

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

Interaction Cinématique
Sol-pile de pont

Encadré par :

Mme MESSAOUDI Akila

Présenté par :

LAMA Amine

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciement

Tout d'abord, Je tiens à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions.

Je Souhaite Exprimer, Tout Particulièrement, Mes Vifs Remerciements Et ma Profonde Reconnaissance A mon Encadreur Mme : A.Messaoudi épouse Mezouar de m'avoir Fait Confiance Et Accepter De Diriger Ce Mémoire.

Je remercie mes très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

Je tiens à remercier tous Les Enseignants, de L'ENSTP Sans Exception, Enfin, Je remercie chaleureusement, le président et les membres du jury d'avoir Accepter d'examiner ce mémoire.

Lama Amir



Dédicace

D'abord et avant tout je remercie ALLAH de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail :

A mes parents pour leurs sacrifices qui m'ont donné depuis ma naissance.

A mes frères :Younes et Mohammed Zied.

A mes sœurs :Belkis ,Khadidja et Nadjet.

A toute la famille LAMA.

A mesamis :Mohammed ,AbdAlali ,Abu Bakker Abid ,Zakaria,

A mon cher ami d'enfance mon cousin LAMA Mouloud.

En fin a tous qui ont contribué de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail

AMIR

Résumé

Le but de ce travail est l'étude de l'interaction sol-pile de pont et son effet sur la réponse de la structure à la force sismique.

Cette étude est basée sur quelques notions de propagation d'onde et les différents types d'interaction ainsi que quelques travaux antérieurs.

Et pour mettre en pratique cette étude on termine par une application sur un modèle de pont en utilisant un logiciel de géotechnique « flush » .

ملخص :

الغرض من هذا العمل هو دراسة التفاعل بين الأرضية وعمود الجسر تأثيرها على استجابة الهيكل للقوة الزلزالية. وتستند هذه الدراسة على بعض المفاهيم كالتنشر الموجات و مختلف أنواع التفاعل وكذلك بعض الأعمال السابقة. ولوضع هذه الدراسة على أرض الواقع نقوم بتطبيقها على نموذج جسر باستخدام برنامج متخصص في الدراسات الجيوتقنية .

Summary:

The purpose of this work is the study of the bridge pile-soil interaction and its effect on the response of the structure to the seismic force.

This study is based on some concepts of wave propagation and the different types of interaction as well as some earlier work.

And for the application of this study we end this work with an application on a bridge model using a geotechnical software "flush".

LISTE DES FIGURES

Figure .1:Interaction sol structure	1
Figure II.1:Les différents types de failles	4
Figure II.2:Les caractéristiques d'un seisme	5
Figure II.3:Shéma des ondes de volume et de surface	7
Figure II.4:Shéma de Réflexion et réfraction des ondes sismiques	8
Figure III.1:Illustration du phénomène d'interaction sol-structure.....	10
Figure III.2:Exemple d'interaction cinématique.....	12
Figure II.3:Interaction cinématique pour un pieu isolé.....	22
Figure IV.1 : Modèle d'interaction cinématique sol-pieux du pont	19
Figure IV.2:Excitation sismique au rocher	19
Figure IV.3a:Reponse au noeud 1.....	21
Figure IV.3b:Reponse au noeud 1981	21
Figure IV.4a:Reponse au noeud 801.....	22
Figure IV.4b:Reponse au noeud 1181	22
Figure IV.5a:Reponse au noeud 810.....	23
Figure IV.5b:Reponse au noeud 1190	23
Figure IV.6a:Reponse au noeud 819.....	24
Figure IV.6b:Reponse au noeud 1199	24
Figure IV.7a:Reponse au noeud 1.....	25
Figure IV.7b:Reponse au noeud 1981	25
Figure IV.8a:Reponse au noeud 801.....	26
Figure IV.8b:Reponse au noeud 1181	26
Figure IV.9a:Reponse au noeud 810.....	27
Figure IV.9b:Reponse au noeud 1190	27
Figure IV.10a:Reponse au noeud 819.....	28
Figure IV.10b:Reponse au noeud 1199	28

LISTE DES TABLAUX

Tableau IV.1:Caractéristique mécaniques du sol	15
Tableau IV.2a:Tableau comparatif des accélérations maximales.....	22
Tableau IV.2b:Coefficients Iu	22

Sommaire

I. INTRODUCTION GENERALE.

II. NOTION DE PROPAGATION D'ONDES.

I. Introduction	3
II. Les origines d'un seisme	3
III. Caractéristiques d'un séisme	4
IV. Définition des ondes sismiques	5
IV.1 Les Ondes de volume	5
IV.2 les Ondes de surface	6
V. Réflexion et réfraction des ondes a une surface	7
VI. Conclusion	8

II. NOTION DE L'INTERACTION SOL- STRUCTURE

I Introduction	9
II Définition de l'interaction sol-structure	9
III Interaction cinématique sol structure-interaction sol pieux de fondation	11
IV Interaction inertielle sol -structure	12
V Revue bibliographique	13
VI Conclusion	15

IV.ETUDES PARAMETRIQUES

I.Introduction	16
II.Génération du système globale sol pieux de pont	16
III.Signal d'entrée	18
IV.Présentation du programme de calcul de l'interaction sol structure « FLUSH ».....	20
V.Reponse du système globale sol-pieux de pont	20
V.1.Cas des pieux de hauteur de 18m.....	21
V.2.Cas des pieux de hauteur de 10m	25
VI.Discution des resultas	29
VII.Conclusion	30

CONCLUSION GENERALE

-Bibliographie.

Chapitre I :

**INTRODUCTION
GENERALE**

I.INTRODUCTION

Le sol est un facteur important dans l'analyse du comportement des structures et de ce fait dans la mitigation et la maîtrise du risque sismique. Une construction fondée sur un sol meuble subit généralement des déformations plus importantes que la même construction implantée sur un sol rocheux et des désordres de toute nature peuvent survenir (fissurations causées par les tassements différentiels...). De même la répartition des efforts dans les éléments composant la construction est également modifiée lors d'une analyse qui souhaite tenir compte de l'interaction sol-structure. De ce fait les coûts de construction engendrés, de par les sections et les fondations choisies en sont favorablement ou défavorablement affectés.

La figure 1 présente les modèles simplifiés (figure I.a) et rhéologique (figure I.b) permettant de considérer l'interaction sol-structure. Cette prise en compte s'effectue par l'intégration d'un système ressorts-amortisseurs. La structure, un système à plusieurs degrés de liberté est remplacé par le modèle dit "en brochette" (Figure I.b). La fondation et son interaction avec le sol (ressorts-amortisseurs) est modélisée grâce à des fonctions d'impédance.

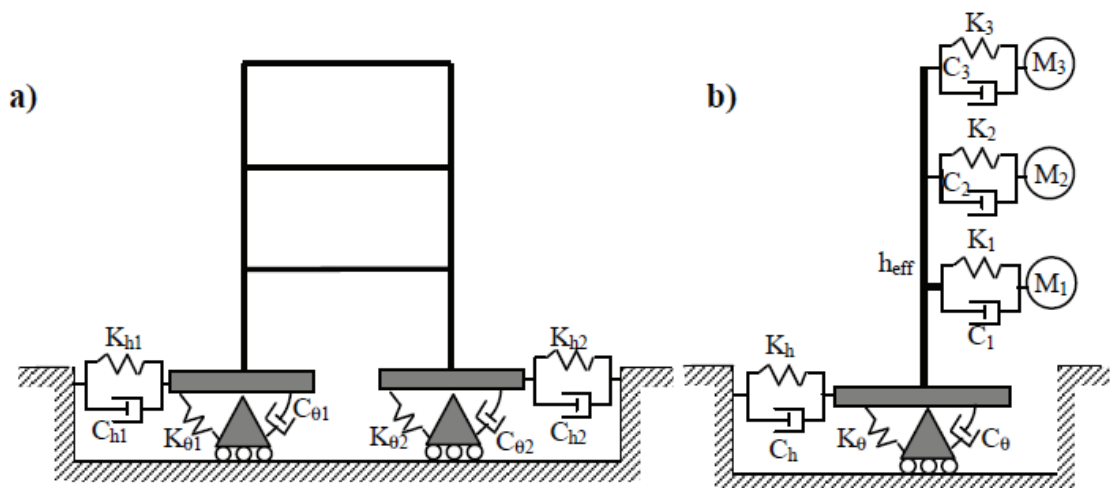


Figure I: Interaction sol-structure

Dans ce présent mémoire, nous considérons le calcul de l'interaction sol-pieux de pont. Ce calcul demande néanmoins la maîtrise de deux milieux très complexes : le sol et la structure (pont). Le sol relève de la connaissance de la dynamique des sols. La structure quand à elle relève de la dynamique des structures. Cependant, l'interaction entre ces deux milieux requiert la maîtrise du phénomène d'Interaction Sol-Structure. Le but de

ce travail, est l'étude de l'effet du pieu du pont sur la réponse sismique en surface du sol et en profondeur.

II. ORGANISATION DU MEMOIRE

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres :

- Au chapitre I, nous présentons une introduction générale du mémoire.
- Au chapitre II, nous présentons des notions générales de propagation d'ondes.
- Au chapitre III, nous définissons le phénomène d'interaction sol-structures. Nous présentons un aperçu de l'état de l'art dans le domaine. Certains travaux antérieurs sont alors résumés.
- Au chapitre IV, nous présentons une modeste étude paramétrique sur l'effet d'interaction sol-pieu de pont. Le milieu global sol- pieu est modélisé par un programme de génération automatique du maillage. Les réponses sismiques sont après calculées par le programme universel Flush.
- Enfin, nous présentons une conclusion générale du travail à la fin du mémoire.

Chapitre II :

NOTIONS DE
PROPAGATION
D'ONDES SISMIQUES

I. INTRODUCTION

L'étude de la propagation d'ondes intéresse différents domaines liés au génie civil, génie parasismique, isolation vibratoire, etc... Les problèmes de propagation d'ondes sont caractérisés par différents phénomènes nous citons: la dispersion et diffraction d'onde la conversion d'ondes, etc. Toutes ces caractéristiques sont rarement accessibles directement par l'expérience. Il est généralement nécessaire de recourir à des expérimentations modèles (matériaux modèles, essais à échelle réduite , etc.) ou d'utiliser le calcul numérique et/ou des méthodes inverses afin de déterminer les paramètres caractérisant le matériau et les ondes qui s'y propagent. La validation des calculs de propagation d'ondes peut être réalisée en confrontant les résultats numériques à des résultats expérimentaux, mais la détermination conjointe des paramètres de comportement du matériau et des caractéristiques de propagation d'ondes est souvent peu aisée. La validation des modèles numériques de propagation d'ondes d'après des solutions analytiques est aussi envisageable dans le cas de milieux de géométrie et à comportement simples.

II. ORIGINES D'UN SEISME :

La Terre est constituée de plusieurs couches : noyau, asthénosphère, lithosphère. Cette dernière est formée de plusieurs plaques rigides appelées : plaques tectoniques. La limite entre les plaques tectoniques est un plan qu'on appelle : une faille. C'est une zone de rupture le long de laquelle la déformation est cisailante.

On admet à présent que les plaques tectoniques sont portées par le mouvement du manteau asthénosphérique sous-jacent et subissent des interactions, dont les trois types principaux sont :

- La divergence : mouvement éloignant deux plaques l'une de l'autre.
- La convergence : mouvement rapprochant deux plaques l'une de l'autre.
- La transcurrence : glissement horizontal de deux plaques.

A ces trois types d'interaction sont associées trois grandes familles de failles (voir figure I.1)

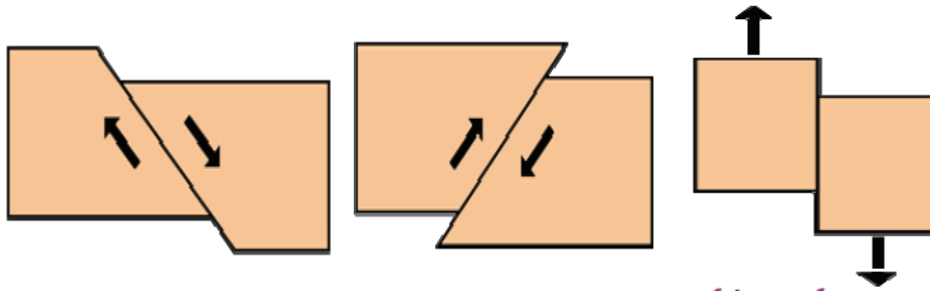


Figure (II.1) : (à gauche) schéma de faille normal, (au milieu) schéma de faille inverse, à droite) schéma de faille en décrochement

Les mouvements relatifs des plaques tectoniques engendrent dans les zones de contact des contraintes. Lorsque celles-ci se sont accrues au point de dépasser la limite de résistance des roches de la croûte terrestre, l'énergie élastique emmagasinée est libérée brutalement au foyer. Une partie sous forme de chaleur et l'autre sous forme d'ondes sismiques ce qui donne naissance à un tremblement de terre.

III. CARACTERISTIQUES D'UN SEISME :

Un séisme est caractérisé par :

Un foyer: ou hypocentre d'un séisme, c'est la région de la faille où se produit la rupture et d'où partent les ondes sismiques. Il est généralement situé dans les cent premiers kilomètres de la lithosphère.

Un épïcentre: lieu de la surface terrestre situé exactement à la verticale du foyer, où l'intensité du séisme est la plus importante.

Une magnitude : la magnitude d'un séisme est une valeur intrinsèque du séisme. Elle est indépendante du lieu d'observation, elle est mesurée sur l'échelle de Richter du nom de l'américain qui en 1935 l'a introduite pour quantifier l'énergie libérée au foyer d'un tremblement de terre. Dans le but de comparer les séismes entre eux. Les valeurs de la magnitude sont comprises entre 1 et 9.

Une intensité : elle correspond à l'évaluation des dégâts observés sur le terrain en un site donné.

L'échelle la plus utilisée est l'échelle M.S.K, graduée de I à XII. Un même séisme sera ressenti avec des intensités différentes selon la distance par rapport à l'épicentre, et selon les caractéristiques locales (effets de site).

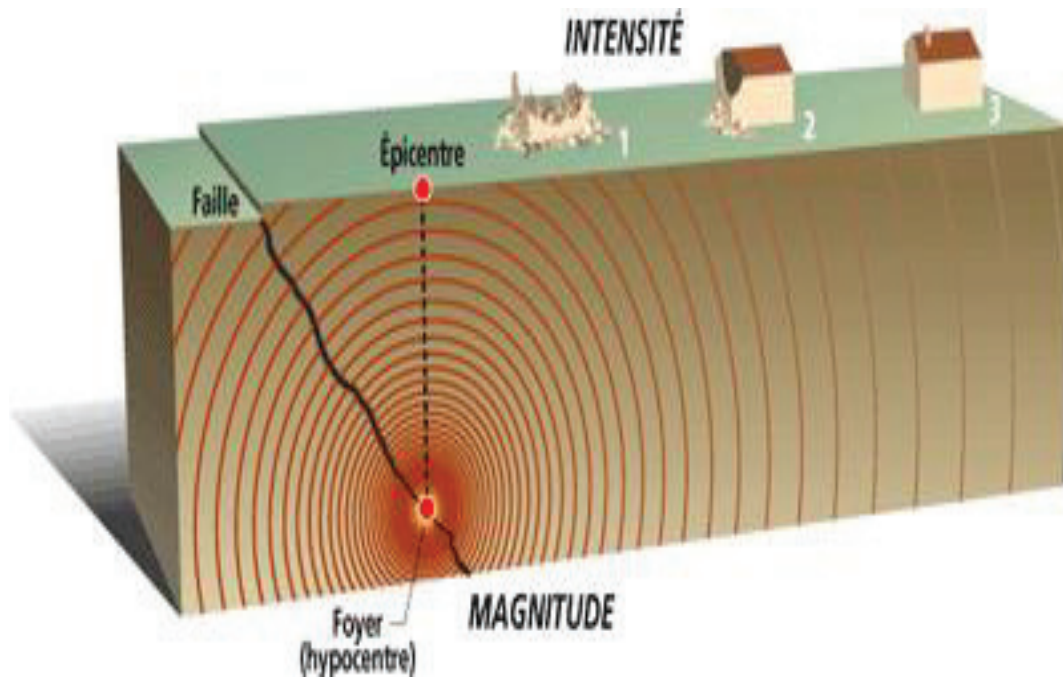


Figure (II.2) : Caractéristiques d'un séisme

IV DEFINITION DES ONDES SISMQUES :

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent traverser un milieu sans le modifier. L'impulsion de départ va pousser les particules élémentaires présentes dans le milieu, qui vont pousser d'autres particules avant de reprendre leur place, se propageant suivant une réaction en chaîne.

Les vibrations lors d'un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la terre, et les ondes de surface qui se propagent à sa surface. Sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou se superposent. Leurs vitesses de propagation et leurs amplitudes sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent. C'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

IV.1 LES ONDES DE VOLUME :

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé. D'une manière générale, elle augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense. On distingue :

- **Les ondes P** ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives donc les particules de sol se déplacent

Chapitre II Notions De Propagation d'Ondes Sismiques

parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les ondes les plus rapides, donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes.

- **Les ondes S** ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. A leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la terre. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

La différence de temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme.

IV.2 LES ONDES DE SURFACE :

Ce sont des ondes guidées par la surface de la terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leurs amplitudes sont généralement plus fortes. On peut distinguer :

- **Les ondes de Love** : c'est un anglais Augustus Edward qui a découvert leur existence en 1911. Leur déplacement sont comparables à celui des S sans le mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui peut être la cause de nombreux dégâts aux fondations d'un édifice.

- **Les ondes de Rayleigh**: ont été découvertes par John William Strutt Rayleigh en 1885. Leur déplacement sont complexe, assez semblables à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical

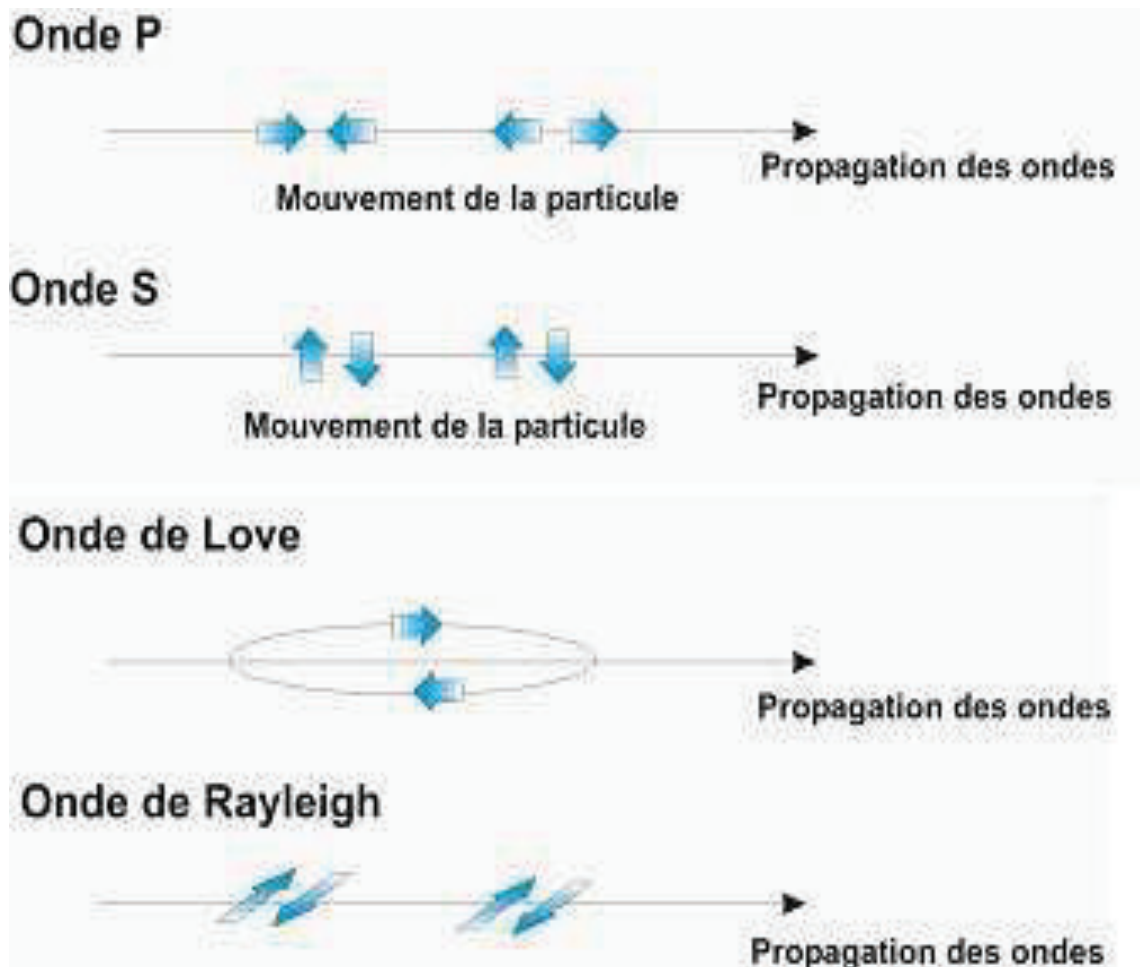


Figure II.3 Schéma des ondes de volume et de surface

V. REFLEXION ET REFRACTION DES ONDES A UNE INTERFACE :

Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

Lorsqu'une onde P ou S rencontre une discontinuité, elle peut donner naissance, en théorie à quatre ondes : deux réfléchies (longitudinale P et transversale S), et deux réfractées (longitudinale P et transversale S). Toutefois, l'existence de ces quatre types d'ondes dépend des rapports des vitesses dans les deux milieux et dans certains cas, il y a disparition d'une, deux ou trois ondes.

De plus, dans la majorité des cas, l'essentiel de l'énergie d'une onde incidente P se distribue dans les ondes P réfléchies et P réfractées. De même, dans le cas d'une onde S incidente, les ondes S réfléchies et réfractées auront le maximum d'énergie.

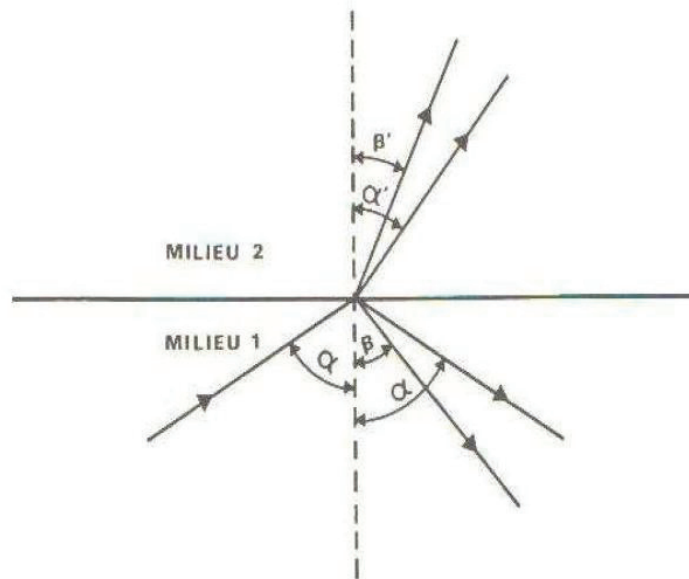


Figure (II.4) Schéma de réflexion et réfraction des ondes sismiques.

VI.CONCLUSION :

Un séisme, ou tremblements de terre constituent un phénomène géologique, qui génère des ondes élastiques se propageant dans toutes les directions. Comme un rayon lumineux pour l'onde optique, on associe un rai sismique aux ondes sismiques : elles se propagent à l'intérieur de la terre suivant des lois analogues à celles de l'optique géométrique (lois de Snell- Descartes pour la réflexion et la réfraction).

Chapitre III :

**NOTIONS
D'INTERACTION
SOL-STRUCTURE**

I.INTRODUCTION

La réponse d'une structure à une action sismique dépend de nombreux paramètres, nous citons, la nature du mouvement sismique, les propriétés dynamiques de l'ouvrage et les propriétés dynamiques du sol. En effet, lors d'un séisme les charges appliquées sur une fondation proviennent des forces d'inerties développées dans la superstructure et des déformations du sol, provoquées par le passage des ondes sismiques, imposées à la fondation. Ces deux types de chargement sont nommés: chargement inertiel et chargement cinématique respectivement. Dans ce qui suivra, nous exposons le phénomène d'interaction sol-structure.

Dans ce présent chapitre II, nous présentons d'une part un modeste aperçu du phénomène d'interaction sol-structure d'un point de vue général. En d'autre part, nous présentons aussi le cas particulier de l'interaction sol-pile de pont.

II-DEFINITION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

Les premières formulations utilisées pour la détermination de la réponse d'une structure ont été basées sur l'hypothèse de la rigidité infinie du sol supportant la structure. Aussi, l'action mutuelle sol-structure n'était pas prise en compte dans les calculs et les résultats obtenus s'avèrent loin de la réalité, en particulier dans le cas de sols déformables.

Soit une force dynamique de type sismique, appliquée directement dans le sol aux alentours de la structure. On entend généralement par interaction sol-structure la modification du mouvement du sol ou de la structure lors d'un séisme, du fait de la présence de l'autre (structure ou sol). En effet, de nombreuses études ont démontré que lorsqu'une structure est soumise à une sollicitation sismique, les efforts engendrés créent une variation des contraintes dans le sol de fondation. De ce fait, deux types d'interaction se produisent entre le sol et la structure:

- *L'interaction inertielle* : dans une première situation, les effets de l'interaction sol-structure se présentent uniquement comme le résultat de forces extérieures et d'inerties transmises à un sol se pliant aux efforts imposés, on attribue à ceci le nom «d'interaction inertielle». L'énergie mécanique transmise alors au sol se propage à partir de la structure sous forme d'ondes de contraintes.

- *L'interaction cinématique* : dans le cas des excitations sismiques, un effet supplémentaire peut survenir. Etant donné la présence de la fondation rigide, celle-ci ne se conforme pas aux distorsions du sol causées par les ondes sismiques incidentes. La structure se présente alors comme un objet opaque ou réfléchissant sur le chemin de l'onde, produisant ainsi une dispersion du champ d'ondes qui modifie localement le mouvement au voisinage de la fondation. Cet effet est connu sous le nom «d'interaction cinématique».

Le terme générique englobant ces deux phénomènes est appelé Interaction Sol-Structure (ISS). Cependant le plus souvent les ingénieurs emploient ce terme pour désigner le chargement inertielle en ignorant la part du au chargement cinématique. Cela provient du fait que :

- Dans certains cas l'interaction cinématique est négligeable (sol rigide indéformable)
- La plupart des règlements parasismiques, excepté certain dont l'Eurocode 8, ne le mentionne pas.
- Les effets de l'interaction cinématique sont plus difficiles à évaluer rigoureusement que les effets inertiels.

Il existe donc une interaction entre la structure et le milieu extérieur, c'est l'interaction sol-structure (ISS). La Figure (II.1) illustre bien le problème de l'ISS. Ce schéma montre le cas général d'une fondation, de type radier, encastrée dans le sol et supportée par des pieux traversant plusieurs couches de sol et se reposant sur une couche rigide ou rocheuse. Le problème de l'ISS reste cependant le même pour tous les types de fondations

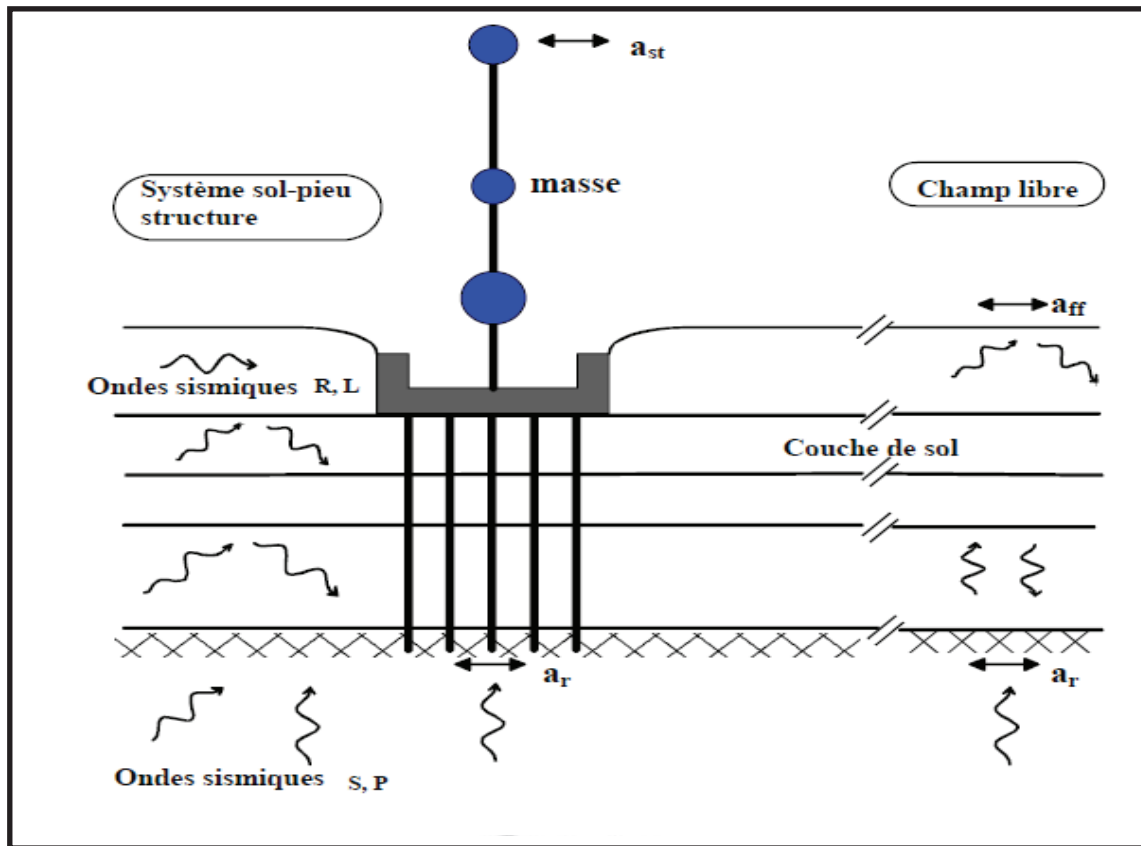


Figure III.1 Illustration du phénomène d'interaction sol-structure

III INTERACTION CINEMATIQUE SOL STRUCTURE-INTERACTION SOL PIEUX DE FONDATION

L'ISScinématique résulte de la différence de raideur pour la partie en terre, entre le sol et la structure : (bâtiment fictif sans masse). Elle est importante pour les structures raides enterrées dans un sol mou. Mais elle est négligeable pour les fondations superficielles avec des propagations verticales.

On a signalé au paragraphe précédent qu'il existe des situations pour lesquelles l'interaction cinématique est rigoureusement nulle et l'interaction sol-structure se réduit à sa part inertielle. Cette situation est exceptionnelle; il existe par contre d'autres situations plus courantes pour lesquelles l'interaction cinématique, sans être rigoureusement nulle, est négligeable. Prenons l'exemple d'un pieu de fondation dans une couche de sol; si la raideur du pieu vis à vis du sol encaissant est faible (cas d'un "spaghetti" dans un sol raide), on comprend que la raideur du pieu ne modifie en rien le mouvement du sol par rapport à celui du champ libre. Pour illustrer ces propos, considérons l'exemple de la figure (II.2).

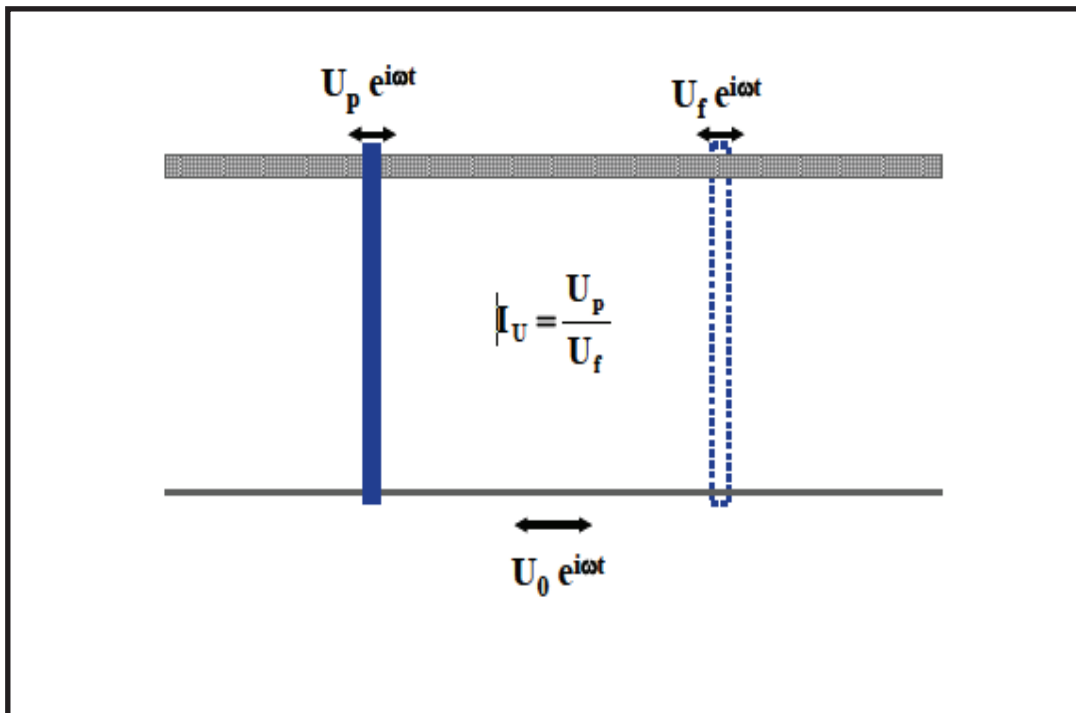


Figure (III.2) Exemple d'interaction cinématique

La couche de sol est soumise à un mouvement harmonique à sa base, d'amplitude U_0 et de pulsation ω . On s'intéresse au mouvement résultant de la tête du pieu, U_p , et plus exactement au rapport de ce mouvement au mouvement du sol en champ libre, U_f : soit I_u ce rapport. La figure (III.3) présente la variation de I_u en fonction d'un paramètre adimensionnel, proportionnel au rapport des raideurs du pieu et du sol et inversement proportionnel à l'élanement du pieu. Plus ce rapport est grand plus le pieu est raide vis à vis du sol encaissant.

L'examen de la figure (III.3) montre que pour des raideurs faibles du pieu, l'interaction cinématique est effectivement nulle: le coefficient I_u est égal à 1.0 et le pieu suit le mouvement du sol sans le modifier. Lorsque la raideur augmente, la présence du pieu se ressent et le coefficient I_u devient différent de 1.0: le pieu ne suit plus le mouvement du sol

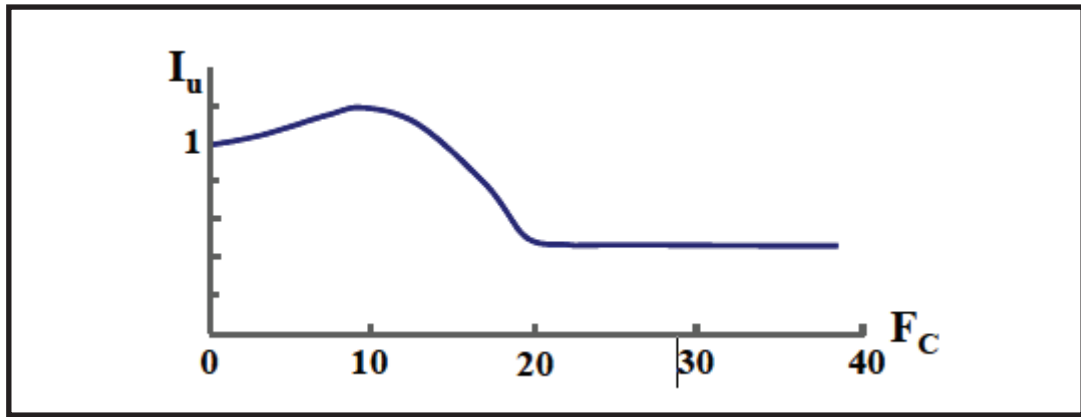


Figure (III.3) : Interaction cinématique pour un pieu isolé

On notera qu'il existe des valeurs du paramètre F_c pour lesquelles le coefficient I_u est supérieur à 1.0 .

IV INTERACTION INERTIELLE SOL STRUCTURE

Ce type d'interaction résulte de la différence de masse entre la structure et le sol. La prise en compte du sol se fait naturellement par l'introduction à la base de la superstructure d'une condition d'appui, à la fois élastique et dissipative, dépendant de la fréquence, qu'il est convenu d'appeler impédance de fondation. Le calcul de l'impédance, dépend des caractéristiques géométriques et mécaniques de la fondation et du sous-sol.

Malheureusement, toute étude paramétrique, destinée à donner un aperçu général de l'interaction sol structure, se trouve limitée par rapport à ses objectifs, compte tenu du fait que :

- En pratique, le sous-sol se présente dans un nombre de configurations quasi infini ;
- Le calcul numérique de l'impédance nécessite des calculs complexes et/ou de fortes approximations, qui introduisent une part d'incertitude dans les résultats.

V. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Nous exposons dans ce paragraphe une revue bibliographique de certains travaux antérieurs dans le domaine de l'interaction sol-structure. Ces références bibliographiques vont nous aider à organiser les travaux de notre mémoire de master.

V.1 TRAVAUX DE M. HADID and M.K. BERRAH, 1995.

Les auteurs se sont intéressés à la modélisation numérique des problèmes dynamiques mettant en jeu les phénomènes d'interaction sol-fondation. Ils ont calculé la réponse dynamique des fondations filantes rigides superficielles et enterrées. A travers d'une étude paramétrique relative à l'influence des propriétés mécaniques du sol, à l'influence de l'enterrement et le type de contact sol-fondation, les auteurs concluent que les déplacements de translation se réduisent significativement aux fréquences moyennes et élevées. La réduction est plus importante pour les ondes à angle d'incidence faible que pour les ondes à angle d'incidence important.

V.2 TRAVAUX DE GEORGE MYLONAKIS and ASPASIA NIKOLAOU, GEORGE GAZETAS, 1997.

Les auteurs présentent des réponses de systèmes pont-pile soutenus par une seule pile ou d'un groupe de pieux dans un profil de sol modérément doux. Ces travaux illustrent le rôle de l'interaction sol-pieu-structure (SPSI) et mettent l'accent sur les erreurs potentielles de certaines hypothèses souvent prises dans la pratique.

V.3 TRAVAUX DE ANASTASIOS G.SEXTOS, KYRIAZIS D.PITILAKIS AND ANDREAS J.KAPPOS, 2003

Une méthodologie complète pour l'analyse dynamique inélastique mondiale de ponts sous variabilité spatiale, les conditions locales, et l'interaction sol-fondation-superstructure est mise en place et mise en œuvre dans un spécialement développé, le code informatique entièrement paramétrable, qui combine l'état de l'art- connaissances en géotechnique de tremblement de terre, et aux séismes historiques de temps et coefficients ressort-amortisseur pour tous les supports qui peuvent être utilisés dans un logiciel éléments finis standard sans recours à des caractéristiques spéciales d'interaction dynamique ou d'analyse inélastique pour le sol, la fondation et le soubassement.

Une validation approfondie a été réalisée pour toutes les étapes de la procédure proposée. La spatiale étape du modèle variabilité et effets de site ont été vérifiées dans les deux les résultats d'une étude précédente et données enregistrées et ont également été couplé et vérifiée par des analyses FE, codes informatiques alternatives, des solutions de recherches précédentes, lorsqu'elles sont disponibles, Les résultats établissent un

degré de confiance suffisant dans l'utilisation de la méthodologie et le code pour d'autres analyses paramétriques et de la conception ou de l'évaluation sismique, ayant mis au point et validé la procédure complète ci-dessus, la réponse dynamique de 20 structures de pont différents peut ensuite être examiné et comparé pour différents cas.

VI. CONCLUSION

Ce présent chapitre est considéré comme clé pour notre mémoire de Master. En effet, pour l'élaboration de ce chapitre, nous avons appris à faire une recherche bibliographique. Nous avons surtout et aussi, appris à résumer certains articles que nous avons eu à lire. En d'autre part, ces travaux antérieurs vont nous servir de support, pour la suite de notre mémoire, afin de représenter les résultats trouvés (courbes, tableaux, commentaires...).

Chapitre IV :

ETUDES

PARAMETRIQUES

I.INTRODUCTION

Dans ce présent chapitre, nous calculons la réponse sismique du système globale sol-pieux de pont. Ce système est soumis une excitation sismique au niveau du rocher. Le sol et la fondation sont d'abord générés de numériquement par un logiciel de génération automatique. Le milieu généré constitue un maillage en éléments finis du système global. La réponse sismique du système global, est calculée en utilisant le programme universel de dynamique des sols FLUSH. Les étapes de calcul, sont résumées dans l'organigramme 1.

II.GENERATION DU SYSTEME GLOBALE SOL PIEUX DE PONT

Nous utilisons un programme de génération automatique élaboré par A.Messaoudi. Ce programme fourni une génération du maillage en éléments finis du milieu global sol-pieux.

II.1 Génération du sol

Le sol est généré par un maillage en éléments finis de type quadrilatéral à 4 nœuds. Chaque maille fait 2m de largeur et 1m de hauteur. Les caractéristiques mécaniques du sol sont représentées dans le tableau ci-dessous (IV.1). Nous prenons un tronçon de sol de 200m de longueur sur 20m de hauteur. Le sol est alors généré à partir de 2000 mailles, soit 2121 nœuds et 4022 degrés de liberté en totalité.

Tableau IV-1 : Caractéristiques mécaniques du sol.

V_S (m/s)	G (Mpa)	ξ (%)	ρ (Kg/m ³)	μ
200	80	7	2000	0.28

Ou :

V_s : Vitesse de propagation de l'onde de cisaillement.

G : Module de cisaillement.

ρ : Masse volumique.

μ : Coefficient de poisson.

ξ : Taux d'amortissement.

II.2 Génération des pieux

Le pont que nous utilisons dans cette partie du travail est celui que nous avons calculé lors de notre projet de fin d'étude (thèse d'ingénieur d'état). Ce pont à poutre est à 3 travées de 36m de longeurs, reposant sur 2 pieux.

L'organigramme ci-dessous indique les étapes de travail pour l'aboutissement aux résultats.

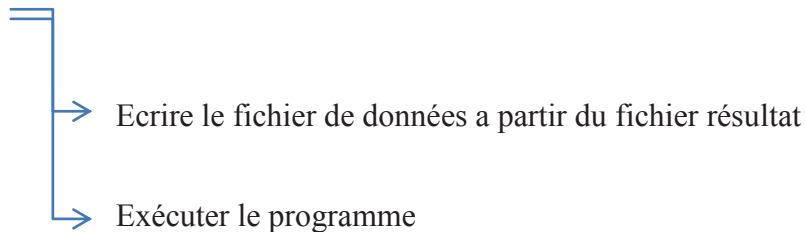
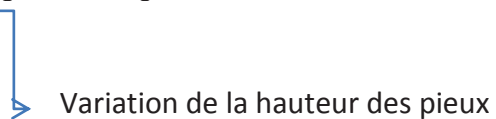
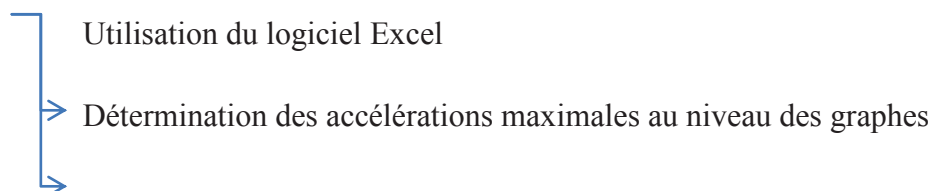
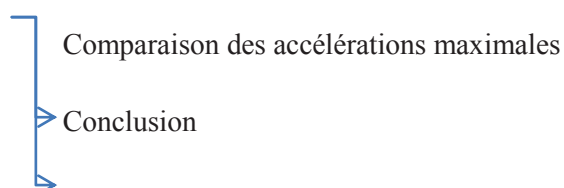
I. Génération du milieu

Lecture de fichier de données

Exécution du programme de génération

Génération des piles : introduction du module de cisaillement G de béton au niveau des nœuds qui représentent les pieux

Fichier résultat

II-Exécution du programme universel flush***III- Etude paramétrique******IV- Tracé des graphes d'accélération******V-Discussion des résultats***

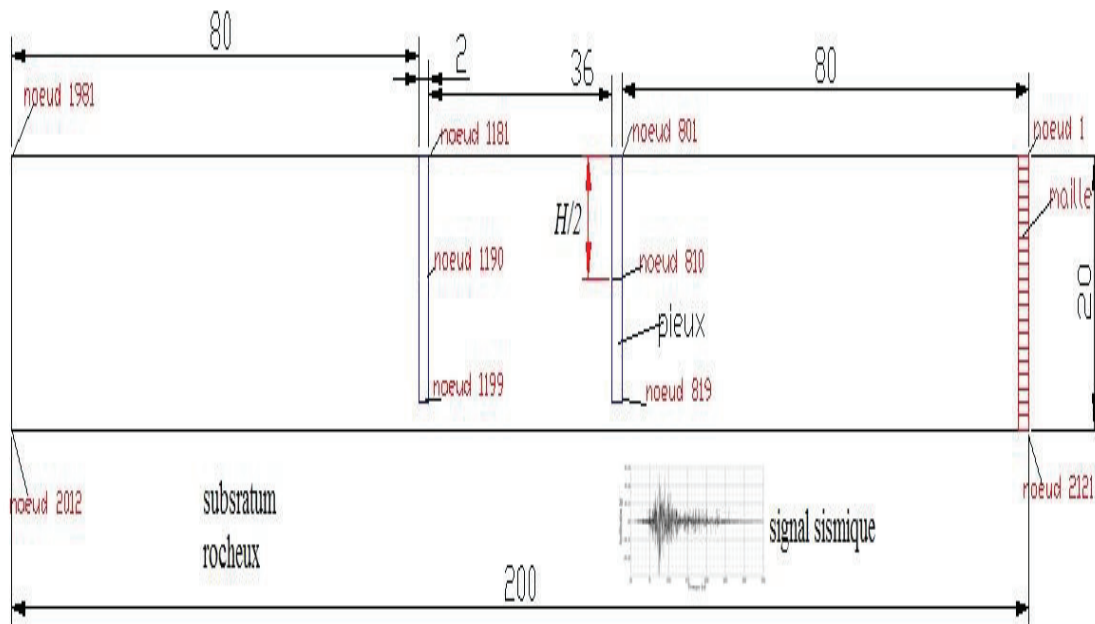


Figure IV.1 : Modèle d'interaction cinématique sol-pieux du pont

III SIGNAL D'ENTREE

On considère un signal d'excitation au niveau de la dernière couche sur une profondeur de 20m (substratum rocheux). Ce mouvement sismique comporte 4 phases : phase initiale pendant laquelle les accélérations sont faibles, une phase forte, une phase modérée et une phase très faible (retour au repos). La durée du signal est de 35 secondes, l'accélération maximale est de 0.3g.

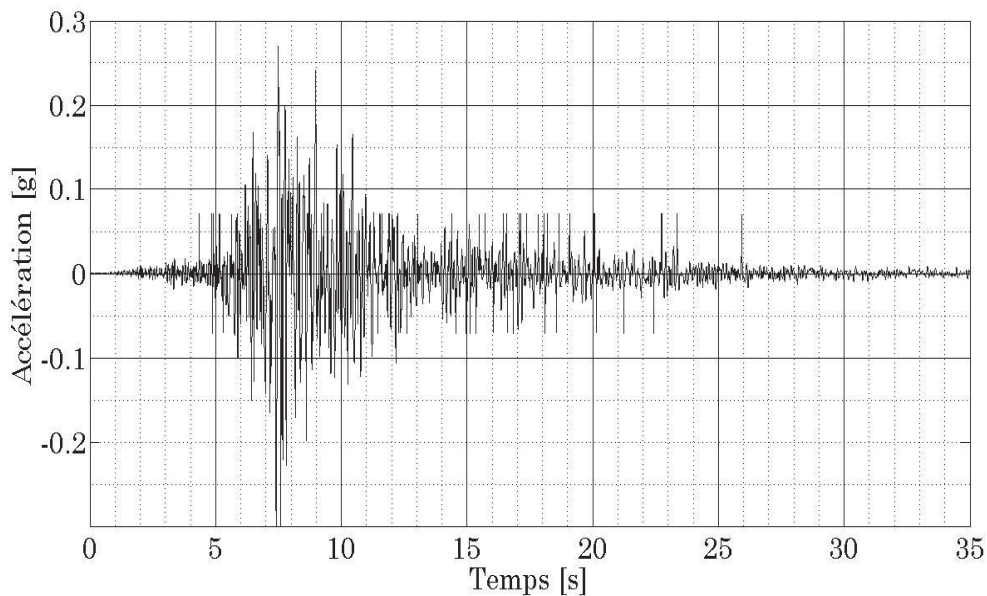


Figure (IV.2) Excitation sismique au rocher.

IV PRESENTATION DU PROGRAMME DE CALCUL DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE « FLUSH »

Dans le cadre du présent travail, la modélisation et la résolution du système total sol-structure sont effectuées à l'aide du logiciel universel de calcul numérique FLUSH (Lysmer et al 1975)[53]. Ce dernier est l'un des programmes de calcul numérique usuellement utilisé pour la résolution des problèmes d'interaction sol-structure par une modélisation globale en éléments finis (rectangulaires pour modéliser le sol et éléments poutres pour la structure). Il emploie une résolution du problème dans le domaine des fréquences. La procédure de calcul est essentiellement bidimensionnelle et les équations du mouvement pour une représentation en éléments finis du système s'écrivent :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = -\{m\}\ddot{Y} - \{V\} + \{F\} - \{T\} \quad \text{IV-1}$$

avec:

$\{U\}$: déplacements relatifs à la base rigide des nœuds du système globale sol-structure.

$[M]$, $[K]$: matrices de masse et de rigidité en déformation plane, d'une tranche de sol d'épaisseur unité.

$\{m\}$: vecteur directionnel de l'accélération à la base rigide.

$\ddot{Y}(t)$: vecteur excitation.

le vecteur force $\{v\}$ est généré à partir de la frontière visqueuse dans le plan du maillage (tranche de sol). Il simule l'effet 3D du système, et est donné par :

Les forces $\{F\}$ et $\{T\}$ agissent à la fin du modèle, dans le plan vertical en champ libre. Elles ne permettent aucune transmission horizontale de l'énergie.

L'équation du mouvement (IV-1) est résolue par la méthode de la réponse complexe qui assume que le mouvement input peut s'écrire en une somme d'excitations harmoniques, à savoir sous forme de séries de Fourier.

V REPONSES DU SYSTEME GLOBALE SOL-PIEUX DE PONT

Nous calculons les réponses en champ libre et sur les pieux, comme ce qui suit :

- ❖ En champ libre : nœud 1, nœud 1981, nœud 2012, nœud 2121.
- ❖ Sur pieux: nœud 801, nœud 1181, nœud 810, nœud 1190, nœud 819, nœud 1199.

Les graphes sont tracés avec le logiciel de calculs mathématiques MATLAB.

Une étude paramétrique est menée avec des pieux de hauteur $H=18\text{m}$, puis pour des pieux de hauteur $H=10\text{m}$.

V.1 Cas des pieux de hauteur de 18m

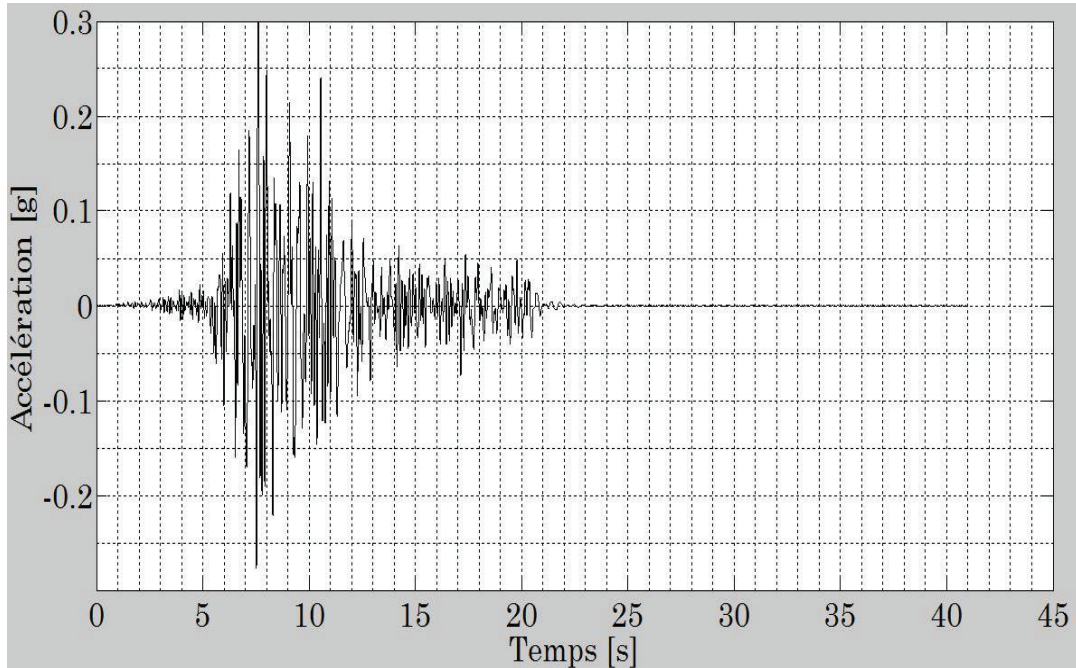


Figure (IV-3a): Réponse au nœud 1

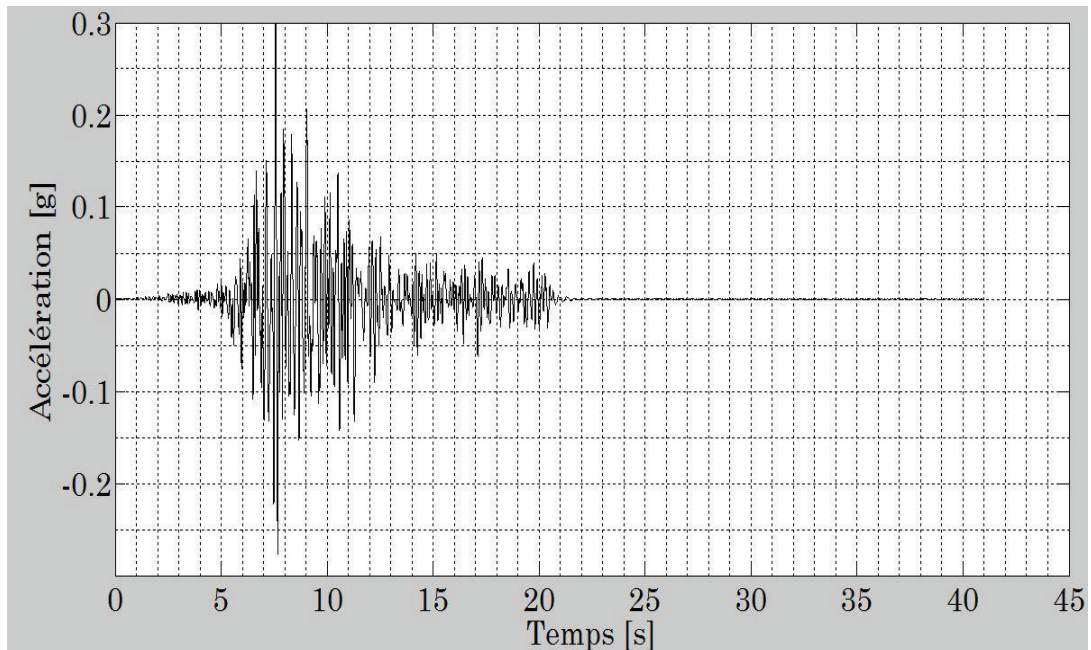


Figure (IV-3b): Réponse au nœud 1981

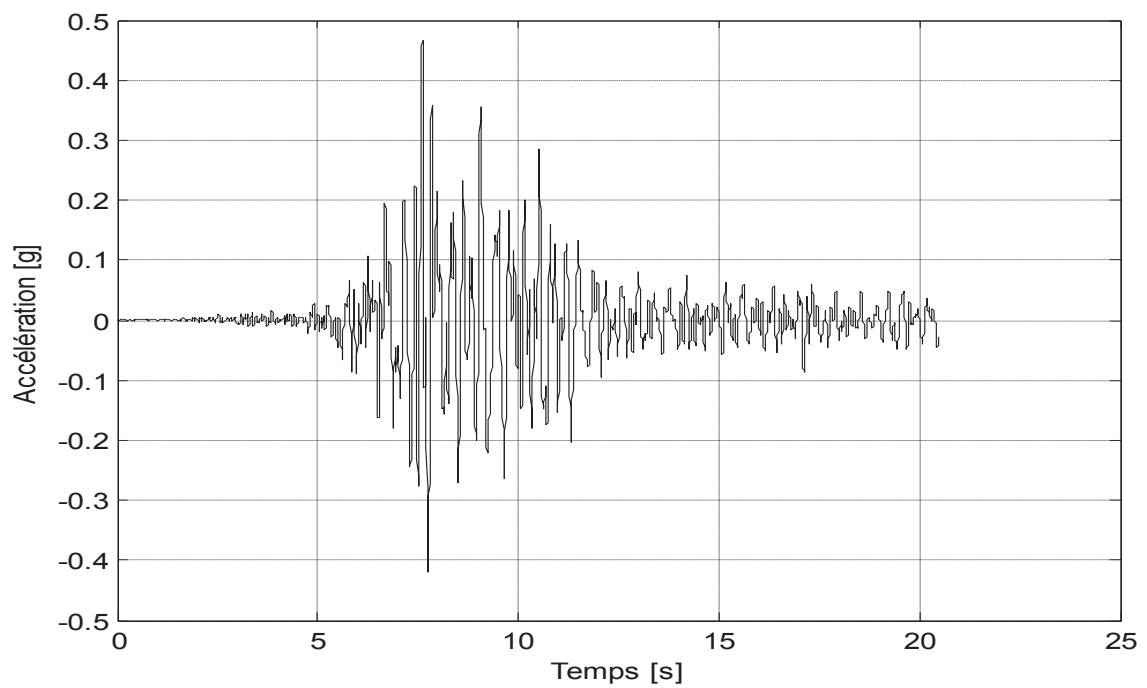


Figure (IV-4a): Réponse au nœud 801

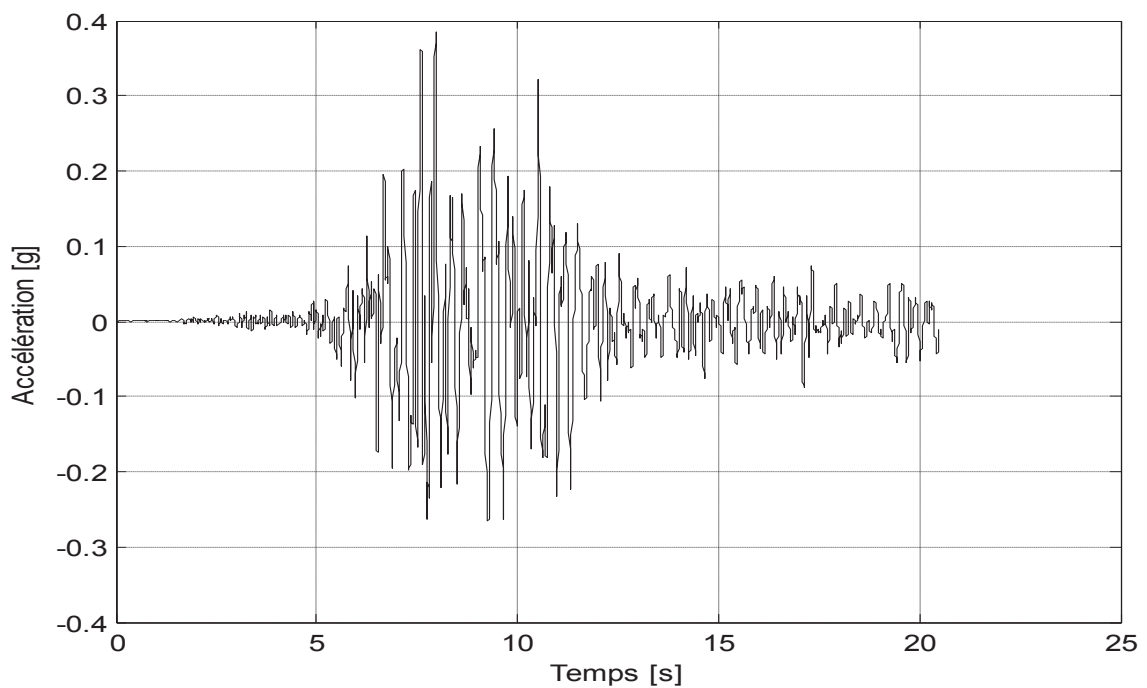


Figure (IV-4b): Réponse au nœud 1181

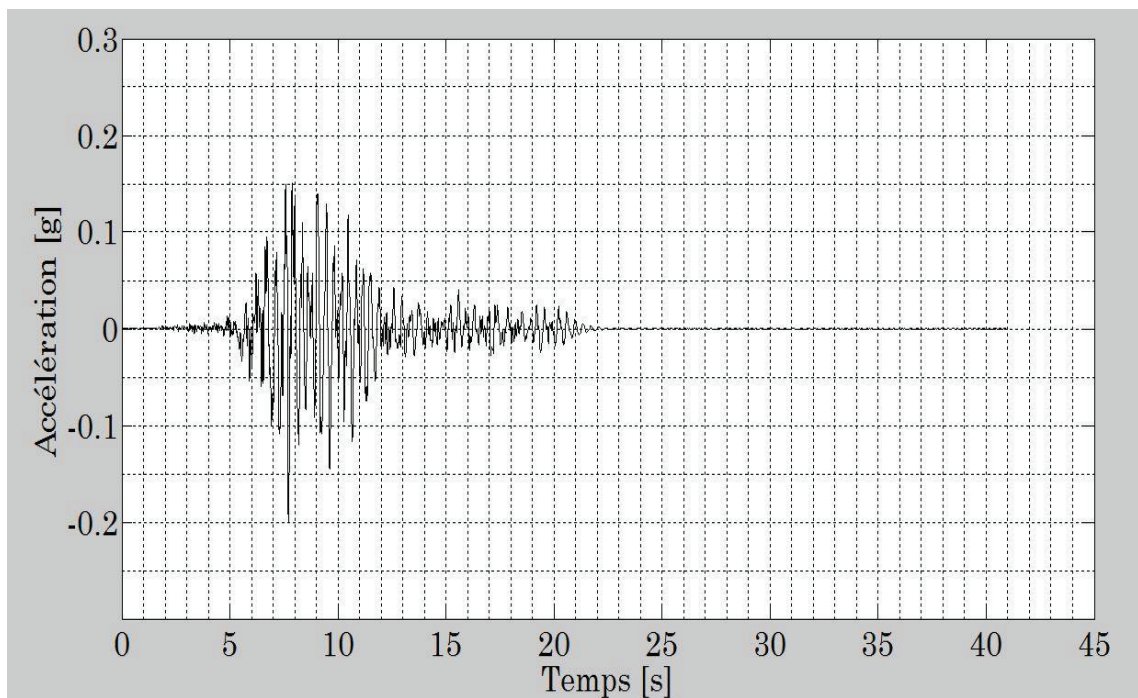


Figure (IV-5a): Réponse au nœud 810

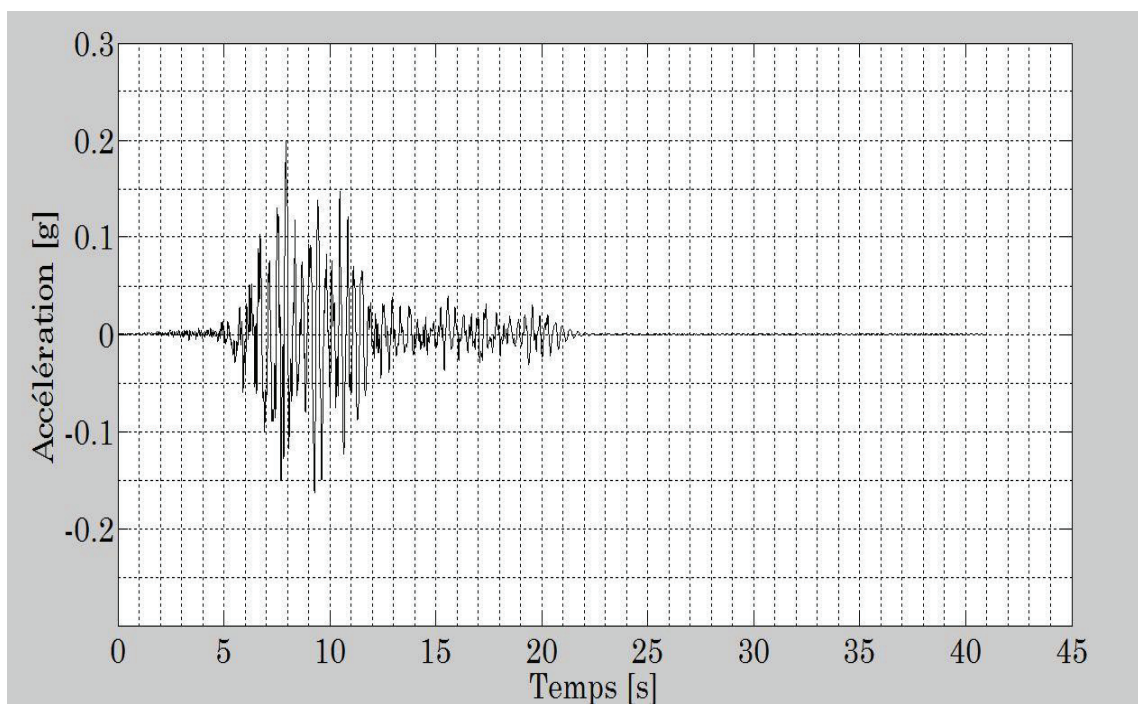


Figure (IV-5b) : Réponse au nœud 1190

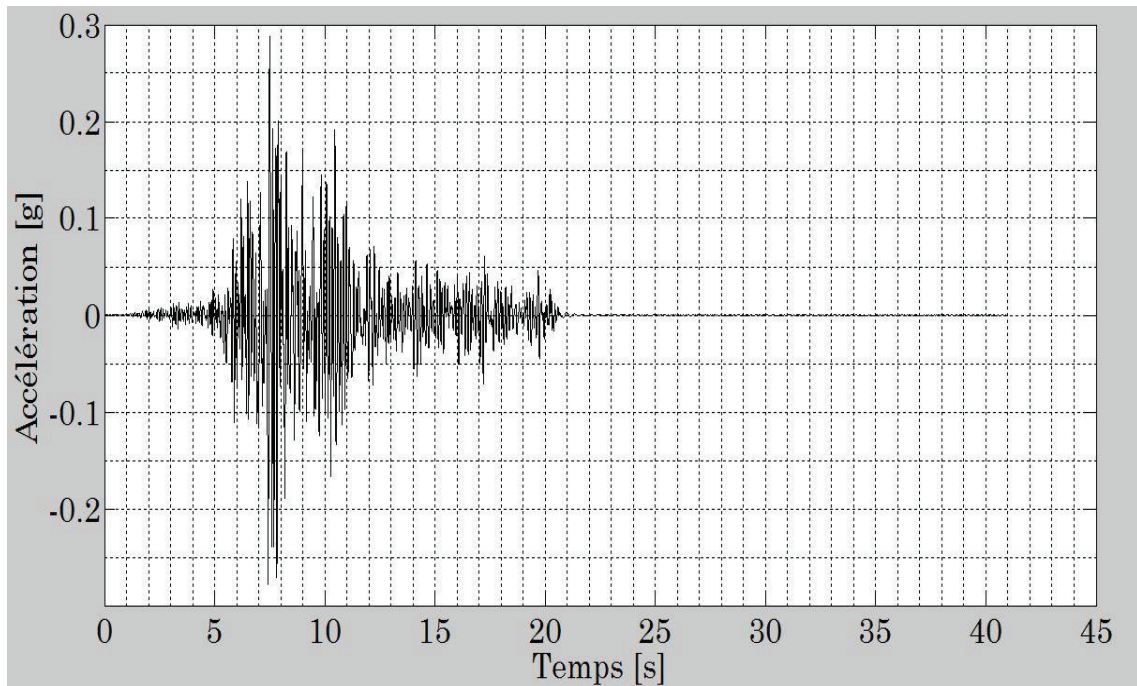


Figure (IV-6a): Réponse au nœud 819

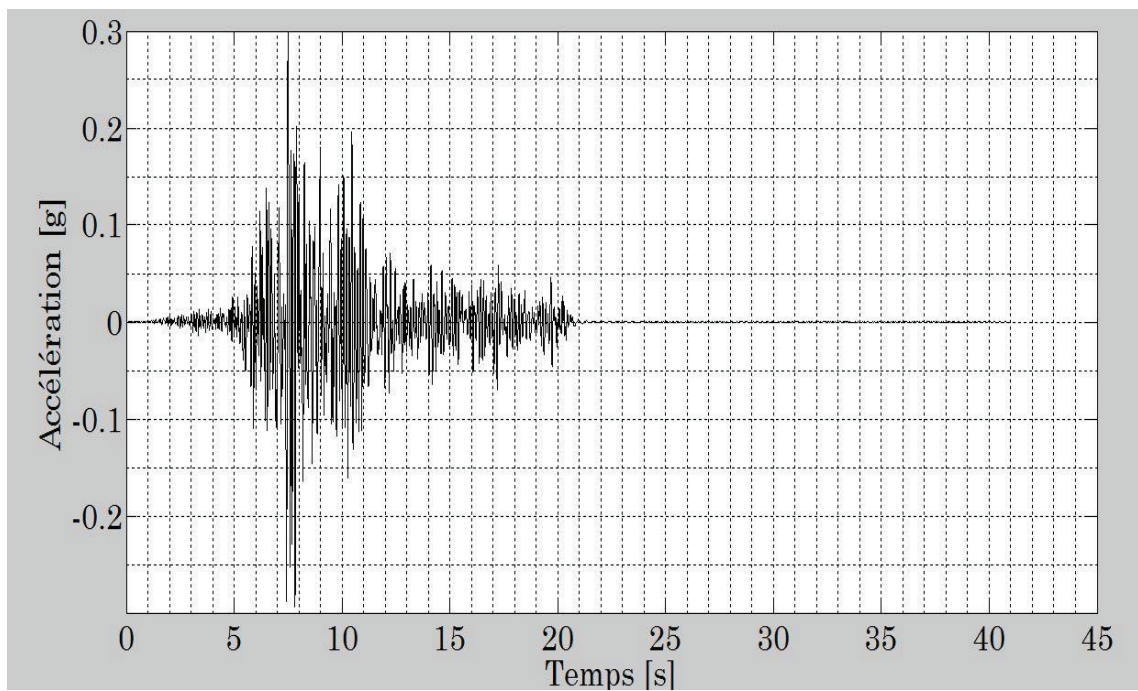


Figure (IV-6b): Réponse au nœud 1199

V.2 Cas des pieux de hauteur de 10m

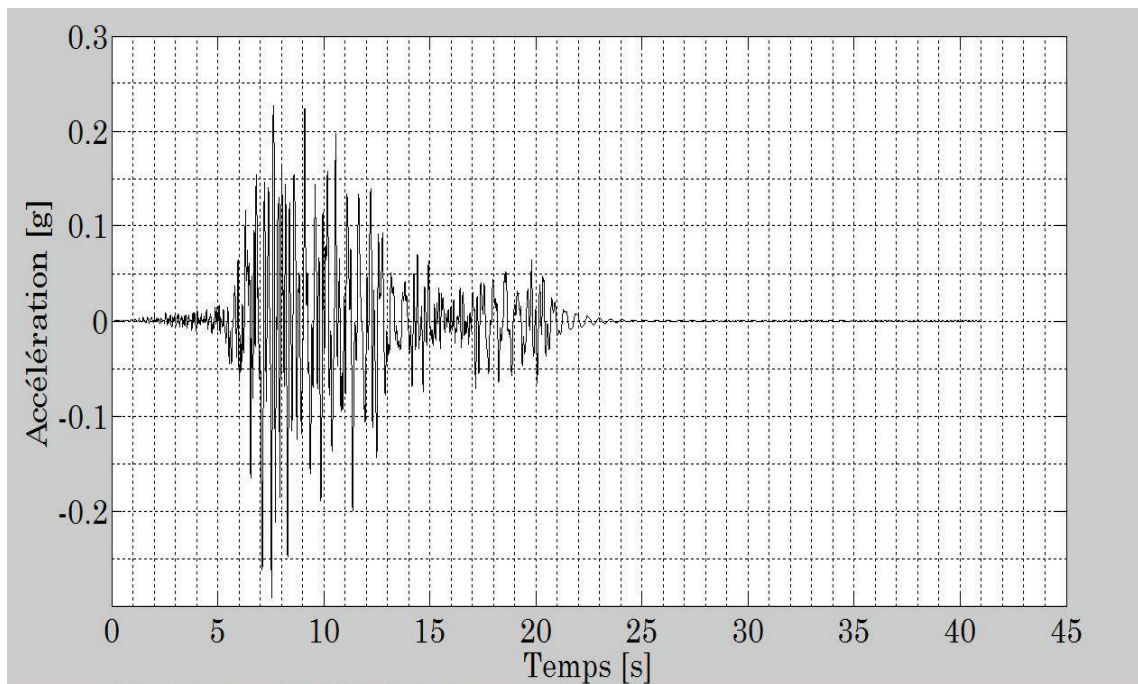


Figure (IV-7a): Réponse au nœud 1

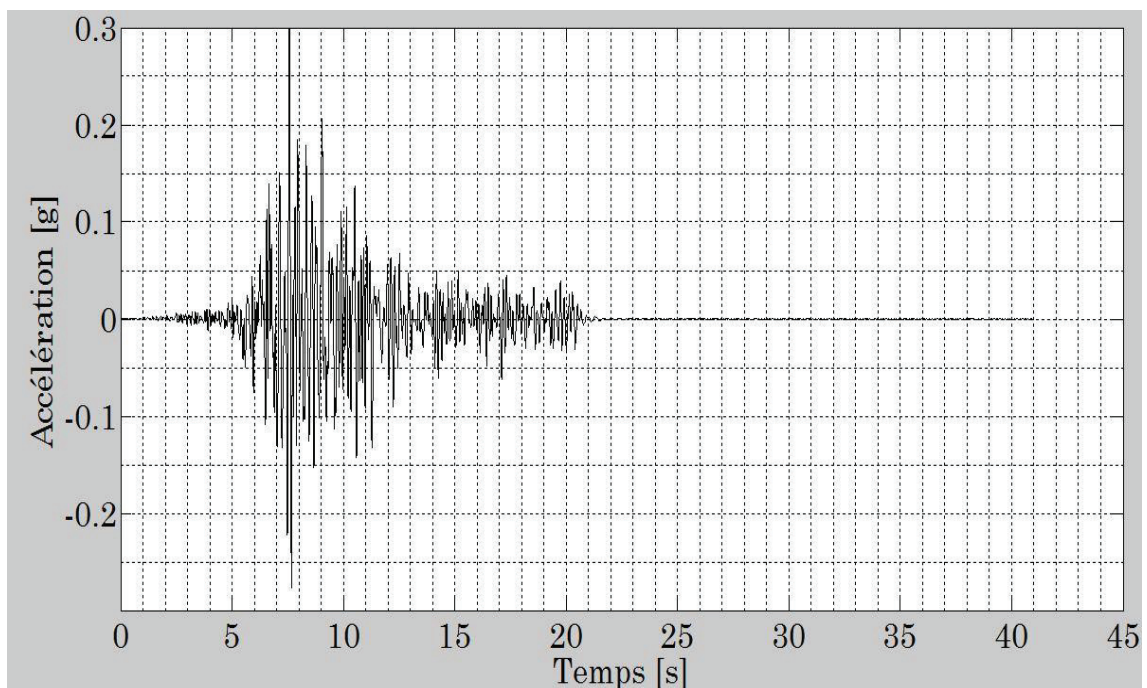


Figure 0IV-7b): Réponse au nœud 1981

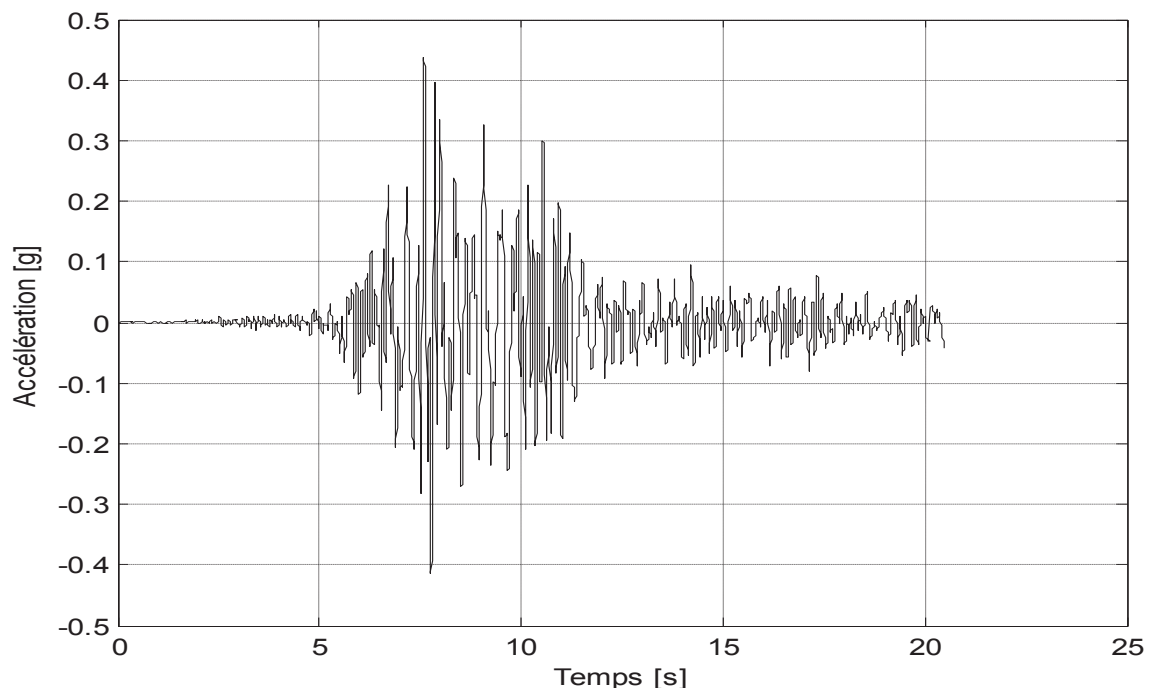


Figure (IV-8a): Réponse au nœud 801

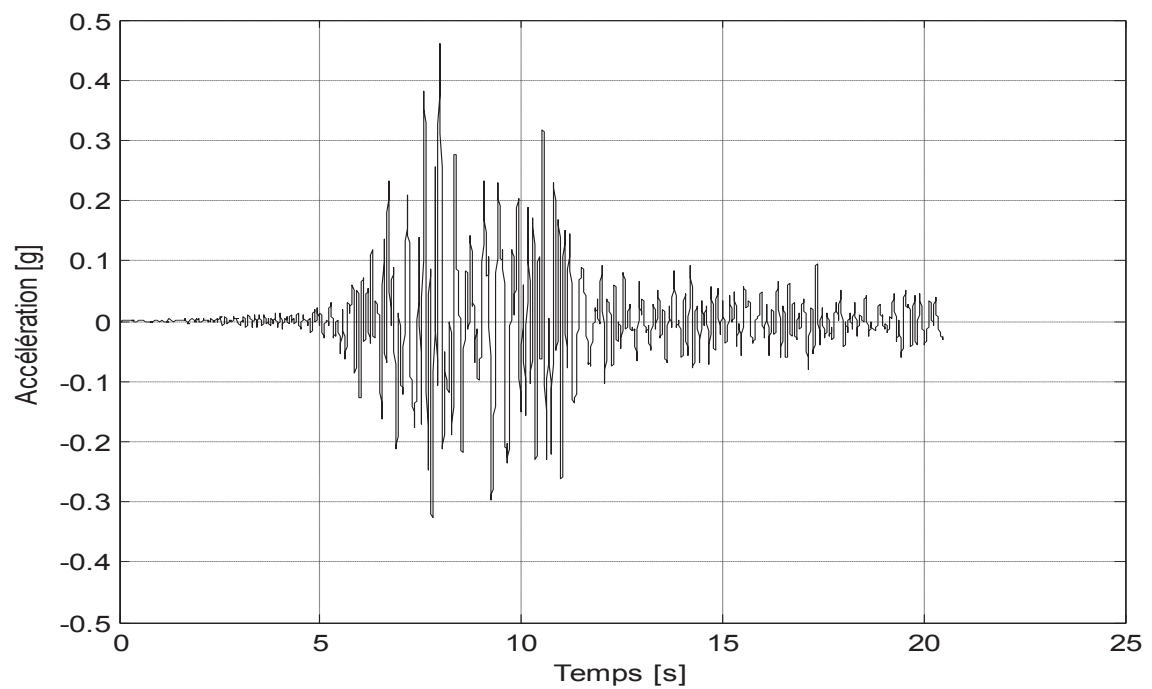


Figure (IV-8b): Réponse au nœud 1181

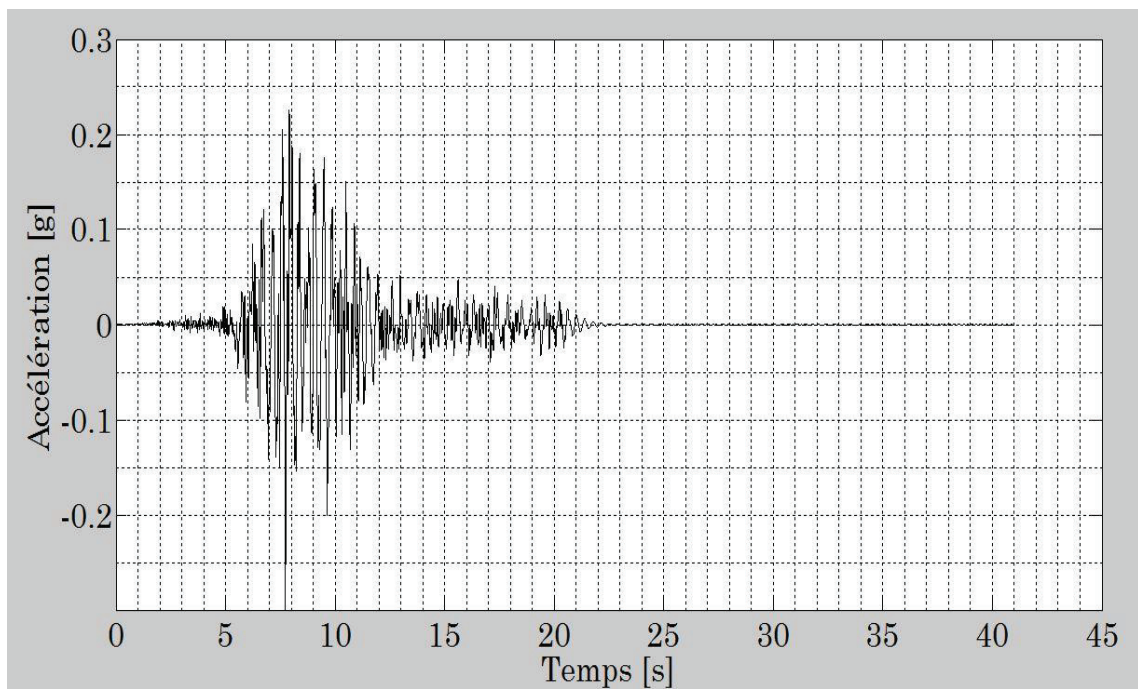


Figure 0(IV-9a): Réponse au nœud 810

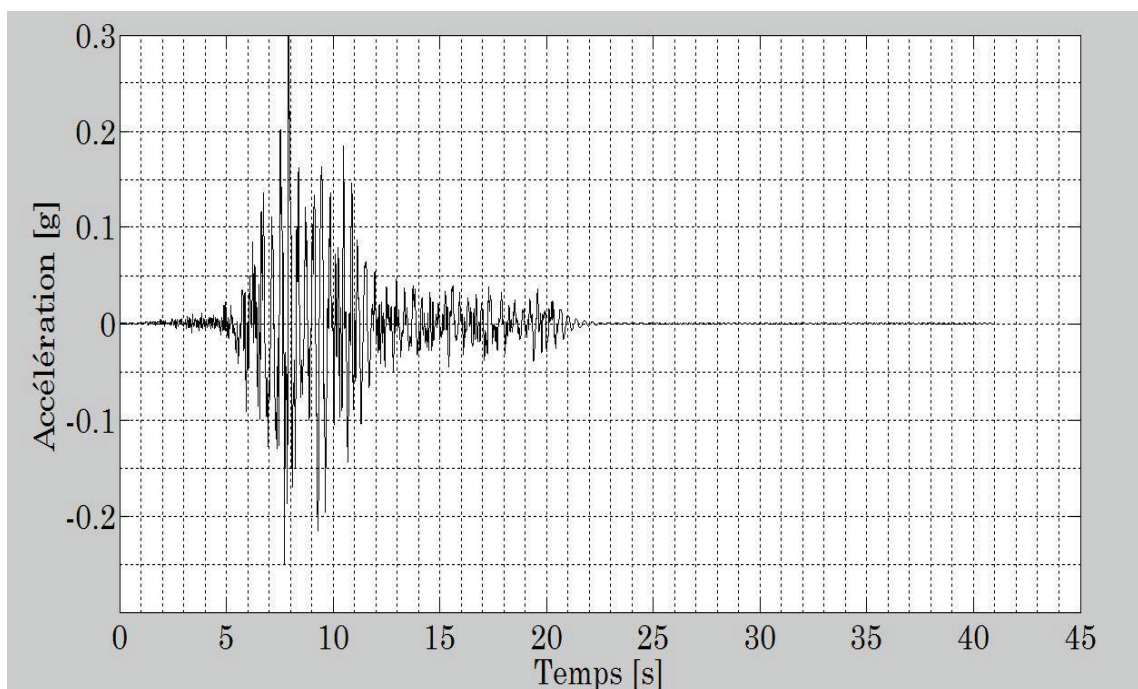


Figure (IV-9b): Réponse au nœud 1190

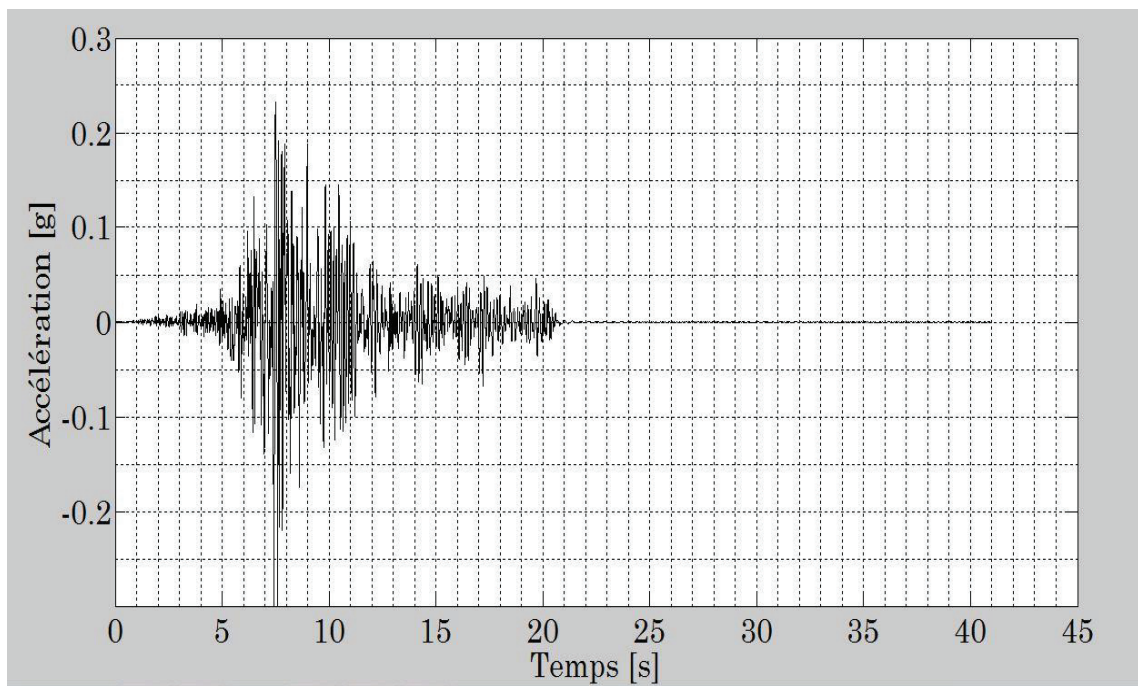


Figure (IV-10a): Réponse au nœud 819

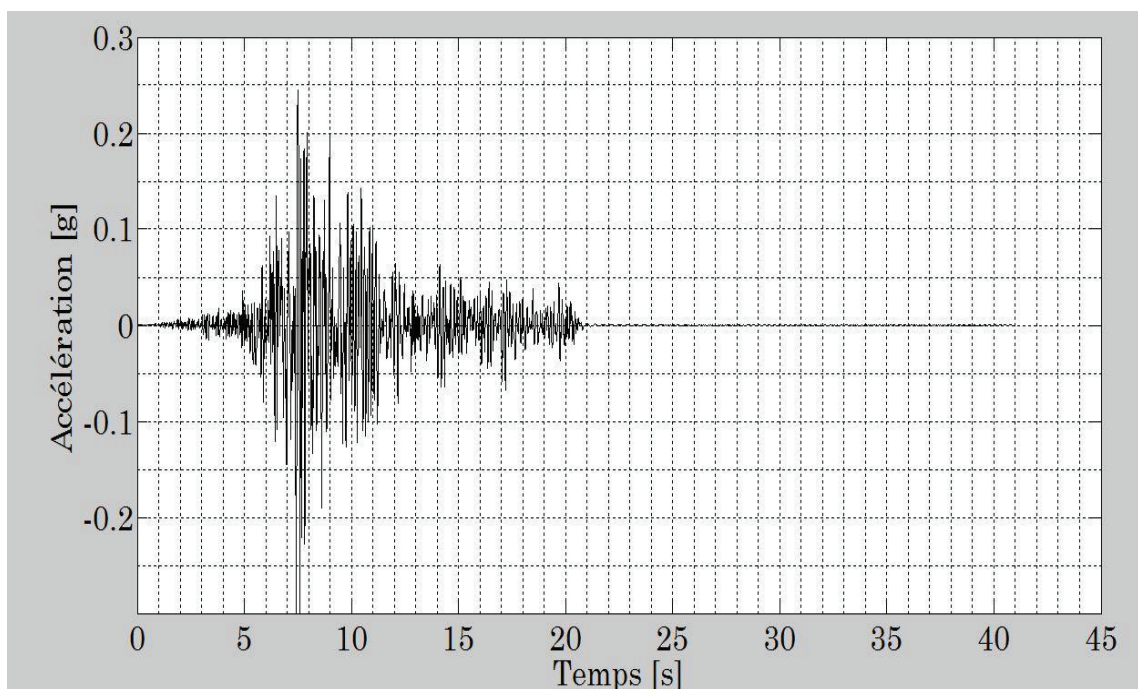


Figure (IV-10b): Réponse au nœud 1199

VI.DISCUSION DES RESULTATS

Nous résumons au tableau (IV.2) ci-dessous, les accélérations maximales calculées à différents niveau du système globale sol-pieux. Les accélérations calculées à la tête des pieux seront comparés à l'accélération maximale en champ libre U_f ($U_f=0.35g$). L'examen des résultats indique un rapport entre le mouvement maximum résultant de la tête du pieu, U_p au mouvement du sol en champ libre, U_f de 1.25 à 1.31 supérieur à 1. Les pieux amplifient le mouvement du sol en champ libre par suite de sa mise en résonance. Ils modifient le mouvement du sol, c'est l'interaction cinématique sol-pieux. En effet, le mouvement à la tête du pieux est amplifié par rapport au champ libre, ceci s'explique par :

- La nature du sol mou (vitesse de propagation de l'onde $V_S=200m/s$), les pieux sont alors plus raides que la couche de sol.
- L'élanement des pieux. En effet, d'après la figure (III.3) le coefficient I_u Est inversement proportionnelle à ce facteur élanement.

Tableau IV.2a: Tableau comparatif des accélérations maximales

Nœud	Accélération maximale (g) pour les pieux de 10 m	Accélération maximale (g) pour les pieux de 18m
Tête du pieu (Nœud 801)	0.44	0.46
Tête du pieu(Nœud 1181)	0.46	0.38
Nœud 810	0.35	0.20
Nœud 1190	0.3	0.20
Nœud 819	0.3	0.28
Nœud 1199	0.30	0.30

Tableau IV.2b: Coefficients I_U

Nœud	Coefficient I_U pour les pieux de 10 m	Coefficient I_U pour les pieux de 18m
Tête du pieu (Nœud 801)	1.25	1.31
Tête du pieu (Nœud 1181)	1.31	1.08

VII. CONCLUSION :

La comparaison des accélérations maximales démontre une augmentation de la réponse en tête des pieux par rapport aux réponses en champ libre. Ces résultats sont toutefois attendus, en effet la présence des pieux modifie la réponse du sol. C'est l'effet de l'interaction cinématique. Toutefois ces résultats concordent bien la bibliographie.




CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusion Générale et Recommandations

Le présent manuscrit représente une initiation à la recherche dans le cadre de notre mémoire de Master. Nous avons étudié le phénomène d'interaction Sol-Pieux de fondation d'un pont soumis à une excitation sismique. Pour cela, nous avons eu recours à plusieurs notions nouvelles, il s'agit de notions de Dynamique des Sols, d'Interaction Sol-Structure, Programmation Informatique. Nous avons appris à écrire, compiler et exécuter des programmes informatiques. D'une part, nous avons appris à faire une étude bibliographique. En d'autre part, nous avons surtout comparé les résultats retrouvés avec nos références bibliographiques.

L'interaction cinématique sol-pieux indique une amplification du mouvement en tête des pieux par rapport au mouvement en champs libre, ce phénomène est plus important quand la différence de rigidité entre le sol et les pieux est importante. C'est le cas de notre exemple, pris dans ce mémoire. Le sol étant mou (flexible), les pieux sont plus rigides. Cependant, ce travail présentant certaines insuffisances, nous citons ci-dessous certaines recommandations pour des travaux futures.

1. Elargir la largeur du profil de sol de part et d'autre des pieux.
2. Raffiner encore plus le maillage éléments finis, de sorte à augmenter encore la précision des résultats.
3. Récolter des résultats dans le domaine des fréquences.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

[1] ASPASIA Nikolaou, GAZETAS George et MYLONAKIS George , (1997),Soil-pile-bridge seismic interaction:kinematic and inertial effects .part i:soft soil.

[2] Bourgeois.E,(2006),Interactions sol-structure en statique "Modélisation numérique des ouvrages géotechniques" Module de base "éléments finis, différences finies et lois de comportement"–*Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*.

[3]Buchi Eric, (2013), Interaction Sol-Structure : Calcul des impédances et effets sur les fondations. *Thèse, INSA de Strasbourg*.

[4]CHUNG BUNG-Yun,Doo-KieKim-Jea-Min Kim, (2000),« Analytical frequency-dependent infinite elements for soil-structure interaction analysis in tow-dimensional medium.

[5]Hadid.M, (1995),Analyse de l'interaction cinématique déterministe et stochastique pour fondationsrigides bidimensionnelles par une approche intégrale aux frontières », *Thèse, Ecole national polytechniques (ENP) Alger*.

[6]A.Kappos,AnastasiosG.SextosetKyriazisD.pitilakis, (2003),Inelastic dynamic analysis of RC brides accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena.

[7] KhaldiHouda et SaibHayet,(2007), Influence du signal sismique sur la réponse dynamique des massifs de sol.*Thèse,ENSTP Alger*.

[8]Oliveira C.S et P.-Y. Bard, (2004), Assessing And Managing Earthquake Risk.

[9]Pecker A., (1984). 'Dynamique des sols', *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris*.

[10]Roussillon Pierre, (2006),Interaction sol-structure et interaction site-ville : aspects fondamentaux et modelisation.*Thèse, Ecole nationale des travaux publics de l'état, France*.