

1/96

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GÉNIE CIVIL
BIBLIOTHEQUE — *المكتبة*
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT

S U J E T

DEFINITION D'UN MOUVEMENT SISMIQUE
INDUIT PAR L'INCIDENCE D'UNE
ONDE DE CISAILLEMENT SV

Etudié par :

ABDESSEMED Nawel
AFIF CHAOUCHE Karim

Dirigé par :

Mr. M. HAMMOUTENE

PROMOTION JUIN 1996

ENP 10, Avenue Hacem Badi EL-HARRACH, ALGER

ملخص

معرفة توتر الإهتزازات و بالأخص التوتر الأساسي لمضهر الأرض جد مهمة وقت إدراك قياس الأشغال في الهندسة المدنية لهذا العمل الحالي سيتضمن التقويم و دراسة دالة تبليغ الأرض في وقت مرور موجة SV خارقة التي تحدث بين طبقتين أمواج ضغط و قص التي تنتشر حتى المساحة الحرة. من جهة أخرى عينا تصميم سرعة الأمواج في المساحة الحرة و أطيايف الحل لمضهر الأرض معين. زيادة على ذلك دراسة تشبيهية مع القواعد الزلزالية الجزائرية درست.

SUMMARY

The knowledge of the frequencies of vibration, and particularly the fundamental one for a soil profile, has a great important during the conceptual phase and the sizing phase of civil projects.

For this purpose, the aim of this work is the study and the evaluation of the amplification effects of a soil, produced by the waves refracted at the interface with a half-space, by an incident SV wave.

Therefore, we determined the accelerograms in the free-field and the response spectra for a given soil profile.

However, we undertake a comparative study using the Algerian Parasismic Standards (RPA 88).

RESUME

La connaissance des fréquences de vibration et en particulier la fréquence fondamentale d'un profil de sol est très importante lors de la conception et du dimensionnement des ouvrages en génie-civil.

Pour cela, ce présent travail consistera en l'évaluation et à l'étude de la fonction d'amplification du sol lors de la propagation d'une onde SV incidente produisant à l'interface des ondes de compression et de cisaillement qui se propagent jusqu'à la surface libre.

Par ailleurs, nous avons déterminé les accélérogrammes à la surface libre et les spectres de réponse pour un profil de sol donné.

Enfin, une étude comparative avec les règles parasismiques Algériennes a été menée.

REMERCIEMENTS



Que Monsieur M. HAMMOUTENE qui nous a confié et accepté de diriger le sujet de notre projet de fin d'études, trouve ici l'expression de notre sincère gratitude et notre profond respect. Nous avons particulièrement apprécié ses remarquables qualités d'homme de sciences alliées à un profond sens de l'humain.

C'est un honneur pour nous de voir Monsieur Le Professeur B. TILIOUINE présider notre jury. Puisse-t-il trouver ici notre infinie reconnaissance. Nous sommes également très sensibles à l'honneur que nous font Monsieur M. DEMIDEME et Monsieur R. BOUTEMEUR, les membres du jury, en acceptant de participer à la critique de notre travail. Nous leur en témoignons notre profonde gratitude.

D'une manière spontanée, nous tenons à remercier particulièrement Monsieur M.K. BERRAH pour ses conseils inestimables et ses efforts pour rendre une ambiance amicale au sein de l'équipe de recherche en Génie - Civil.

Que tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études trouvent dans ces quelques lignes l'esprit de notre reconnaissance et notre gratitude. Celles-ci s'adressent tout particulièrement à Mademoiselle KADI Karima et le personnel de la Société Brown and Root - Condor.

Enfin, nous remercions tous les enseignants qui ont veillé à assurer notre formation depuis notre jeune âge, le personnel de la bibliothèque et du centre de calcul, ainsi que tous ceux qui ont contribué par leur soutien moral ou leur conseils, à la finalité de ce travail.

DEDICACES

*A la mémoire de mon père ,
A ma très chère mère ,
A mes soeurs DOUNIA et AMEL ,
A tous ceux qui me sont chers .*

NAWEL

*A mes parents à qui je dois énormément ,
A mes frères et à ma soeur ,
A toute ma famille ,
A tous mes amis .*

KARIM

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I. NOTIONS DE SISMOLOGIE

- I.1. Introduction, 6
- I.2. Origine des tremblements de terre, 6
- I.3. Mécanisme général de production des séismes, 6
- I.4. Ondes sismiques, 7
 - I.4.1. Ondes de volume, 8
 - I.4.2. Ondes de surface, 8
- I.5. Caractérisation du mouvement sismique, 9
 - I.5.1. Paramètres caractéristiques du mouvement sismique, 9
 - I.5.2. Définitions, 10
 - I.5.3. Durée d'un séisme, 11
 - I.5.4. Intensité d'un séisme, 12
- I.6. Spectre de réponse, 13

CHAPITRE II. EQUATIONS DU MOUVEMENT DYNAMIQUE D'UN PROFIL DE SOL

- II.1. Introduction, 15
- II.2. Théorie de l'élasticité, 16
 - II.2-1 . Equation du mouvement, 16
 - II.2-2 . Notion de déformation, 23
 - II.2-3 . Notion de contrainte, 25
- II.3 – Prise en compte de l'amortissement, 27

CHAPITRE III. MODELISATION DE LA SOURCE

- III.1. Introduction, 30
- III.2. Modèle de source cinématique de HASKELL, 31
 - III.2.1. Expression du déplacement, 32
 - III.2.2. Diagramme de radiation, 34
 - III.3.3. Spectre de Fourier, 36

CHAPITRE IV. MODELISATION DU PROFIL DE SOL EN MILIEU STRATIFIE.

- IV.1. Introduction, 39
- IV.2. Modélisation du sol, 40
- IV.3. Réflexion et transmission des ondes sismiques aux interfaces, 41
- IV.4. Réflexion et réfraction d'une onde SV incidente, 44
- IV.5. Conditions aux limites, 45

CHAPITRE V. DETERMINATION ET ETUDE DE LA FONCTION D'AMPLIFICATION D'UN PROFIL DE SOL

- V.1. Introduction, 52
- V.2. Fonction de transfert, 52
- V.3. Traitement numérique, 53
- V.4. Etude paramétrique, 54
 - V.4.1. Influence de l'épaisseur « h » de la couche sédimentaire, 54
 - V.4.2. Influence de l'angle d'incidence « j_2 » sur la variation de la fonction d'amplification du sol, 55

- V.4.3. Influence du type de sol sur la variation de la fonction de transfert, 56
- V.4.4. Influence du rocher sur la variation de la fonction de transfert, 57
- V.4.4. Influence de la nature de l'onde, 58

CHAPITRE VI. ACCELEROGRAMME ET SPECTRE DE REPONSE

- VI.1. Introduction, 68
- VI.2. Description du modèle dynamique élastique, 68
- VI.3. Représentation analytique de l'action sismique, 69
 - VI.3.1 – Spectre de réponse, 70
 - VI.3.2 – Spectre de calcul, 71
 - VI.3.3 – Spectre de réponse en déplacement, 72
 - VI.3.4 – Spectre de Fourier, 73
- VI.4. Etude temporelle de l'action sismique, 74
- VI.5. Détermination temporelle de l'action sismique, 74
- VI.6. Traitements numériques, 75
 - VI.6.1 – Accélérogrammes, 75
 - VI.6.2 – Spectre de réponse, 83

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS , 88

BIBLIOGRAPHIE, 91

ANNEXES, 92

LISTE DE FIGURES



- Fig. I-1 : Les différents types d'ondes.
- Fig. I-2 : Caractéristiques du milieu sismique.
- Fig. II-1 : Composantes des contraintes suivant OX.
- Fig. II-2 : Modèle de Kelvin-Voigt.
- Fig. III-1 : Modèle de source cinématique de HASKELL.
- Fig. III-2 : Fonction Rampe.
- Fig. III-3 : Diagrammes de rayonnement.
- Fig. III-4 : Variation du terme de déplacement en fonction des fréquences.
- Fig. IV-1 : Modélisation du sol.
- Fig. IV-2 : Réflexion et transmission des ondes sismiques aux interfaces.
- Fig. IV-3 : Réflexion et refraction d'une onde SV incidente.
- Fig. V-1 : Le domaine d'étude.
- Fig. V-4.1 : Fonction d'amplification de l'onde SV suivant OX.
- Fig. V-4.2 : Fonction d'amplification de l'onde P suivant OZ.
- Fig. V-4.3 : Fonction d'amplification de l'onde SV suivant OX.
- Fig. V-4.4 : Fonction d'amplification de l'onde P suivant OZ.
- Fig. V-4.5 : Fonction d'amplification de l'onde SV suivant OX.
- Fig. V-4.6 : Fonction d'amplification de l'onde P suivant OZ.
- Fig. V-4.7 : Fonction d'amplification de l'onde SV suivant OX.
- Fig. V-4.8 : Fonction d'amplification de l'onde P suivant OZ.
- Fig. VI-1 : Système idéalisé à un degré de liberté.
- Fig. VI-2 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde SV pour $h=25$ mètres.
- Fig. VI-3 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde P pour $h=25$ mètres.
- Fig. VI-4 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde SV pour $h=100$ mètres.
- Fig. VI-5 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde P pour $h=100$ mètres.
- Fig. VI-6 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde SV pour $h=250$ mètres.
- Fig. VI-7 : Accélérogramme à la surface libre de l'onde P pour $h=250$ mètres.
- Fig. VI-8 : Spectres de réponse de l'onde SV.
- Fig. VI-9 : Spectres de réponse de l'onde P.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Ordres de grandeur des vitesses V_p et V_s .

Tableau II-2 : Ordres de grandeur des coefficients de qualité Q_p et Q_s .

LISTES DES ANNEXES

Annexe I : Transformée de Fourier.

Annexe II : Organigrammes.

LISTES DES SYMBOLES

P	Onde longitudinale de compression
SV	Onde transversale de cisaillement (verticale)
SH	Onde transversale de cisaillement (horizontale)
U, V, W	Les déplacements
ξ_x, ξ_y, ξ_z	Les déformations
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Contraintes normales
τ_x, τ_y, τ_z	Contraintes tangentielles
λ, μ	Coefficients de Lamé
E	Module de Young
γ	Coefficient de Poisson
ρ_i	Densité du milieu
V_p (ou α)	Vitesse de propagation des ondes P
V_s (ou β)	Vitesse de propagation des ondes S
ϕ	Potentiel de dilatation des ondes P
ψ	Potentiel de distortion des ondes S
Qp	Facteur de qualité de l'onde P
Qs	Facteur de qualité de l'onde S
h	L'épaisseur de la couche sédimentaire
ω	Pulsation
frq	Fréquence
T	Période
V_r	Vitesse de rupture
τ	Temps de montée
t_r	Temps de rupture
M_0	Moment sismique
f_c	Fréquence coin

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Parmi les catastrophes naturelles, ce sont les séismes qui le plus frappent l'imagination par leur soudaineté, leur violence, les incidences psychologiques, socio-économiques pouvant laisser des séquelles. C'est parce qu'ils constituent un lourd fardeau pour la société que l'homme a de tout temps cherché à s'en prémunir.

L'action sismique consiste en un mouvement vibratoire du sol de forte amplitude et de caractère aléatoire correspondant à la propagation d'une perturbation ayant pris naissance à l'intérieur de l'écorce terrestre. Sa durée est très variable mais toujours brève.

Les objectifs de la sismologie sont nombreux et variés. Cependant la prévention et la prévision des séismes demeurent encore la préoccupation principale des scientifiques.

Depuis quelques années, des travaux sont entrepris dans le monde afin de pouvoir prédire les grands séismes en un lieu et à une date précise. Malheureusement, la prévision temporelle des séismes ne connaît pas encore de succès et il s'avère de nos jours que seule la prévention pourrait en atténuer les répercussions sociales et économiques, exemple de ces préventions: les constructions parasismiques modernes.

Cette prévention nécessite la connaissance du phénomène sismique par son intensité, sa fréquence et sa localisation qui conduit à l'identification des zones sismiques.

Les sols sont le siège de phénomènes dynamiques, soit qu'ils servent d'assises à un ouvrage sollicité dynamiquement par les charges d'exploitation soit qu'ils constituent le milieu dans lequel une excitation dynamique se propage et se transmet aux constructions avoisinantes.

Le problème qui est donc posé à l'ingénieur dans la phase d'avant projet de construction est de deux natures :

- * Evaluation de la sollicitation sismique compte tenu des conditions de site au lieu d'implantation de l'ouvrage.
- * Conception et dimensionnement de la structure de sorte à avoir un comportement satisfaisant, notamment vis-à-vis d'un séisme éventuel.

Pour les ouvrages importants tels que les centrales nucléaires , les barrages , les réservoirs de gaz....., la maîtrise des divers facteurs régissant le comportement d'un sol est d'une nécessité vitale quant à leur conception et au choix du site de leurs implantations.

En effet, cette maîtrise passe par l'évaluation de la fonction d'amplification du profil de sol considéré, ce qui permet d'illustrer le comportement de ce dernier lors du passage d'une onde sismique réfractée à son interface inférieure à la surface libre.

Connaissant les amplitudes des diverses ondes à la source, ainsi que leurs radiations, il est possible de valoriser, à l'aide de la fonction de transfert, le mouvement en surface.

C'est ainsi que notre travail s'inscrit dans le cadre d'une modeste contribution dans le domaine du Génie Parasismique, dans le sens où, nous nous sommes attachés à l'étude des mouvements sismiques résultant de la propagation d'une onde transversale incidente (onde du type Sv).

Pour cela, nous avons jugé utile de présenter une méthodologie permettant d'évaluer les amplitudes des mouvements à la surface libre en fonction des deux types d'ondes, de compression et de cisaillement, générés par une onde Sv incidente.

En effet, nous avons commencé par définir au chapitre premier, les notions fondamentales de sismologie, en faisant référence aux divers types d'ondes qui se propagent à partir de la source, provoquant ainsi un séisme à la surface libre.

Par la suite, nous avons donné, au deuxième chapitre, un bref rappel des concepts fondamentaux de la mécanique des milieux continus, et ce en posant le système d'équations d'équilibre régissant les déformations d'un corps élastique et les contraintes qui s'y créent.

Par ailleurs, l'étude de la propagation des ondes sismiques requière un choix de la modélisation de la faille pour pouvoir déterminer les grandeurs du séisme. Pour cela, nous avons choisi d'étudier le modèle de source cinématique de HASKELL au troisième chapitre .

Au quatrième chapitre, nous avons étudié les lois de réflexion et de transmission de la propagation des ondes transversales et longitudinales traversant une interface entre un rocher et une couche sédimentaire le surmontant.

Par la suite, nous nous sommes penchés dans le cinquième chapitre, sur le calcul de la fonction de transfert du sol, caractéristique intrinsèque du milieu considéré. Nous avons aussi étudié l'influence des paramètres la caractérisant pour avoir une idée plus ou moins détaillée sur le comportement du sol lors du passage des ondes P et Sv réfractées à l'interface.

En outre, au sixième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude, dans le domaine temporelle, de l'action sismique et ce en déterminant et caractérisant les accélérogrammes à la surface libre.

Enfin, nous avons aussi étudié l'impact de l'action sismique sur les structures et ce en déterminant les spectres de réponse. A l'issue de cette dernière partie, nous avons tenu à faire une étude comparative avec les spectre de réponse réglementaires régis par le Règlement Parasismique Algérien (RPA 88).

En outre, nous avons déduit dans le dernier chapitre, les conclusions essentielles, ainsi que les recommandations nécessaires sur la base des observations faites dans les chapitres précédants.

Nous avons fini cette modeste contribution par la proposition des perspectives futures qui sont pour l'essentiel le fruit des problèmes que nous n'avons pas pu aborder dans cette étude vu le temps relativement court qui nous a été imparti.

CHAPITRE -I-

NOTIONS DE SISMOLOGIE

1.1. INTRODUCTION :

Les tremblements de terre sont responsables de la destruction de villes entières , de la mort de millions d'êtres humains et ont souvent des conséquences économiques désastreuses pour les pays considérés. Pour cela, la prise en compte du risque sismique reste très importante pour la conception des ouvrages

2. Origine des tremblements de terre :

Les tremblements de terre correspondent à une vibration du sol provoquée par une soudaine libération d'énergie dans la croûte terrestre et qui peut être provoquée par :

- Des glissements le long des failles géologiques.
- Une activité volcanique produisant des séismes d'intensité faible au voisinage immédiat du volcan.
- La subduction : qui est la plongée d'une couche sous une autre.
- Le décrochement : qui est le coulissage horizontal d'une plaque par rapport à une autre.
- Le changement d'état des roches : qui est le changement de volume dû à des changements de contraintes.
- D'autres raisons comme des explosions ou la sismicité induite par certains grands réservoirs.

Les séismes les plus importants sont ceux provoqués par les mouvements aux frontières des plaques tectoniques.

1.1. Mécanisme général de production des séismes :

Les séismes tectoniques apparaissent comme des conséquences de lentes déformations qui affectent les régions supérieures du globe terrestre et au cours desquelles des quantités considérables d'énergie s'accumulent dans les matériaux constitutifs sous forme d'énergie de déformation .

Lorsqu'en un point moins résistant ou plus sollicité que les autres , un équilibre limite est dépassé , il se produit une rupture qui s'étend très rapidement de proche en proche aux régions avoisinantes .Elles s'accompagnent de la brusque libération de l'énergie potentielle accumulée dans la déformation et donnent naissance à un ébranlement qui se propage au loin sous forme d'ondes sismiques , que l'on classe selon la façon dont elles se propagent à travers la terre .

1.4. Ondes sismiques :

Après rupture , l'énergie est libérée sous forme d'ondes sismiques . Ces dernières se propagent rapidement à partir de l'épicentre (foyer) , provoquant le séisme et engendrant en surface un mouvement complexe difficilement prédictible en un site donné.

On distingue les types d'ondes suivantes (voir figure I-1) :

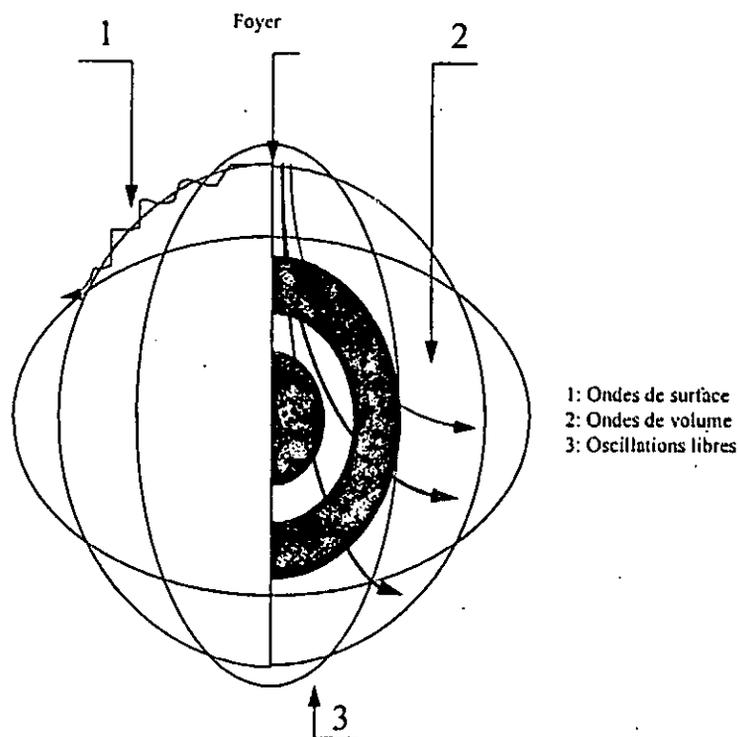


Figure I-1 : Types d'ondes

1.4.1. Ondes de volume :

Elles prennent naissance dans le foyer et se propagent à l'intérieur de la terre (dans un volume), elles sont de deux types :

- Ondes longitudinales ou ondes P :

Ce sont des ondes de dilatation qui produisent des déplacements dans le sens de la propagation du train d'ondes . Elles s'accompagnent d'un changement de volume .

Ce sont des ondes de compression - décompression.

- Ondes transversales ou ondes S :

Ce sont des ondes de cisaillement , correspondant à un mouvement sans variation de volume . Elles induisent une distorsion dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation . Ces ondes sont les plus dangereuses pour les constructions .

A la différence des ondes longitudinales, les ondes transversales ne peuvent se propager dans les milieux liquides ou gazeux, en raison de l'inaptitude de ces milieux à transmettre les efforts de cisaillement.

1.4.2. Ondes de surface:

Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre produisent des ondes de surface n'intéressant le sol que sur une profondeur extrêmement faible.

Ce sont les ondes de LOVE et de RAYLEIGH . Restant en surface, elles n'y subissent qu'un faible amortissement, ce qui fait qu'on les reçoit avec des amplitudes très supérieures à celles des ondes de volume, et elles sont parfois encore détectables après avoir fait plusieurs fois le tour de la terre . On distingue:

- Ondes de RAYLEIGH ou ondes R :

Ce sont des ondes pour lesquelles les points du sol décrivent des ellipses dans le plan vertical à la direction de propagation .

- Ondes de LOVE ou ondes Q :

Ce sont des ondes pour lesquelles les points du sol se déplacent dans un plan perpendiculaire à la direction de la propagation .

I - 5. Caractérisation du mouvement sismique :

I. 5.1. Paramètres caractéristiques du mouvement sismique :

Les propriétés des séismes dépendent de nombreux facteurs, en particulier; magnitude, mécanisme au foyer et profondeur du foyer ; distance au site de la source, direction de propagation ; propriétés mécaniques et configuration des milieux traversés; caractéristiques géologiques, géotechniques et topographiques du site.

Lorsque les ondes sismiques atteignent un site à la surface du globe, elles engendrent des vibrations en trois dimensions (deux horizontales orthogonales et une verticale).

Les enregistrements des accélérations de ces mouvements en fonction du temps s'effectuent à l'aide d'un accélérographe à partir duquel on détermine l'accélérogramme.

Par intégration d'un accélérogramme, on peut obtenir les diagrammes de vitesse et de déplacement en fonction du temps . Cette opération exige une minimisation des erreurs dues aux basses fréquences et les processus de différenciation pour les réponses des systèmes à hautes fréquences qui exigent aussi une réduction des erreurs à hautes fréquences .

Une approche pratique pour résoudre ces deux problèmes consiste à réduire les erreurs de digitalisation à des niveaux acceptables et ce en filtrant les accélérogrammes . Une fois ces corrections faites, l'accélérogramme résultant sera utilisé pour le calcul des paramètres du mouvement sismique en l'occurrence l'accélération, la vitesse, le déplacement, les contraintes.....

La compréhension de ces paramètres est d'une grande importance en génie parasismique .

I.5.2. Définitions :

a - L'épicentre géométrique:

L'épicentre géométrique est la projection verticale du foyer sismique sur la surface libre. (voir figure I-2).

b - La distance focale:

La distance focale d'un bâtiment est la distance qui le sépare du foyer sismique.

c - La distance épacentrale:

La distance épacentrale d'un bâtiment est la distance qui le sépare de l'épicentre géométrique.

d - L'épicentre d'observation:

C'est le point à surface de la terre qui est à la verticale du foyer (ou hypocentre).

e - Le foyer au centre: (hypocentre)

C'est le point sur la faille où est initiée la rupture.

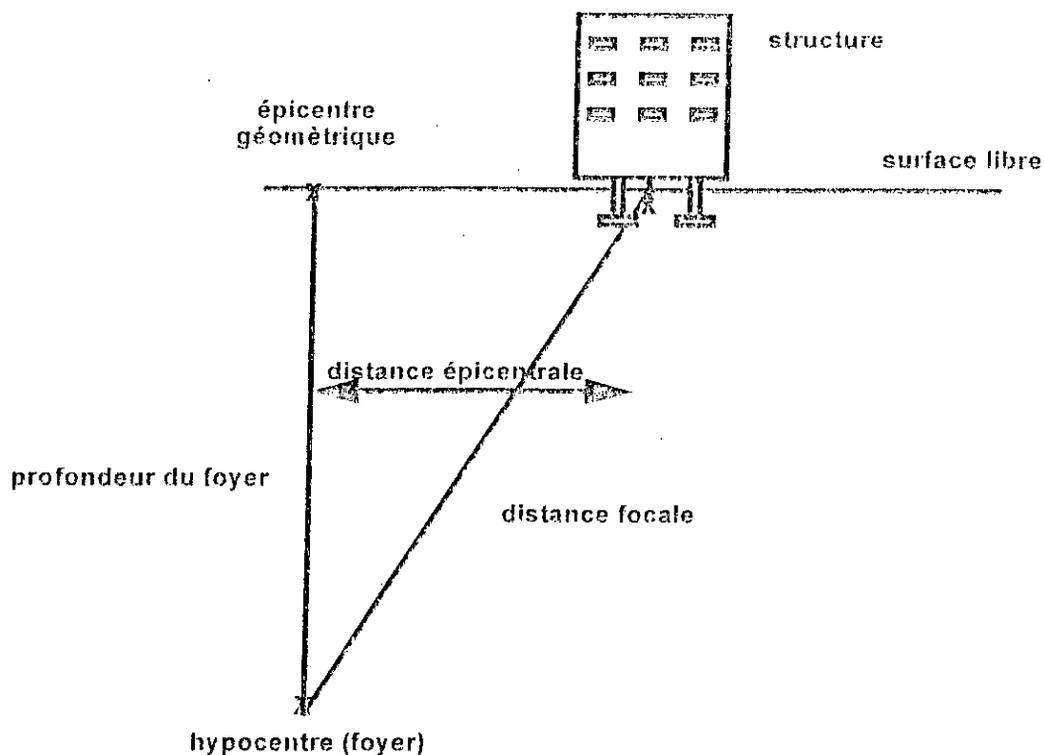


Figure I-2 : Caractéristiques du mouvement sismique

I.5.3. Durée d'un séisme :

La détermination de ce paramètre dans la caractérisation d'un séisme est très délicate à partir de l'accélérogramme.

Certains sismologues ont proposé de la définir à partir du diagramme d'HUSID qui proposa une forme convenable pour quantifier la variation du niveau de vibration dans le temps.

Si $a(t)$ est l'accélération en fonction du temps, T la durée totale du séisme (de l'accélérogramme). Ainsi, une variable normalisée $h(t)$ peut être définie comme:

$$h(t) = \frac{\int_0^t (a(t))^2 dt}{\int_0^T (a(t))^2 dt}$$

$h(t)$ est appelé tracé d'HUSID.

L'intégrale au dénominateur est une mesure de l'énergie contenue dans l'accélérogramme.

On peut alors définir la durée significative du séisme comme étant le temps requis pour passer du niveau 5% au niveau 95% du tracé d'HUSID.

1.5.4. Intensité d'un séisme :

L'échelle d'intensité attribuée à un séisme caractérise son importance en un lieu donné, d'après les manifestations ressenties par les personnes et les dégâts subis par les constructions.

L'intensité d'un séisme dépend du lieu où elle est mesurée et décroît généralement quand la distance épacentrale du lieu d'observation augmente, elle dépend aussi de la durée du séisme, de la nature du sol et du sous-sol dans laquelle l'énergie sismique rayonne, de la solidité des constructions. Elle est exprimée en chiffres romains.

Il existe deux grandes échelles de mesure :

a - L'échelle macrosismique internationale et l'échelle MERCALLI:

Elles décrivent les effets d'un séisme observé, sur l'environnement, les constructions et les sens de l'homme.

Degré I	secousse imperceptible à l'homme mais captée par appareils de mesure.
Degré II - III	secousse ressentie par un faible nombre de personnes.
Degré IV - V	séisme ressenti par de nombreuses personnes.
Degré VI	séisme ressenti par la plupart des personnes.
Degré VII	dommages légers aux constructions.
Degré VIII - IX	dommages importants aux constructions, apparition de fissures dans le sol.
Degré X	destruction générale des bâtiments.
Degré XI - XII	catastrophes.

b - L'échelle macrosismique M.S.K. :

Plus précise, elle prend en compte le type de construction et le pourcentage des bâtiments affectés, pour l'évaluation des dégâts.

I. 6. Spectre de réponse:

Le spectre de réponse en accélération, vitesse ou déplacement permet de faire intervenir la notion de contenu en fréquence du mouvement sismique. Son but est de permettre au calculateur d'évaluer d'une manière très simple, la réponse d'une structure, et de là, de déterminer les forces sismiques qui la sollicitent.

Il exprime la réponse maximale des grandeurs d'un oscillateur à un degré de liberté en fonction de sa fréquence propre, pour un coefficient d'amortissement donné.

CHAPITRE - II -

**FORMULATION DES EQUATIONS
DU MOUVEMENT**

II.1. Introduction :

Le problème à résoudre est celui de la propagation d'ondes sismiques dans le sol et l'influence de ce dernier sur le mouvement incident de la source, et le mouvement résultant au niveau de la surface libre. Un tel problème devient d'une grande complexité si l'on désire tenir compte des paramètres de la source (la faille), des hétérogénéités du sol, de son comportement non linéaire,.....

La mise en oeuvre des solutions numériques liées à un problème sismique nécessite la résolution des étapes suivantes:

- Le choix de la nature et de la direction de propagation de l'onde incidente (P, SV ou SH).
- Le choix de la modélisation du milieu. Cette modélisation comprend une modélisation d'ordre géométrique (milieu continu ou discrétisé) et le choix de la loi de comportement du sol (viscoélastique linéaire équivalent ou non linéaire).
- La modélisation de la source (la faille), et la prise en compte de ses caractéristiques géophysiques (dimensions, vitesse de rupture, temps de rupture,.....).
- La détermination des conditions aux limites, en surface libre et à l'interface.
- Le choix d'une méthode d'intégration: intégration dans le domaine fréquentiel ou intégration pas à pas dans le temps.

La résolution d'un problème de propagation d'ondes sismiques depuis une source est un problème tridimensionnel.

II.2. Théorie de l'élasticité :

Une approche pour l'étude de ce phénomène consiste à considérer que les roches se comportent comme des matériaux élastiques et que les séismes sont produits par la relaxation brusque de contraintes lors du glissement suivant un plan de faille. On passe donc d'un premier état d'équilibre correspondant à des contraintes importantes à un second état où après glissement, ces contraintes ont disparu partiellement ou en totalité.

La propagation des ondes élastiques à travers le sol dépend des propriétés des roches d'où la nécessité de l'étude des concepts fondamentaux de l'élasticité.

Quand on applique des forces à la surface d'un corps solide, la dimension et la forme de ce dernier changent et des forces internes s'opposent à ce changement, le corps tend à revenir à son état initial lorsque les forces externes sont annulées.

Cette propriété s'appelle l'élasticité. Nous dirons qu'un corps est élastique s'il retrouve son état initial après avoir été déformé. La théorie de l'élasticité lie donc les forces extérieures appliquées à la surface d'un corps aux modifications en dimension et en forme qui en résultent.

II.2.1. Formulation des équations du mouvement :

Pour la mise en équation du problème de propagation des ondes sismiques; considérons un volume de sol élémentaire, de dimensions Δx , Δy et Δz .

Cet élément de sol est supposé avoir un comportement élastique, linéaire et isotrope. Il est traversé par un train d'ondes y créant un champ de contraintes, normales et tangentielles, sur ses six facettes.

Les composantes des contraintes appliquées suivant la direction OX sont représentées sur la figure II-1.

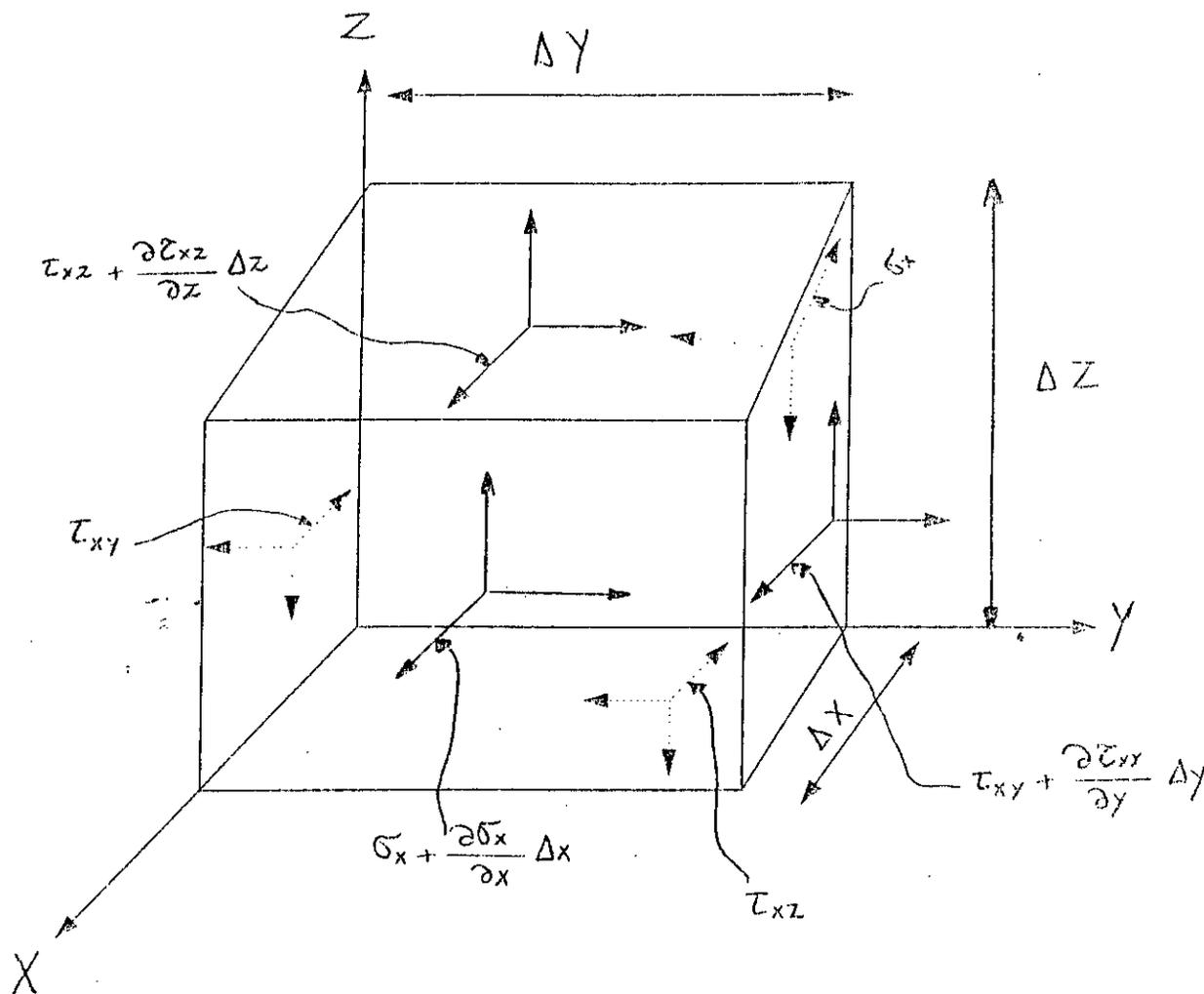


Figure II.1 : Composantes des contraintes suivant la direction OX.

Les déplacements seront notés :
 U le long de X,
 V le long de Y,
 W le long de Z.

L'équilibre dans la direction OX s'écrit :

$$\sum F_x = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (II-1)$$

et en notant par ρ la masse volumique du sol, on obtient :

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \rho (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (II-2)$$

De même, si on exprime l'équilibre suivant les deux directions OY et OZ, on aboutit ainsi au système d'équations d'équilibre :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{cases} \quad (II-3)$$

Loi de déformation du milieu - Loi de Hooke :

Lorsque les ^{déformations} contraintes sont petites, les déformations engendrées sont directement proportionnelles aux contraintes qui les provoquent : c'est la loi de Hooke, qui lie les contraintes aux déformations.

Le profil de sol est à comportement viscoélastique linéaire équivalent régi par la loi de Hooke:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2 \mu \varepsilon_{ij} \quad (\text{Loi de Hooke}) \quad (II-4)$$

Avec:

σ_{ij} : la contrainte.

ε_{ij} : la déformation.

ε_{kk} : la trace du tenseur de déformation.

δ_{ij} : le symbole de Kronecker

$$\delta_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1 \text{ si } i = j$$

λ et μ : sont les constantes de LAME. Elles peuvent s'écrire en fonction du module de Young E et du coefficient de Poisson ν :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Reste à définir le lien entre les déformations et les déplacements :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z} \quad (II-5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}$$

Les rotations pures autour de l'élément sont données par :

$$2\bar{\omega}_x = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}, \quad 2\bar{\omega}_y = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad 2\bar{\omega}_z = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \quad (II-6)$$

Remplaçons toutes ces équations dans le système d'équations (II-3), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 U \quad \dots\dots\dots (1) \\ \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 V \quad \dots\dots\dots (2) \\ \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 W \quad \dots\dots\dots (3) \end{array} \right. \quad (II-7)$$

Avec :

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad \text{Déformation volumétrique,}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{Opérateur Laplacien en coordonnées cartésiennes.}$$

Le système d'équations (II-7) nous donne deux solutions de l'équation du mouvement: L'une décrit la propagation de l'onde de dilatation simple et l'autre, la propagation de l'onde de rotation pure:

Si on dérive l'équation (II-7.1) par rapport à x, l'équation (II-7.2) par rapport à y et l'équation (II-7.3) par rapport à z, on obtient :

$$\frac{\partial^2 \bar{\epsilon}}{\partial t^2} = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \bar{\epsilon} \quad (II-8)$$

C'est l'équation d'onde de l'onde de compression simple (onde P, onde primaire), dans un milieu infini, avec :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Vp étant la vitesse de propagation des ondes P de compression (ondes irrotationnelles).

Si on dérive, maintenant, l'équation (II-7.2) par rapport à z, et l'équation (II-7.3) par rapport à y, on obtient une rotation par rapport à x :

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \bar{\omega}_x \quad (\text{II-9})$$

C'est l'équation d'onde de l'onde de rotation pure (onde S, onde secondaire), dans un milieu infini, avec :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

V_s étant la vitesse de propagation des ondes S de rotation pure (ondes de distorsion ou de cisaillement)

**ORDRES DE GRANDEUR DES VITESSES DE PROPAGATION
DES ONDES P ET S ET DES MASSES VOLUMIQUES DES ROCES**

Les ordres de grandeur des vitesses de propagation des ondes P et des ondes S et des masses volumiques correspondant à quelques roches et sols sont donnés dans le tableau représenté ci-dessous (Tableau II-1).

Nature des terrains	Vitesse P (m/s)	Vitesse S (m/s)	Masse volumique (g/cm ³)
Eblouis, terre végétale	300 - 700	100 - 300	1.7 - 2.4
Sables secs	400 - 1200	100 - 500	1.5 - 1.7
Sables humides	1500 - 4000	400 - 1200	1.9 - 2.1
Argiles	1100 - 2500	200 - 800	2.0 - 2.4
Marnes	2000 - 3000	750 - 1500	2.1 - 2.6
Grès	3000 - 4500	1200 - 2800	2.1 - 2.4
Calcaires	3500 - 6000	2000 - 3300	2.4 - 2.7
Craie	2300 - 2600	1100 - 1300	1.8 - 2.3
Sel	4500 - 5500	2500 - 3100	2.1 - 2.3
Anhydrite	4000 - 5500	2200 - 3100	2.9 - 3.0
Dolomie	3500 - 6500	1900 - 3600	2.5 - 2.9
Granite	4500 - 6000	2500 - 3300	2.5 - 2.7
Basalte	5000 - 6000	2800 - 3400	2.7 - 3.1
Charbon	2200 - 2700	1000 - 1400	1.3 - 1.8
Eau	1450 - 1500	-	1.0
Glace	3400 - 3800	1700 - 1900	0.9
Huile	1200 - 1250	-	0.6 - 0.9

Tableau II-1 : Ordre de grandeur des vitesses Vp et Vs.

L'onde longitudinale P se propage donc, plus rapidement que l'onde transversale S. C'est le train d'ondes P qui est tout d'abord enregistré par les séismographes.

Si l'on connaît les vitesses V_p et V_s ainsi que les écarts qui existent entre le temps d'arrivée des ondes P et S, on peut calculer la distance entre le foyer et le point d'enregistrement.

11.2.2. Notion de déformation :

La déformation est le changement des formes et des dimensions d'un corps élastique soumis à des contraintes.

- Pour les ondes de compression (P):

le mouvement des particules est contenu dans le plan de propagation et est dirigé suivant le sens de propagation

le vecteur déplacement est tel que :

$$\begin{cases} U = \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ V = 0 \\ W = \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{cases} \quad (11-10)$$

U et W sont indépendants de Y.

ϕ étant le potentiel de dilatation des ondes P défini comme suit:

$$\phi^{inc} = A \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin i}{V_p} x - \frac{\cos i}{V_p} z - t \right) \right] \quad \text{pour une onde P incidente}$$

$$\phi^{ref} = B \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin i}{V_p} x + \frac{\cos i}{V_p} z - t \right) \right] \quad \text{pour une onde P réfléchie}$$

- Pour les ondes de cisaillement (Sv et Sh):

Le mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation . On peut distinguer deux types d'ondes de cisaillement.

Les ondes SV :

Pour lesquelles le mouvement des particules est contenu dans le plan de propagation et est dirigé perpendiculairement au sens de propagation.

Le vecteur déplacement est tel que :

$$\begin{cases} U = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \\ V = 0 \\ W = \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{cases} \quad (II-11)$$

ψ étant le potentiel de distorsion des ondes Sv défini comme suit:

$$\psi^{inc} = A \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin j}{V_s} x - \frac{\cos j}{V_s} z - t \right) \right] \text{ pour une onde SV incidente}$$

$$\psi^{ref} = B \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin j}{V_s} x + \frac{\cos j}{V_s} z - t \right) \right] \text{ pour une onde SV réfléchie}$$

Les ondes SH :

Pour lesquelles le mouvement des particules est contenu dans le plan horizontal et dirigé perpendiculairement au plan de propagation.

Le vecteur déplacement est tel que :

$$\begin{cases} U = 0 \\ V = v \\ W = 0 \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

V étant indépendant de Y.

$$v^{\text{inc}} = A \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin j}{V_s} x - \frac{\cos j}{V_s} z - t \right) \right] \quad \text{pour une onde SH incidente}$$

$$v^{\text{ref}} = B \exp \left[i\omega \left(\frac{\sin j}{V_s} x + \frac{\cos j}{V_s} z - t \right) \right] \quad \text{pour une onde SH réfléchie}$$

II.2.3. Notion de contrainte :

La contrainte est définie comme étant une force par unité de surface (dimension d'une pression).

Si la force est perpendiculaire à la surface, on parle de contrainte normale; et lorsque la force est tangentielle à l'élément de surface, la contrainte est dite de cisaillement.

Dans le cas général, toute force qui n'est ni perpendiculaire ni parallèle à la surface élémentaire, peut être décomposée en deux composantes: normale et tangentielle.

D'après la mécanique des milieux continus, le tenseur de contraintes qui s'exerce sur une facette horizontale est donné par:

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \\ \sigma_{yz} = \mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \\ \sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial W}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

En remplaçant les composantes des déplacements par leurs expressions en fonction des potentiels, on obtient:

Pour l'onde P:

Le vecteur contrainte de l'onde P est tel que :

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = 2\mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} \\ \sigma_{yz} = 0 \\ \partial_{zz} = \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

Pour l'onde Sv:

Le vecteur contrainte de l'onde SV est tel que :

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) \\ \sigma_{yz} = 0 \\ \partial_{zz} = 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial x} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Pour l'onde Sh:

Le vecteur contrainte de l'onde SH est tel que :

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{yz} = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \\ \partial_{zz} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

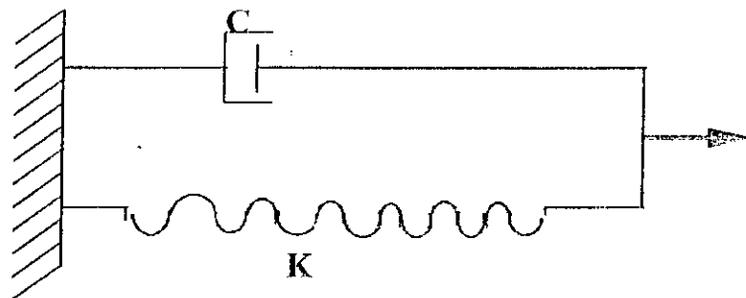
II.3. Prise en compte de l'amortissement :

L'amortissement est une grandeur fondamentale dans l'étude des phénomènes vibratoires, en particulier au voisinage de la résonance.

Le phénomène d'amortissement correspond à la dissipation sous forme de chaleur dans la structure d'une partie de l'énergie injectée dans cette dernière.

Il permet à un système physique, mis en vibration à une fréquence égale à sa fréquence de résonance de maintenir une amplitude de déplacement limitée.

Sous sollicitation harmonique, un matériau viscoélastique linéaire peut être représenté par un ressort et un amortisseur placé en parallèle : modèle de Kelvin-Voigt. (voir figure II.2).



K : raideur du ressort.

C : coefficient d'amortissement.

Figure II-2 : MODELE DE KELVIN- VOIGT

Chaque milieu est caractérisé par deux facteurs de qualité Q_p et Q_s :

Q_p : Facteur de qualité relatif aux ondes de compression P.

Q_s : Facteur de qualité relatif aux ondes de cisaillement S.

Les ordres de grandeur des facteurs de qualité Q_p et Q_s relatifs aux ondes P et aux ondes S sont donnés dans le tableau représenté ci-dessous (Tableau II-2).

Nature des terrains	Q_p	Q_s
Eblouis, terre végétale	10	5
Sables secs	30	15
Sables humides	50	25
Argiles	50	25
Marnes	100	50
Grès	200	100
Calcaires	200	100
Craie	120	60
Sel	300	150
Anhydrite	300	150
Dolomie	300	150
Granite	300	150
Basalte	400	200
Charbon	120	60

Tableau II-2 : **Ordre de grandeur des facteurs
de qualité Q_p et Q_s .**

CHAPITRE - III -

MODELISATION DE LA SOURCE

III.1. Introduction :

L'évaluation de la réponse au niveau d'un point du sol, pour une excitation sismique donnée, pose des problèmes liés à la nature du mouvement incident, à la nature du milieu dans lequel il se propage et à la source (foyer, faille où se déclenche le séisme).

La rupture cesse de se propager lorsque l'énergie de déformation est épuisée ; la faille ainsi créée coupe les terrains sans égard pour la morphologie superficielle et constitue une surface de moindre résistance. Si les déformations continuent dans la même région, c'est donc de préférence sur une faille déjà formée que se produit la nouvelle rupture. Cette faille rejoue, et c'est là, beaucoup plus fréquemment que la formation d'une faille nouvelle, la cause ordinaire des séismes.

De tout temps, les chercheurs en sismologie ont été intéressés par l'analyse des mouvements forts selon les besoins de l'ingénierie. Cependant, les paramètres de l'input, usuellement utilisés pour l'évaluation du critère de résistance vis-à-vis d'un séisme, ont été synthétisés pour divers temps, indépendamment des considérations physiques de la source.

Récemment, des sismologues ont commencé à donner un intérêt actif aux mouvements forts en étudiant les détails de la faille, de même que les données des mouvements forts ont été réunies et accumulées en champs proche ainsi qu'en champs lointain.

L'étude de la propagation des ondes sismiques est l'un des remarquables sujets de sismologie et de l'ingénierie des tremblements de terre. La première ébauche de cette analyse a été réalisée par AKI (1968) et par HASKELL (1969), utilisant un modèle de source cinématique, donné par une propagation de la rupture le long du plan de faille, dans un milieu homogène, isotrope et infini. Les paramètres physiques de cette étude sont déterministes. Les plus importants étant: les dimensions, la profondeur et

l'orientation de cette faille; la direction, la vitesse et le temps de rupture; ainsi que le spectre de l'énergie dispersée sous forme d'ondes sismiques.

III.2. Modèle de source cinématique de HASKELL :

L'étude de la propagation des ondes sismiques requière le choix de la modélisation (modèle mathématique) de la faille. Parmi ces modèles, nous avons choisi le modèle de source cinématique de HASKELL (1969) qui considère une faille de forme rectangulaire, de dimensions $L \times W$ (voir figure III-1).

La rupture créée au niveau du foyer, provoque une dislocation continue et successive de tous les points de la faille, à une vitesse de rupture constante V_r . Ainsi, chaque point ξ_0 situé sur le plan de faille, subit un glissement D_0 pendant un temps τ .

Cette rupture progressive donne naissance à des ondes sismiques qui se propagent dans le sol, dans toutes les directions. Un récepteur situé à une distance r_0 par rapport au point ξ_0 reçoit alors ces ondes et les enregistre. Cet enregistrement constituera alors notre accélérogramme.

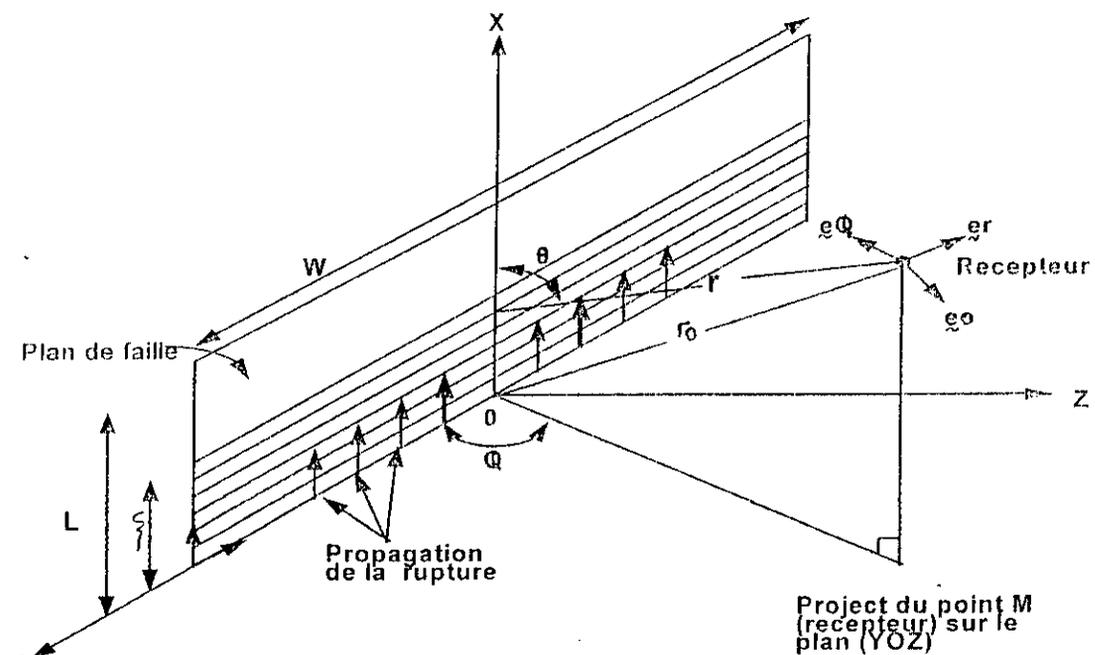


Figure III-1 : Modèle de HASKELL.

III.2.1. Expression du déplacement :

Soit un point M du récepteur, défini par ses coordonnées r_0, θ et φ dans le repère (OXYZ) lié à la faille, et considérons le repère local $(M, e_{-r}, e_{-\theta}, e_{-\varphi})$ tel que :

e_{-r} : Le long de \underline{OM} ,

$e_{-\theta}$: Appartient au plan (XOM) et perpendiculaire à e_{-r} ,

$e_{-\varphi}$: est tel que $e_{-r} \wedge e_{-\theta} = e_{-\varphi}$

Glissement au point ξ_0 :

Lorsque la rupture atteint le point ξ_0 de la faille, celui-ci subit un glissement à vitesse constante V_r pendant un temps τ , appelé temps de montée. Ce point atteint son équilibre limite après un déplacement global de D_0 .

Pour modéliser le passage de l'état d'équilibre initial à l'état d'équilibre final, HASKELL a choisi une fonction simple où le passage se fait en forme de rampe comme représentée sur la figure III-2.

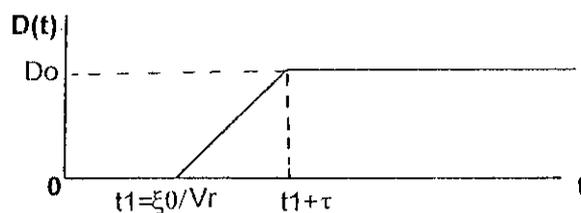


Figure III-2 : Fonction rampe.

Le modèle de Haskell est donc un modèle cinématique caractérisé par cinq paramètres: longueur de la faille (L), largeur de la faille (W), la vitesse de rupture (V_r), le glissement final (D_0) et le temps de montée (τ).

Rayonnement du modèle :

Lorsque le rayon r_0 est très grand devant la longueur L de la faille (en champs lointain), le déplacement \tilde{u} au niveau du récepteur M à un instant t sera donné par l'expression suivante :

$$\tilde{u}(M, t) = R_{\alpha}(\theta, \varphi, r) \mu W I_{\alpha} + R_{\beta}(\theta, \varphi, r) \mu W I_{\beta} \quad (III-1)$$

Le premier terme exprime le rayonnement des ondes P (ou α) de compression simple (déplacement suivant e_{-r}), le second représente le rayonnement des ondes S (ou β) de cisaillement pur (déplacement dans le plan $e_{-\theta}, e_{-\varphi}$).

avec :

$$I_c = \int_0^L \dot{D} \left(t - \frac{\xi}{V_r} - \frac{r_0}{c} \right) d\xi \quad ; \quad c = \alpha \text{ ou } \beta \text{ (célérité)}. \quad (III-2)$$

R_{α} : Coefficient de radiation de l'onde P.

R_{β} : Coefficient de radiation de l'onde S.

et :

$$\begin{cases} \alpha & : \text{Vitesse de l'onde P.} \\ \beta & : \text{Vitesse de l'onde S.} \\ \mu & : \text{Rigidité du milieu.} \end{cases}$$

En posant $r = r_0 - \xi \cos \theta$ (en champs lointain), et en introduisant une nouvelle variable :

$$t_r = \frac{L}{V_r} - \frac{L \cos \theta}{c} \quad (\text{temps de rupture vu du point M}) \quad (\text{III-3})$$

On aboutit à l'expression définitive du déplacement du point M :

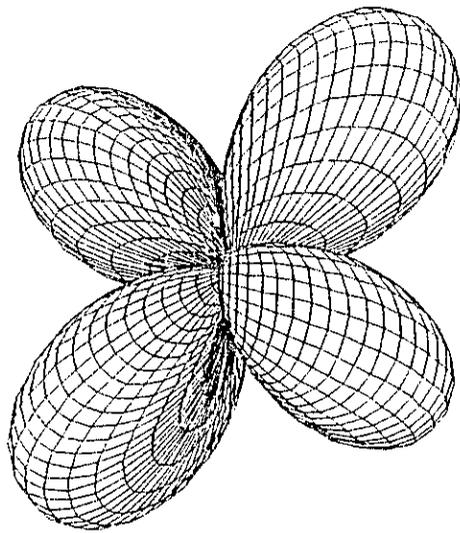
$$\tilde{u}_c = \tilde{R}_c(\theta, \varphi, r) \mu W \frac{L}{t_r} \left[D\left(t - \frac{r_0}{c}\right) - D\left(t - \frac{r_0}{c} - t_r\right) \right] \quad (\text{III-4})$$

III - 2.2. Diagramme de radiation :

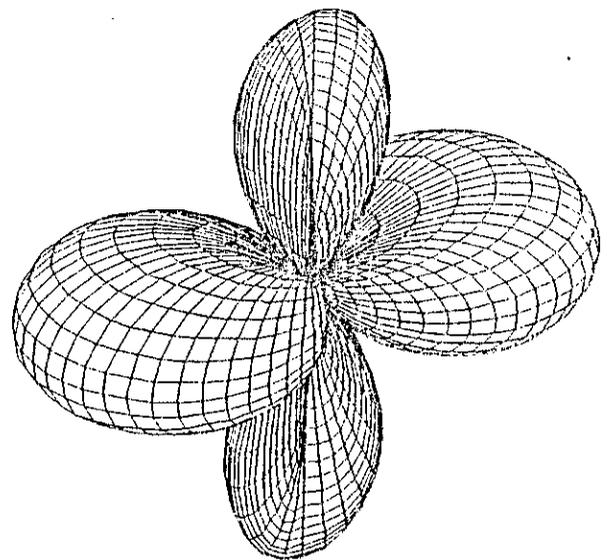
L'étude des termes de radiation $R_{-\alpha}$ et $R_{-\beta}$ nous conduit à diagramme de radiation représenté sur la figure ci-contre (fig.III-3).

Cette figure montre que pour les ondes P, il n'y a pas de radiation lorsque $\sin 2\theta = 0$. Le plan de faille et le plan orthogonal à la dislocation, appelé plan auxiliaire, sont donc des plans nodaux pour la radiation des ondes P. Par ailleurs, la radiation est maximale par rapport à ces plans quand $\sin 2\theta = 1$ (voir figure III-3.a).

Pour les ondes S, le rayonnement est maximal à 0° par rapport aux plans nodaux, alors qu'il est nul à 45° (voir figure III-3.b).



a- Pour ondes P.



b- Pour ondes S.

Figure III-3 : Termes de rayonnement.

III.2.2. Etude du terme de décroissance géométrique:

Dans l'expression (III-4), on remarque une proportionnalité de l'amplitude du déplacement avec le coefficient $\frac{M_0}{4 \pi \rho r_0^3 c^3}$ où M_0 représente le moment sismique, défini par Aki (1966) par :

$$M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot D_0 \quad (III-5)$$

C'est un paramètre important et surtout très significatif, car il décrit mieux l'importance d'un séisme.

On note aussi que l'amplitude du déplacement est inversement proportionnelle à la distance source-observateur et au cube de la vitesse de propagation de l'onde. Pour cette raison, l'amplitude des ondes S est plus grande en général que celle des ondes P.

III.2.3. Spectre de Fourier :

Pour le passage au domaine fréquentiel, on utilisera la transformation de Fourier, définie par :

$$\text{TF} [f(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = F(\omega)$$

ou alors :

$$\text{TF} [f(t - t_0)] = F(\omega) e^{-j 2\pi f_{rq} t_0}$$

Donc , l'expression (III-2) devient :

$$I_c(\omega) = \frac{L}{t_r} \frac{D_0}{\tau \omega^2} e^{-j\omega \frac{r_0}{c}} \left(1 - e^{-j\omega t_r}\right) \left(e^{-j\omega \tau} - 1\right) \quad (\text{III-6})$$

le module de $|I_c(\omega)|$ est :

$$|I_c(\omega)| = L D_0 \text{sin}_c \frac{\omega \tau}{2} \text{sin}_c \frac{\omega t_r}{2} \quad (\text{III-7})$$

et en définitif, on obtient l'expression du module de déplacement :

$$|u_c(\omega)| = R_{\omega \varphi} \frac{1}{4 \pi \rho r_0 c^3} \mu W L D_0 \text{sin}_c \frac{\omega t_r}{2} \text{sin}_c \frac{\omega \tau}{2} \quad (\text{III-8})$$

Le déplacement en fonction de la fréquence est représenté par la figure III-4.

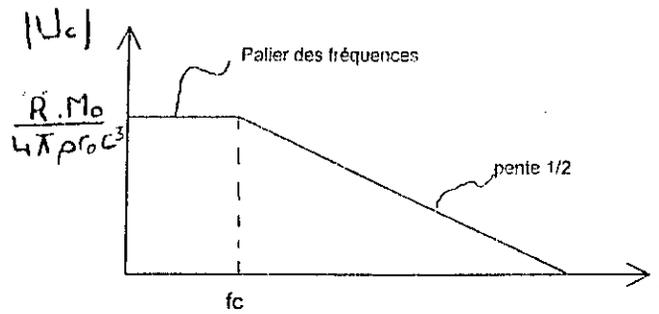


Figure III-4 : Variation du terme de déplacement en fonction des fréquences.

On voit sur ce spectre que les fortes amplitudes sont celles associées à des basses fréquences jusqu'à la valeur f_c (dite fonction coin), ensuite, ça diminue.

f_c est donnée par la condition suivante :

$$\sin c\left(\omega_c \frac{t_r}{2}\right) \cdot \sin c\left(\omega_c \frac{\tau}{2}\right) = 1 \quad (\text{III-9})$$

avec : $\omega_c = 2 \pi f_c$, ce qui donne :

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{t_r \tau}} \quad (\text{III-10})$$

En remplaçant t_r , τ et V_r par leurs expressions, la relation (III-10) devient :

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{\frac{L \tau}{0.72 \beta} (1 - 0.72 \cos \theta)}} \quad (\text{III-11})$$

On voit bien que plus la longueur L de la faille augmente, plus la valeur de f_c diminue. Par contre plus la vitesse β des ondes S augmente, plus la valeur de f_c augmente.

CHAPITRE - IV -

**MODELISATION DU PROFIL DE SOL
EN MILIEU STRATIFIE**

IV.1. Introduction :

Un dépôt géotechnique naturel présente des caractéristiques mécaniques qui croissent généralement avec la profondeur. De plus, à une certaine profondeur existe une roche à caractéristiques nettement plus élevées que celles des sols sus-jacents. L'onde sismique se propageant dans la roche va, en heurtant la surface de discontinuité entre les deux milieux, être réfractée.

Les lois de Snell montrent que le rapport d'admittance étant très faible, l'onde se propagera dans les couches de sol suivant un trajet sub-vertical. En progressant vers la surface, la diminution des caractéristiques provoque une réfraction continue et le trajet de l'onde devient quasiment vertical. On a vu alors que le mouvement vertical était engendré par la propagation d'ondes P et les mouvements horizontaux par la propagation d'ondes S, les mouvements étant découplés.

Basée sur ces considérations physiques, l'hypothèse couramment admise en génie parasismique est de supposer que le mouvement horizontal résulte uniquement de la propagation verticale d'une onde de cisaillement et le mouvement vertical de la propagation d'une onde de compression.

Il existe cependant des configurations géométriques telles que, même dans les couches supérieures, les ondes de volume auront une incidence non verticale. Le mouvement horizontal résulte alors de la propagation d'ondes S et P.

Certaines configurations conduisent également à la formation d'ondes de surface généralisées. Ainsi en un point quelconque, le mouvement horizontal résulte de la combinaison de tous ces types d'ondes sans qu'il soit possible de distinguer la proportion de chacune d'entre elles. L'état des connaissances actuelles est suffisamment avancé pour permettre la résolution du problème de propagation d'ondes dans un milieu viscoélastique à condition de spécifier la nature de l'onde (surface, volume) et sa direction de propagation.

IV.2. Modélisation du sol :

Mathématiquement le problème de propagation d'une onde incidente avec un angle d'incidence donné, dans le sol est d'une grande complexité, pour sa résolution on se limitera au cas d'un monocouche c'est à dire, une couche de sol homogène d'épaisseur « h », ayant une masse volumique ρ_1 constante avec la profondeur, surmontant un semi-espace représentant le rocher sous-jacent (le bed-rock), de masse volumique ρ_2 .

On désigne par l'indice « 1 » les paramètres relatifs à la couche de sol et par l'indice « 2 » ceux relatifs au rocher (voir figure IV-1).

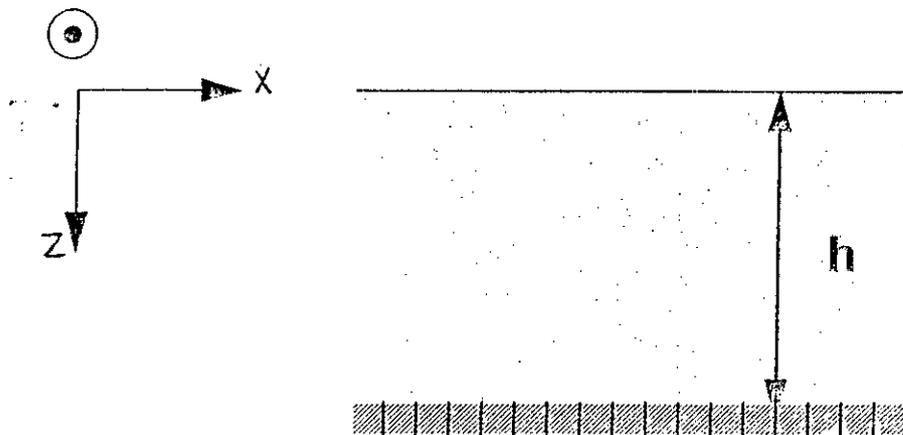


Figure IV-1 : Modélisation du sol.

ρ_1, ρ_2 : désignent les masses volumiques des milieux 1 et 2.

V_{p1}, V_{p2} : désignent les vitesses de propagation des ondes de compression P dans les deux milieux.

V_{s1}, V_{s2} : désignent les vitesses de propagation des ondes de cisaillement Sv dans les deux milieux.

En se basant sur une telle modélisation, l'estimation des fréquences de vibration et en particulier la fréquence fondamentale de ce profil est très importante dans une phase d'avant projet et de conception d'ouvrages, de même le calcul de sa fonction d'amplification ; pour pouvoir déterminer l'amplification induite en surface libre à partir d'une excitation générée au niveau du substratum rocheux, afin de prédire le mouvement sismique en tout point du profil modélisé.

IV .3. Réflexion et transmission des ondes sismiques aux interfaces :

Lorsque les fronts d'ondes arrivent aux interfaces du sous-sol, ils sont partiellement réfléchis et partiellement transmis, nous nous intéresserons au cas des ondes de volume incidentes sur des interfaces planes et horizontales de dimensions infinies. Une onde P ou Sv incidente donne naissance en général à une onde P et une onde Sv réfléchies, et à une onde P et une onde Sv transmises (voir figure IV-2).

Par contre, une onde Sh incidente ne donne naissance qu'à une Sh réfléchie et une Sh transmise.

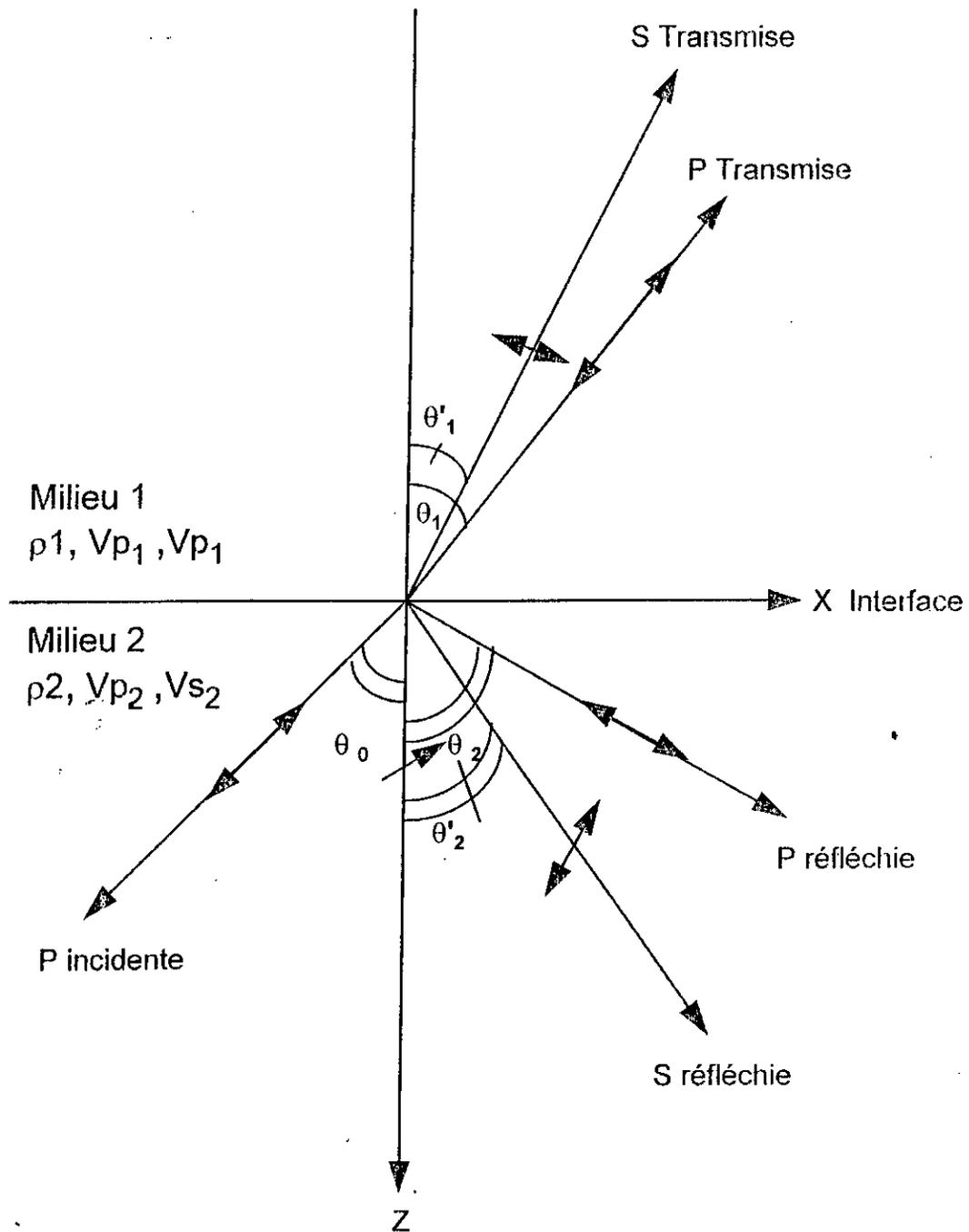


Figure IV-2 : REFLEXION ET TRANSMISSION DES ONDES SISMiques AUX INTERFACES

La loi de Snell :

Les relations angulaires entre les rayons incidents, réfléchis et transmis dans les différents types d'ondes se déduisent du principe d'Huygens et conduisent à la loi de SNELL, dite aussi loi de réfraction.

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{p1}} = \frac{\sin \theta_1'}{V_{s1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{p2}} = \frac{\sin \theta_2'}{V_{s2}} = R = \text{cste} \quad (\text{IV-1})$$

$\theta_1, \theta_1', \theta_2, \theta_2'$: Ce sont les angles d'incidence, de réflexion et de transmission à travers l'interface.

$V_{p1}, V_{s1}, V_{p2}, V_{s2}$: Ce sont les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement dans les milieux 1 et 2.

La loi de SNELL montre que si les caractéristiques mécaniques des deux milieux et l'angle d'incidence de l'onde incidente sont tels que :

$$\frac{V_{s1}}{V_{s2}} \sin \theta_1' > 1 \quad (\text{IV-2})$$

Pour la valeur de θ_1' telle que $\sin \theta_1' > 1$, l'onde incidente donnera naissance à des ondes inhomogènes se propageant avec une vitesse $V_{s2} / \sin \theta_2'$. Ces ondes ont été exclues de notre étude, pour cela, nous nous sommes limités à déterminer les fonctions de transfert jusqu'à un angle critique θ_2' pour lequel :

$$\frac{V_{s1}}{V_{s2}} \sin(\theta_2') < 1 \quad (\text{IV-3})$$

IV.4. Réflexion et réfraction d'une onde Sv incidente:

Lorsque l'onde incidente Sv rencontre l'interface, elle donnera naissance à deux ondes réfléchies une onde P et une onde Sv, et donnera aussi lieu à deux autres ondes transmises une onde P et une onde Sv avec différents angles de réflexion et de transmission. Ensuite, chacune de ces deux ondes transmises va se propager jusqu'à atteindre la surface libre et donnera lieu à deux autres ondes réfléchies une onde P et une onde Sv avec d'autres angles de réflexion (figure IV-3).

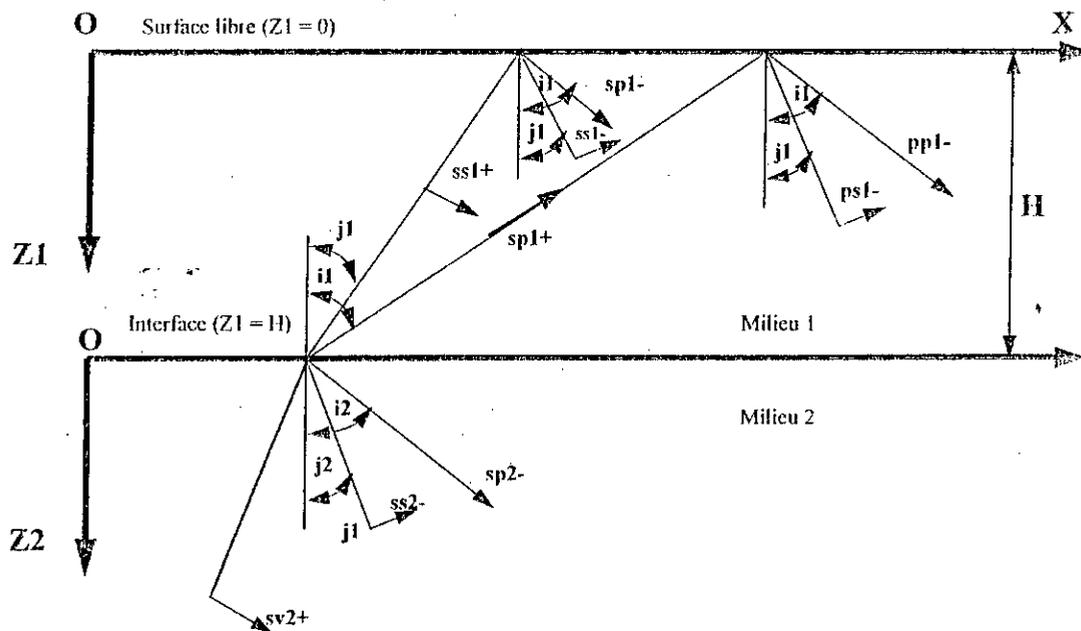


Figure IV-3 : Réflexion et réfraction d'une onde Sv incidente

Les expressions des déplacements :

Les expressions des déplacements des ondes de compression P et des ondes de cisaillement Sv, réfléchies et réfractées suivant les trois directions OX, OY et OZ sont les suivantes:

- déplacement de l'onde P ascendante :

$$(U_{p+}, V_{p+}, W_{p+}) = A^+ (\sin i, 0, -\cos i) e^{i\omega (px - \frac{\cos i}{V_p} z - t)} \quad (IV-4)$$

- déplacement de l'onde P descendante :

$$(U_{p-}, V_{p-}, W_{p-}) = A^- (\sin i, 0, \cos i) e^{i\omega (px + \frac{\cos i}{V_p} z - t)} \quad (IV-5)$$

- déplacement de l'onde S ascendante :

$$(U_{s+}, V_{s+}, W_{s+}) = B^+ (\cos j, 0, \sin j) e^{i\omega (px - \frac{\cos j}{V_s} z - t)} \quad (IV-6)$$

- déplacement de l'onde P descendante :

$$(U_{s-}, V_{s-}, W_{s-}) = B^- (-\cos j, 0, \sin j) e^{i\omega (px + \frac{\cos j}{V_p} z - t)} \quad (IV-7)$$

A^+, A^-, B^+, B^- étant respectivement les amplitudes des ondes P et Sv ascendantes et descendantes.

IV.5. Conditions aux limites:

Comme il a été exposé, lorsqu'une onde atteint une surface séparant deux milieux de propriétés élastiques différentes, elle donne naissance à des ondes réfléchies et à des ondes réfractées.

Les relations entre les différentes ondes s'établissent à partir des équations liant les tensions et les déformations sur chacun des côtés de l'interface et à la limite entre les deux milieux, nous devons avoir la continuité des contraintes et des déformations.

Les conditions de continuité, de la contrainte et du déplacement, fournissent les équations nécessaires à la détermination des amplitudes des ondes réfléchies et réfractées, en fonction de l'amplitude de l'onde incidente.

Les conditions aux limites s'obtiennent en écrivant la continuité des déplacements et des contraintes de part et d'autre de l'interface et la nullité des contraintes σ_{xz} et σ_{zz} à la surface libre.

- Equations de continuité des déplacements à l'interface:

$$\begin{aligned}x_1(z=h) &= U_{x_2}(z=0) \\z_1(z=h) &= U_{z_2}(z=0)\end{aligned}\tag{IV-8}$$

- Equations de continuité des contraintes à l'interface:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz_1}(z=h) &= \sigma_{xz_2}(z=0) \\ \sigma_{zz_1}(z=h) &= \sigma_{zz_2}(z=0)\end{aligned}\tag{IV-9}$$

- Equations de nullité des contraintes à la surface libre:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz_1}(z=0) &= 0 \\ \sigma_{zz_1}(z=0) &= 0\end{aligned}\tag{IV-10}$$

Ce qui nous donne un système de six équations linéaires qui relie les amplitudes du mouvement des différents types d'ondes.

La résolution de ce système d'équations nous permet de calculer ces amplitudes en fonction de l'amplitude de l'onde incidente Sv2 qu'on prendra unitaire.

Le système d'équations obtenu est le suivant :

$$y_1 = A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + A_{14}X_4 + A_{15}X_5 + A_{16}X_6$$

$$y_2 = A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + A_{24}X_4 + A_{25}X_5 + A_{26}X_6$$

$$y_3 = A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 + A_{34}X_4 + A_{35}X_5 + A_{36}X_6$$

$$y_4 = A_{41}X_1 + A_{42}X_2 + A_{43}X_3 + A_{44}X_4 + A_{45}X_5 + A_{46}X_6$$

$$y_5 = A_{51}X_1 + A_{52}X_2 + A_{53}X_3 + A_{54}X_4 + A_{55}X_5 + A_{56}X_6$$

$$y_6 = A_{61}X_1 + A_{62}X_2 + A_{63}X_3 + A_{64}X_4 + A_{65}X_5 + A_{66}X_6$$

(IV-11)

$$\begin{cases} X_1 = S S_1^+ \\ X_2 = S S_1^- + P S_1^- \\ X_3 = S P_1^+ \\ X_4 = S P_1^- + P P_1^- \\ X_5 = S S_2^- \\ X_6 = S P_2^- \end{cases} \quad \text{(IV-12)}$$

$$\begin{cases} Y_1 = 0 \\ Y_2 = 0 \\ Y_3 = \cos j_2 S_2^+ \\ Y_4 = \sin j_2 S_2^+ \\ Y_5 = \mu_2 \gamma_2^P (\sin^2 j_2 - \cos^2 j_2) S_2^+ \\ Y_6 = -2\mu_2 \gamma_2^P \cos j_2 \sin j_2 S_2^+ \end{cases} \quad \text{(IV-13)}$$

$$\begin{cases} A_{11} = \gamma_1^s (\sin^2 j_1 - \cos^2 j_1) \\ A_{12} = \gamma_1^s (\sin^2 j_1 - \cos^2 j_1) \\ A_{13} = -2\gamma_1^p \sin i_1 \cos i_1 \\ A_{14} = 2\gamma_1^p \sin i_1 \cos i_1 \\ A_{15} = 0 \\ A_{16} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-14})$$

$$\begin{cases} A_{21} = -2\mu_1 \gamma_1^s \cos j_1 \sin j_1 \\ A_{22} = 2\mu_1 \gamma_1^s \cos j_1 \sin j_1 \\ A_{23} = \gamma_1^p (\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 i_1) \\ A_{24} = \gamma_1^p (\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 i_1) \\ A_{25} = 0 \\ A_{26} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-15})$$

$$\begin{cases} A_{31} = \cos j_1 e^{-s_1} \\ A_{32} = -\cos j_1 e^{s_1} \\ A_{33} = \sin i_1 e^{-p_1} \\ A_{34} = -\sin i_1 e^{p_1} \\ A_{35} = \cos j_2 \\ A_{36} = \sin i_2 \end{cases} \quad (\text{IV-16})$$

$$\begin{cases}
 A_{41} = \sin j_1 e^{-s_1} \\
 A_{42} = \sin j_1 e^{s_1} \\
 A_{43} = -\cos i_1 e^{-p_1} \\
 A_{44} = \cos i_1 e^{p_1} \\
 A_{45} = -\sin j_2 \\
 A_{46} = -\cos i_2
 \end{cases} \quad (IV-17)$$

$$\begin{cases}
 A_{51} = \mu_1 \gamma_1^s (\sin^2 j_1 - \cos^2 j_1) e^{-s_1} \\
 A_{52} = \mu_1 \gamma_1^s (\sin^2 j_1 - \cos^2 j_1) e^{s_1} \\
 A_{53} = -2 \mu_1 \gamma_1^s \cos i_1 \sin i_1 e^{-p_1} \\
 A_{54} = 2 \mu_1 \gamma_1^s \cos i_1 \sin i_1 e^{p_1} \\
 A_{55} = \mu_2 \gamma_2^s (\cos^2 j_2 - \sin^2 j_2) \\
 A_{56} = -2 \mu_2 \gamma_2^s \sin i_2 \cos i_2
 \end{cases} \quad (IV-18)$$

$$\begin{cases}
 A_{61} = -2 \mu_1 \gamma_1^s \cos j_1 \sin j_1 e^{-s_1} \\
 A_{62} = 2 \mu_1 \gamma_1^s \cos j_1 \sin j_1 e^{s_1} \\
 A_{63} = (\lambda_1 + 2 \mu_1 \cos^2 i_1) \gamma_1^p e^{-p_1} \\
 A_{64} = (\lambda_1 + 2 \mu_1 \cos^2 i_1) \gamma_1^p e^{p_1} \\
 A_{65} = -2 \mu_2 \gamma_2^s \cos j_2 \sin j_2 \\
 A_{66} = -2 (\lambda_2 + 2 \mu_2 \cos^2 i_2) \gamma_2^p
 \end{cases} \quad (IV-19)$$

avec:

$$P_1 = i \gamma_1^p \cos i_1 h$$

$$S_1 = i \gamma_1^s \cos j_1 h$$

et:

$$\gamma_1^p = \frac{\omega}{V_{p1}} \quad ; \quad \gamma_2^p = \frac{\omega}{V_{p2}}$$

$$\gamma_1^s = \frac{\omega}{V_{s1}} \quad ; \quad \gamma_2^s = \frac{\omega}{V_{s2}}$$

CHAPITRE - V -

**DETERMINATION ET ETUDE DE LA
FONCTION D'AMPLIFICATION D'UN
PROFIL DE SOL**

V.1. Introduction :

Le calcul des fréquences de vibration et en particulier la fréquence fondamentale du sol, est une étape très importante dans une phase de conception et de dimensionnement des structures devant résister aux sollicitations sismiques.

De même, la détermination de la fonction de transfert du profil de sol, caractéristique intrinsèque du milieu, permet d'évaluer la réponse sismique d'une couche de sol et son comportement vis-à-vis d'une excitation générée à sa base. Cette fonction nous donne un aperçu sur l'amplification du mouvement sismique en surface libre à partir de la connaissance des caractéristiques sismiques du sol et du substratum rocheux.

Dans le présent chapitre, nous avons élaboré les hypothèses fondamentales suivantes:

- Le profil du sol est supposé infini horizontalement.
- La couche de sol et le rocher sont entièrement définis par leurs modules de cisaillement, leurs masses volumiques, leurs coefficients d'amortissement et leurs épaisseurs.

V.2. Fonction de transfert :

On appelle fonction de transfert, la fonction reliant l'amplitude du déplacement à la surface de la couche de sol (point A de la figure V-1) à l'amplitude du déplacement à l'interface (point B de la figure V-1).

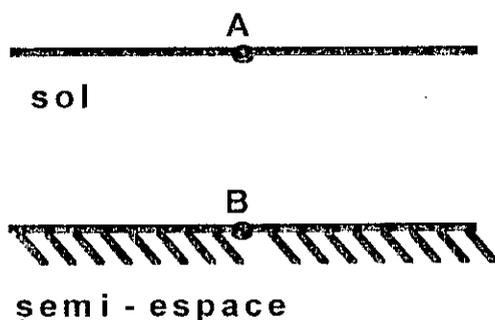


Figure V-1 : Domaine d'étude.

La fonction de transfert est une première étape vers le calcul des accélérogrammes et des spectres de réponse à la surface libre du sol. Un seul coup d'oeil sur cette courbe permet de lire la plage des fréquences où le sol cause de grands dommages pour les constructions et les ouvrages implantés sur ce site.

V.3. Traitements numériques :

Après résolution numérique du système d'équations (IV- 11) en introduisant les conditions aux limites (équations IV-8 , IV-9 et IV-10), nous obtenons, les fonctions d'amplification des ondes P et des ondes Sv suivant les deux directions OX et OZ.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que les fonctions de transfert des ondes P suivant l'axe OX et des ondes Sv suivant l'axe OZ étaient inférieures à l'unité. Ainsi, ces types d'ondes n'induisent pas une amplification des sollicitations générées au niveau de l'interface. Ceci confirme l'hypothèse couramment admise en Génie Parasismique, qui considère que le mouvement horizontal résulte uniquement de la propagation d'une onde de cisaillement et le mouvement vertical de la propagation d'une onde de compression.

Ceci s'explique clairement par loi de Snell (équation IV-1) qui devient pour un angle d'incidence j_2 :

$$\frac{\sin j_2}{V_{S_2}} = \frac{\sin j_1}{V_{S_1}} = \frac{\sin i_1}{V_{P_1}}$$

D'où :

$$\sin j_1 = \frac{V_{S_1}}{V_{S_2}} \cdot \sin j_2$$

$$\sin i_1 = \frac{V_{P_1}}{V_{S_2}} \cdot \sin j_2$$

Vu que les vitesses de propagation des ondes sismiques dans le milieu 1 sont sensiblement inférieures à celles du milieu 2, les angles de réfraction correspondants aux ondes Pet Sv deviennent alors nuls.

Nous pouvons donc conclure que le mouvement des ondes Sv suivant OX et des ondes P suivant OZ est prépondérant relativement à celui des ondes Sv suivant OZ et des ondes P selon OX. C'est pourquoi, notre étude a porté sur la fonction d'amplification de l'onde de cisaillement suivant la direction OX (notée S_x) et celle de l'onde de compression suivant la direction OZ (notée P_z).

V.4. Etude paramétrique :

Les expressions des fonctions de transfert relatives aux ondes P et aux ondes S montrent que l'amplification du sol pour une sollicitation initiale considérée au niveau du bed-rock est fonction de plusieurs paramètres qui sont les suivants:

- Les caractéristiques géotechniques du milieu de propagation (sol, rocher).
- L'angle d'incidence « j_2 ».
- L'épaisseur de la couche sédimentaire « h ».
- la nature de l'onde incidente.

L'étude de l'influence de ces derniers sur l'amplitude des fonctions de transfert et sur les modes propres de vibration du sol nous a permis d'avoir une idée plus ou moins détaillée sur le comportement du sol, en particulier à la surface libre, à partir d'une excitation générée au niveau du substratum rocheux.

V.4.1. Influence de l'épaisseur « h » de la couche sédimentaire:

On s'intéressera dans ce qui suit, à l'effet des remplissages sédimentaires et à l'influence de la variation d'épaisseur de cette couche sédimentaire sur la sollicitation sismique et donc sur la réponse dynamique de la structure implantée au site considéré.

Nous menons notre étude en comparant les sollicitations et les réponses du sol pour trois catégories de sites: rocheux (25 mètres), dépôt sédimentaire peu profond (100 mètres) et dépôt sédimentaire profond (250 mètres).

Pour bien mener cette comparaison, nous avons considéré différents types de sols, différents types d'angles d'incidence pour les différentes profondeurs de la couche sédimentaire de sol.

- Pour l'onde transversale Sv:

On remarque que plus la hauteur de la couche sédimentaire est importante, plus la valeur de la fréquence associée au mode fondamental est petite; ainsi dans le cas d'un semi-espace en granite surmonté d'une couche marneuse (fig V-4.1), pour une largeur de bande de 25 Hz on trouve:

- Pour une hauteur de 25 mètres: un pic d'amplification au voisinage de 14 Hz.
- Pour une hauteur de 100 mètres : quatre pics d'amplification ; le premier au voisinage de 4 Hz.
- Pour une hauteur de 250 mètres: neuf pics d'amplification ; le premier au voisinage de 2 Hz.

Ce résultat semble se généraliser pour les autres types de combinaison rochers-sols.

Nous avons aussi observé que la valeur de l'amplification du sol avait tendance à diminuer très sensiblement avec l'augmentation de la hauteur de la couche sédimentaire.

-Pour l'onde longitudinale P:

Des résultats similaires sont obtenus pour l'onde P (Fig V-4.2). Il est simplement à noter que la décroissance des amplitudes avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche sédimentaire est moins sensible que dans le cas des ondes Sv.

V.4.2. Influence de l'angle d'incidence « j_2 » sur la variation de la fonction d'amplification du sol:

Pour mener cette étude, nous avons considéré une couche de sol sédimentaire surmontée d'un semi-espace rocheux, ayant une profondeur h constante. Nous nous sommes intéressé aux valeurs d'angles d'incidence suivantes:

$$j_2 = 10^\circ ; j_2 = 20^\circ ; j_2 = 30^\circ.$$

De cette étude, on a pu tirer les conclusions suivantes:

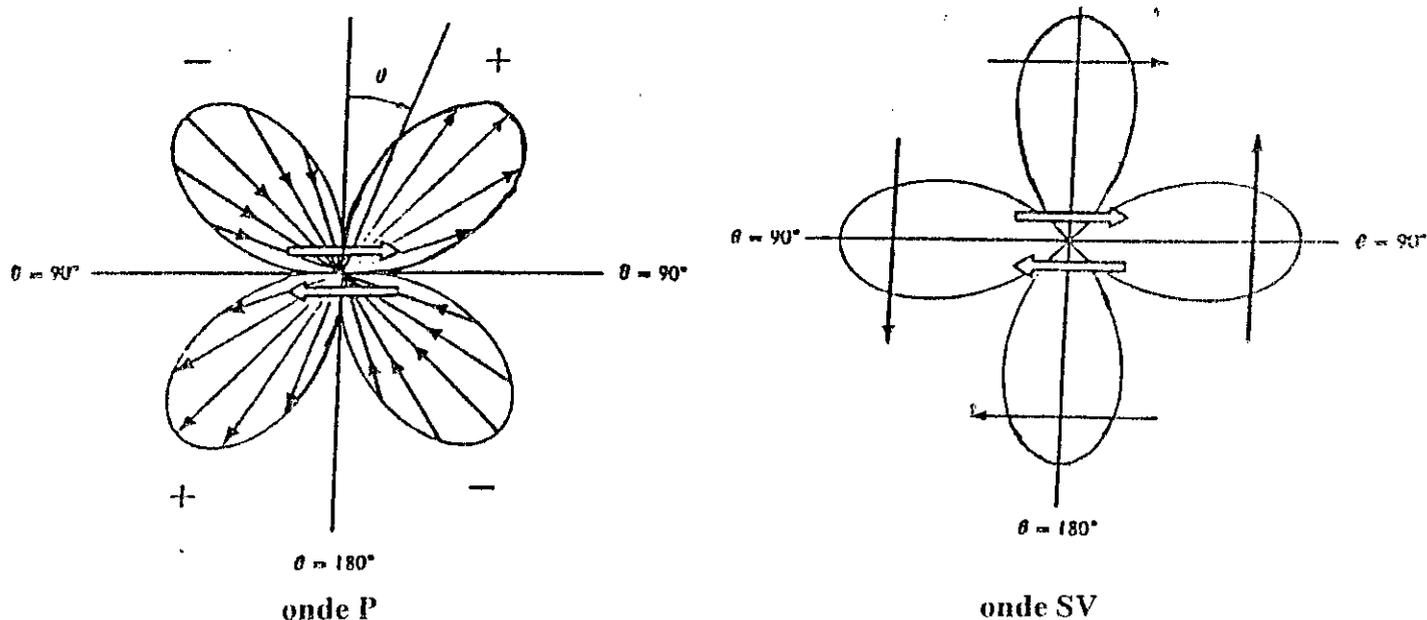
- Pour l'onde de cisaillement Sv :

Nous remarquons que l'angle d'incidence n'a aucune influence sur la valeur du mode propre de vibration du sol. Néanmoins les amplitudes ont tendance à diminuer très sensiblement au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente (fig V-4.3).

- Pour l'onde de compression P :

Le mode fondamental de vibration du sol est sensiblement le même pour les différentes valeurs de l'angles d'incidence (fig V-4.4). Néanmoins, les amplitudes de l'onde P ont une tendance très très peu sensible à augmenter avec la croissance de l'angle d'incidence.

Que ce soit pour l'onde P ou pour l'onde Sv, la variation de l'amplitude vis à vis de l'angle d'incidence est en cohérence directe avec les diagrammes de radiation correspondants au niveau de la source (Fig III-3).



V.4.3. Influence du type de sol sur la variation de la fonction de transfert:

Le sol influe sur la variation du rapport d'amplitudes, et ce par sa masse volumique et par la vitesse de propagation de l'onde incidente Sv transmise au milieu I.

Pour mener cette étude, nous avons considéré trois types de sols dont les caractéristiques géotechniques diffèrent. Ces sols sont: La terre végétale, l'argile et la marne.

-Pour l'onde transversale Sv:

Les valeurs des périodes fondamentales semblent être en liaison directe avec la densité du sol (fig V-4.5). En effet, plus celle-ci devient importante plus la valeur de la fréquence fondamentale augmente.

Nous avons remarqué aussi que l'amortissement des ondes était relativement plus important pour les sols peu denses que pour les sols denses. De même, les pics d'amplification sont plus importants pour les sols de plus grande densité.

Ces constatations sont valables quelque soit le type de rocher sous-jacent.

-Pour l'onde longitudinale P:

Pour l'onde P (Fig V-4.6), on remarque toujours un plus fort amortissement des ondes se propageant dans les sols peu denses. Par contre, la variation des amplitudes de l'onde de compression P semble suivre une tendance inverse que celle des ondes de cisaillement Sv.

V.4.4. Influence du rocher sur la variation de la fonction de transfert:

Dans cette partie, nous avons considéré trois types de rochers de caractéristiques géotechniques différentes : granite, grès et la dolomie.

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que pour un sol donné, la valeur du mode fondamental de résonance n'était pas altérée par le type de rocher sous-jacent. Cette constatation est valable quelque soit le type d'onde P ou Sv (fig V-4.7 et fig V-4.8).

D'autre part, les amplitudes varient d'une roche à une autre de manière peu sensible.

En effet, celles-ci sont moins importantes pour les roches peu denses que pour les roches denses. Ces résultats peuvent s'expliquer par une différence d'impédance relativement faible.

V.3.5. Influence de la nature de l'onde

Compte tenu des vitesses de propagation plus importantes pour les ondes de compression P que pour les ondes de cisaillement Sv, le mode fondamental de vibration du sol est relativement plus important au passage des ondes P qu'à celui de l'onde S.

D'autre part, quelque soit le type et la hauteur du sol, les amplifications induites par les ondes S sont supérieures à celles provoquées par les ondes P.

La différence d'amplification obtenue pour les différentes valeurs de l'angle d'incidence est beaucoup plus sensible pour l'onde S (diminution de l'amplification avec l'augmentation de l'angle d'incidence) que pour les ondes de compression P (augmentation de l'amplification avec la croissance de l'angle d'incidence).

Par ailleurs, l'amortissement des ondes de cisaillement est beaucoup plus prononcé que celui des ondes de compression. En effet, pour le cas cité à la fig V-4.1.(a) aucune amplification pour l'onde S n'est constatée au delà de 15 Hz, alors que pour l'onde P (fig V-4.2.(a)), l'amplification est observée jusqu'à 25 Hz.

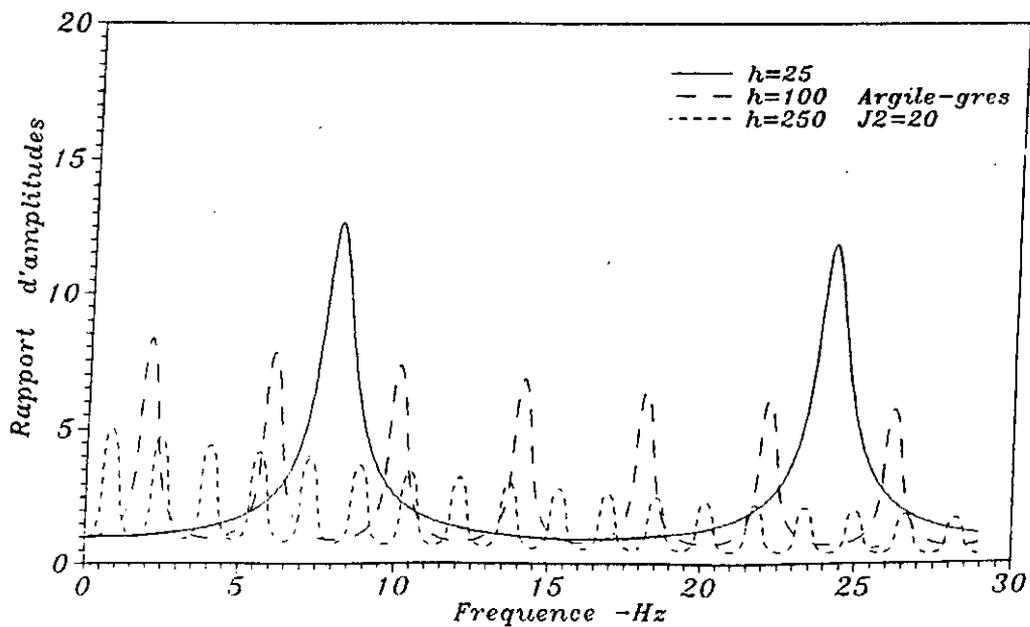
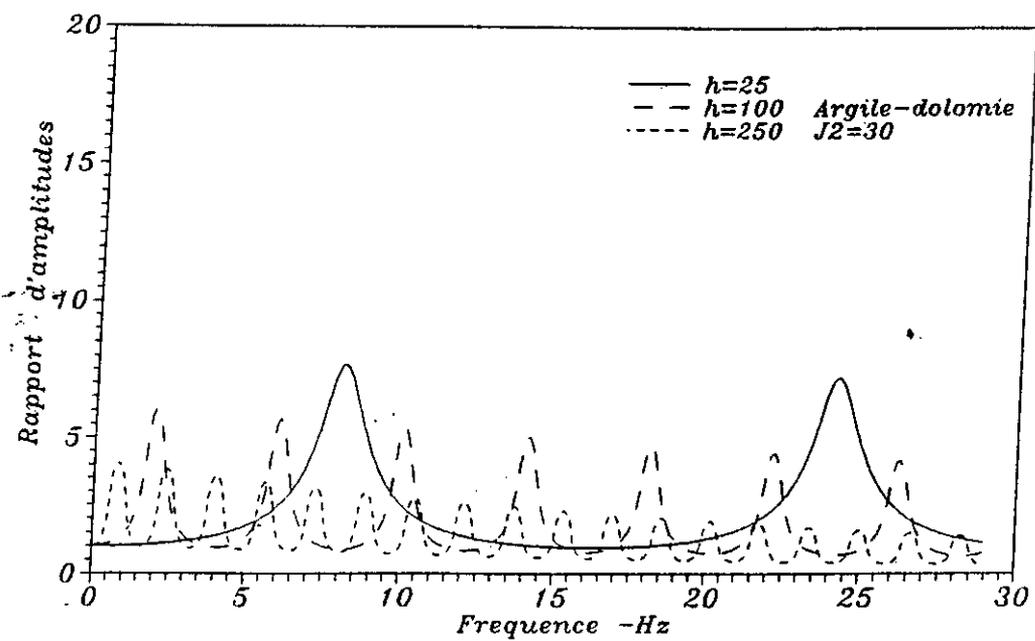
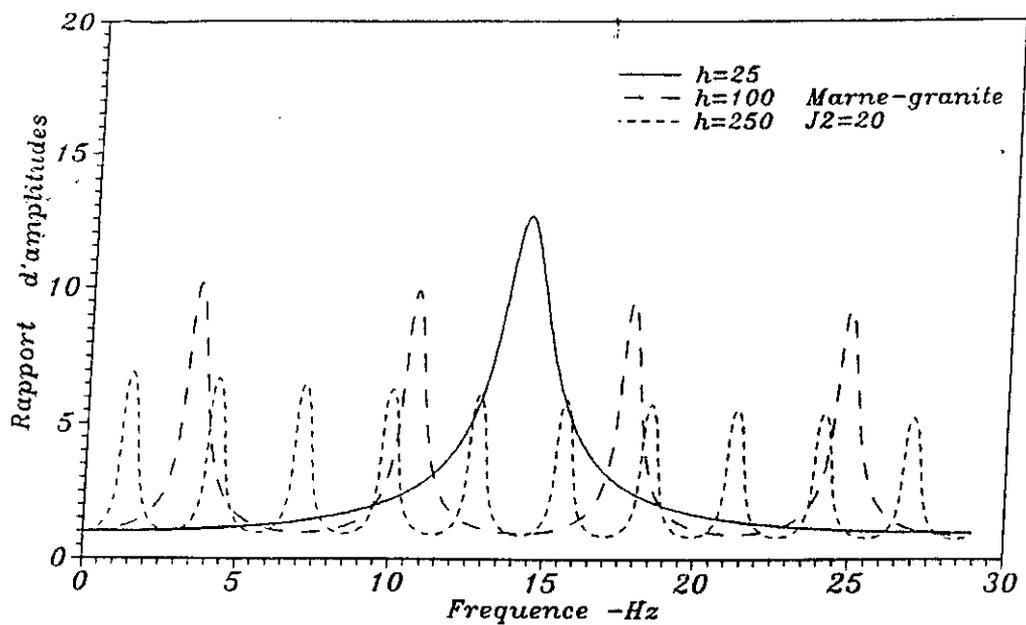


Fig V-4-1 Fonction d'amplification de l'onde SV suivant (OX).

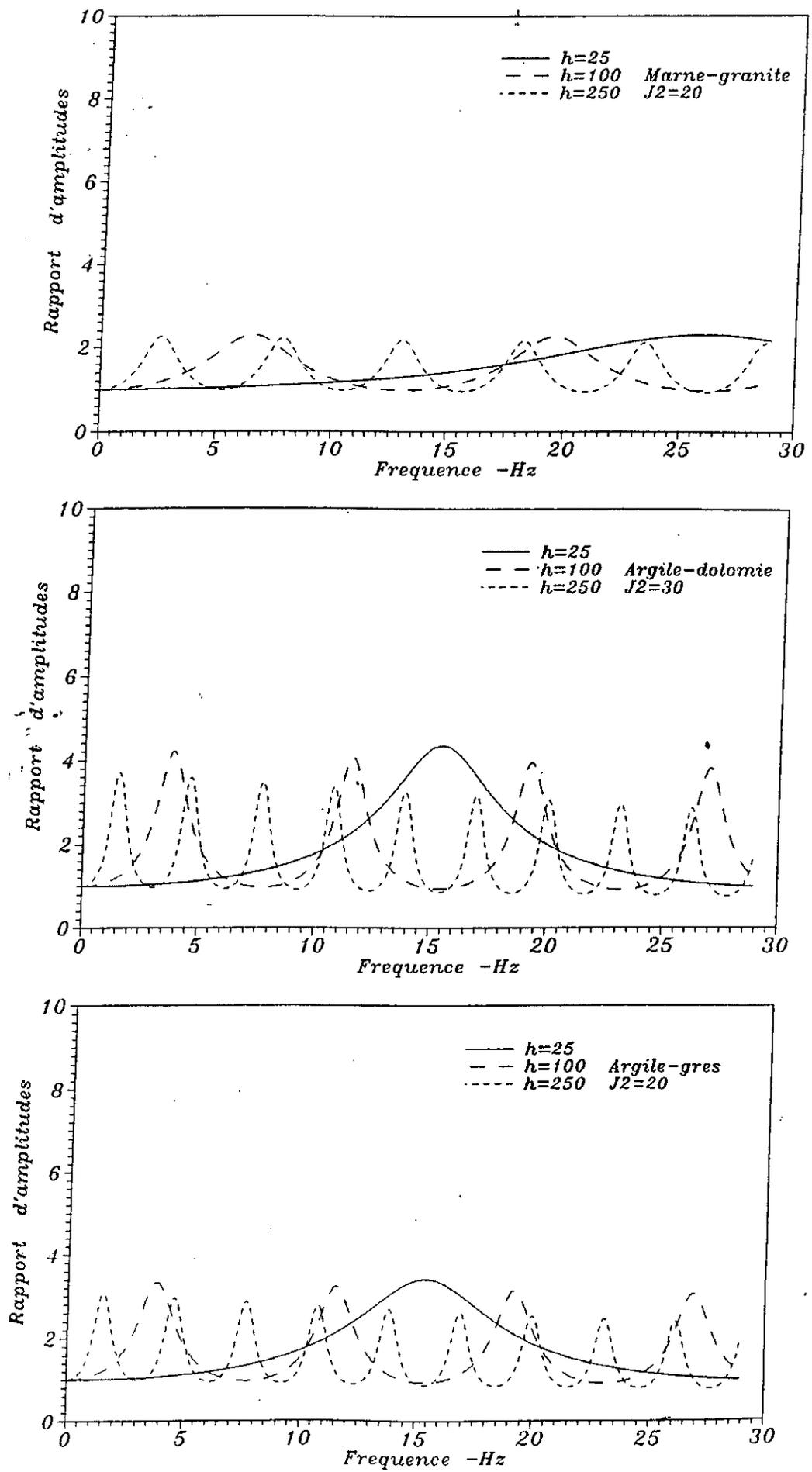


Fig V-4-2 Fonction d'amplification de l'onde P suivant (OZ).

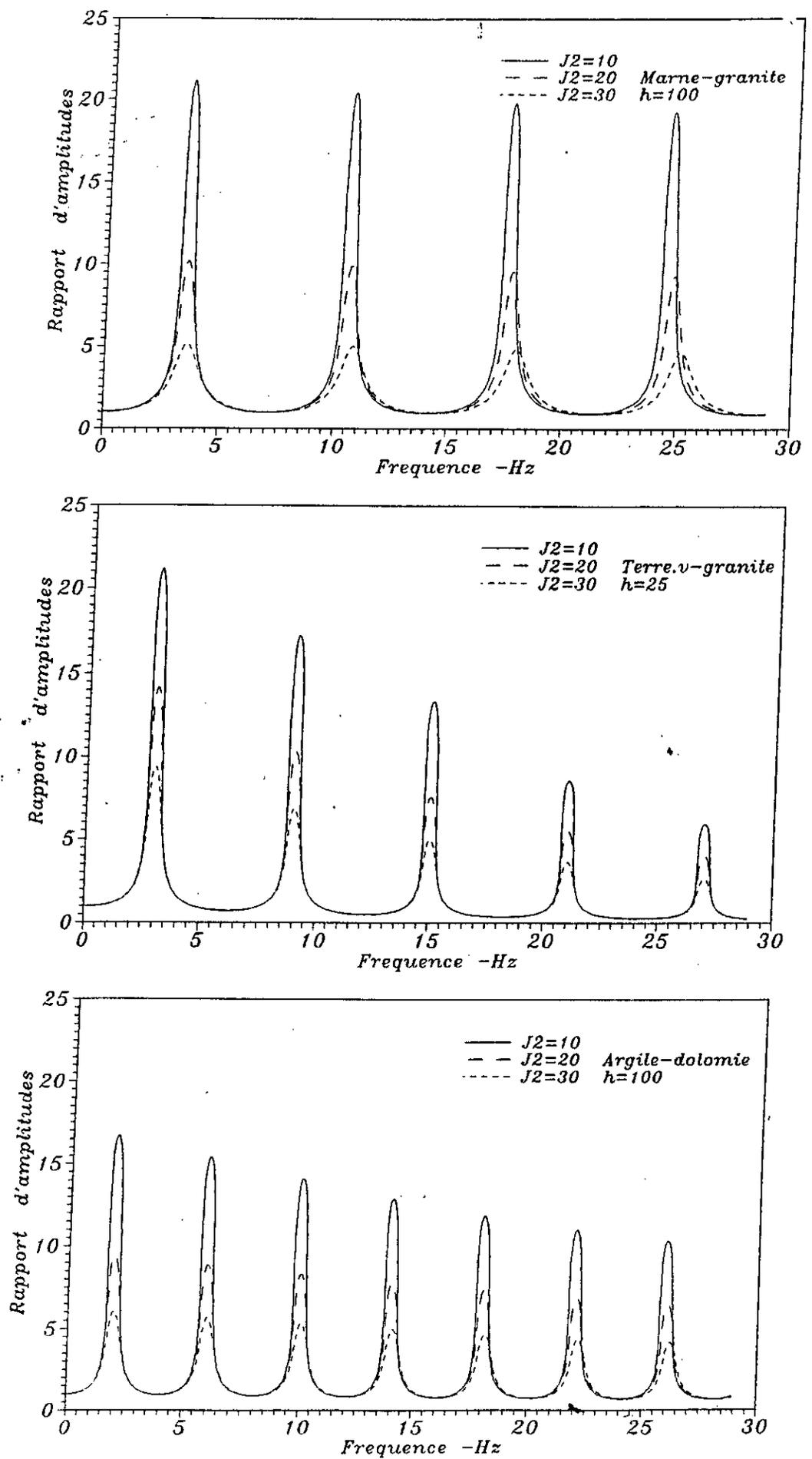


Fig V-4-3 Fonction d'amplification de l'onde SV suivant (OX).

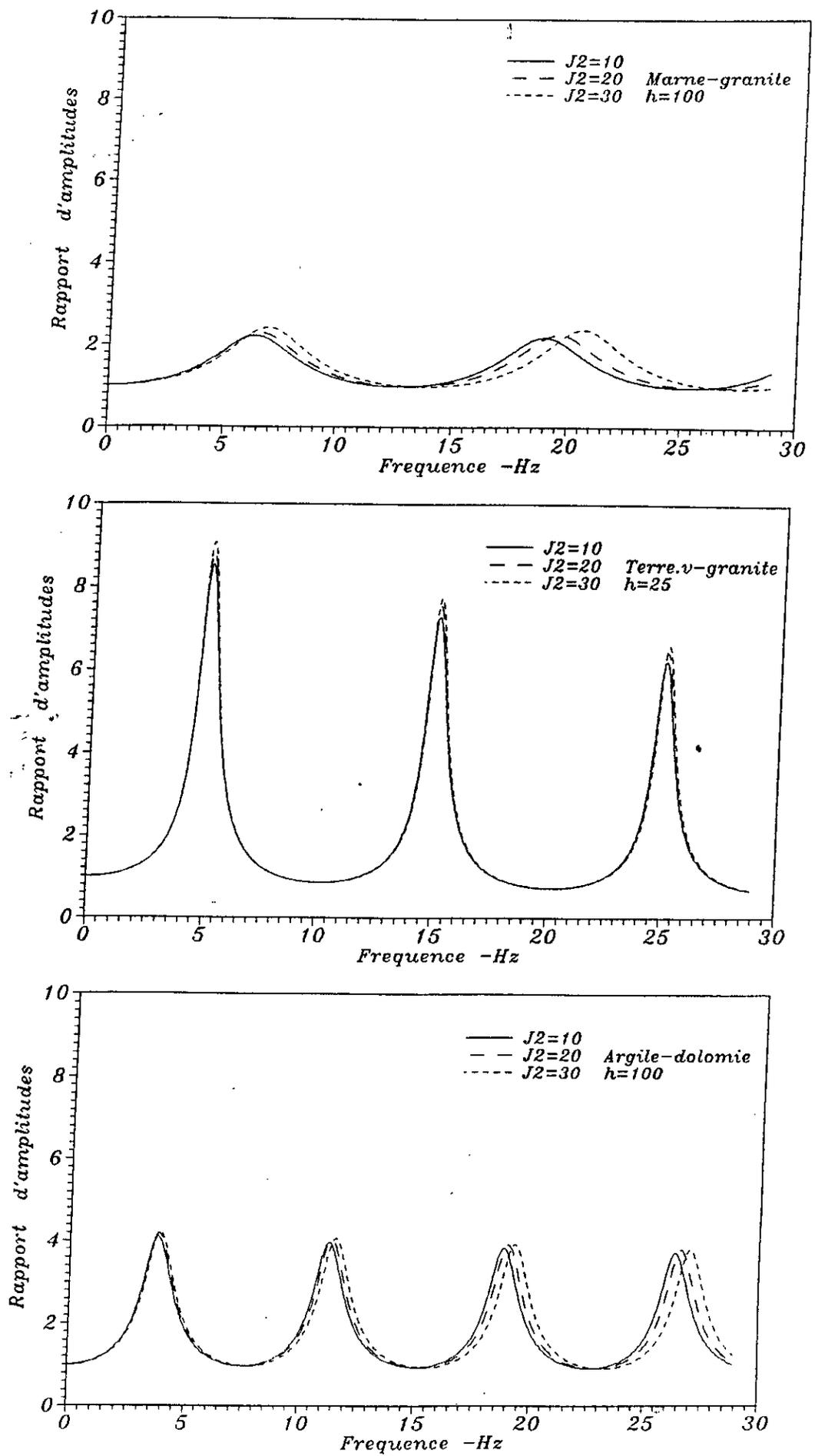


Fig V-4-4 Fonction d'amplification de l'onde P suivant (OZ).

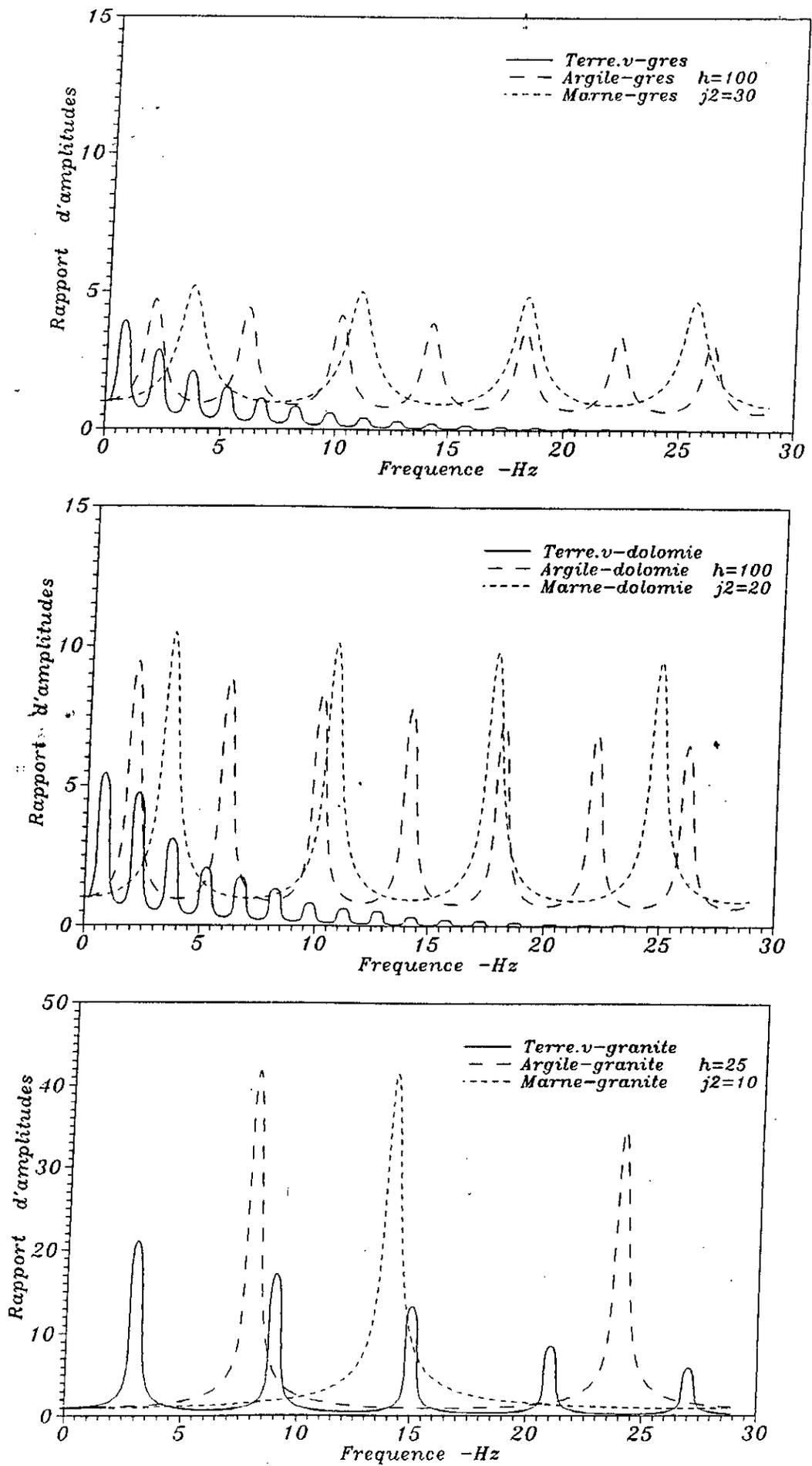


Fig V-4-5 Fonction d'amplification de l'onde SV suivant (OX).

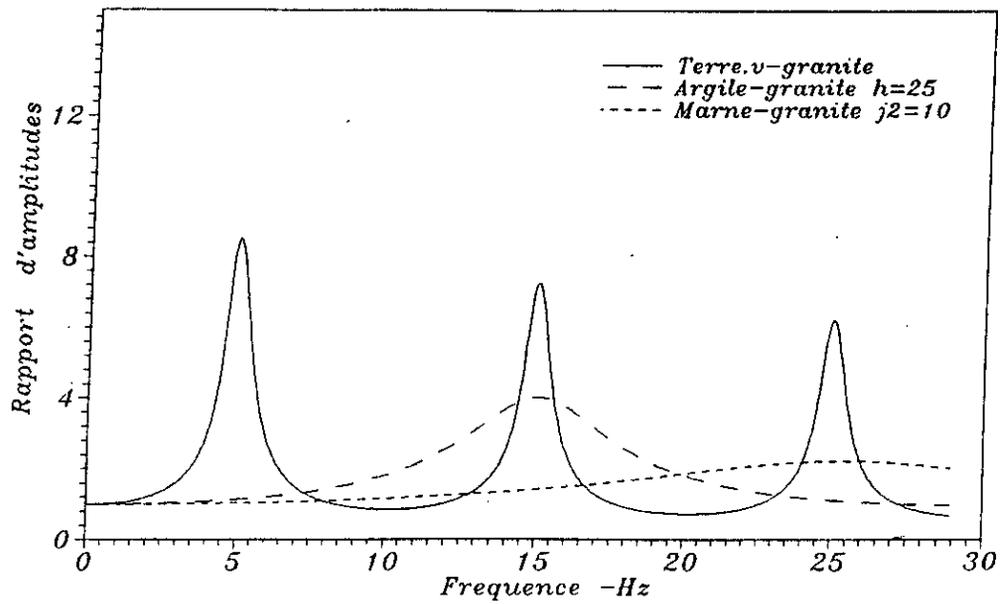
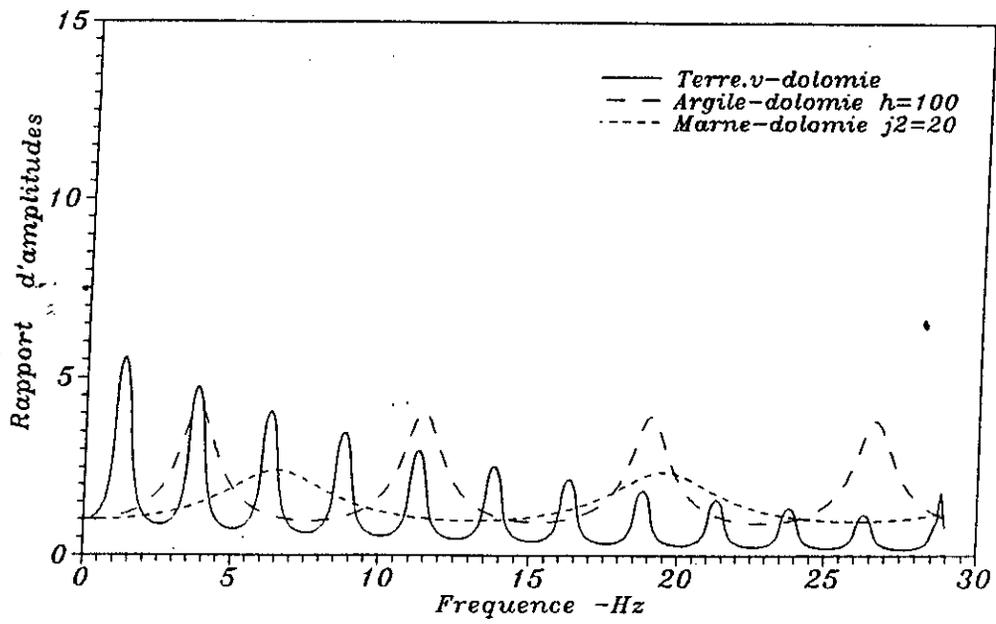
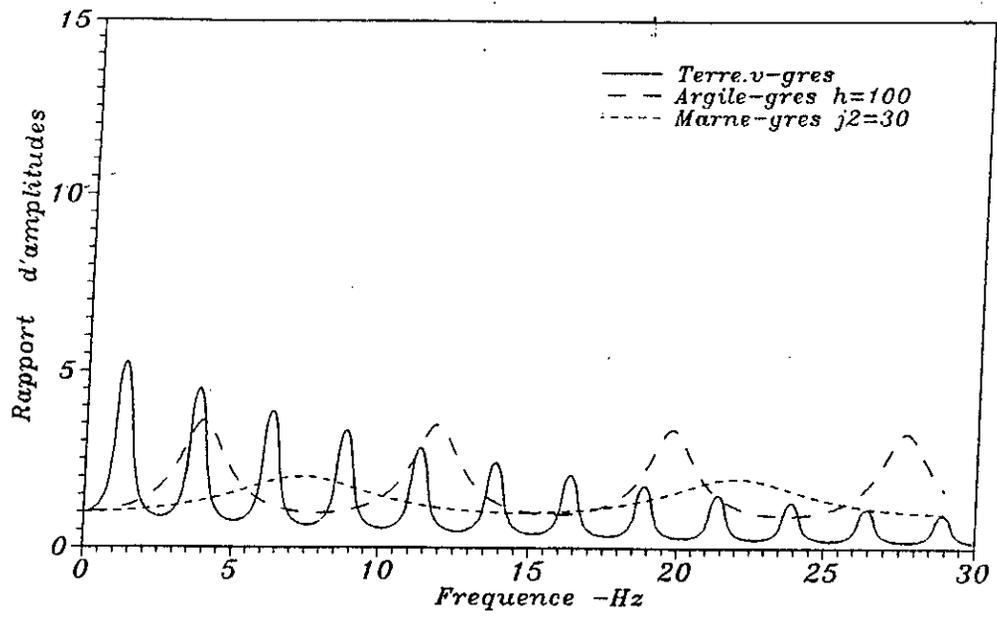


Fig V-4-6 Fonction d'amplification de l'onde P suivant (OZ).

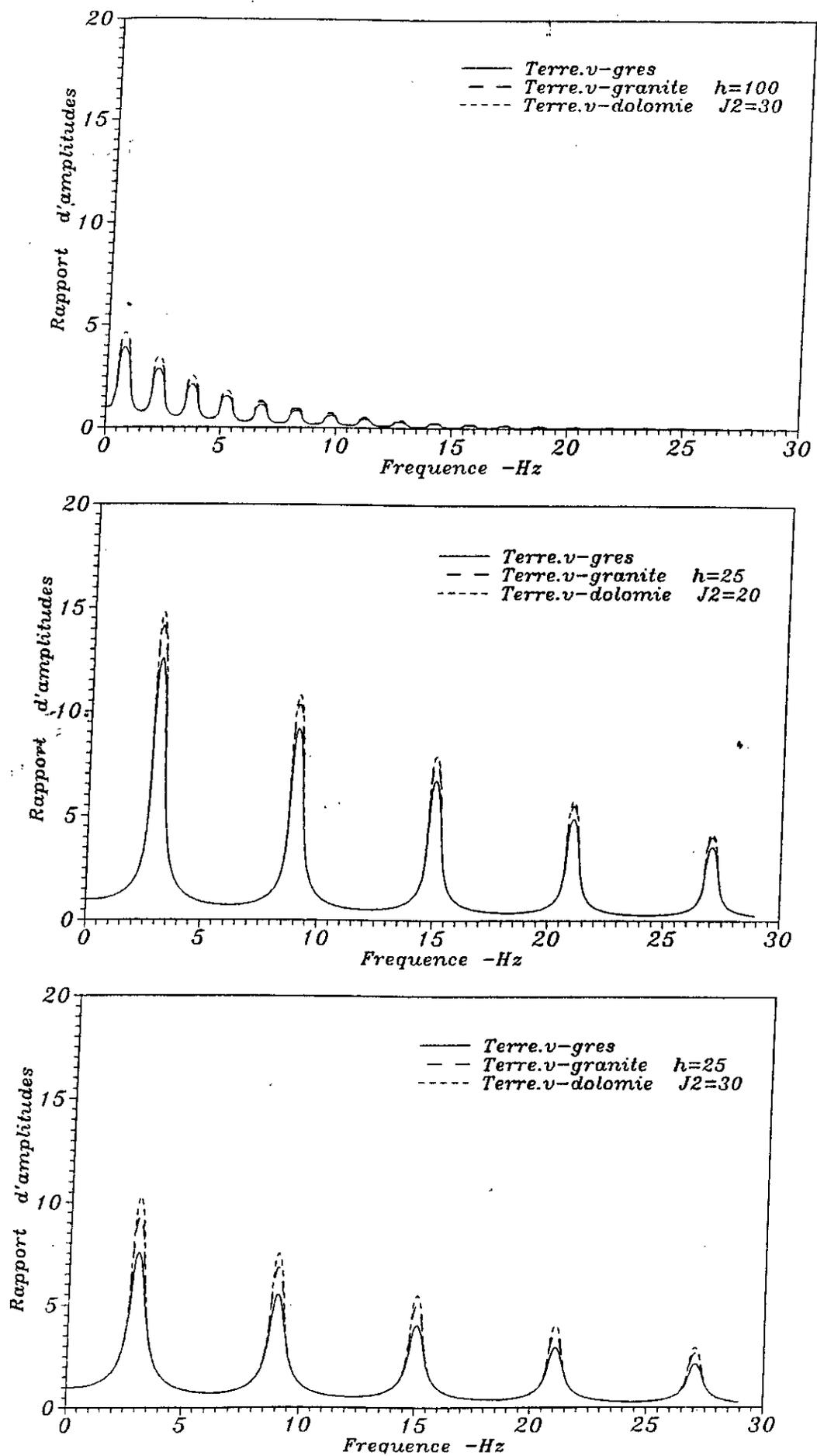


Fig V-4-7 Fonction d'amplification de l'onde SV suivant (OX).

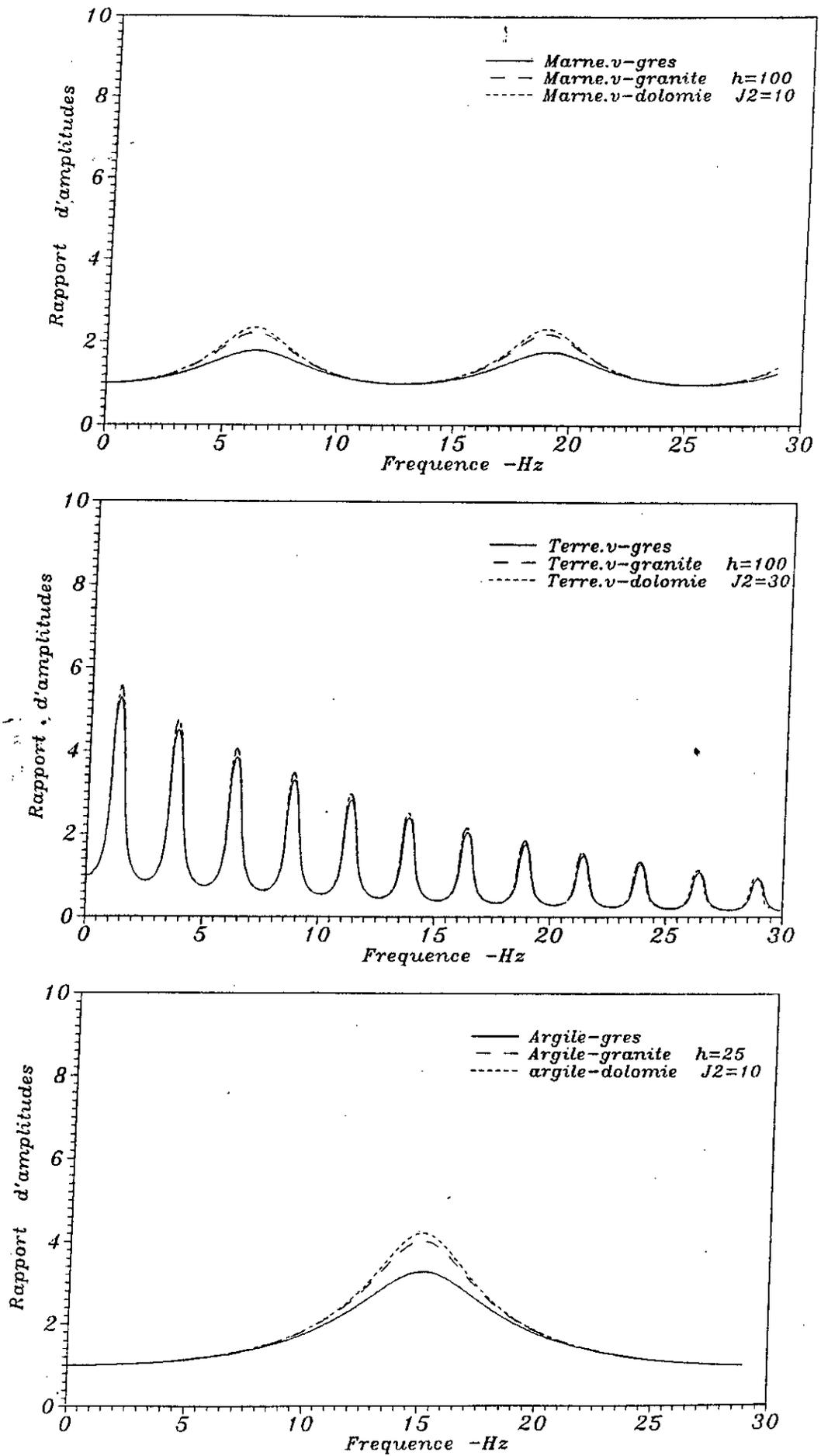


Fig V-4-8 Fonction d'amplification de l'onde P suivant (OZ).

CHAPITRE - VI -

**ACCELEROGRAMMES ET SPECTRES
DE REPONSE**

VI.1. Introduction:

La connaissance de la nature des sources sismiques ainsi que des lois de propagation des ondes, n'est qu'une étape vers la détermination du risque sismique, le problème principal étant celui de l'identification des mouvements au niveau du sol.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent principalement sous la forme d'un accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps; on peut de même enregistrer la vitesse ou le déplacement.

En général, les secousses sismiques ont des durées variables pouvant atteindre 2 à 3 minutes. Elles sont caractérisées aussi par leur accélération maximale (PGA), paramètre important des mouvements forts.

Il convient de noter qu'en un point du sol donné, les mouvements forts d'un séisme s'effectuent dans toutes les directions, à l'horizontale comme à la verticale. Il est donc difficile de déterminer les enregistrements dans les autres directions quant on ne dispose d'enregistrements que dans une direction donnée.

Dans ce cas, pour l'étude de la réponse des constructions aux tremblements de terre, il faut donc pouvoir disposer, pour un site donné, d'un ensemble de trois accélérogrammes suivant les deux directions horizontales et la direction verticale.

VI.2. Description du modèle dynamique élastique :

Les caractéristiques physiques essentielles de toute structure élastique linéaire soumise à des charges de nature dynamique sont sa masse, ses propriétés élastiques (souplesse ou rigidité), son mécanisme de déperdition d'énergie, ou amortissement, et la source extérieure d'excitation, ou chargement. Dans le modèle le plus simple de système à un degré de liberté, chacune de ces caractéristiques est supposée condensée dans un élément physique unique: la figure VI-1 montre un schéma d'un tel système.

Toute la masse m de ce modèle simple est localisée dans le bloc rigide. Des rouleaux contraignent son déplacement de manière qu'il ne puisse se produire que suivant une translation simple; l'unique coordonnée de déplacement v définit donc complètement

sa position. La résistance élastique au déplacement est représentée par le ressort sans masse de rigidité k , et le mécanisme de déperdition d'énergie par l'amortisseur c . Le mécanisme de chargement externe qui provoque la réponse dynamique du système est la charge $p(t)$ variable dans le temps.

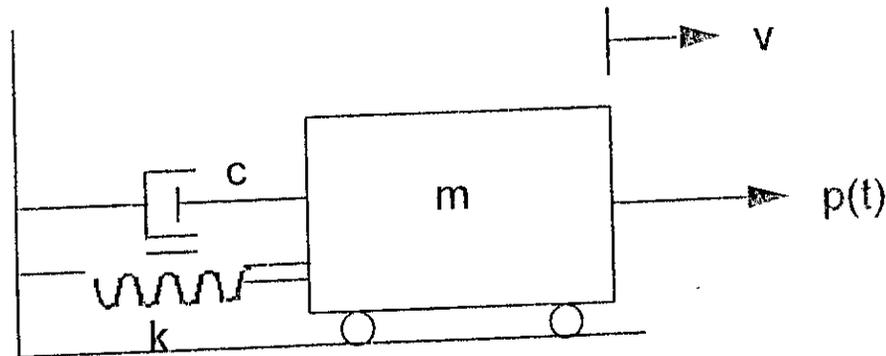


Figure VI-1 : Système idéalisé à un degré de liberté

VI.3. Représentation analytique de l'action sismique :

Il est bien entendu que l'une des visées du génie-sismique est de quantifier au mieux la réponse sismique des structures. Dans ce sens, plusieurs descriptions mathématiques de l'action sismique existent.

Parmi elles, celle qui utilise l'histoire temporelle de l'input sismique semble être la plus directe.

En effet, l'analyse temporelle de différents accélérogrammes peut procurer des informations utiles relatives à la variabilité de la réponse sismique.

Le spectre de réponse est le moyen le plus proéminent pour la représentation de l'input sismique.

De manière générale, le spectre de réponse ou de calcul est une forme de fonction de transfert, qui relie l'excitation sismique (chargement) et la réponse (résistance) d'une structure.

VI.3.1 Spectre de réponse :

Le spectre de réponse en accélération, vitesse ou déplacement permet de faire intervenir la notion du contenu en fréquence du signal sismique. Son but est de caractériser un séisme d'après la réponse d'une structure à un seul degré de liberté.

La forme du spectre de réponse est très sensible à la nature du sol. En effet, les ondes sismiques se propagent dans le rocher, puis en certains endroits à travers des sédiments dont les caractéristiques vont influencer sur le mouvement du sol enregistré en surface. Pour une même excitation sismique, les spectres seront donc différents selon qu'ils correspondent à un affleurement rocheux ou à un dépôt sédimentaire.

Donc lorsqu'il s'agit de choisir un spectre de réponse pour un site donné, il est très important de connaître la nature du sol, puisque les sols durs transmettent de préférence les hautes fréquences et les sols mous les basses fréquences.

Intérêt du spectre de réponse :

Il permet, par une simple lecture, d'évaluer le déplacement maximal d'un oscillateur quelconque, donc les efforts maximaux.

Au lieu d'utiliser le processus complet des vibrations sismiques des constructions en fonction du temps, la méthode spectrale ne considère que les valeurs maximales de leurs caractéristiques cinématiques (déplacements, vitesses, accélérations)

On étudie à cet effet le comportement dynamique d'oscillateurs ayant même caractéristiques dynamiques (période, amortissement) que les structures réelles, et sollicités par un processus vibratoire conforme à un sismographe.

On en déduit les courbes spectrales ou spectres de réponse qui donnent les valeurs maximales des accélérations, vitesses ou déplacements de l'oscillateur en fonction de sa période propre et de son amortissement.

Ces courbes spectrales seront directement utilisées pour le calcul des constructions.

Notions de spectre :

La notion de spectre de réponse a été introduite en génie parasismique pour prévoir les dégâts causés aux constructions par des séismes.

L'essentiel des informations contenues dans un accélérogramme peut être résumé en vue des applications par un spectre de la fonction $\gamma(t)$, c'est à dire par une représentation non plus dans le domaine des temps mais dans celui des fréquences.

$\gamma(t)$: accélération en fonction du temps

Les données indispensables aux calculs d'ouvrages par les spécialistes du génie parasismique comprennent nécessairement, outre les fonctions temporelles, une représentation des paramètres sous forme de spectres.

Le spectre peut représenter les valeurs d'accélération, de vitesse ou de déplacement du sol en fonction de la fréquence.

VI.3.2. Spectre de calcul :

Lorsqu'il s'agit de déterminer le spectre de réponse à prendre en compte pour le calcul des constructions en un site donné, il est bien entendu exclu d'utiliser un seul accélérogramme, même si par chance il a été enregistré au voisinage du site.

En effet, l'accélérogramme du séisme contre lequel on veut se prémunir n'est à priori pas prévisible. Il convient donc de déterminer un spectre de calcul qui sera l'enveloppe d'un ensemble de spectres correspondant à des accélérogrammes enregistrés dans des sites comparables du point de vue de la nature du sol. Ensuite on applique à chaque spectre une affinité pour qu'ils aient tous la même valeur d'intensité spectrale; les spectres obtenus sont des spectres normalisés.

Enfin, en faisant l'enveloppe de ces derniers on obtient le spectre de calcul.

Il existe donc une différence fondamentale entre un spectre de réponse et un spectre de calcul. Le premier caractérise la réponse (calculée) associée à un mouvement sismique particulier (unique), alors que le second caractérise une classe de mouvements sismiques pouvant exciter un site bien défini, et s'inscrit convenablement dans le cadre d'une approche non déterministe (probabiliste).

VI.3.3. Spectre de réponse en déplacement et en accélération:

On considère un oscillateur simple lié au sol et caractérisé par sa pulsation ω et son coefficient d'amortissement ξ , soumis aux effets d'un séisme aux effets d'un séisme (donnés par un accélérogramme).

A un instant t quelconque, le déplacement relatif peut être calculé par l'intégrale de DUHAMEL:

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t V_S(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (\text{VI-1})$$

avec :

$$\omega_D = \omega \sqrt{1-\xi^2}$$

La fonction $V_S(t)$ étant connue, le déplacement ne dépend que de ω et ξ , donc U_{\max} dépend seulement de ω et ξ . Pour une valeur donnée de ξ , on peut donc tracer la courbe reliant le déplacement maximum et la période T . Cette courbe est appelée spectre de déplacement de la structure.

Le spectre de déplacement est donc :

$$S_d = \max [u(t)]$$

$u(t)$ étant le déplacement relatif.

Le spectre de vitesse devient alors :

$$S_v = \omega \cdot S_d \quad \text{c'est la pseudo-vitesse.}$$

De même, pour le spectre de réponse en accélération :

$$S_a = \omega^2 \cdot S_d \quad \text{c'est la pseudo-accélération.}$$

Ce spectre permet par une simple lecture, d'évaluer le déplacement maximum donc les efforts maximaux.

Par contre, le spectre ne fournit pas la valeur du temps à laquelle se produit le déplacement maximum.

On peut, de la même façon, tracer la courbe donnant le maximum de la pseudo-accelération γ_{\max} en fonction de la période T, puisque $\gamma_{\max} = \omega^2 U_{\max}$

VI.3.4. Spectre de Fourier :

Ayant une excitation donnée à la base ou au niveau d'une couche d'un profil de sol donné, il est intéressant de déterminer le contenu fréquentiel de cette excitation afin de savoir dans quelle gamme de fréquences cette excitation est énergétique.

A la première vue d'un spectre de Fourier au niveau d'une couche spécifique, on peut immédiatement avoir une idée sur la bande de fréquences où l'amplitude du mouvement est maximale.

En utilisant les algorithmes de la Transformée de Fourier Rapide FFT, on peut calculer le spectre de Fourier au niveau du substratum rocheux, et pour pouvoir calculer le spectre de Fourier en tout point du profil de sol, on relie ce dernier avec celui du substratum par la relation suivante:

$$\ddot{X}_j(\omega) = \ddot{X}_{n+1}(\omega) \cdot T_{j,n+1}^* \quad (\text{VI-2})$$

$\ddot{X}_j(\omega)$ désigne les valeurs de spectre de Fourier au niveau de la couche j.
 $\ddot{X}_{n+1}(\omega)$ désigne les valeurs de spectre de Fourier à la base du profil de sol.
 $T_{j,n+1}^*$ désigne la fonction d'amplification entre le substratum rocheux et la couche j.

Ayant déterminé le spectre de Fourier au point j, on peut facilement obtenir l'accélérogramme en tout point j du profil et plus particulièrement à la surface libre, en utilisant la Transformée de Fourier Inverse.

Du point de vue temps de calcul, l'opération la plus longue est l'obtention des fonctions d'amplification. Une fois celles-ci obtenues, le calcul de la réponse sismique du profil de sol pour différents accélérogrammes est très rapide et peut être obtenu aisément.

La solution de l'équation (VI-2), permet de connaître en tout point de profil, la vitesse et le déplacement par intégration, la déformation de cisaillement et, à l'aide de la loi de comportement la contrainte de cisaillement σ_{xz} .

VI.4. Etude temporelle de l'action sismique :

Les enregistrements des accélérations des mouvements engendrés par l'arrivée des ondes à un site à la surface libre en fonction du temps s'effectuent à l'aide d'accélérographes, ils constituent des accélérogrammes.

La plupart des enregistrements correspondant aux mouvements forts contiennent aussi bien des ondes de volume que des ondes de surface.

Il est difficile de séparer complètement ces deux types d'ondes contenus dans un même enregistrement. Cependant, rappelons que les ondes de volume se déplacent plus rapidement que les ondes de surface.

Ces dernières arrivent plus tard que les ondes de volume aux stations d'observation.

En outre, elles sont généralement dominantes dans la marge des fréquences. C'est d'ailleurs ces caractéristiques qui contribuent à leur identification lors de l'analyse des accélérogrammes.

VI.5. Détermination temporelle de l'action sismique :

Pour déterminer l'accélérogramme à la surface libre, on doit passer par les étapes suivantes:

- 1- Déterminer l'accélérogramme correspondant au séisme de projet.
- 2- Déterminer le spectre de Fourier de l'accélérogramme correspondant au séisme de projet et ce en faisant sa Transformée de Fourier.
- 3- Déterminer la fonction de transfert du profil de sol à la surface libre.
- 4- Déterminer le spectre de Fourier de l'accélérogramme à la surface libre et ce en faisant un produit de convolution de la fonction de transfert par le spectre de Fourier (obtenu en 2).
- 5- Déterminer l'accélérogramme à la surface libre en faisant la Transformée de Fourier Inverse du spectre de Fourier obtenu à la surface libre.

VI.6. Traitement numérique

VI.6.1 Accélérogrammes :

Dans ce chapitre, nous n'avons malheureusement pas pu étudier les différentes influences comme fait précédemment pour les fonctions d'amplification.

Nous avons donc mené cette étude en ne faisant varier que l'épaisseur de la couche sédimentaire du sol. Les résultats des réponses du sol seront comparés pour trois catégories de site : rocheux (25 mètres), dépôt sédimentaire peu profond (100 mètres) et dépôt sédimentaire profond (250 mètres).

Pour se faire, nous avons considéré un rocher de dolomie surmontant un sol marneux, dont les caractéristiques géotechniques sont les suivantes :

Sol	Masse volumique.	Vp	Vs
Marne	2.4	2700	1400
Dolomie	3	5500	3200

Nous avons maintenu l'angle d'incidence ' $j_2 = 20^\circ$ '.

Nous avons pu constater que plus le sol était profond, plus la fonction d'amplification de ce dernier diminuait, et de plus en plus le pic d'accélération augmentait; cela est dû au fait de la multitude des harmoniques de la fonction d'amplification.

Pour le cas étudié, nous avons obtenu pour une hauteur de 25 mètres, une seule harmonique d'amplitude 12 et un pic d'accélération égal à 700 cm/s^2 ; quatre harmoniques d'amplitude 8 et un pic d'accélération de 1240 cm/s^2 pour une profondeur de 100 mètres et neuf harmoniques d'amplitude 5 pour une accélération maximale de 1330 cm/s^2 . On illustrera ces conclusions par les figures VI-2, VI-4 et VI-6 pour les ondes de cisaillement S_x .

Des résultats similaires sont constatés pour le cas d'une onde de compression P_z comme c'est illustré sur les figures VI-3, VI-5 et VI-7.

Bien que le facteur d'amplification soit plus important pour les sols de faible épaisseur, son influence sur le spectre de Fourier est moins importante que pour les sols de grande épaisseur.

Cela est dû au fait que l'amplification des sols peu épais a lieu à des fréquences relativement hautes. En conséquence, les figures VI-2 à VI-7 illustrent de manière claire le transfert d'énergie vers les basses fréquences induit par les sols de grandes épaisseurs, ce qui a pour effet de se traduire dans le domaine temporel par des accélérogrammes relativement plus lissés pour les sols épais avec des amplitudes plus importantes.

Les mêmes constatations sont retenues pour les ondes de compression P.

Vu que l'amplification de l'onde de compression P est relativement plus faible que celle de l'onde de cisaillement Sv, nous avons des pics d'accélération beaucoup plus importants pour l'onde transversale que pour l'onde longitudinale.

On le voit bien sur les figures VI-2 et VI-3, où l'on obtient pour :

- onde Sv : l'accélération maximale est égale à 700 cm/s^2 pour un pic d'amplification égal à 12 Hz.
- onde P : l'accélération maximale est égale à 220 cm/s^2 pour un pic d'amplification égal à 2 Hz.

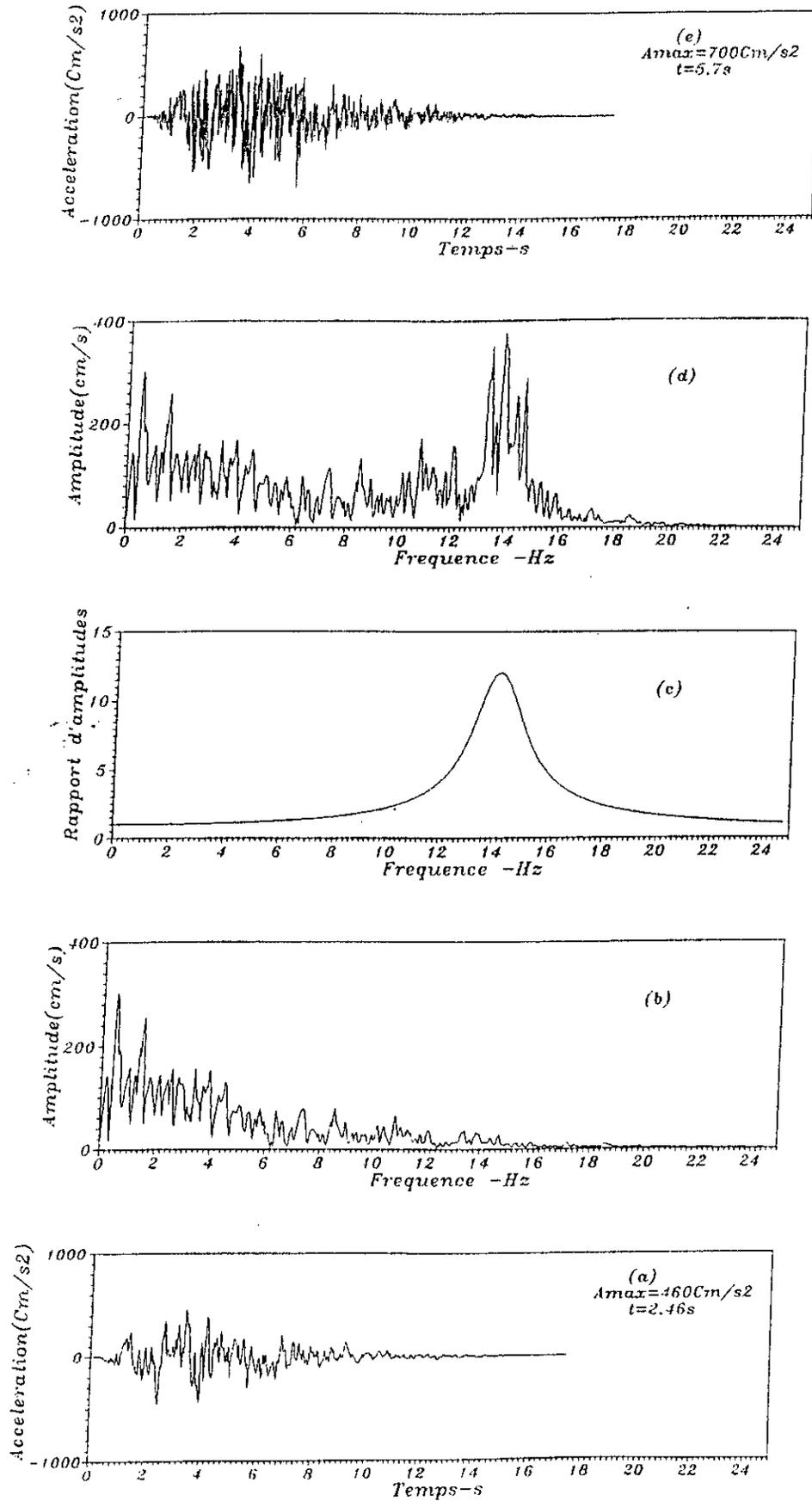


Figure VI.2 (a) Accélérogramme de projet
(b) Spectre de Fourier de (a)
(c) Fonction de transfert
(d) Spectre de Fourier de (e)
(e) Accélérogramme à la surface

$h = 25 \text{ m}$

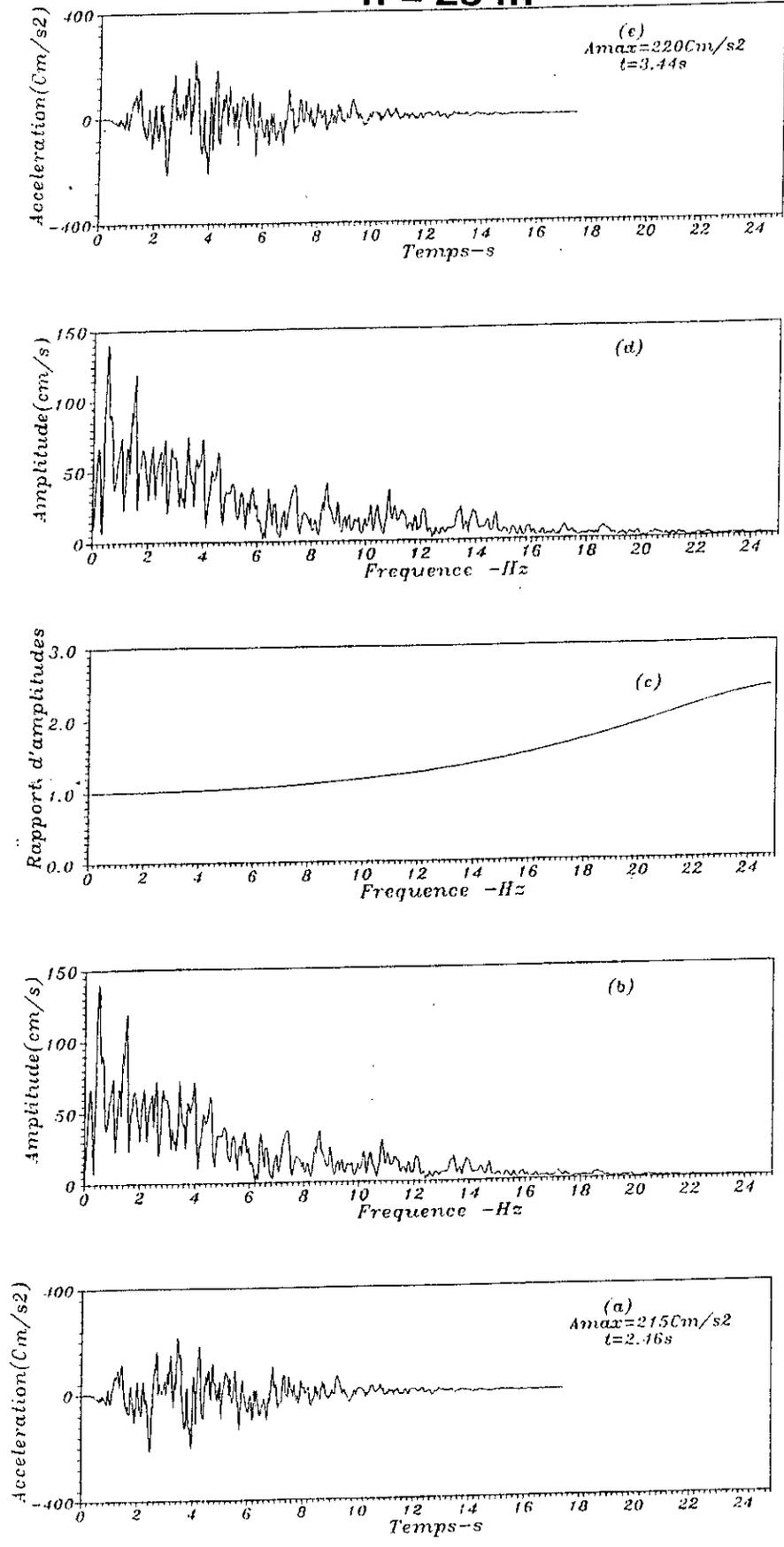


Figure VI.3 (a) Accélérogramme de projet
(b) Spectre de Fourier de (a)
(c) Fonction de transfert
(d) Spectre de Fourier de (e)
(e) Accélérogramme à la surface

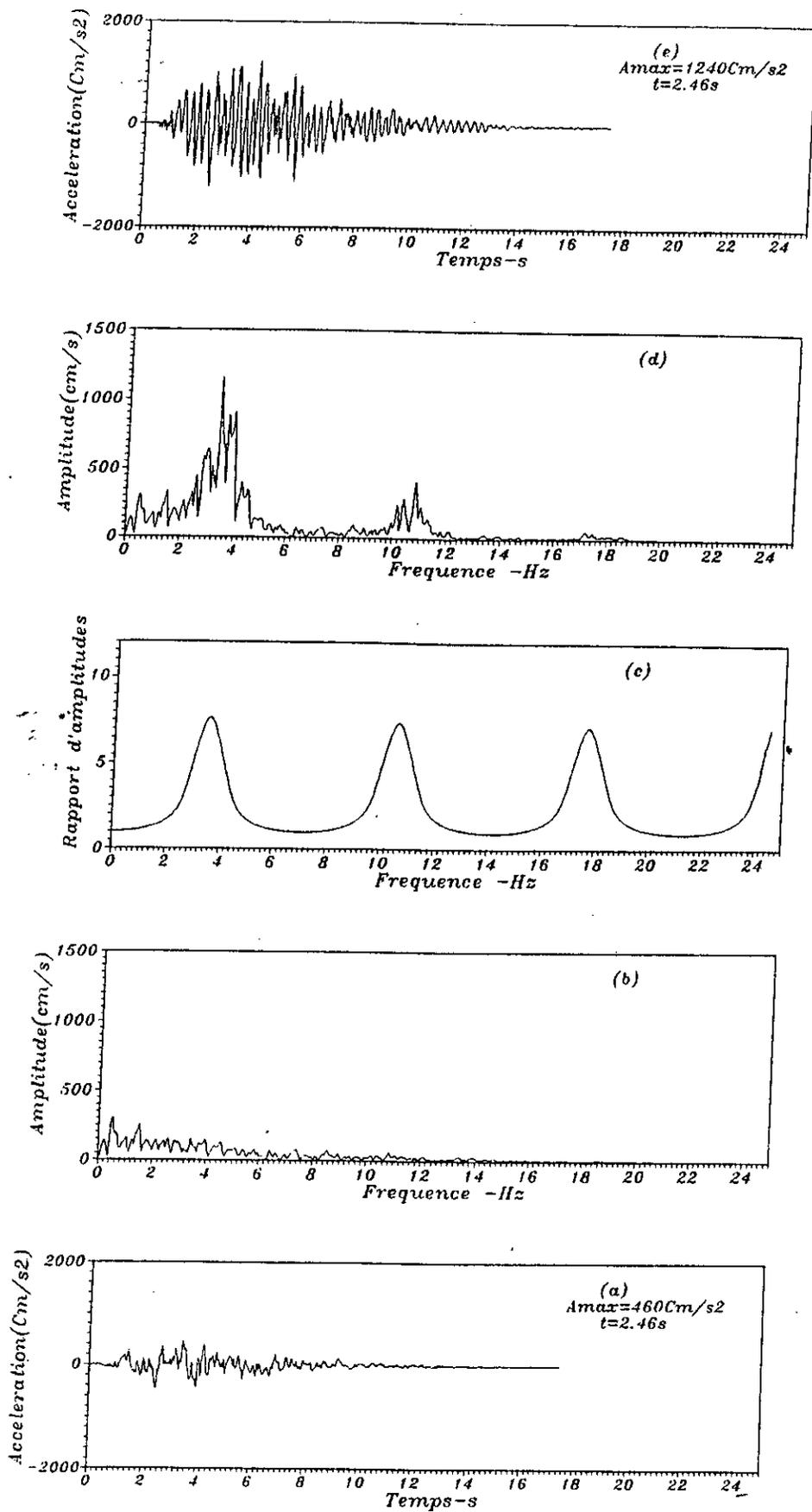


Figure VI. 4 (a) Accélérogramme de projet
 (b) Spectre de Fourier de (a)
 (c) Fonction de transfert
 (d) Spectre de Fourier de (e)
 (e) Accélérogramme à la surface

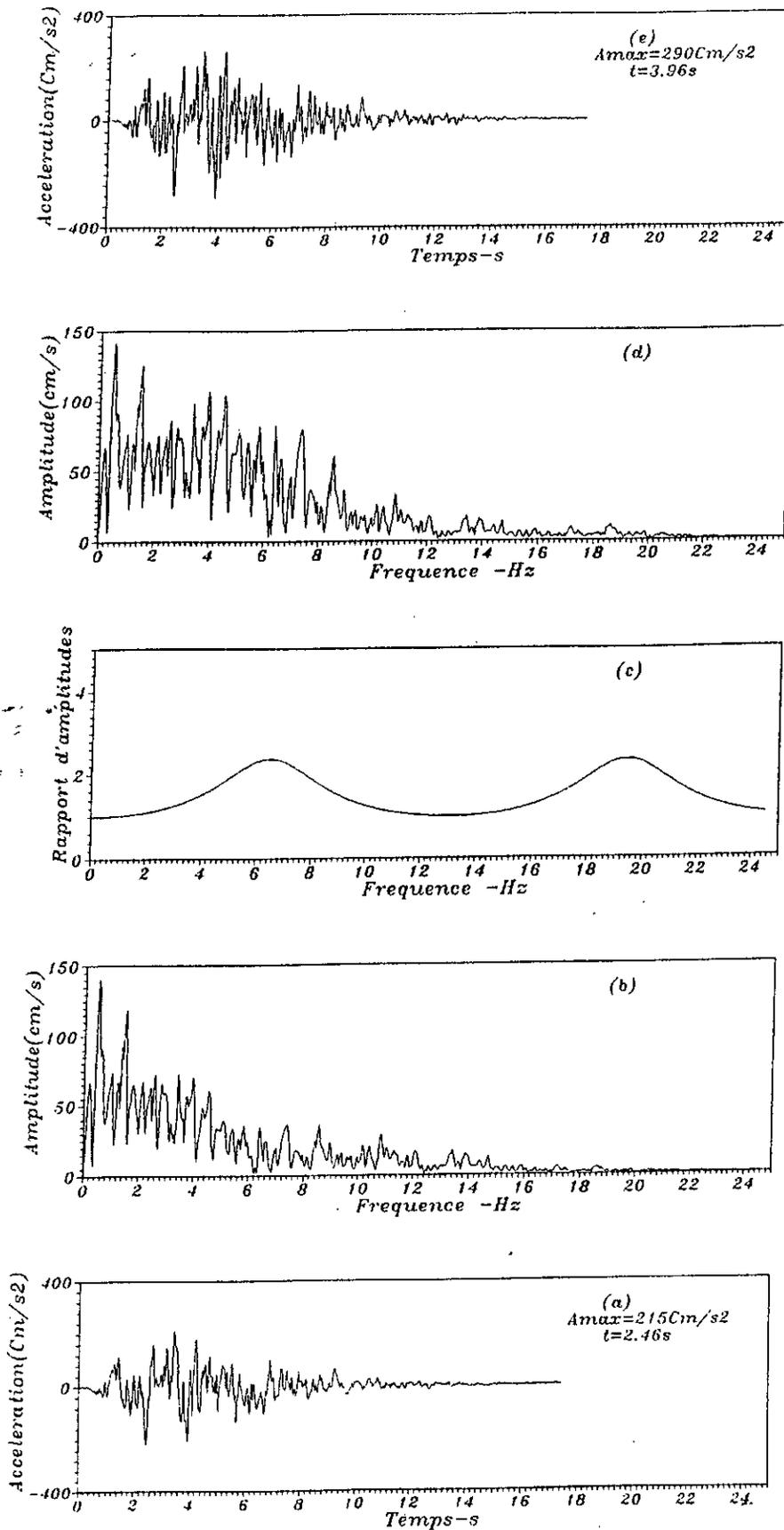


Figure VI.5 (a) Accélérogramme de projet
(b) Spectre de Fourier de (a)
(c) Fonction de transfert
(d) Spectre de Fourier de (e)
(e) Accélérogramme à la surface

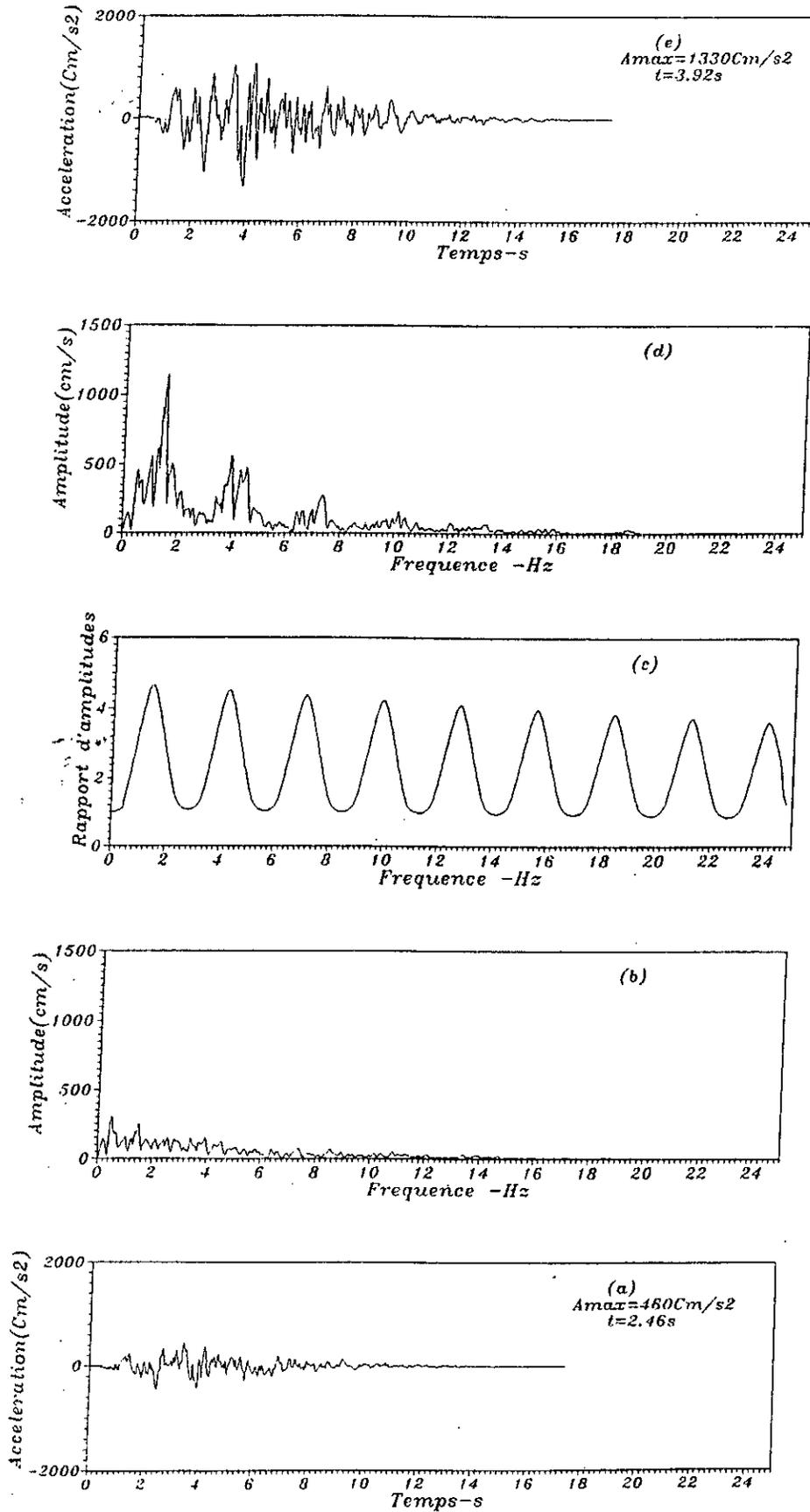


Figure VII. 6 (a) Accélérogramme de projet
(b) Spectre de Fourier de (a)
(c) Fonction de transfert
(d) Spectre de Fourier de (e)
(e) Accélérogramme à la surface

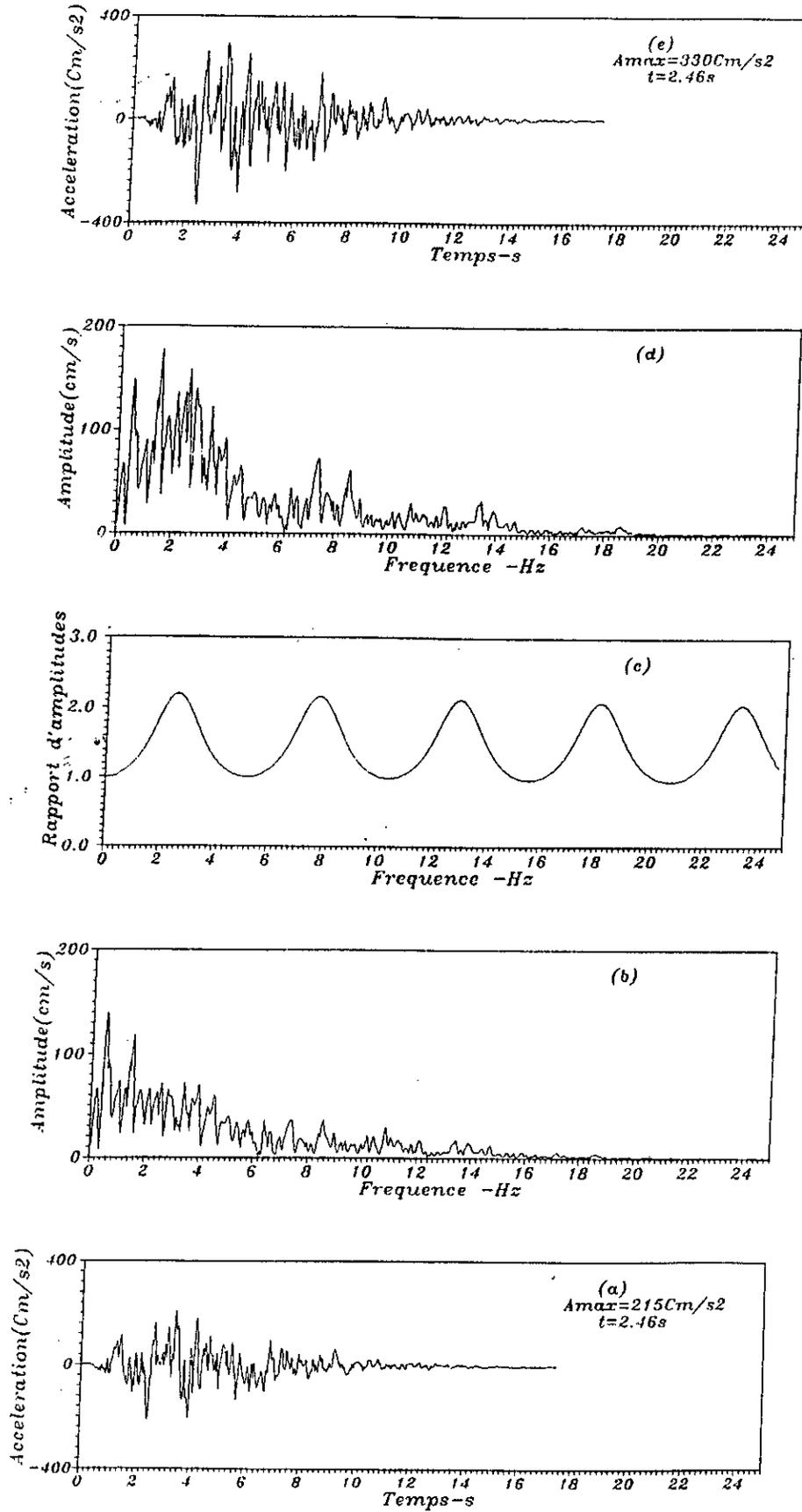


Figure VI.7 (a) Accélérogramme de projet
(b) Spectre de Fourier de (a)
(c) Fonction de transfert
(d) Spectre de Fourier de (e)
(e) Accélérogramme à la surface

VI.6.2. Spectres de réponse :

Les formes des spectres de réponse obtenues par l'analyse dynamique sont très sensibles à la nature du sol, puisque les sols durs transmettent de préférence les hautes fréquences et les sols mous les basses fréquences.

Nous avons tracé les spectres proposés par les règlements parasismiques Algériens (1988) et nous les avons comparé aux spectres de réponse résultant de notre application.

Cette comparaison nous a mené à tirer les conclusions suivantes:

- Le spectre du R.P.A correspondant à un sol ferme et celui que nous avons eu au niveau de l'interface sont comparables; mais celui correspondant au RPA n'assure pas le bon comportement des structures à basses périodes ($T < 0.3$ s).
- Pour les sols meubles de faible hauteur, les amplifications les plus grandes ont lieu pour les hautes fréquences c'est à dire en basses périodes. Celles-ci dépassent largement les amplitudes spectrales proposées par les RPA.
- Pour une hauteur $h = 25$ m le RPA ne couvre pas les structures de périodes inférieures à 0,35, par contre pour les périodes $T > 0,35$ les valeurs proposées sont sécuritaires et assure le bon comportement de ces structures (fig VI-8 et VI-9).
- Pour une hauteur $h = 100$ (sol moyennement profond) on note une amplitude spectral de 3200 cm/s² qui n'est pas prévu par le R.P.A. en effet le R.P.A ne couvre pas les structure de $T < 0,55$, par contre il donne des amplitudes plus sécuritaires lorsque la période est $> 0,55$. Et enfin pour $h = 250$ (sol relativement profond) le spectre du R.P.A ne aucunement les structures de périodes usuelles ($T < 2,55$).

Pour les ondes de compression P, les spectres de réponse donnés par le R.P.A enveloppent ceux obtenus de l'analyse dynamique, donc ils assurent le bon comportement de nos structures sur les sols fermes et les sols meubles.

En conclusion, au vue des spectres de réponse des ondes P et des ondes S, le transfert d'énergie vers les basses fréquences est caractérisé par les amplitudes spectrales des structures relativement plus importantes pour les structures de périodes de plus en plus grandes bâties sur des sols de plus en plus meubles.

On peut dire en conclusion, que les sols les plus dangereux pour les constructions sont les sols meubles de forte épaisseur.

Les règlements parasismiques précisent que les procédures d'analyse dynamique usuelles peuvent être classées comme suit :

- Analyse par spectre de réponse.
- Analyse du mouvement en fonction du temps (accélérogrammes).

Pour un système élastique linéaire, ces deux méthodes sont censées donner des résultats similaires au point de vue réponse maximum.

Ceci n'est pas le cas dans notre étude, les résultats obtenus par spectres de réponse et ceux obtenus par les accélérogrammes ne sont pas du tout identiques.

L'analyse du mouvement en fonction du temps peut nécessiter plusieurs enregistrements de mouvements sismiques pour assurer une couverture convenable du problème. Des courbes artificielles de mouvements sismiques de sol peuvent être utilisées comme alternative. On doit noter que le mouvement sismique peut être considéré comme un processus stochastique. L'analyse du mouvement en fonction du temps peut être appliquée aussi bien aux systèmes linéaires que non linéaires.

Du fait qu'il est impossible de prédire exactement les mouvements sismiques attendus sur le site dans le futur, il pourrait être approprié d'utiliser des courbes artificielles des mouvements sismiques de sols en analyse dynamique. Les accélérogrammes synthétiques sont construits au moyen de l'approche probabiliste.

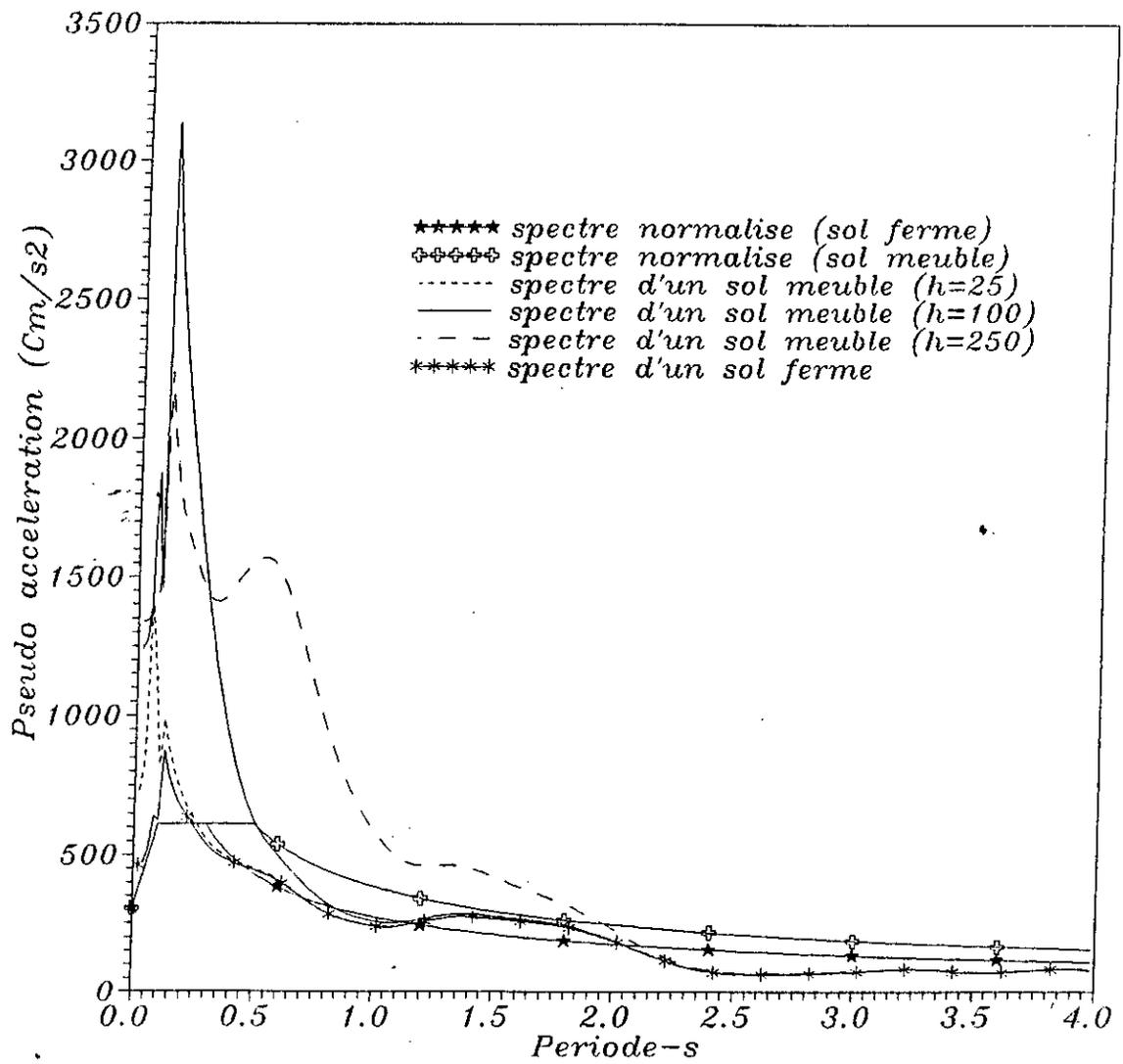


Fig VI- 8 Spectres de réponse de l'onde de cisaillement Sv

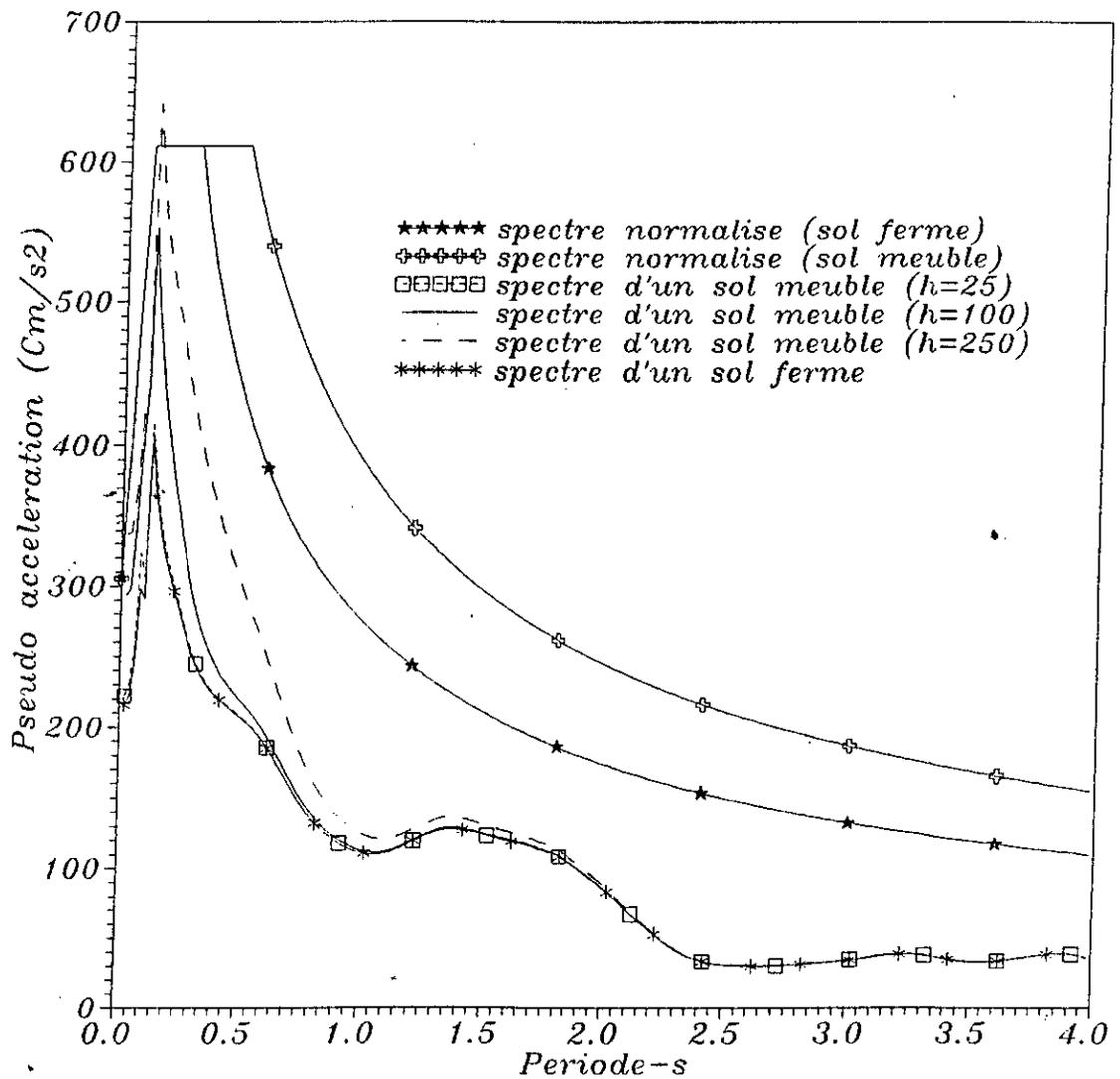


Fig VI- 9 Spectres de réponse de l'onde de compression P

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'étude de la propagation des ondes sismiques induites par une rupture au niveau de la faille, est une étape importante dans une phase de conception et de dimensionnement des ouvrages en Génie Civil.

Si l'on considère une onde Sv incidente au niveau du substratum rocheux, elle donnera à l'interface une onde de compression du type P, sensiblement verticale, et une onde de cisaillement du type Sv, dans le plan horizontal. Celles-ci vont se propager dans le profil de sol provoquant un séisme à la surface libre.

C'est ainsi que notre modeste travail a porté essentiellement sur l'estimation des fréquences de vibration, sur l'étude de la fonction d'amplification et des accélérogrammes et d'un profil de sol à stratification horizontale, surmontant un semi-espace élastique rocheux.

Nous avons développé les différentes équations qui gouvernent le problème de la propagation de l'onde Sv incidente. Le système d'équations ainsi obtenu sera linéaire et va décrire l'évolution du déplacement et de l'accélération pour chaque pas de temps et de fréquence. Il sera résolu en considérant les conditions aux limites au niveau de l'interface et de la surface libre.

Face à la grande variété des modèles développés dans le but d'apporter des améliorations aux diverses approches, on s'est amené à choisir le modèle cinématique de HASKELL, offrant la possibilité de prendre en considération les caractéristiques géophysiques de la faille, et ouvrant de larges perspectives à l'étude de la propagation individuelle des ondes sismiques dans ses différents aspects.

Par ailleurs, une étude paramétrique a été menée dans l'analyse de la fonction d'amplification. Elle a porté principalement sur l'effet de l'incidence, du type de sol et du substratum rocheux.

A cet égard, il semble nécessaire de noter que dans l'étude de l'influence de l'angle d'incidence sur la fonction de transfert, seuls les angles inférieurs à l'angle limite ont été considérés, et ceci pour une raison qui n'est pas due à une difficulté de programmation mais qui est due uniquement à l'absence totale de théories aboutissant à une approche réaliste du problème.

Dans le même esprit, lorsqu'on veut étudier les fonctions d'amplification d'un profil de sol, la préoccupation majeure consistera à définir:

- 1- Les caractéristiques géotechniques du sol considérés telles que la densité, les coefficients de Young, de cisaillement et de lamé,...
- 2- La profondeur h de la couche sédimentaire.
- 3- Les dimensions (L, W) et les paramètres caractérisant la faille: vitesse de rupture, temps de montée, moment sismique,....

Aussi n'insistera-t-on jamais sur l'importance des détails géologiques du profil de sol. C'est pourquoi, le succès d'atteindre l'approche réelle du comportement d'un profil de sol vis - à - vis des ondes sismiques, dépend en premier lieu de la mesure des paramètres physiques du sol et de la source qui ont encore un caractère assez aléatoire.

En attendant de vaincre ces difficultés, l'idéal semble consister en la réalisation d'un chantier d'observation où l'on installerait un réseau d'accélérogrammes dont l'analyse des enregistrements permettrait de contrôler la validité des prévisions du modèle de comportement du sol.

De même, une brève étude comparative a été menée dans le domaine spectral, avec les règlements parasismiques Algériens. De là, on peut noter une variation sensible entre les spectres de calcul et les spectres réglementaires, et ce pour l'onde de cisaillement. Par contre, les résultats concernant l'onde de compression P sont relativement comparables.

En conclusion, on peut dire que cette présente étude n'est qu'une étape dans le domaine de la recherche en dynamique des sols et en Génie Parasismique.

Nous espérons que des études seront poursuivies dans ce sens et que cette thèse servira de point de départ pour de nombreux axes de recherche.

Comme perspectives futures, nous proposons l'étude de la propagation des divers types d'ondes et cela en considérant un sol multicouches, de comportement linéaire et non linéaire.

BIBLIOGRAPHIE

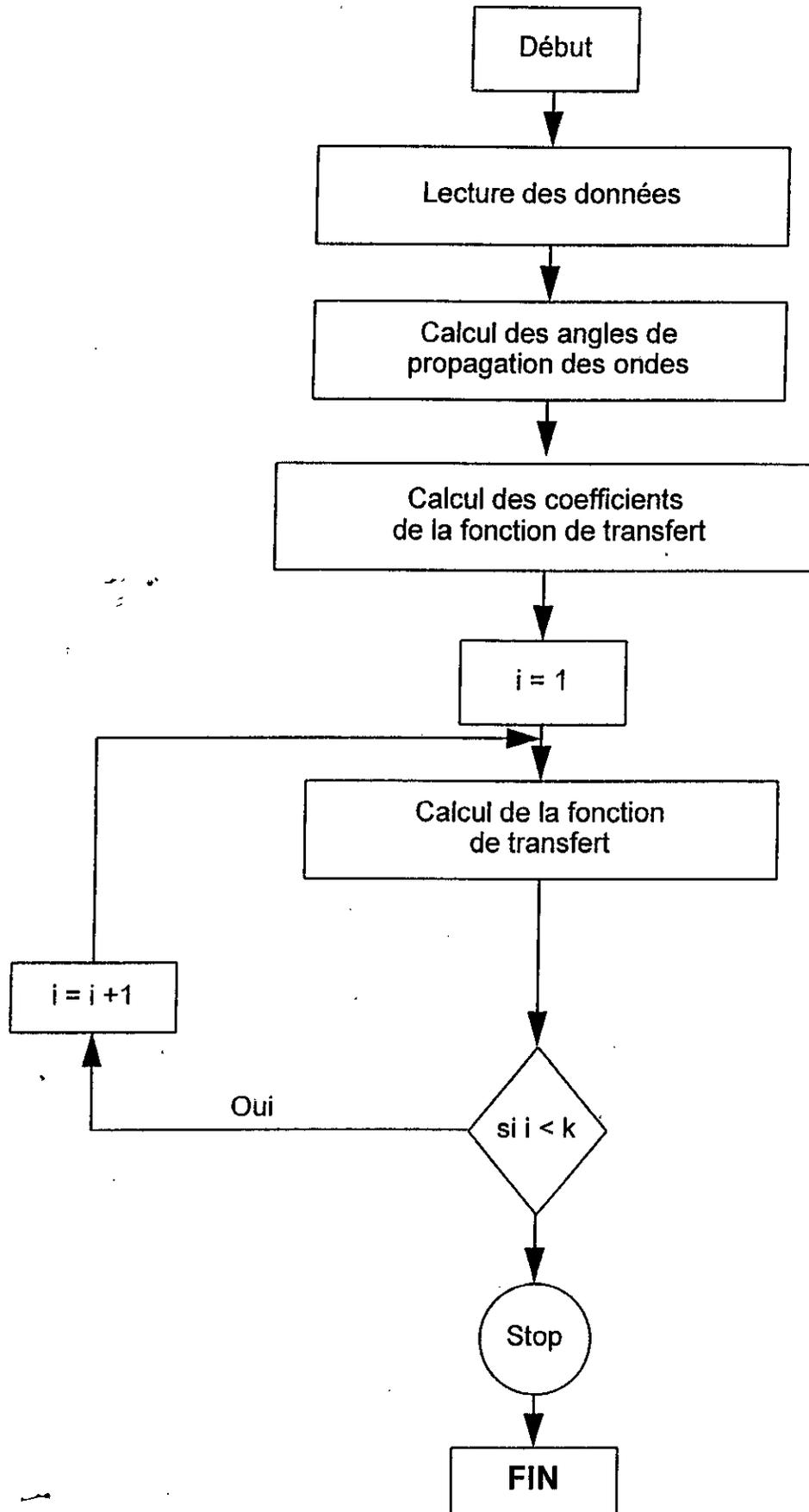
BIBLIOGRAPHIE

- BARD. P.Y** Cours de sismologie de l'ingénieur
Laboratoire de géophysique interne et de tectonophysique LGIT -
IRIGM Grenoble
- BERRAH. M.K** Cours de vibration aléatoire
Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie civil, 1995
- BOORE. D.M** Stochastic simulation of high frequency ground motion based on
seismological models of the radiated spectra
Bulletin of Seismological Society of America, BBSA, Vol 73, N°. 73,
P. 1865 - 1894, 1983
- CAPRA. A and
DAVIDOVICIV** Calcul des structures en zone sismique
3^{ème} Edition, Eyolles, Paris, 1984
- CLOUGH. R.W
and PENZIEN. J** Dynamic of structures
Mc GRAW-HILL, New York, 1975
- DAVIDOVICI. V** Genie Parasismique
Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, ENPC,
Paris 1985
- DEMIDEM. M** Cours de calcul automatique des structures
Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie civil, 1995
- PECKER. A** Dynamique des sols
Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, ENPC,
Paris, 1984

- PRAKACH. S** Soil dynamics
Mc GRAW-HILL Book Company 1981
- SIBSON. R.H** Earthquake faulting as a structural process
Journal of structural geology, Vol 11, N°1/2, P.1-14, 1989
- TILIOUINE. B** Cours de dynamique des structures
Ecole Nationale Polytechnique, Département Génie civil, 1995
- WILLIAM. H** Numerical recipes - The art of scientific computing
Cambridge University Press, London, 1986
- Les Règles Parasismiques Algériennes RPA 88

ANNEXES

ORGANIGRAMME TRSF



PROGRAMME TRSF

Ce programme calcule les différentes fonctions de tra paramètres dont lequel on a mis les valeurs des caract du sol.

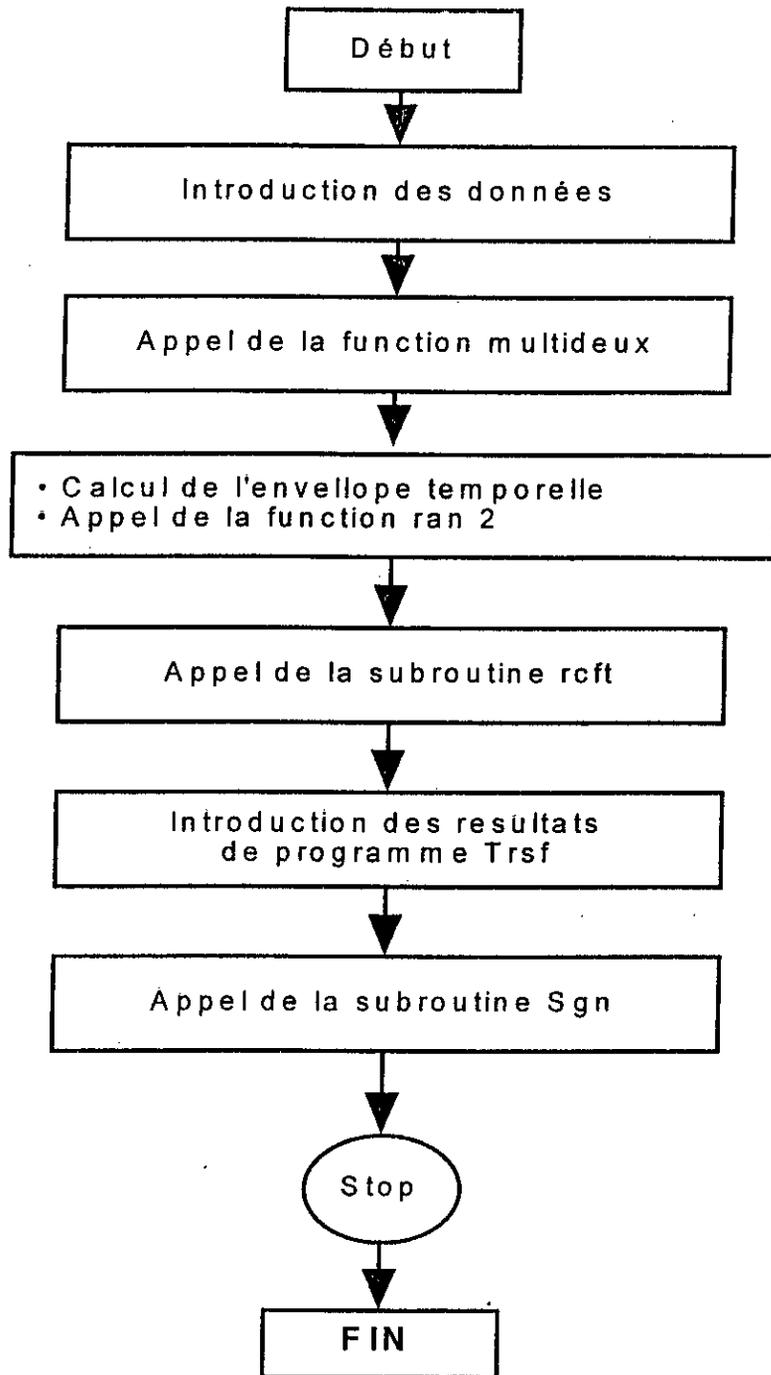
Subroutine Litpas:

C'est un programme qui fait des lectures et d fichiers quelconques, en particulier les fichie

Subroutine Smooth:

C'est un programme qui sert pour les lissages courbes obtenues.

Organigramme Accel



Organigramme Accel

Le programme accel calcul les accelérogrammes, leurs spectres de Fourier au niveau de l'interface et la surface libre pour les deux types d'ondes suivant (ox) et oz) en utilisant les fonctions de transfert calculées dans le programme trsf.

Ce programme utilise plusieurs sous-programmes

Subroutine rcft:

C'est un programme qui sert pour le passage de domaine temporel au domaine fréquentiel

Subroutine crft:

Elle fait le passage inverse

Subroutine multideux:

Cette fonction fait l'échantillonnage en temps et en fréquence

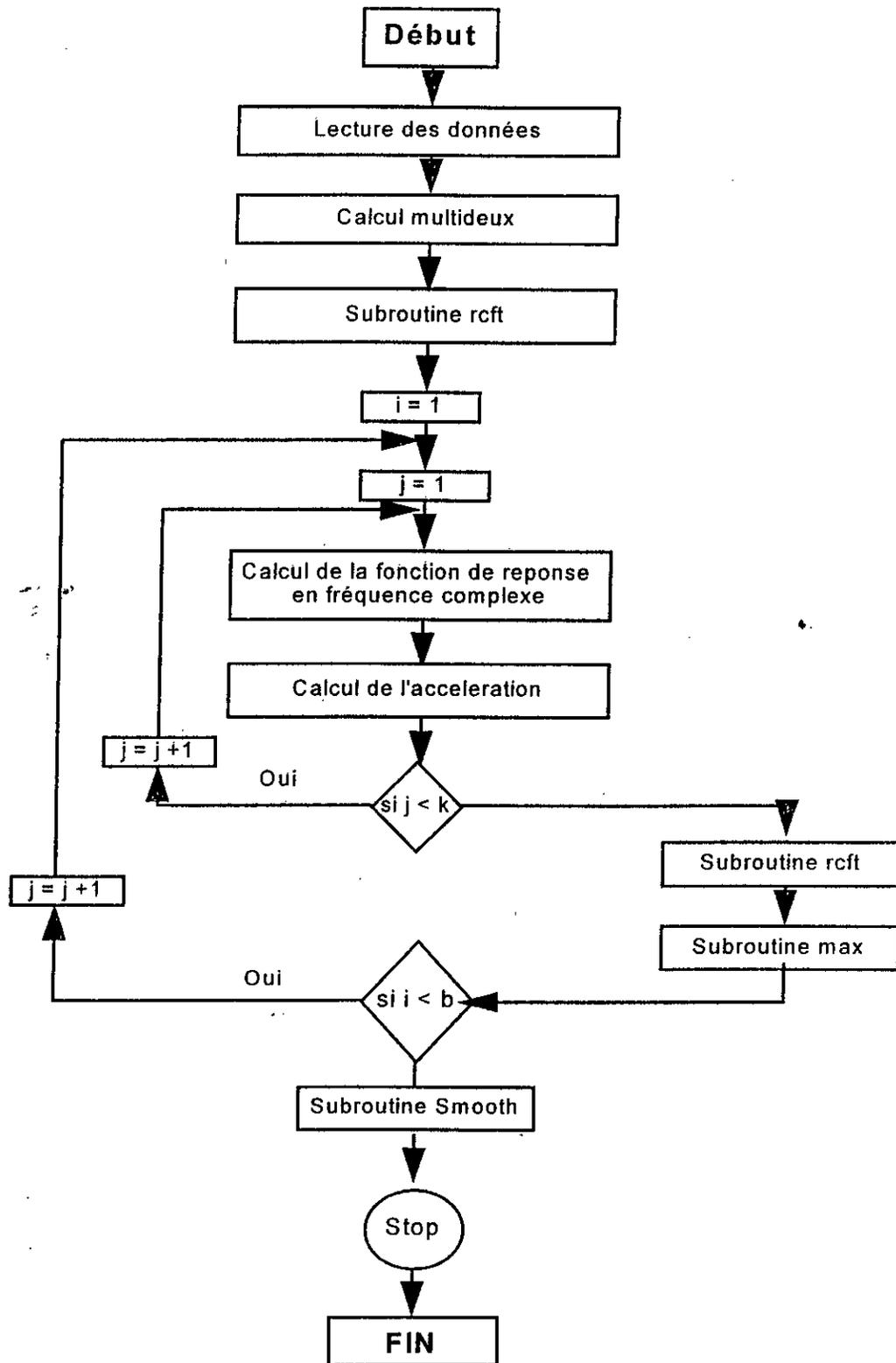
Function ran2:

Pour construire le bruit blanc

Subroutine sgn:

Elle nous calcule des différents accélérogrammes et les spectres de fourier.

ORGANIGRAMME SPREP



PROGRAMME SPREP

Ce programme calcul les spectres de réponse d'un système à un degré de liberté qui repose soit sur un sol meuble ou un sol ferme aux excitations sismiques calculées dans le programme accel.

Les différents sous programmes utilisés sont

Subroutine Litpas:

C'est pour la lecture et l'écriture dans les fichiers paramètres

Subroutine Max:

Elle calcule la valeur maximale de plusieurs nombres ainsi que la fonction que la fonction multideux, subroutine rcft et crft

Subroutine Smmoth:

C'est un programme qui sert pour le lissage des différentes courbe obtenue

RAPPEL SUR LA TRANSFORMÉE DE FOURIER

En analyse dynamique, il est souvent très utile d'opérer une transformation sur les fonctions du temps qui interviennent dans les équations mécaniques, de telle sorte que les équations transformées soient résolues plus facilement. La transformée de Fourier est la plus couramment utilisée.

L'étude dans le domaine des temps est générale et peut servir à déterminer la réponse de tout système linéaire à un degré de liberté soumis à une excitation quelconque ; mais il est parfois plus commode de porter l'étude dans le domaine des fréquences.

L'application littérale de l'analyse en fréquences mène à des calculs longs et fastidieux d'intégrales. Il convient donc de rendre la méthode plus commode d'accès en la formulant de manière numérique.

Nous avons vu que le signal sismique est l'ensemble des événements enregistrés en fonction du temps. Il existe une autre façon de représenter l'information contenue dans le signal sismique, c'est la représentation dans le domaine "harmonique" ou domaine des fréquences. Le passage du domaine temporel au domaine harmonique se fait par la Transformée de Fourier.

Soit un signal à valeurs complexes $s(t)$ de la variable continue t . On définit la Transformée de Fourier, TF $\{s(t)\}$ de la variable f par:

$$S(f) = \text{TF} [s(t)] = \int s(t) e^{-2\pi j f t} dt$$

La base $\exp(-2\pi j f t)$ est orthonormée et directe, la fonction TF $\{s(t)\}$ est indéfiniment dérivable.

On note TFI la Transformée de Fourier Inverse qui permet le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel.

$$\text{TFI } [S(f)] = \int s(t) e^{2\pi j f t} dt$$

Les applications TF et TFI sont mutuellement réciproques.

La transformée de Fourier permet de faciliter le calcul du produit de convolution, en le passant d'une forme intégrale à un simple produit de fonctions.