculées pour différents degrés de saturation à la fréquence de 1Hz .

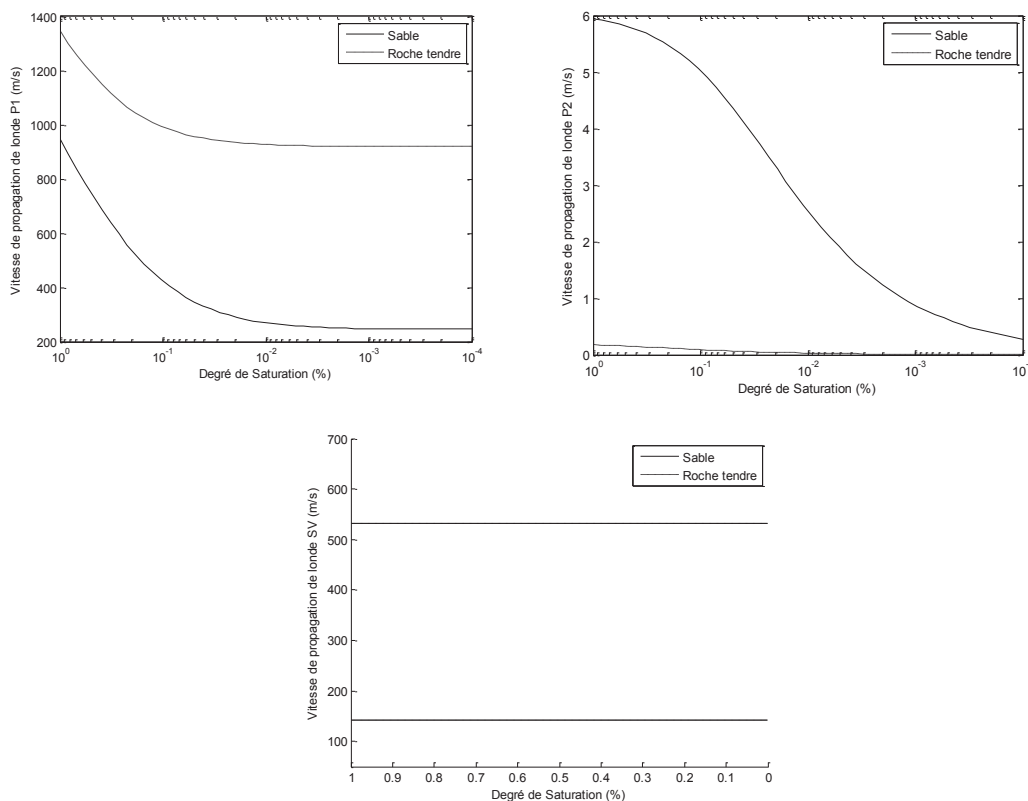


Figure 5.1. Effet de la variation du degré de saturation sur les vitesses de propagation des ondes élastiques ($f=1\text{Hz}$)

Tel qu'il apparaît dans la figure 5.1, les vitesses de propagation des deux ondes de compression P_1 et P_2 sont influencées par le degré de saturation. La vitesse de propagation de l'onde P_1 diminue sensiblement avec même une légère réduction en

dessous de la saturation complète. Il est noté qu'elle est maximum pour une complète saturation avec une valeur de 980 m/sec pour le demi-espace sableux et de 1350 m/sec pour le demi-espace rocheux, alors qu'elle chute à 970m/sec, pour la roche, et 240 m/sec pour le sable lorsque le milieu est sec i.e. le degré de saturation est nul. La vitesse de propagation de l'onde P_2 diminue aussi avec la diminution du degré de saturation. Néanmoins, elle est nettement inférieure à la vitesse de l'onde P_1 .

L'onde de cisaillement ne se propageant pas dans l'eau, la variation du degré de saturation n'exerce aucune influence sur la vitesse de propagation de l'onde SV .

5.2.1.2. Réponses dynamiques

• Incidence d'onde P_1

A partir des figures 5.2 et 5.3, il apparaît que pour une complète saturation i.e. $Sr=100\%$, la valeur maximale du déplacement horizontal normalisé approche la valeur de 0.1 pour le profil sableux et celle de 0.2 pour le profil rocheux. Dès que le degré de saturation baisse légèrement, la réponse du sol poreux se rapproche de plus en plus de celle du sol élastique (considéré non poreux).

L'effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements verticaux est négligeable pour les deux cas de profils étudiés.

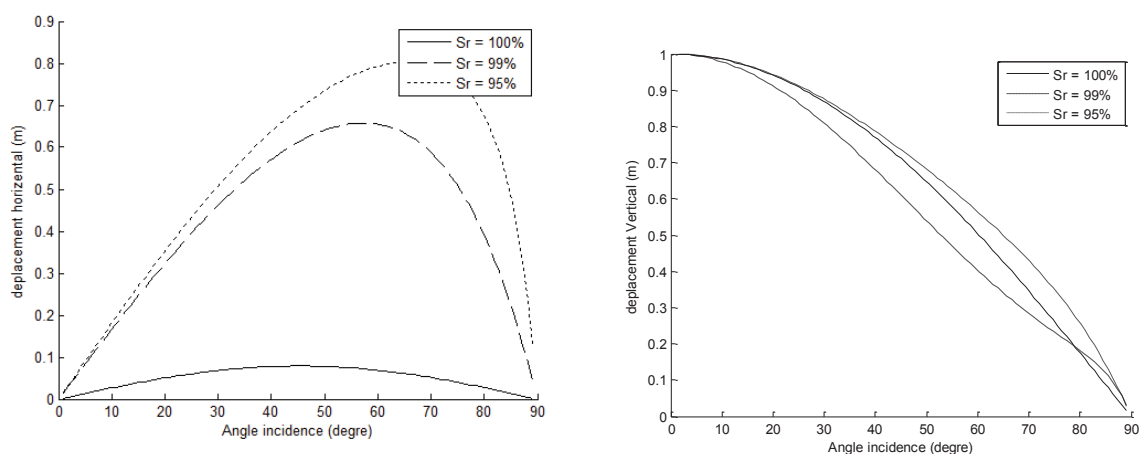


Figure 5.2. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d'onde P_1

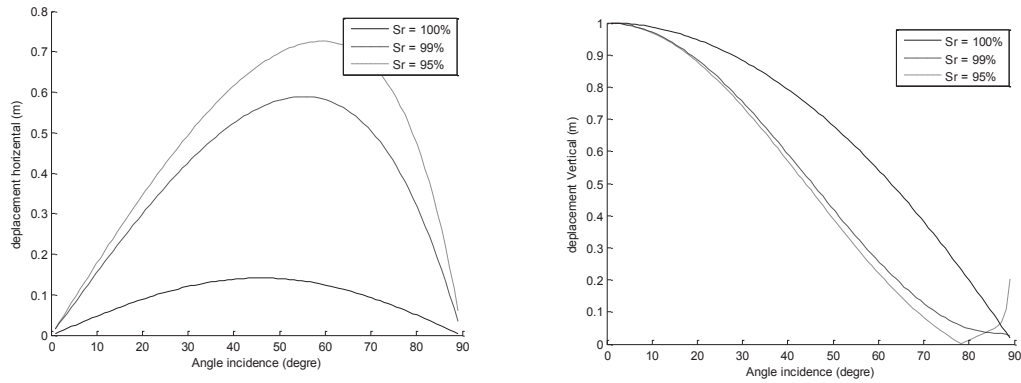


Figure 5.3. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P_1

• Incidence d’onde P_2

Les mêmes constatations faites pour le cas d’incidence d’une onde P_1 sont faites à partir des figures 5.4 et 5.5 pour le cas d’une onde P_2 . Dès que le degré de saturation est en dessous de 100%, les réponses dynamiques des deux profils de sol se rapproche de celle d’un sol modélisé solide monophasique.

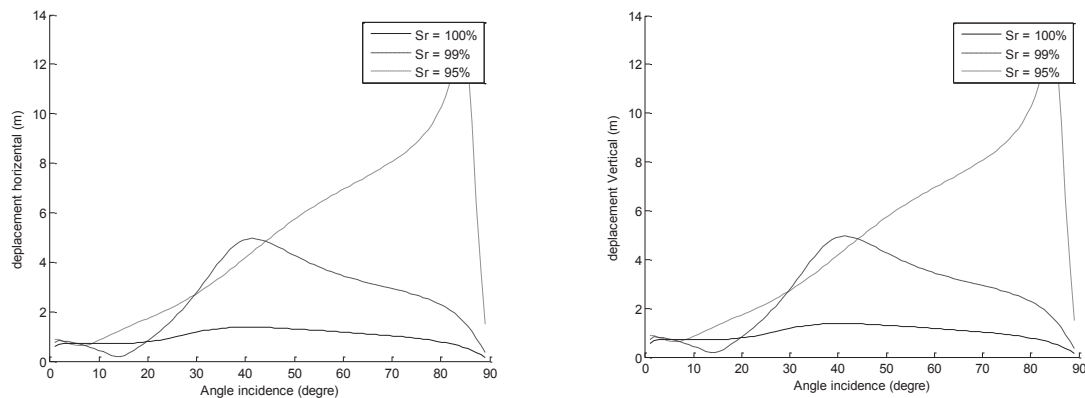


Figure 5.4. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde P_2

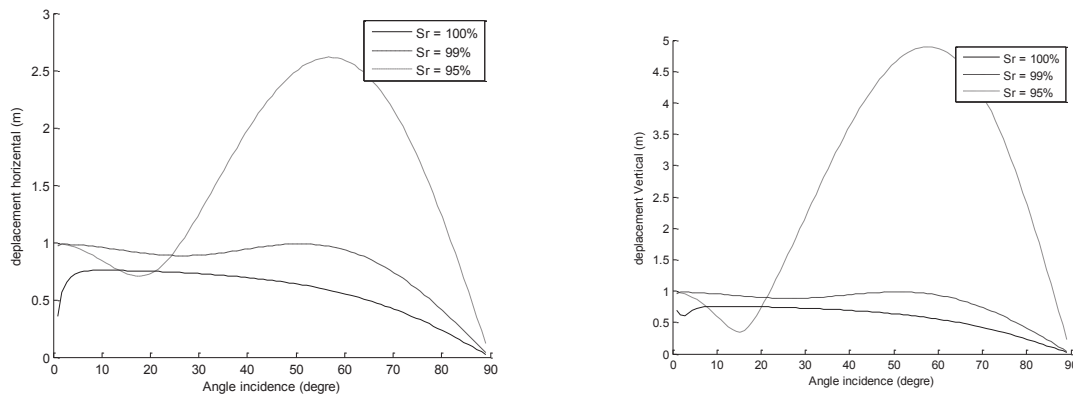


Figure 5.5. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P_2

- **Incidence d’onde SV**

En étudiant les figures 5.6 et 5.7, il est remarqué que l’effet de la variation du degré de saturation, sur les déplacements induits par l’incidence d’une onde SV, est significatif.

De même que pour l’incidence d’une onde P_2 ou P_2 , dès que la saturation n’est plus totale, les déplacements se rapprochent de ceux obtenus pour le cas élastique non poreux, et cela pour les deux demi-espaces étudiés.

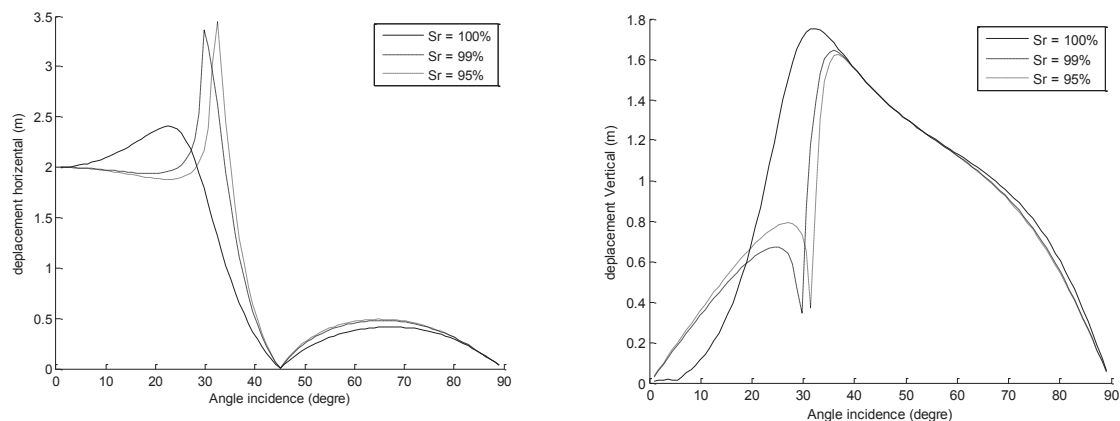


Figure 5.6. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde SV

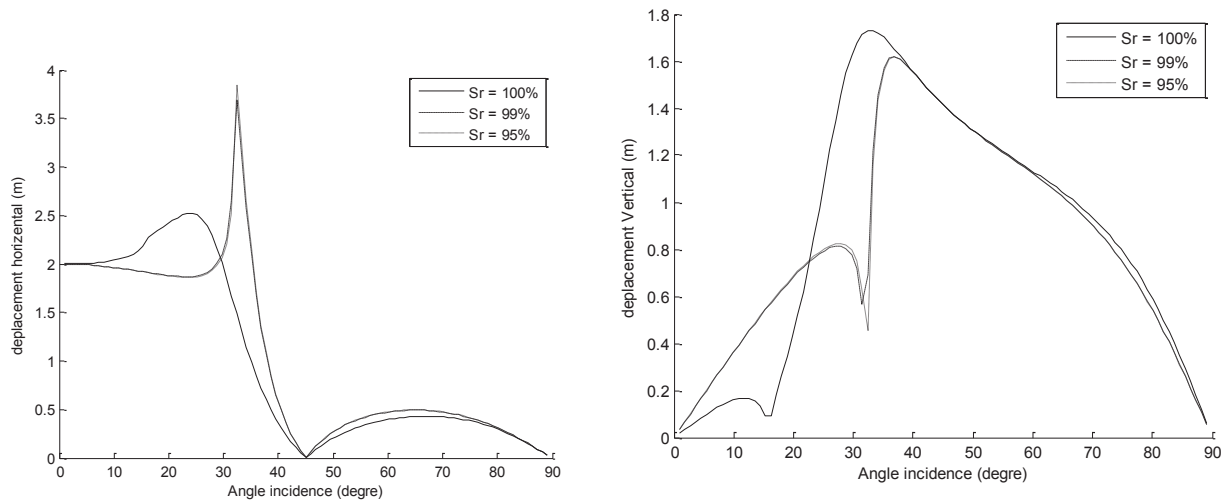


Figure 5.7. Effet de la variation du degré de saturation sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde SV

5.2.2. Effet de la viscosité du fluide :

5.2.2.1. Vitesses de propagation des ondes élastiques

Les figures 5.8 et 5.9 représentent la variation des vitesses de propagation des différentes ondes sismiques en fonction de la saturation, avec et sans prise en compte de la viscosité du fluide interstitiel. Il est noté que pour les deux profils de sol, les vitesses de propagation des ondes augmentent si la viscosité est négligée.

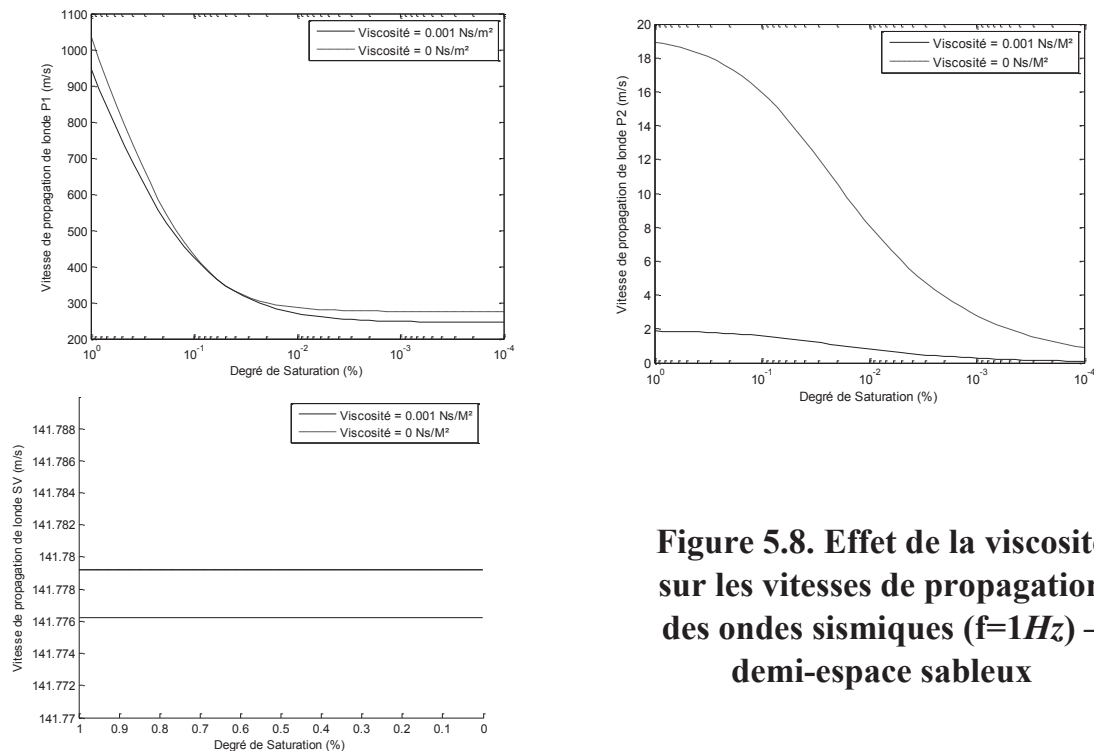


Figure 5.8. Effet de la viscosité sur les vitesses de propagation des ondes sismiques ($f=1Hz$) – demi-espace sableux

Néanmoins, pour le cas des ondes P_1 et P_2 , cette augmentation est fortement dépendante du degré de saturation

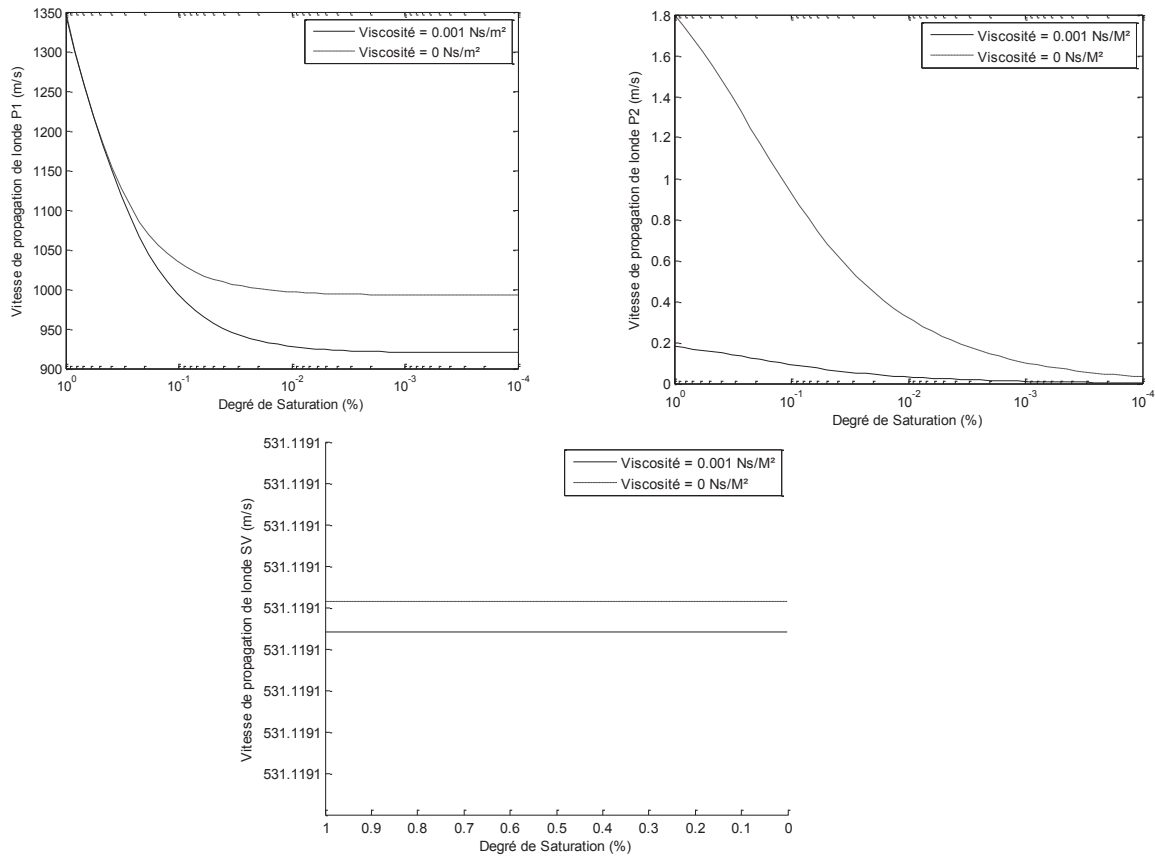


Figure 5.9. : Effet de la viscosité sur les vitesses de propagation des ondes sismiques ($f=1Hz$) – demi-espace ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux

5.2.2.2. Réponses dynamiques

- **Incidence d'onde P_1**

Les figures 5.10 et 5.11 indiquent une très légère variation du déplacement en fonction de la prise en compte ou pas de la viscosité du fluide interstitiel pour le cas d'incidence d'une onde P_1 .

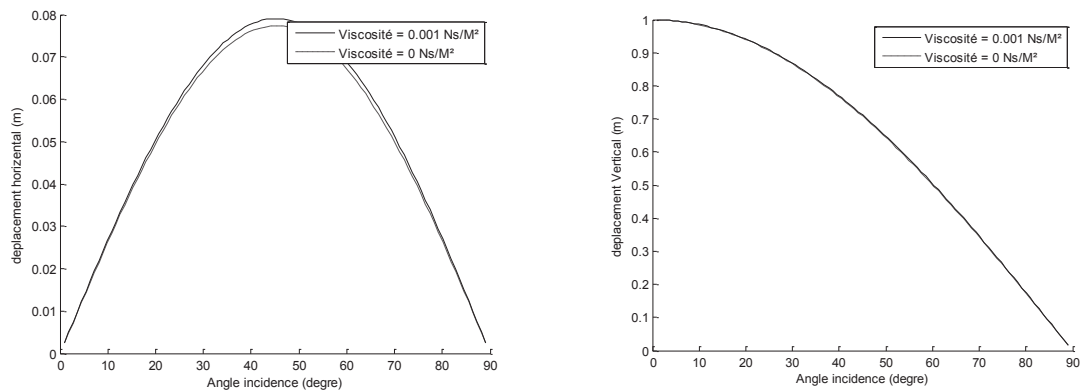


Figure 5.10. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde P_1 - $Sr=100\%$

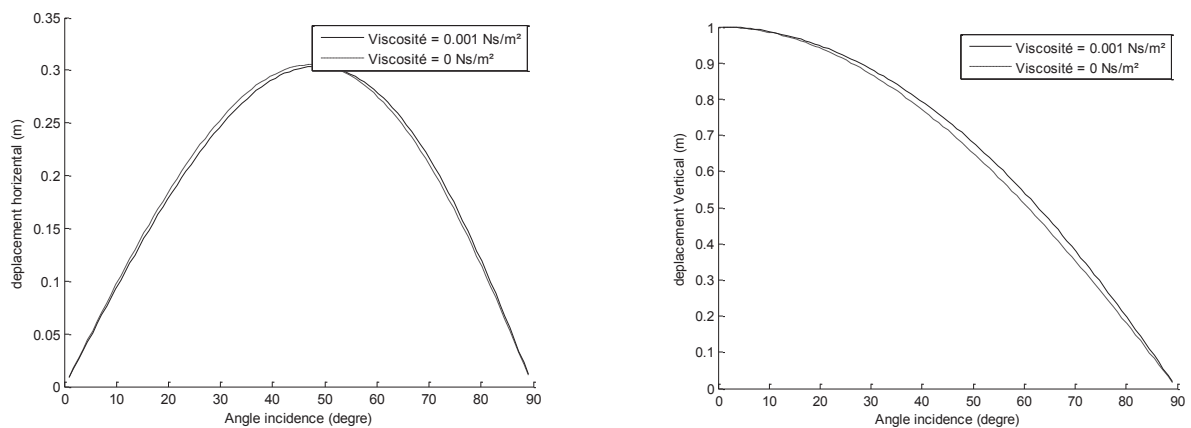


Figure 5.11. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P_1 – $Sr = 100\%$

- **Incidence d’onde P_2**

Contrairement au cas précédent, la viscosité du fluide interstitiel exerce une influence certaine sur les déplacements induits par l’onde P_2 . Les figures 5.12 et 5.13 montrent clairement la différence engendrée par la prise en compte ou pas de la viscosité.

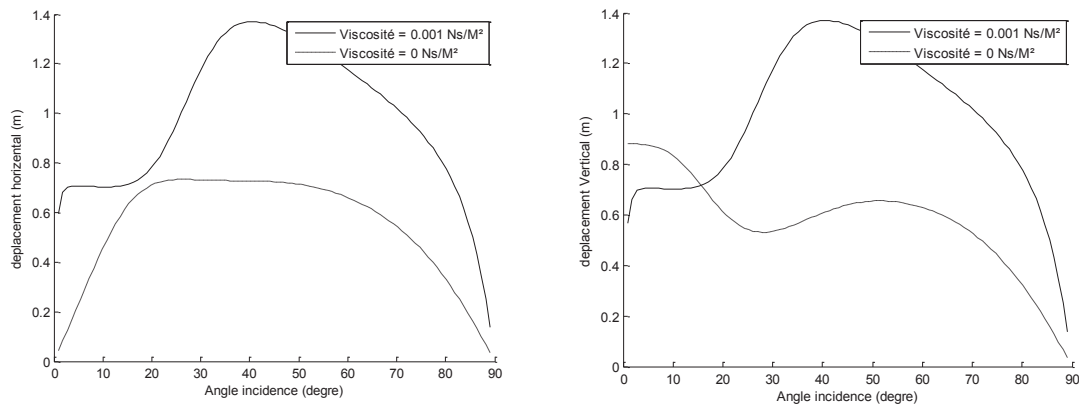


Figure 5.12. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde P_2

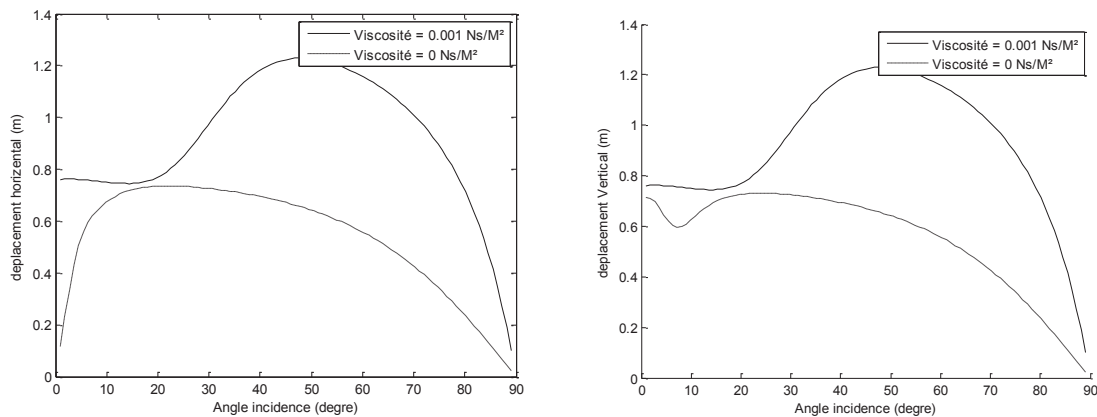


Figure 5.13. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P_2

• **Incidence d’onde SV**

Comme pour le cas de l’onde P_2 , la négligence de la viscosité cause une diminution de la réponse dynamique du sol pour le cas d’une onde SV (voir fig. 5.13 et 5.14).

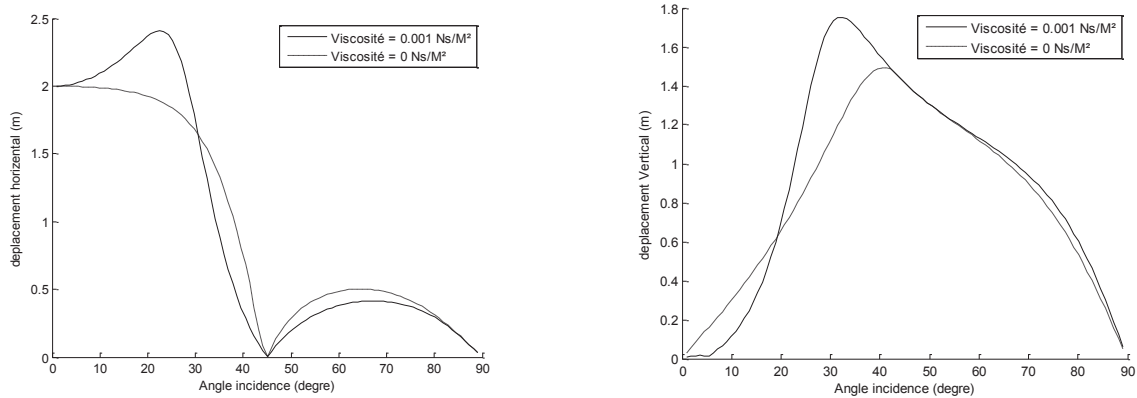


Figure 5.14. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde SV – $Sr = 100\%$

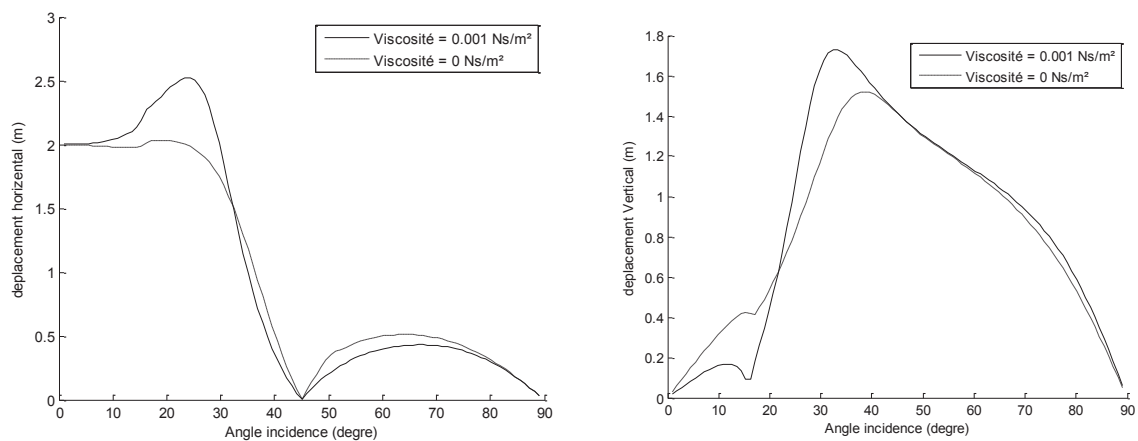


Figure 5.15. Effet de la viscosité du fluide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde SV – $Sr = 100\%$

5.2.3. Effet de l’amortissement matériel du squelette solide :

Afin d’étudier l’effet de la prise en compte ou pas de l’amortissement matériel du squelette solide, un module de cisaillement complexe a été considéré.

5.2.3.1. Vitesses de propagation des ondes élastiques

En étudiant la figure 5.16, il est noté qu’il n’y a aucun changement dans les valeurs des vitesses de propagation des trois ondes P_1 , P_2 et SV en fonction de la prise en compte ou pas de l’amortissement matériel du squelette

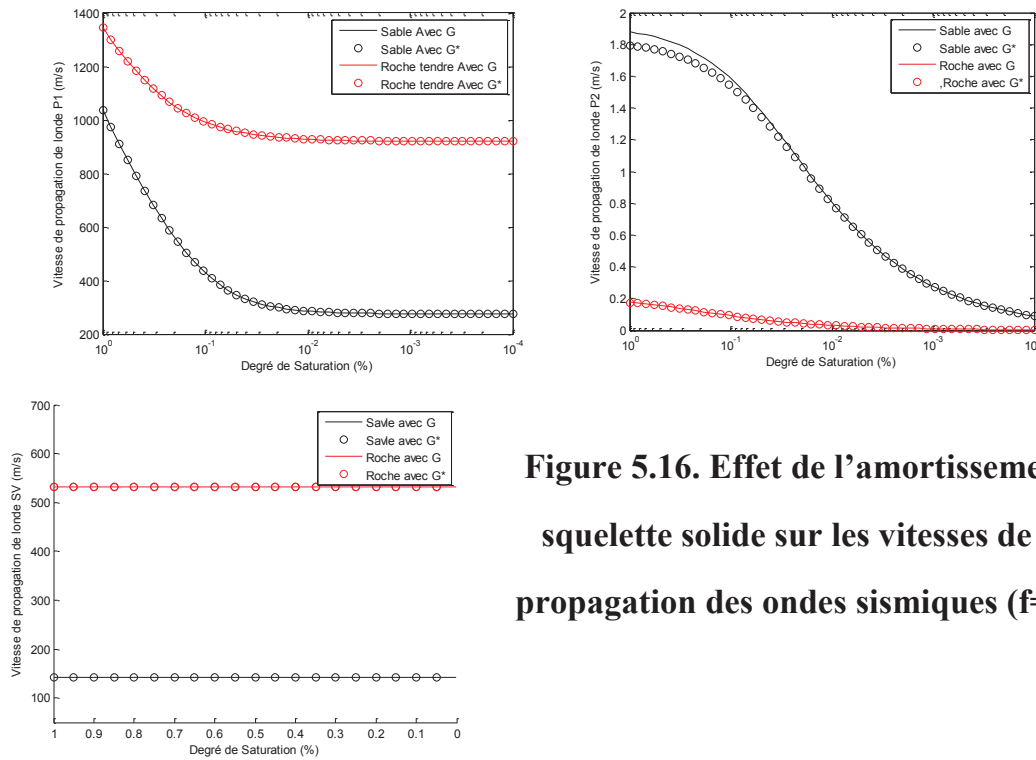


Figure 5.16. Effet de l'amortissement du squelette solide sur les vitesses de propagation des ondes sismiques (f=1Hz)

5.2.3.2. Réponses dynamiques

- **Incidence d'onde P₁**
- A partir des figures 5.17 et 5.18, il apparait que l'amortissement matériel du squelette solide n'influe pas sur les déplacements dynamiques du sol.

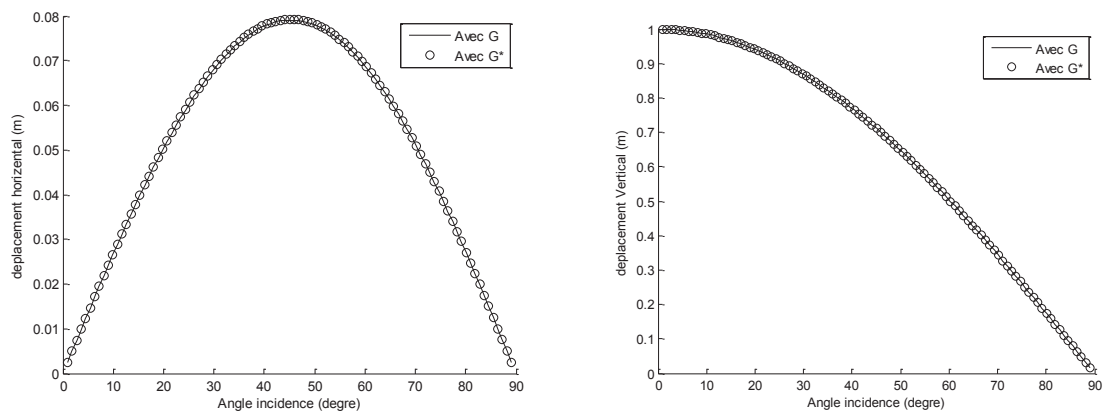


Figure 5.17. Effet de l'amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace sableux – incidence d'onde P₁– Sr = 100%

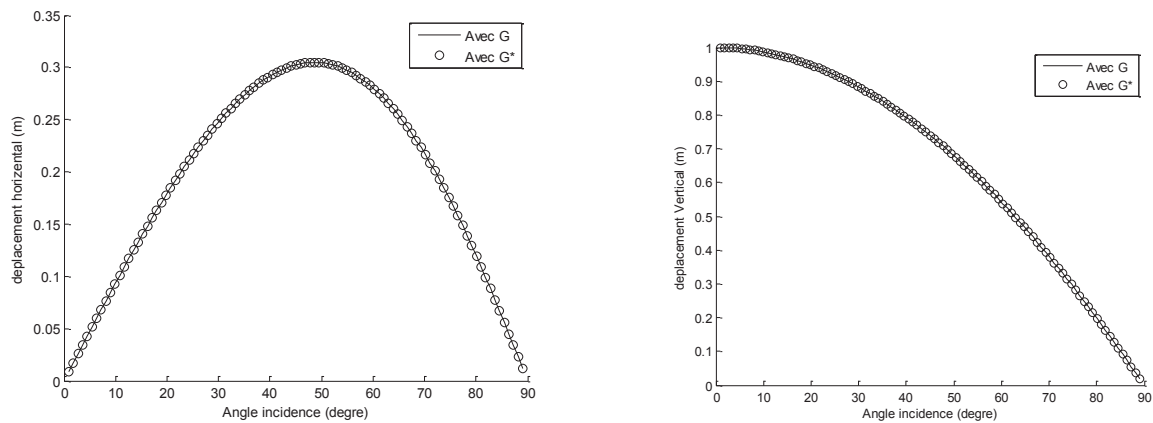


Figure 5.18. Effet de l'amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d'onde P_1 – $S_r = 100\%$

- **Incidence d'onde P_2**

Les figures 5.19 et 5.20 indiquent une légère diminution des déplacements en surface lorsque l'amortissement matériel du squelette est considéré.

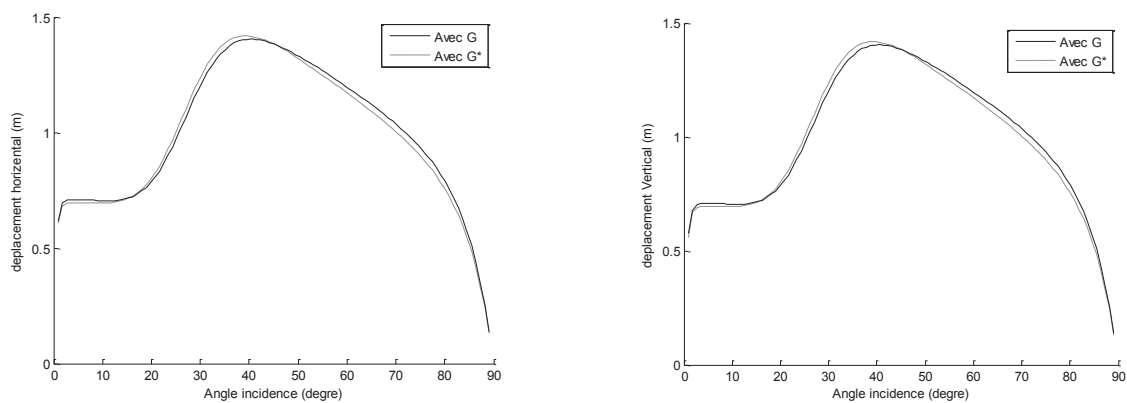


Figure 5.19. Effet de l'amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d'onde P_2 – $S_r = 100\%$

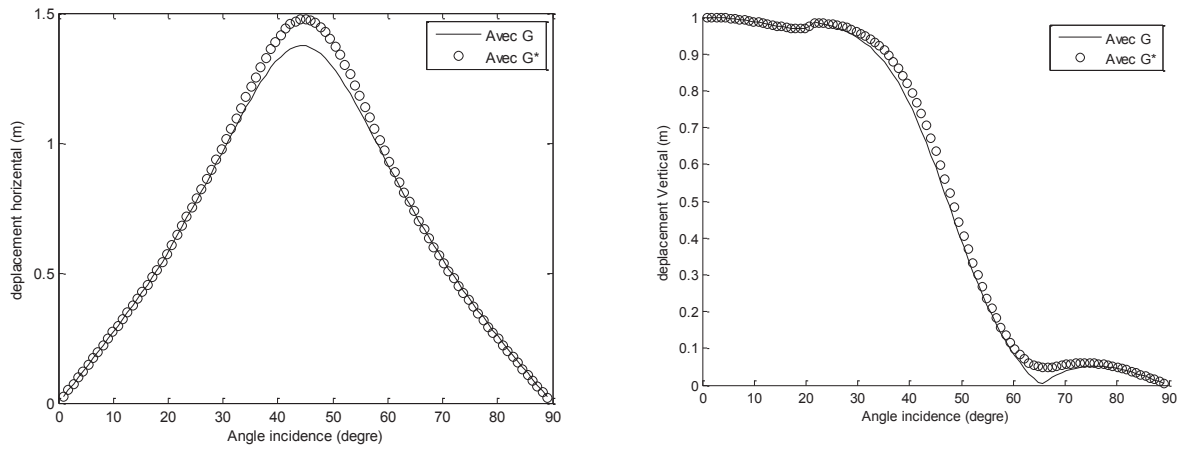


Figure 5.20. Effet de l’amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P_2 – $Sr = 100\%$

• **Incidence d’onde SV**

En examinant les figures 5.21 et 5.22, une légère diminution des déplacements en surface est notée lorsque l’amortissement matériel du squelette est considéré pour le cas d’incidence d’une onde SV.

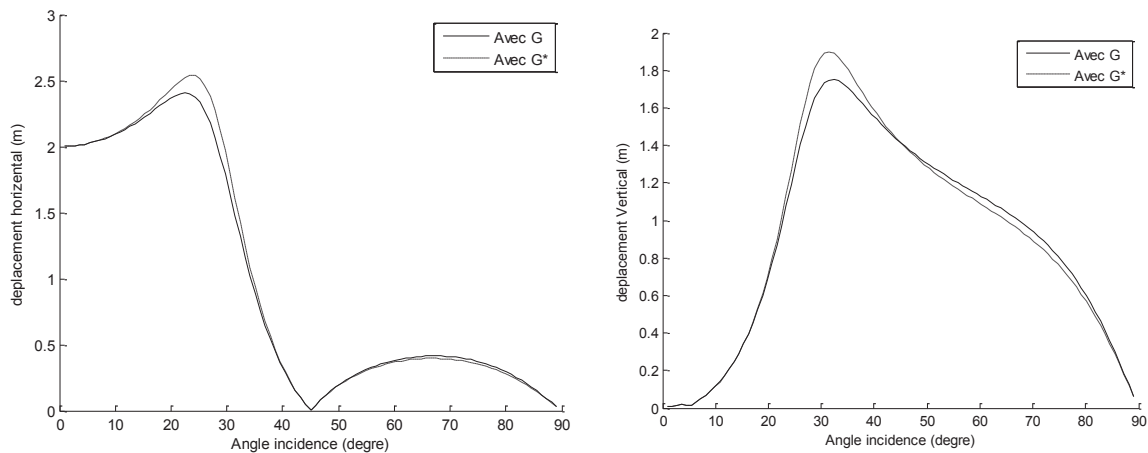


Figure 5.21. Effet de l’amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$) – demi-espace sableux – incidence d’onde SV– $Sr = 100\%$

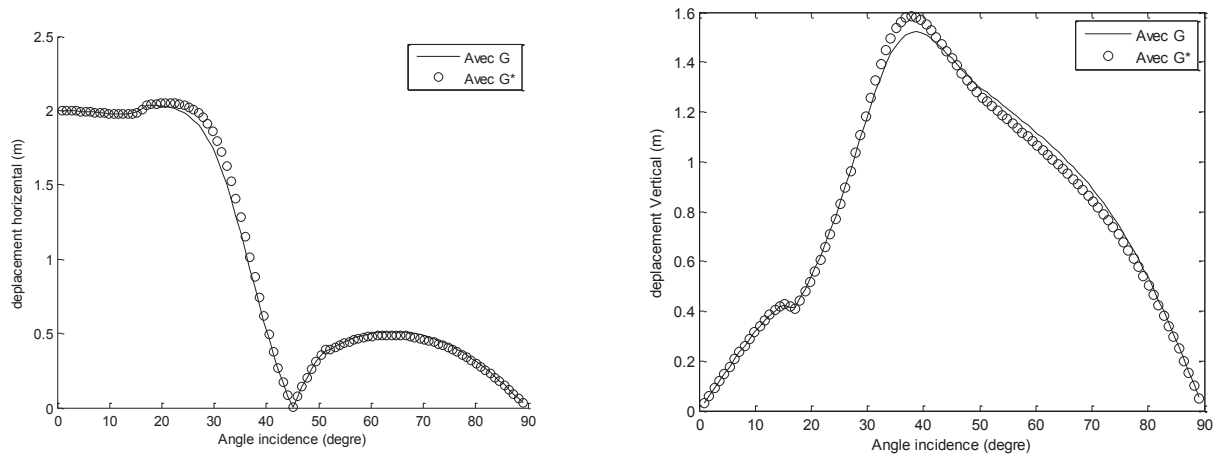


Figure 5.22. Effet de l'amortissement matériel du squelette solide sur les déplacements normalisés en surface ($f=1\text{Hz}$) – demi-espace rocheux – incidence d'onde SV – $Sr = 100\%$

5.2.4. Effet de la porosité :

L'effet de la porosité est étudié pour le cas des deux demi-espaces considérés totalement saturés i.e. $Sr = 100\%$.

5.2.4.1. Vitesses de propagation des ondes élastiques

Les vitesses de propagation des ondes sismiques, dans les deux demi-espaces considérés, ne semblent pas être affectées par les variations de la porosité du sol, à l'exception de l'onde P_1 qui semble présenter une certaine dépendance de ce paramètre.

En effet, lorsque la porosité est de 0.1, les vitesses de propagation de l'onde P_1 sont de 2397 m/sec et de 2514 m/sec, pour le sol sableux et le sol rocheux, respectivement, alors qu'elle chute à 1529 m/sec et 1819 m/sec pour une porosité égale à 0.5.

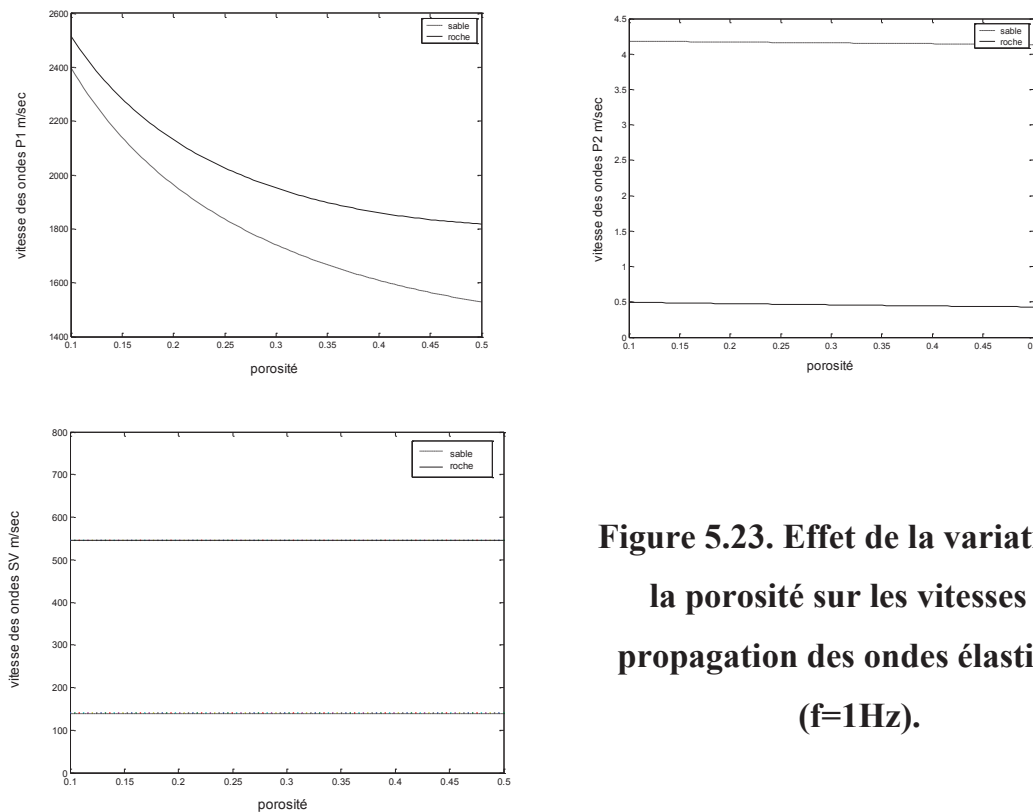


Figure 5.23. Effet de la variation de la porosité sur les vitesses de propagation des ondes élastiques (f=1Hz).

5.2.4.2. Réponses dynamiques

• Incidence d'onde P₁

A travers les figures 5.24 et 5.25, il apparaît que la variation de la porosité n'affecte que les déplacements horizontaux induits par l'incidence d'une onde P₁, et cela pour les deux sols étudiés.

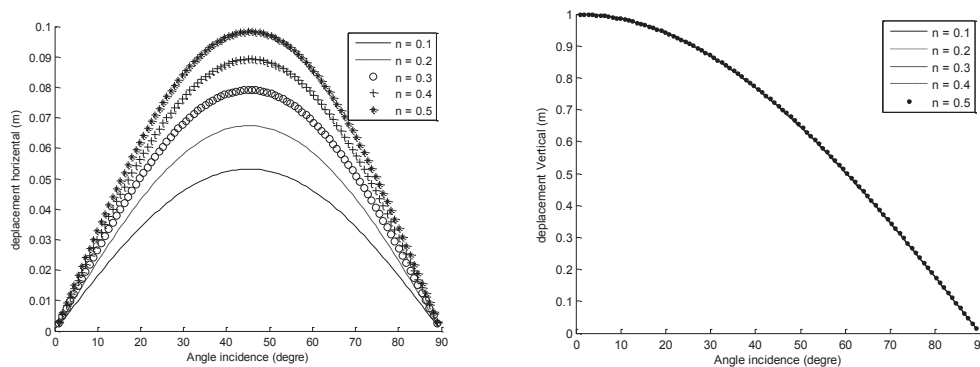


Fig. 5.24 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace sableux – incidence d'onde P₁

Plus la porosité augmente et plus les déplacements horizontaux du sol sont élevés.

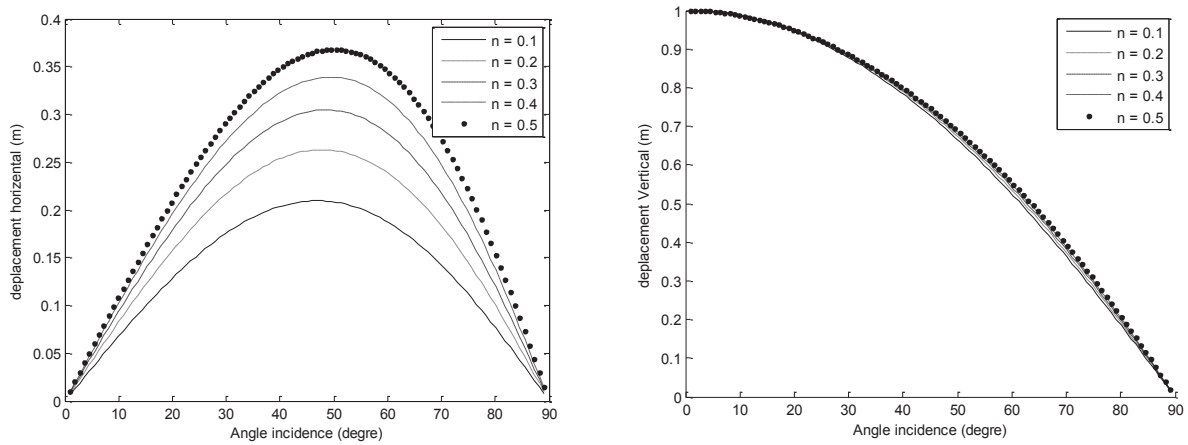


Fig. 5.25 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P1

• **Incidence d’onde P₂**

A travers les figures 5.24 et 5.25, il apparaît que la variation de la porosité n’affecte que les déplacements horizontaux induits par l’incidence d’une onde P₁, et cela pour les deux sols étudiés.

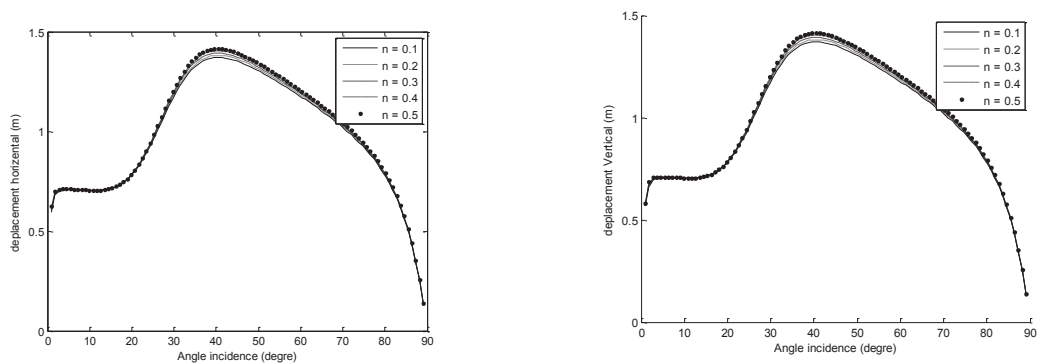


Fig. 5.26 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace sableux – incidence d’onde P2

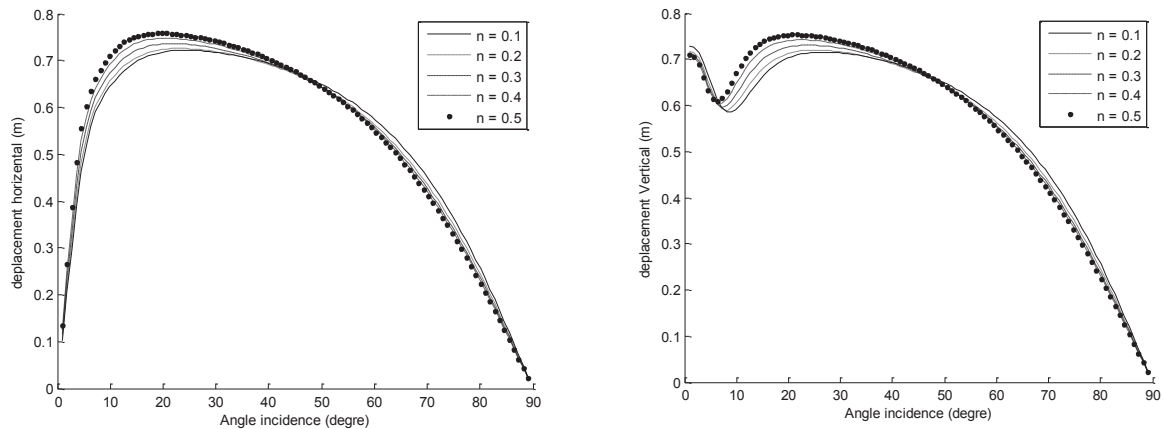


Fig. 5.27 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace rocheux – incidence d’onde P2

• **Incidence d’onde SV**

A partir des figures 5.26 et 5.27, il apparaît que la variation de la porosité n’influence que légèrement la réponse dynamique des deux demi-espaces à la propagation d’une onde SV.

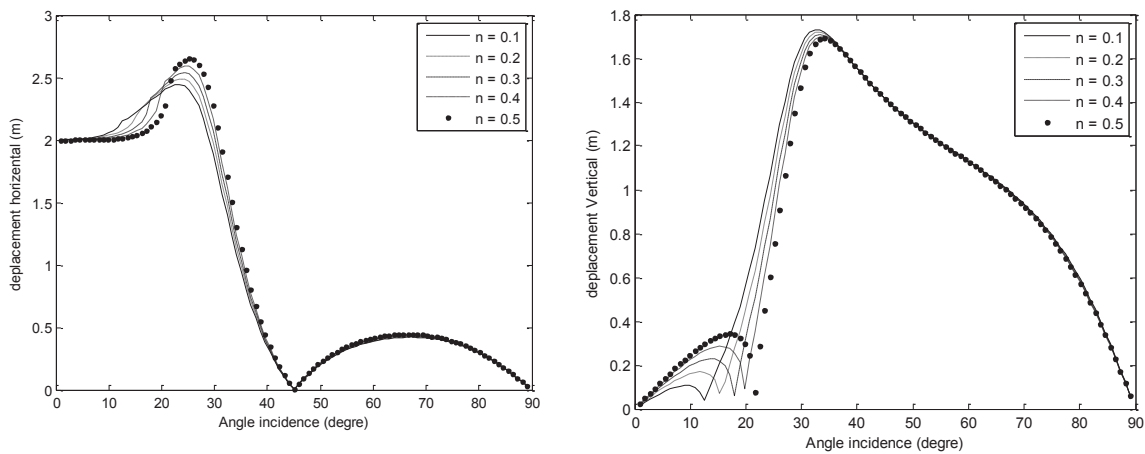


Fig. 5.28 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz) – demi-espace sableux – incidence d’onde SV

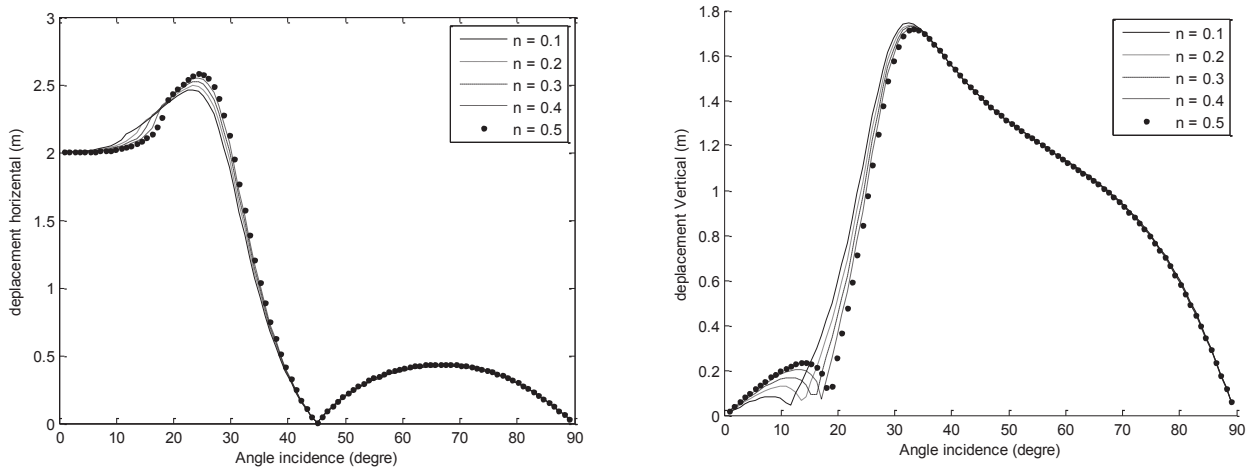


Fig. 5.29 : Effet de la variation de la porosité sur les déplacements normalisés en surface ($f=1\text{Hz}$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde SV

5.2.5. Effet du rapport G/K_f :

Le rapport du module de cisaillement G sur le module d’incompressibilité du fluide K_f indique le contraste existant entre la résistance du solide et celle du fluide.

5.2.5.1. Vitesses de propagation des ondes élastiques

On remarque bien dans la figure 5.28 que le rapport G/K_f exerce une certaine influence sur les vitesses de propagation des ondes P_1 , P_2 et SV. Pour le cas particulier de l’onde P_2 , cette influence dépend du degré de saturation.

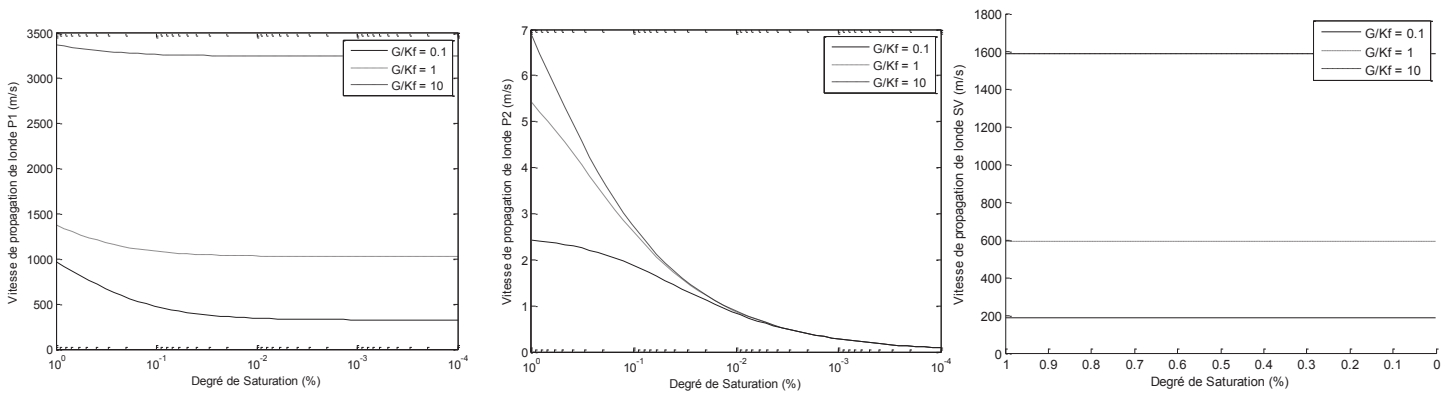


Fig. 5.30 : Effet de la variation du rapport G/K_f sur les vitesses de propagation des ondes élastiques ($f=1\text{Hz}$) – demi-espace sableux – incidence d’onde SV – $S_r = 100\%$

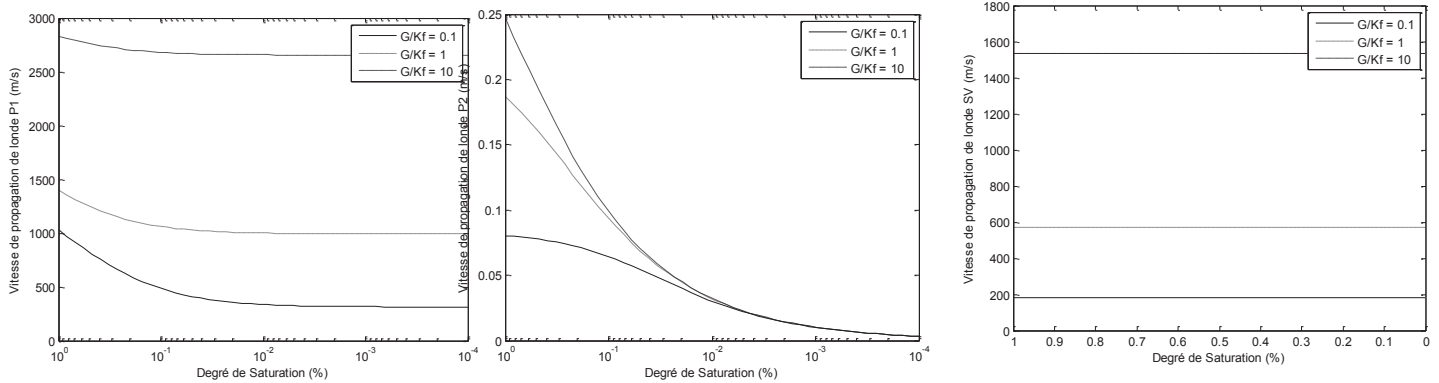


Fig. 5.31 : Effet de la variation du rapport G/K_f sur les vitesses de propagation des ondes élastiques ($f=1\text{Hz}$) – demi-espace rocheux – incidence d’onde SV – $S_r = 100\%$

5.2.5.2. Réponses dynamiques

Il apparait à partir des figures 5.29, 5.30 et 5.31 que le rapport G/K_f exerce une certaine influence sur les déplacements horizontaux et verticaux des ondes P_1 et P_2 alors que les ondes SV ne semble pas sensibles à ce paramètre

• Incidence d'onde P_1

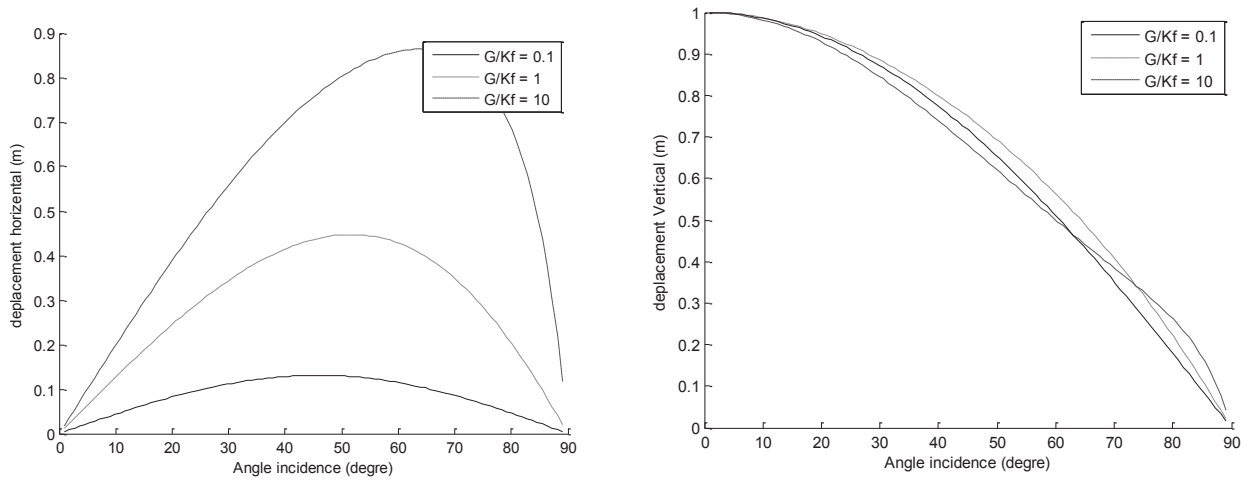


Fig. 5.32 : Effet de la variation du rapport G/Kf sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$)– incidence d'onde P_1) – demi-espace sableux –

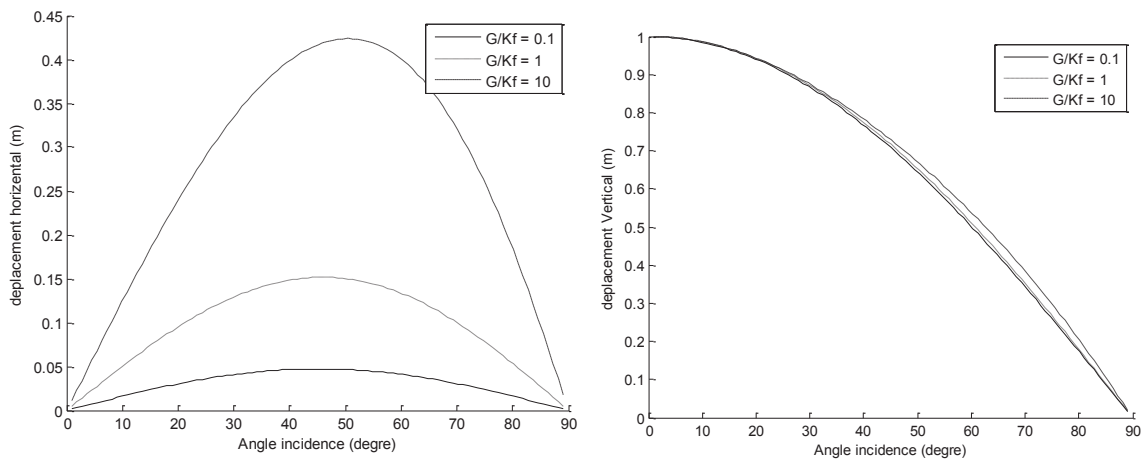


Fig. 5.33 : Effet de la variation du rapport G/Kf sur les déplacements normalisés en surface ($f=1Hz$)– incidence d'onde P_1) – demi-espace rocheux –

• Incidence d'onde P₂

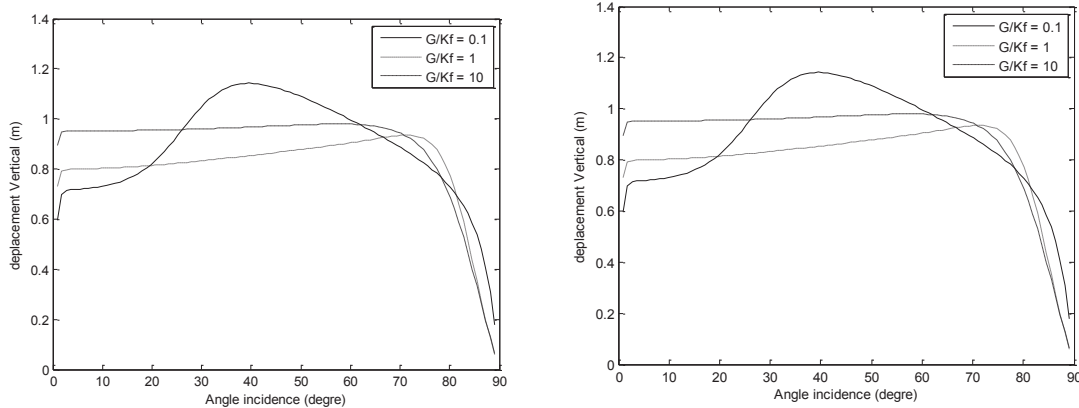


Fig. 5.34 : Effet de la variation du rapport G/Kf sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz)– incidence d'onde P₂– demi-espace sableux –

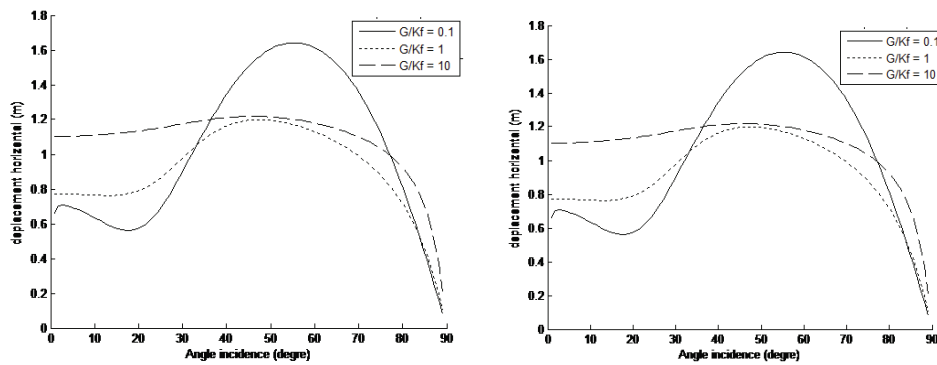


Fig. 5.35 : Effet de la variation du rapport G/Kf sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz)– incidence d'onde P₂– demi-espace rocheux –

• Incidence d'onde SV

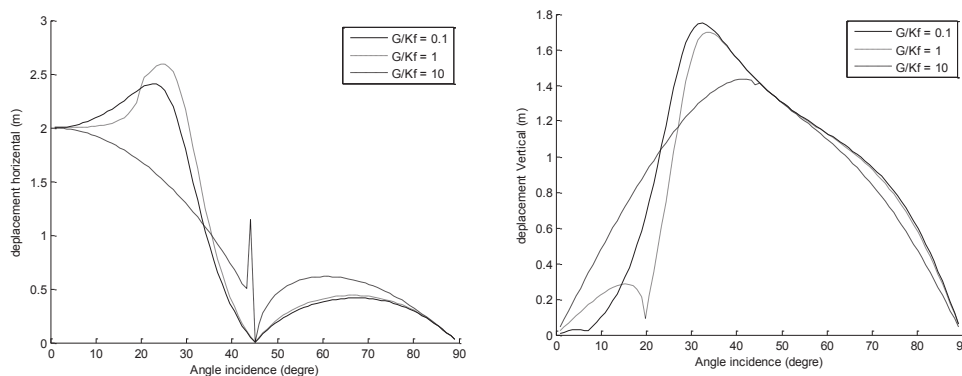


Fig. 5.36 : Effet de la variation du rapport G/Kf sur les déplacements normalisés en surface (f=1Hz)– incidence d'onde SV– demi-espace sableux –

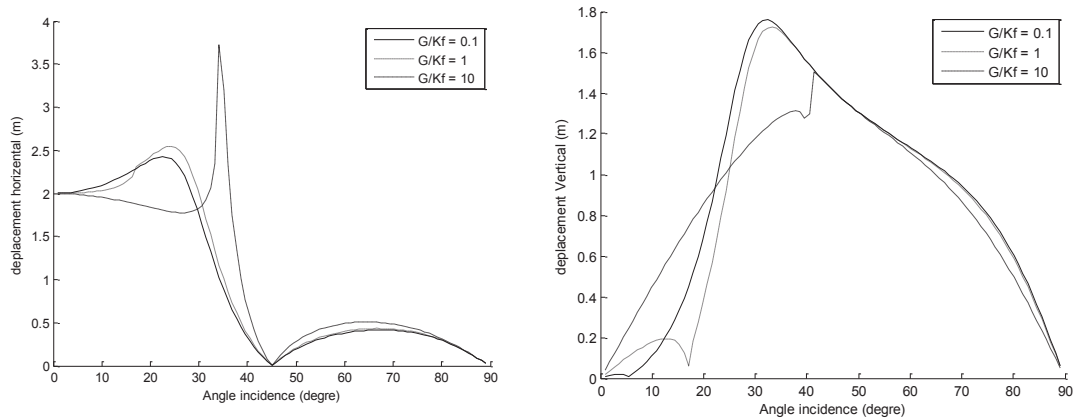


Fig. 5.37 : Effet de la variation du rapport G/K_f sur les déplacements normalisés en surface ($f=1\text{Hz}$)– incidence d'onde SV– demi-espace rocheux –

5.3.Conclusion

Deux demi-espaces ont été utilisés afin de détecter les paramètres géophysiques et géomécaniques qui pourraient avoir de l'influence sur la réponse dynamique des sols poro-élastiques à l'incidence d'ondes P_1 , P_2 et d'ondes SV.

Lorsque le sol est totalement saturé, le fluide interstitiel absorbe une partie de l'énergie transmise et de ce fait la réponse dynamique du sol s'en trouve changée. Cette influence dépend de l'angle d'incidence de l'onde excitatrice, de plus, une très légère baisse du degré de saturation rend le comportement du sol poro-élastique proche de celui du sol élastique non poreux et cela pour le cas des deux demi-espaces étudiés.

La viscosité semble avoir un effet variable en fonction de l'onde incidente. Pour le cas d'une onde P_1 , l'effet est négligeable alors que pour les deux autres types d'ondes, il est beaucoup plus prononcé.

La prise en compte de l'amortissement matériel du sol n'engendre qu'une légère diminution dans la réponse dynamique en champ libre

L'effet de la variation de la porosité du sol ne semble apparaître que dans le cas où l'excitation est provoquée par l'incidence d'une onde P_1 .

Le rapport entre le module de cisaillement et le module d'incompressibilité du fluide influence les vitesses de propagation des ondes sismiques mais n'a d'impact que sur les déplacements induits par l'incidence d'onde P_1 ou P_2

CONCLUSION GENERALE

Une étude sur le comportement des sols poro-élastique face à une excitation sismique a été menée. Pour cela, une approche déterministe a été adoptée avec une résolution analytique. Notre intérêt s'est porté sur le cas du semi-espace uniquement.

Les résultats de nos analyses ont relevé l'influence de plusieurs paramètres géophysiques et géomécaniques sur les vitesses de propagation des ondes sismiques ainsi que sur les déplacements en champ libre :

- Il apparaît que pour les deux exemples de sol traités, une légère diminution du degré de saturation en deçà des 100%, rend le comportement du sol poro élastique similaire à celui du sol élastique non poreux, quel que soit le type d'onde incidente, de plus, la présence du fluide interstitiel amorti la réponse dynamique du sol qui reste généralement inférieure à celle du sol non poreux.
- La viscosité semble avoir un effet variable en fonction de l'onde incidente. Pour le cas d'une onde P_1 , l'effet est négligeable alors que pour les deux autres types d'ondes, il est beaucoup plus prononcé.
- L'amortissement matériel du sol a une influence négligeable sur les vitesses et les réponses dynamiques du sol pour le cas des trois ondes sismique.
- Pour ce qui est de l'effet de la variation de la porosité, il n'est apparent que dans le cas d'incidence d'une onde P_1 (éventuellement une onde P_2), les ondes SV ne se propageant pas à travers l'eau.
- L'analyse de l'effet du rapport G/K_f montre que ce facteur influe clairement les vitesses de propagation des ondes sismiques mais n'a d'impact que sur les déplacements induits par l'incidence d'onde P_1 ou P_2 .

Une étude plus poussée du comportement dynamique des sols poro-élastiques multicouches serait tout à fait judiciable car le processus de propagation d'ondes y est beaucoup plus complexe que dans le cas d'un semi-espace. De même, la prise en compte des nonlinéarités du sol serait tout à fait appropriée et par la suite tous les problèmes d'interaction sol-structure et de liquéfaction.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. A. Biot : Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. *Journal of Applied Physics*. Avril 1962. Volume 33. N° 4. 1482-1498.
- [2] Paul S. On the displacements produced in a porous elastic half-space by an impulsive load (non-dissipative case). *Pure Appl. Geophys.*, 114(4), 605–614, 1976.
- [3] Gajo A. and Mongiovi L. An analytical solution for the transient response of saturated linear elastic porous media. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 19, 399–413, 1995.
- [4] Carcione J. and Quiroga-Goode G. Full frequency-range transient solution for compressional waves in a fluid-saturated viscoacoustic porous medium. *Geophys. Prospecting*, 44, 99–129, 1996.
- [5] Degrande G., De Roeck G., Van Den Broeck P., and Smeulders D. Wave propagation in layered dry, saturated and unsaturated poroelastic media. *Int. J. Solids Struct.*, 35(34–35), 4753–4778, 1998.
- [6] Gerasik V. and Stastna M. Poroelastic acoustic wavetrains excited by harmonic line tractions. *Proc. Royal Soc. A.*, 464(2090), 491–511, 2008.
- [7] Rajapakse R. and Senjuntichai T. Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium. *Earth. Eng. Struct. Dyn.*, 24, 703–722, 1995.
- [8] Lu J. and Hanyga A. Fundamental solution for a layered porous half space subject to a vertical point force or a point fluid source. *Comput. Mech.*, 35, 376–391, 2005.
- [9] B. R. Simon, O. C. Zienkiewicz & D. K. Paul : An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 1984 Volume 8 381-395
- [10] A. P. S. Salvadurai & R. Karpurapu : Composite infinite element for modeling unbounded saturated-soil media *Journal of Geotechnical Engineering* November 1989. Volume 115. N° 11. 1633-1646.
- [11] T. Nogami & M. Kazama : Dynamic response analysis of submerged soil by thin layer element method *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1992 11 17-26

[12] J. Tabatabaie Yazdi, S Valliappan & C. Zhao : Analytical and numerical solutions for wave propagation in water-saturated porous layered half-space . Soil Dynamics and Earthquake Engineering 1994 13 249-257.

[13] S. Valliappan. J. Tabatabaie Yazdi & C. Zhao : Analytical solution for two-dimensional dynamic consolidation in frequency domain. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 1995 Volume 1° 003-052

[14] T.Akivoshi, X. Sun & K. Fuchida : General absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1998. 17. 397-406.

[15] N. Khalili, M. Yazdchi & S. Valliappan : Wave propagation analysis of two-phase saturated porous media using coupled finite-infinite element method Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999. 18. 533-553.

[16] J. Bo & L. Hua : Vertical dynamic response of a disk on a saturated poroelastic half-space Soil Dynamics and Earthquake Engineering 1999 18 437-443

[17] J. Bo & L. Hua : Rocking vibration of rigid disk on saturated poroelastic medium Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2000. 19 469-472

[18] J. Yang & T. Sato : Influence of water saturation on horizontal and vertical motion at a porous soil interface induced by incident SV wave. Soil Earthquake Engineering 2000 19 339-346

[19] J. Yang : Influence of water saturation on horizontal and vertical motion on porous soil interface induced by incident P wave. Soil Dynamics Earthquake 2000 19 575-581

[20] T. Akiyoshi, X. Sun & K. Fuchida : General absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1998. 17. 397-406.

[21] O. C. Zienkiewicz & T. Shiomi : Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1984. Volume 8. 71-96.

[22] J. Dominguez : Boundary Elements in Dynamics. Computational Mechanics Publications. Elsevier Applied Science. 1993.

[23] Coussy O., Mécanique des milieux poreux. Ed. Technip Paris, 1991.

[24] Dormieux L. et Bourgeois E., Introduction à la micromécanique des milieux poreux. Ed. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.

[25] J. Yang & T. Sato : Effect of hydraulic interface conditions on seismic reflection and transmission. 11th European Conference on Earthquake Engineering. 1998 Balkema, Rotterdam.

[26] M. Y. Mehiaoui & M. Hadid. Dynamic response of nonlinear poroelastic multilayered soil profile. Proceeding of the International Conference " Earthquake Engineering in 21st Century (EE-21C)", Skopje, OHRID, REPUBLIC OF MACEDONIA. 21 august – 01 september 2005

[27] M. Y. Mehiaoui, M. Hadid & W. Kouici. Poroelastic stochastic multilayered soil profile amplification. Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake engineering (14WCEE), Beijing, CHINA. October 12 – 17, 2008

ANNEXE

Scripte de Programme (Par Matlab)

```
function varargout =
MasterGUI(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',
mfilename, ...
                'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
                'gui_OpeningFcn',
@MasterGUI_OpeningFcn, ...
                'gui_OutputFcn',
@MasterGUI_OutputFcn, ...
                'gui_LayoutFcn',
[] , ...
                'gui_Callback',
[]);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end
```

```
if nargin
    [varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
end
```

```
function
MasterGUI_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)
guidata(hObject, handles);
```

```
function varargout =
MasterGUI_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;
```

```
function edit1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
```

```
function edit1_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
```

```
if ispc &&
isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundCol
or'))

set(hObject, 'BackgroundColor', 'white
');
end
```

```
function edit7_Callback(hObject,
eventdata, handles)
```

```
function edit7_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
```

```
if ispc &&
isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundCol
or'))
```

```
set(hObject, 'BackgroundColor', 'white
');
end
```

```
function edit8_Callback(hObject,
eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
pperties.
function edit8_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
```

ANNEXE

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))

set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit9_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit9_CreateFcn(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))
```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit10_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit10_CreateFcn(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))
```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit11_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit11_CreateFcn(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))
```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit12_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit12_CreateFcn(hObject,
 eventdata, handles)
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))
```

```
set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

ANNEXE

```
function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit17_Callback(~, ~, ~)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit17_CreateFcn(hObject, ~, handles)
```

ANNEXE

```
% hObject    handle to edit17 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not
created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))

set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit18_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to edit18 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String')
returns contents of edit18 as text
%
str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit18 as a
double
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit18_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to edit18 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not
created until after all CreateFcns
called
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))

set(hObject,'BackgroundColor','white
');
end
```

```
function edit19_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to edit19 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String')
returns contents of edit19 as text
%
str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit19 as a
double
```

```
% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function edit19_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to edit19 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not
created until after all CreateFcns
called
```

```
% Hint: edit controls usually have a
white backpund on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor
'),
```

ANNEXE

```

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor')

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% to calcul
% --- Executes on button press in
pushbutton3.
function
[Vs,Vp1,Vp2,Sr1, couleur,UH,UV,angle]
=pushbutton3_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3
(see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

%u=str2num(get(handles.edit13,'string'));
vis=str2num(get(handles.edit11,'string'));
pf=str2num(get(handles.edit14,'string'));
ps=str2num(get(handles.edit1,'string'));
k=str2num(get(handles.edit12,'string'));
n=str2num(get(handles.edit7,'string'));
v=str2num(get(handles.edit15,'string'));
E=str2num(get(handles.edit16,'string'));
Ks=str2num(get(handles.edit9,'string'));
Kb=str2num(get(handles.edit8,'string'));
Kw=str2num(get(handles.edit10,'string'));

```

```

f=str2num(get(handles.edit17,'string'));
Pa=str2num(get(handles.edit18,'string'));
Sr=str2num(get(handles.edit19,'string'));

Sr1=1-Sr;
%Sr1=logspace(-4,0);
Sr1=logspace(-4,0);

if get(handles.G,'value')==1
    E=E*(1+i*2*0.05);
else

E=str2num(get(handles.edit16,'string'));
end

if get(handles.Rouge,'value')== 1
    couleur='r';
elseif get(handles.Bleu,'value')== 1
    couleur='b';
elseif get(handles.o,'value')== 1
    couleur='o';
elseif get(handles.x,'value')== 1
    couleur='x';
elseif get(handles.plus,'value')== 1
    couleur='+';
end

w=2.*3.14.*f;          %w=n(U-
u);U:dep de solide & u:dep de fluide
y= E.*v./((1+v).*(1-2.*v)); %y ;
Kf=1./(1/Kw+(Sr1)/Pa);
Kd=Ks.*(1+n.*(Ks./Kf-1));
alpha=1-Kb./Ks;
M=Ks.^2./(Kd-Kb);
po=ps.*(1-n)+pf.*n;
b=vis./k;

%vitesse de pppagation des ondes de
cisaillement
Vs=sqrt(E.*(i*b.*n-w*pf)/(w*pf^2.*n-
w.*po*pf+i.*po.*b.*n));
%vitesse de pppagation des ondes de
compression P1 et P2
%Vp1=1./(2.*M.*n.*(y+2.*u)).*sqrt(-
2.*M.*n.*(y+2.*u).*(2.*M.*w.*n.*pf.*
alpha-M.*w.*n.*p+y.*i.*b.*n-
y.*pf.*w+2.*u.*i.*b.*n-
2.*u.*pf.*w+alpha.^2.*M.*i.*b.*n-

```

ANNEXE

```

alpha.^2.*M.*pf.*w-
sqrt(y.^2.*pf.^2.*w.^2+4.*u.^2.*pf.^
2.*w.^2-
8.*u.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+M.^2.*w.^2.*
n.^2.*p.^2+y.^2.*i.^2.*b.^2.*n.^2+4.
*y.*pf.^2.*w.^2.*u+4.*u.^2.*i.^2.*b.
^2.*n.^2+alpha.^4.*M.^2.*pf.^2.*w.^2
-8.*u.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w-
4.*y.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w+4.
*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.^2.*alpha.^2+4
.*M.*n.^2.*y.*w.^2.*pf.^2-
4.*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.*alpha.*p+4.
*M.*w.*n.^2.*pf.*alpha.*y.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*y+8.*M.
*w.*n.^2.*pf.*alpha.*u.*i.*b-
8.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*u+4.*M.
^2.*w.*n.^2.*pf.*alpha.^3.*i.*b-
4.*M.^2.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.^3+2.
*M.*w.*n.^2.*p.*y.*i.*b-
2.*M.*w.^2.*n.*p.*y.*pf+4.*M.*w.*n.^
2.*p.*u.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*p.*u.*pf-
2.*M.^2.*w.*n.^2.*p.*alpha.^2.*i.*b+
2.*M.^2.*w.^2.*n.*p.*alpha.^2.*pf-
2.*y.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+4.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*u-
8.*y.*i.*b.*n.*u.*pf.*w+2.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*alpha.^2.*M+2.*y.*pf.^2.
*w.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*i.^2.*b.^2.
*n.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*pf.^2.*w.^2
.*alpha.^2.*M+alpha.^4.*M.^2.*i.^2.*
b.^2.*n.^2-
2.*alpha.^4.*M.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+8.
*M.*n.^2.*u.*w.^2.*pf.^2)).*w);
%Vp2=1./(2.*M.*n.*(y+2.*u)).*sqrt(-
2.*M.*n.*(y+2.*u).*w.*(2.*M.*w.*n.*p
f.*alpha-M.*w.*n.*p+y.*i.*b.*n-
y.*pf.*w+2.*u.*i.*b.*n-
2.*u.*pf.*w+alpha.^2.*M.*i.*b.*n-
alpha.^2.*M.*pf.*w+sqrt(y.^2.*pf.^2.
*w.^2+4.*u.^2.*pf.^2.*w.^2-
8.*u.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+M.^2.*w.^2.*
n.^2.*p.^2+y.^2.*i.^2.*b.^2.*n.^2+4.
*y.*pf.^2.*w.^2.*u+4.*u.^2.*i.^2.*b.
^2.*n.^2+alpha.^4.*M.^2.*pf.^2.*w.^2
-8.*u.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w-
4.*y.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w+4.
*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.^2.*alpha.^2+4
.*M.*n.^2.*y.*w.^2.*pf.^2-
4.*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.*alpha.*p+4.
*M.*w.*n.^2.*pf.*alpha.*y.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*y+8.*M.
*w.*n.^2.*pf.*alpha.*u.*i.*b-
8.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*u+4.*M.
^2.*w.*n.^2.*pf.*alpha.^3.*i.*b-
4.*M.^2.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.^3+2.
*M.*w.*n.^2.*p.*y.*i.*b-

```

```

2.*M.*w.^2.*n.*p.*y.*pf+4.*M.*w.*n.^
2.*p.*u.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*p.*u.*pf-
2.*M.^2.*w.*n.^2.*p.*alpha.^2.*i.*b+
2.*M.^2.*w.^2.*n.*p.*alpha.^2.*pf-
2.*y.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+4.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*u-
8.*y.*i.*b.*n.*u.*pf.*w+2.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*alpha.^2.*M+2.*y.*pf.^2.
*w.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*i.^2.*b.^2.
*n.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*pf.^2.*w.^2
.*alpha.^2.*M+alpha.^4.*M.^2.*i.^2.*
b.^2.*n.^2-
2.*alpha.^4.*M.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+8.
*M.*n.^2.*u.*w.^2.*pf.^2));
A=M.*(y+2*E);
B=M.*w^2.*(2*pf*alpha-
po)+(y+2*E+alpha^2.*M).* (i*b*w-
pf./n.*w^2);
C=w^4.*(po.*pf./n-pf^2)-i*b.*po*w^3;
Vp1=w./sqrt((-B-sqrt(B.^2-
(4.*A.*C)))./2./A);
Vp2=w./sqrt((-B+sqrt(B.^2-
(4.*A.*C)))./2./A);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
calcul displacement :

```

```

%[Vsone,Vp1one,Vp2one,M]=CalUni_Call
back(hObject, eventdata, handles);

```

```

k1=w./Vp1(1);
k2=w./Vp2(1);
k3=w./Vs(1);
phil=0.;
npts=100;
for j=1:npts;
phil=phil+pi/2/npts;
if get(handles.Vp1,'value')==1
p=k1*sin(phil);
elseif get(handles.Vp2,'value')==1
p=k2*sin(phil);
elseif get(handles.Vs,'value')==1
p=k3*sin(phil);
end
q1=sqrt(k1^2-p^2);
q2=sqrt(k2^2-p^2);
q3=sqrt(k3^2-p^2);

z=0;

Cp1=cos(q1*z);

```

ANNEXE

```

Cp2=cos(q2*z);
Cs=cos(q3*z);
Sp1=sin(q1);
Sp2=sin(q2);
Ss=sin(q3);
sygma1=( (y+2*E+alpha^2*M(1)) *k1^2-
po*w^2) / (pf*w^2-alpha*M(1) *k1^2);
sygma2=( (y+2*E+alpha^2*M(1)) *k2^2-
po*w^2) / (pf*w^2-alpha*M(1) *k2^2);
sygma3=( (E*k3^2-po*w^2) / (pf*w^2) );
H1=(y+alpha^2*M(1)+2*E+alpha*M(1) *sy
gma1) *k1^2-2*E*p^2;
H2=(y+alpha^2*M(1)+2*E+alpha*M(1) *sy
gma2) *k2^2-2*E*p^2;
D1=(sygma1+alpha) *M(1);
D2=(sygma2+alpha) *M(1);
N1=E*p*q1;
N2=E*p*q2;
N3=E*p*q3;
N4=E*(q3^2-p^2);
angle(j)=phi1*90/pi*2;

```

```

jj=[-i*p*Cp1      -p*Sp1      -
i*p*Cp2      -p*Sp2
q3*Ss      i*q3*Cs
      -q1*Sp1      -i*q1*Cp1
-q2*Sp2      -i*q2*Cp2      -
i*p*Cs      -p*Ss
      -sygma1*q1*Sp1      -
i*sygma1*q1*Cp1      -sygma2*q2*Sp2      -
i*sygma2*q2*Cp2      -i*sygma3*p*Cs      -
sygma3*p*Ss
      k1^2*D1*Cp1      -i*k1^2*D1*Sp1
k2^2*D2*Cp2      -i*k1^2*D2*Sp2
0      0
      2*i*N1*Sp1      -2*N1*Cp1
2*i*N2*Sp2      -2*N2*Cp2
N4*Cs      -i*N4*Ss
      -H1*Cp1      i*H1*Sp1
-H2*Cp2      i*H2*Sp2
2*i*N3*Ss      -2*N3*Cs];

```

```

jinv=jj^(-1);
A=[jinv(1,1) -jinv(2,2) -
jinv(2,3);jinv(3,1) -jinv(4,2) -
jinv(4,3);-jinv(6,1) jinv(5,2) -
jinv(5,3)];
if get(handles.Vp1,'value')==1
    B=[2;0;0];
elseif
get(handles.Vp2,'value')==1
    B=[0;2;0];
elseif get(handles.Vs,'value')==1
    B=[0;0;2];
end

```

```

uu=A\B;
ux(j)=abs(uu(1));
uz(j)=abs(uu(2));
wz(j)=abs(uu(3));

end
if get(handles.Vp1,'value')==1
    amplitude=2*k1;
elseif
get(handles.Vp2,'value')==1
    amplitude=2*k2;
elseif get(handles.Vs,'value')==1
    amplitude=k3;
end

UH=ux/amplitude;
UV=uz/amplitude;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% bouton CALCUL
% --- Executes on button press in
pushbutton1.
function
pushbutton1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1
(see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

[Vs,Vp1,Vp2,M,UHP1,UVP1,UHP2,UVP2,UH
Sv,UVSv]=CalUni_Callback(hObject,
eventdata, handles)

```

ANNEXE

```
Vs=sqrt(real(Vs).^2+imag(Vs).^2);
Vp1=sqrt(real(Vp1).^2+imag(Vp1).^2);
Vp2=sqrt(real(Vp2).^2+imag(Vp2).^2);
```

```
if get(handles.vitesse,'value')==1
```

```
Vss=num2str(Vs);
Vpp1=num2str(Vp1);
Vpp2=num2str(Vp2);
set(handles.text19,'string',Vss);
set(handles.text20,'string',Vpp1);
set(handles.text21,'string',Vpp2);
```

```
elseif get(handles.horiz,'value')==1
```

```
Vss=num2str(UHSv);
Vpp1=num2str(UHP1);
Vpp2=num2str(UHP2);
set(handles.text19,'string',Vss);
set(handles.text20,'string',Vpp1);
set(handles.text21,'string',Vpp2);
```

```
elseif get(handles.vert,'value')==1
```

```
Vss=num2str(UVSv);
Vpp1=num2str(UVP1);
Vpp2=num2str(UVP2);
set(handles.text19,'string',Vss);
set(handles.text20,'string',Vpp1);
set(handles.text21,'string',Vpp2);
end
```

```
%les résultats de calculs :
```

```
% --- Executes on button press in
CalUni.
```

```
function
[Vscomp,Vp1comp,Vp2comp,M,UHP1,UVP1,
UHP2,UVP2,UHSv,UVSv]=CalUni_Callback
(hObject,eventdata,handles)
% hObject handle to CalUni (see
GCBO)
% eventdata reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
%u=str2num(get(handles.edit13,'string'));
vis=str2num(get(handles.edit11,'string'));
pf=str2num(get(handles.edit14,'string'));
```

```
ps=str2num(get(handles.edit1,'string'));
k=str2num(get(handles.edit12,'string'));
n=str2num(get(handles.edit7,'string'));
v=str2num(get(handles.edit15,'string'));
E=str2num(get(handles.edit16,'string'));
Ks=str2num(get(handles.edit9,'string'));
Kb=str2num(get(handles.edit8,'string'));
Kw=str2num(get(handles.edit10,'string'));
f=str2num(get(handles.edit17,'string'));
Pa=str2num(get(handles.edit18,'string'));
Sr=str2num(get(handles.edit19,'string'));
```

```
Sr1=1-Sr;
```

```
if get(handles.G,'value')==1
```

```
E=E*(1+i*2*0.05);
```

```
else
```

```
E=str2num(get(handles.edit16,'string'));
end
```

```
w=2.*3.14.*f; %w=n(U-
u);U:dep de solide & u:dep de fluide
y= E.*v./((1+v).*(1-2.*v)); %y ;
Kf=1./(1/Kw+(Sr1)/Pa);
Kd=Ks.*(1+n.*(Ks./Kf-1));
alpha=1-Kb./Ks;
M=Ks.^2./(Kd-Kb);
po=ps.*(1-n)+pf.*n;
b=vis./k;
```

```
%vitesse de propagation des ondes de
cisaillement
```

```
Vscomp=sqrt(E.*(i*b.*n-
w*pf)/(w*pf^2.*n-
w.*po*pf+i.*po.*b.*n));
%vitesse de propagation des ondes de
compression P1 et P2
%Vp1=1./(2.*M.*n.*(y+2.*u)).*sqrt(-
2.*M.*n.*(y+2.*u).*(2.*M.*w.*n.*pf.*
alpha-M.*w.*n.*p+y.*i.*b.*n-
y.*pf.*w+2.*u.*i.*b.*n-
2.*u.*pf.*w+alpha.^2.*M.*i.*b.*n-
```

ANNEXE

```

alpha.^2.*M.*pf.*w-
sqrt(y.^2.*pf.^2.*w.^2+4.*u.^2.*pf.^
2.*w.^2-
8.*u.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+M.^2.*w.^2.*
n.^2.*p.^2+y.^2.*i.^2.*b.^2.*n.^2+4.
*y.*pf.^2.*w.^2.*u+4.*u.^2.*i.^2.*b.
^2.*n.^2+alpha.^4.*M.^2.*pf.^2.*w.^2
-8.*u.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w-
4.*y.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w+4.
*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.^2.*alpha.^2+4
.*M.*n.^2.*y.*w.^2.*pf.^2-
4.*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.*alpha.*p+4.
*M.*w.*n.^2.*pf.*alpha.*y.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*y+8.*M.
*w.*n.^2.*pf.*alpha.*u.*i.*b-
8.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*u+4.*M.
.^2.*w.*n.^2.*pf.*alpha.^3.*i.*b-
4.*M.^2.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.^3+2.
*M.*w.*n.^2.*p.*y.*i.*b-
2.*M.*w.^2.*n.*p.*y.*pf+4.*M.*w.*n.^
2.*p.*u.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*p.*u.*pf-
2.*M.^2.*w.*n.^2.*p.*alpha.^2.*i.*b+
2.*M.^2.*w.^2.*n.*p.*alpha.^2.*pf-
2.*y.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+4.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*u-
8.*y.*i.*b.*n.*u.*pf.*w+2.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*alpha.^2.*M+2.*y.*pf.^2.
*w.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*i.^2.*b.^2.
*n.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*pf.^2.*w.^2
.*alpha.^2.*M+alpha.^4.*M.^2.*i.^2.*
b.^2.*n.^2-
2.*alpha.^4.*M.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+8.
*M.*n.^2.*u.*w.^2.*pf.^2)).*w);
%Vp2=1./(2.*M.*n.*(y+2.*u)).*sqrt(-
2.*M.*n.*(y+2.*u).*w.*(2.*M.*w.*n.*p
f.*alpha-M.*w.*n.*p+y.*i.*b.*n-
y.*pf.*w+2.*u.*i.*b.*n-
2.*u.*pf.*w+alpha.^2.*M.*i.*b.*n-
alpha.^2.*M.*pf.*w+sqrt(y.^2.*pf.^2.
*w.^2+4.*u.^2.*pf.^2.*w.^2-
8.*u.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+M.^2.*w.^2.*
n.^2.*p.^2+y.^2.*i.^2.*b.^2.*n.^2+4.
*y.*pf.^2.*w.^2.*u+4.*u.^2.*i.^2.*b.
^2.*n.^2+alpha.^4.*M.^2.*pf.^2.*w.^2
-8.*u.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w-
4.*y.*i.*b.*n.*alpha.^2.*M.*pf.*w+4.
*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.^2.*alpha.^2+4
.*M.*n.^2.*y.*w.^2.*pf.^2-
4.*M.^2.*w.^2.*n.^2.*pf.*alpha.*p+4.
*M.*w.*n.^2.*pf.*alpha.*y.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*y+8.*M.
*w.*n.^2.*pf.*alpha.*u.*i.*b-
8.*M.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.*u+4.*M.
.^2.*w.*n.^2.*pf.*alpha.^3.*i.*b-
4.*M.^2.*w.^2.*n.*pf.^2.*alpha.^3+2.
*M.*w.*n.^2.*p.*y.*i.*b-

```

```

2.*M.*w.^2.*n.*p.*y.*pf+4.*M.*w.*n.^
2.*p.*u.*i.*b-
4.*M.*w.^2.*n.*p.*u.*pf-
2.*M.^2.*w.*n.^2.*p.*alpha.^2.*i.*b+
2.*M.^2.*w.^2.*n.*p.*alpha.^2.*pf-
2.*y.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+4.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*u-
8.*y.*i.*b.*n.*u.*pf.*w+2.*y.*i.^2.*
b.^2.*n.^2.*alpha.^2.*M+2.*y.*pf.^2.
*w.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*i.^2.*b.^2.
*n.^2.*alpha.^2.*M+4.*u.*pf.^2.*w.^2
.*alpha.^2.*M+alpha.^4.*M.^2.*i.^2.*
b.^2.*n.^2-
2.*alpha.^4.*M.^2.*i.*b.*n.*pf.*w+8.
*M.*n.^2.*u.*w.^2.*pf.^2));
A=M.*(y+2*E);
B=M.*w^2.*(2*pf*alpha-
po)+(y+2*E+alpha^2.*M).*(i*b*w-
pf./n.*w^2);
C=w^4.*(po.*pf./n-pf^2)-i*b.*po*w^3;
Vp1comp=w./sqrt((-B-sqrt(B.^2-
(4.*A.*C)))./2./A);
Vp2comp=w./sqrt((-B+sqrt(B.^2-
(4.*A.*C)))./2./A);

Vs=sqrt(real(Vscomp).^2+imag(Vscomp)
.^2);
Vp1=sqrt(real(Vp1comp).^2+imag(Vp1co
mp).^2);
Vp2=sqrt(real(Vp2comp).^2+imag(Vp2co
mp).^2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%D"placeme
nt :

UHP1=0;UHP2=0;UHSv=0;
UVP1=0;UVP2=0;UVSv=0;

for iiii=1:3

k1=w./Vp1(1);
k2=w./Vp2(1);
k3=w./Vs(1);
phil=str2num(get(handles.edit13,'str
ing'))*pi/180;
phil=0;
npts=100;

phil=phil+pi/2/npts;
if iiii==1
    p=k1*sin(phil);
elseif iiii==2
    p=k2*sin(phil);
elseif iiii==3
    p=k3*sin(phil);
end

```

ANNEXE

```

q1=sqrt(k1^2-p^2);
q2=sqrt(k2^2-p^2);
q3=sqrt(k3^2-p^2);

z=0;

Cp1=cos(q1*z);
Cp2=cos(q2*z);
Cs=cos(q3*z);
Sp1=sin(q1);
Sp2=sin(q2);
Ss=sin(q3);
sygma1=((y+2*E+alpha^2*M(1))*k1^2-
po*w^2)/(pf*w^2-alpha*M(1)*k1^2);
sygma2=((y+2*E+alpha^2*M(1))*k2^2-
po*w^2)/(pf*w^2-alpha*M(1)*k2^2);
sygma3=((E*k3^2-po*w^2)/(pf*w^2));
H1=(y+alpha^2*M(1)+2*E+alpha*M(1)*sy
gma1)*k1^2-2*E*p^2;
H2=(y+alpha^2*M(1)+2*E+alpha*M(1)*sy
gma2)*k2^2-2*E*p^2;
D1=(sygma1+alpha)*M(1);
D2=(sygma2+alpha)*M(1);
N1=E*p*q1;
N2=E*p*q2;
N3=E*p*q3;
N4=E*(q3^2-p^2);
angle=phi1*90/pi*2;

jj=[-i*p*Cp1      -p*Sp1      -
i*p*Cp2      -p*Sp2
q3*Ss      i*q3*Cs
      -q1*Sp1      -i*q1*Cp1
-q2*Sp2      -i*q2*Cp2      -
i*p*Cs      -p*Ss
      -sygma1*q1*Sp1      -
i*sygma1*q1*Cp1      -sygma2*q2*Sp2      -
i*sygma2*q2*Cp2      -i*sygma3*p*Cs      -
sygma3*p*Ss
      k1^2*D1*Cp1      -i*k1^2*D1*Sp1
k2^2*D2*Cp2      -i*k1^2*D2*Sp2
0      0
      2*i*N1*Sp1      -2*N1*Cp1
2*i*N2*Sp2      -2*N2*Cp2
N4*Cs      -i*N4*Ss
      -H1*Cp1      i*H1*Sp1
-H2*Cp2      i*H2*Sp2
2*i*N3*Ss      -2*N3*Cs];

jinv=jj^(-1);
A=[jinv(1,1) -jinv(2,2) -
jinv(2,3);jinv(3,1) -jinv(4,2) -
jinv(4,3);-jinv(6,1) jinv(5,2) -
jinv(5,3)];
if iiii==1
    B=[2;0;0];
elseif iiii==2
    B=[0;2;0];
elseif iiii==3
    B=[0;0;2];
end

uu=A\B;
ux=abs(uu(1));
uz=abs(uu(2));
wz=abs(uu(3));

if iiii==1
    amplitude=2*k1;
    UHP1=ux/amplitude;
    UVP1=uz/amplitude;
elseif iiii==2
    amplitude=2*k2;
    UHP2=ux/amplitude;
    UVP2=uz/amplitude;
elseif iiii==3
    amplitude=k3;
    UHSv=ux/amplitude;
    UVSv=uz/amplitude;
end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%TRACER
% --- Executes on button press in
pushbutton1.
function
pushbutton2_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1
(see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

[Vs,Vp1,Vp2,Sr]=pushbutton3_Callback
(hObject, eventdata, handles);

```

ANNEXE

```

set(handles.Vs, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp1, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp2, 'Enable', 'on');

if get(handles.Vp1, 'value')== 1
    Vp1_Callback(hObject, eventdata,
handles)
elseif get(handles.Vp2, 'value')== 1
    Vp2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
elseif get(handles.Vs, 'value')== 1
    Vs_Callback(hObject, eventdata,
handles)
end

% --- Executes on button press in
Vs.
function Vs_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to Vs (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of Vs

[Vs,Vp1,Vp2,Sr, couleur,UH,UV, angle]=
pushbutton3_Callback(hObject,
eventdata, handles);

set(handles.Vs, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp1, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp2, 'Enable', 'on');

%Sr=0:0.001:1;

if get(hObject, 'value')== 1
    set(handles.Vp1, 'value', 0);
    set(handles.Vp2, 'value', 0);
    %cla

set(handles.axeVs, 'visible', 'on');

set(handles.axeVp1, 'visible', 'off');

set(handles.axeVp2, 'visible', 'off');
axes(handles.axeVs);

    if
get(handles.vitesse, 'value')==1

    Sr=logspace(0,-4);
    semilogx(Sr,Vs, couleur)
    hold on
    xlabel('saturation');
    ylabel('vitesse donne S');
    set(gca, 'Xdir', 'reverse');

    elseif
get(handles.horiz, 'value')==1
    plot(angle,UH, couleur)
    hold on
    elseif
get(handles.vert, 'value')==1
    plot(angle,UV, couleur)
    hold on
    end
end

% --- Executes on button press in
Vp1.
function Vp1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to Vp1 (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of Vp1
[Vs,Vp1,Vp2,Sr, couleur,UH,UV, angle]=
pushbutton3_Callback(hObject,
eventdata, handles);
set(handles.Vs, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp1, 'Enable', 'on');
set(handles.Vp2, 'Enable', 'on');

if get(hObject, 'value')== 1
    set(handles.Vs, 'value', 0);
    set(handles.Vp2, 'value', 0);

```

ANNEXE

```

%cla

set(handles.axeVs,'visible','off');
set(handles.axeVp1,'visible','on');

set(handles.axeVp2,'visible','off');
axes(handles.axeVp1);

if
get(handles.vitesse,'value')==1

    Sr=logspace(0,-4);
    semilogx(Sr,Vp1, couleur)
    hold on
    xlabel('saturation');
    ylabel('vitesse donde p1');
    set(gca,'Xdir','reverse');

elseif
get(handles.horiz,'value')==1
    plot(angle,UH, couleur)
    hold on
elseif
get(handles.vert,'value')==1
    plot(angle,UV, couleur)
    hold on
end

end

% --- Executes on button press in
Vp2.
function Vp2_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to Vp2 (see
GCBO)
% eventdata reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of Vp2
[Vs,Vp1,Vp2,Sr, couleur,UH,UV, angle]=
pushbutton3_Callback(hObject,
 eventdata, handles);
set(handles.Vs,'Enable','on');
set(handles.Vp1,'Enable','on');
set(handles.Vp2,'Enable','on');

```

```

%Sr=logspace(0,-4);

if get(hObject,'value')== 1
    set(handles.Vs,'value',0);
    set(handles.Vp1,'value',0);
%cla

set(handles.axeVs,'visible','off');

set(handles.axeVp1,'visible','off');

set(handles.axeVp2,'visible','on');
axes(handles.axeVp2);

if
get(handles.vitesse,'value')==1

    Sr=logspace(0,-4);
    semilogx(Sr,Vp2, couleur)
    hold on
    xlabel('saturation');
    ylabel('vitesse donde p2');
    set(gca,'Xdir','reverse');

elseif
get(handles.horiz,'value')==1
    plot(angle,UH, couleur)
    hold on
elseif
get(handles.vert,'value')==1
    plot(angle,UV, couleur)
    hold on
end

end

%EFFACER
% --- Executes on button press in
pushbutton4.
function
pushbutton4_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4
(see GCBO)
% eventdata reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

cla(handles.axeVs)
cla(handles.axeVp1)
cla(handles.axeVp2)

```

ANNEXE

```
% --- Executes on button press in G.
function G_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to G (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of G
```

```
% --- Executes on button press in
Rouge.
function Rouge_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to Rouge (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of Rouge
```

```
set(handles.Bleu,'value',0);
set(handles.o,'value',0);
set(handles.x,'value',0);
set(handles.plus,'value',0);
```

```
% --- Executes on button press in
Bleu.
function Bleu_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to Bleu (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of Bleu
```

```
set(handles.Rouge,'value',0);
set(handles.o,'value',0);
set(handles.x,'value',0);
set(handles.plus,'value',0);
```

```
% --- Executes on button press in x.
function x_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to x (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of x
set(handles.o,'value',0);
set(handles.Bleu,'value',0);
set(handles.plus,'value',0);
set(handles.Rouge,'value',0);
```

```
% --- Executes on button press in o.
function o_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to o (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of o
set(handles.Bleu,'value',0);
set(handles.x,'value',0);
set(handles.plus,'value',0);
set(handles.Rouge,'value',0);
```

```
% --- Executes on button press in
plus.
function plus_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to plus (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of plus
set(handles.o,'value',0);
set(handles.x,'value',0);
set(handles.Bleu,'value',0);
set(handles.Rouge,'value',0);
```

ANNEXE

```
% --- Executes on selection change
in Saturation.
function
Saturation_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to Saturation
(see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents =
cellstr(get(hObject,'String'))
returns Saturation contents as cell
array
%
contents{get(hObject,'Value')}
returns selected item fpm Saturation

% --- Executes during object
creation, after setting all
ppperties.
function
Saturation_CreateFcn(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to Saturation
(see GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not
created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually
have a white backgpund on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundCol
or'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in
vitesse.

function vitesse_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to vitesse (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of vitesse
set(handles.horiz,'value',0);
set(handles.vert,'value',0);
cla
hold off

% --- Executes on button press in
horiz.
function horiz_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to horiz (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of horiz
set(handles.vitesse,'value',0);
set(handles.vert,'value',0);
cla
hold off

% --- Executes on button press in
vert.
function vert_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to vert (see
GCBO)
% eventdata  reserved - to be
defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles
and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns
toggle state of vert
set(handles.horiz,'value',0);
set(handles.vitesse,'value',0);
cla
hold off
```