

5/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

PROJET **DE FIN D'ETUDES**



POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE CIVIL

Thème

ETUDE THÉORIQUE SUR LES FONCTIONS
DE COHÉRENCE DES MOUVEMENTS
SISMIQUES À VARIABILITÉ SPATIALE

Proposé et dirigé par:

Mr. M. HAMMOUTENE

Etudié par :

Mr. FERTIKH Abdelhak
Mr. KAROUCHE Abdelhamid

PROMOTION JUILLET 1997

ENP 10, Avenue Hacen Badi EL-HARRACH. ALGER

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

PROJET **DE FIN D'ETUDES**



POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE CIVIL

Thème

**ETUDE THÉORIQUE SUR LES FONCTIONS
DE COHÉRENCE DES MOUVEMENTS
SISMIQUES À VARIABILITÉ SPATIALE**

Proposé et dirigé par:

Mr. M. HAMMOUTENE

Etudié par :

Mr. FERTIKH Abdelhak
Mr. KAROUCHE Abdelhamid

PROMOTION JUILLET 1997

ENP 10, Avenue Hacen Badi EL-HARRACH. ALGER

Dédicaces



- . *A mes parents qui sont pour moi les êtres les plus chers au monde. Ils n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'aider même dans les moments les plus difficiles.*
- . *A mon frère Samir et mes soeurs Feriel et Baya*
- . *A la mémoire de mon grand père Aïssa et mon oncle Salah*
- . *A mes grands parents*
- . *A mes oncles et mes tantes paternels et maternels*
- . *A tous mes cousins et cousines*
- . *A tous mes amis et plus particulièrement : Amine, Rédha, Sihem, Ilhem, Wassila, Hakim, Lyès sans oublier Salim et Zoheir.*
- . *A tous ceux qui me sont chers*
- . *A notre Algérie qui sortira vainqueur de ses souffrances. Inchallah.*

Abdelhak

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

- . *A mes parents, avec toute la reconnaissance pour les sacrifices consentis à mon égard et pour leurs encouragements.*
- . *A la mémoire de Abdelbasset, et de ma grand mère.*
- . *A mon frère Lamri, ainsi qu'à ma belle sœur.*
- . *A mes soeurs, ainsi qu'à mes beaux frères.*
- . *A mes neveux et mes nièces, surtout : Hatem, Chaima, Imad, Yacine, Bidjad et Samia.*
- . *A mes profs à qui je dois énormément : Mr Benkaa et Mr Athmani.*
- . *A mes tantes Fatima (paternelle et maternelle).*
- . *A mon oncle Mhamed.*
- . *A toute ma famille.*
- . *A tous mes amis, surtout : Hakim, Abdelouahab, Yacine, Hamoud et Kafja.*
- . *A tous ceux qui veillent pour que la paix revienne à mon pays.*

Hamoudi

Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Aucun mot, aucune expression ne suffiront pour traduire notre immense gratitude à notre promoteur, Mr. Malek HAMMOUTENE, Chargé de cours, pour son aide, ses conseils et sa disponibilité à la réalisation de ce travail.

Qu'il veuille bien accepter nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions doublement Mr. B. TILIOUINE, Professeur, premièrement pour sa qualité d'initiateur de la recherche dans le domaine de la dynamique des structures au sein du département Génie Civil. Deuxièmement, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider notre jury de thèse. Ses nombreux travaux de recherche sont pour nous une référence incontournable.

Nous remercions également Mr. S. BELKACEMI, Maître de conférence et Mr. M. DEMIDEM, Chargé de cours, pour l'honneur qu'ils nous font d'être membres du jury de la thèse, et pour leurs nombreux travaux de recherche qui ont été d'un apport certain à la qualité de nos connaissances.

Nous tenons aussi à remercier Mr. M. K. BERRAH, Maître de conférence, qui est au sein de l'école à l'origine des travaux pilotes dans le domaine de la variabilité spatiale. Les nombreux résultats qui y ont été obtenus nous ont été hautement bénéfiques.

Nous n'oublierons pas de remercier Melle. KADI Karima et Mr. TOUNSI Khaled pour leur disponibilité à nous aider.

Nous remercions tous les enseignants sans exception pour leurs patience et servitude. Ils ont contribué depuis notre plus jeune âge à nous transmettre leur savoir pour assurer notre formation.

Enfin, une grande reconnaissance et un grand merci sont adressés aux personnel de la bibliothèque et du centre de calcul et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre projet. Leur soutien nous a été bénéfique pour la réalisation de ce travail.

ملخص :

يستعمل النموذج النظري لدالة الانسجام لوصف التغير الفضائي لحركات الزلازل القوية. هذا النموذج يتكون من أربع مركبات تمثل أربع تأثيرات مختلفة للتغير الفضائي و هي تأثير عدم الانسجام تأثير مرور الموجة تأثير التخامد و تأثير استجابة الوسط. هذا البحث يتضمن حساب و دراسة هذه العوامل الممثلة لكل مركبة من مركبات دالة الانسجام . الدراسة النظرية لهذا البحث تتم عن طريق تقدير الكثافة الطيفية لحركات الزلازل باستعمالنموذج الإشعاع للأطياف في المنبع .

ABSTRACT :

A theoretical model for the coherency function is used in this work in order to describe the spatial variability of earthquake strong ground motion. This model consists on four components characterizing four distinct effects of the spatial variability.

The investigation consists on the evaluation of the parameters of each component characterizing the coherency function.

The theoretical approach of this investigation is made through the estimation of the spectral density function of the seismic motions by the use of source radiated spectra model.

RESUME :

Un modèle théorique pour la fonction de cohérence est utilisé pour la description de la variabilité spatiale des mouvements sismiques forts du sol.

Ce modèle est constitué de quatre composantes caractérisant quatre effets distincts de la variabilité spatiale : l'effet de l'incohérence, l'effet du passage d'onde, l'effet de l'atténuation et l'effet de site.

L'investigation porte sur l'évaluation des paramètres caractérisant chacune des composantes de la fonction de cohérence.

L'approche théorique de cette investigation est faite à travers l'estimation de la densité spectrale des mouvements sismiques en utilisant un modèle de radiation des spectres de source.

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE I : GENERALITES | 5 |
| 1- Notions de sismologie | 6 |
| 1-1- Introduction | 6 |
| 1-2- Ondes sismiques | 7 |
| 1-3- Caractérisation du mouvement sismique | 9 |
| 2- Variabilité spatiale | 13 |
| 3- Fonction de cohérence | 14 |
| 3-1- Définition | 14 |
| 3-2- Caractéristiques de la fonction de cohérence | 14 |
| 4- Densité spectrale | 16 |
| 5- Représentation discrète des processus en terme de fréquence | 18 |
| CHAPITRE II : EFFET D'INCOHERENCE | 19 |
| 1- Introduction | 20 |
| 2- Représentation discrète des processus en terme de fréquence | 20 |
| 3- Fonction de cohérence | 22 |
| 4- Etude de paramètres caractérisant l'effet d'incohérence | 22 |
| 4-1- Cas où « k » se situe à l'épicentre | 23 |
| 4-2- Cas où « k » se situe à une distance « dkl » de l'épicentre | 30 |
| CHAPITRE III : EFFET DU PASSAGE D'ONDE | 32 |
| 1- Introduction | 33 |
| 2- Fonction de cohérence | 33 |
| 3- Définition de la phase $\theta_{kl}(f)$ | 34 |
| 4- Etude du décalage temporel « τ_{kl} » | 35 |
| CHAPITRE IV : EFFET D'ATTENUATION | 37 |
| 1- Introduction | 38 |
| 2- Types d'atténuation | 38 |
| 2-1- Atténuation géométrique | 38 |
| 2-2- Atténuation intrinsèque | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 3- Fonction d'atténuation | 39 |
| 3-1- Définition | 39 |
| 3-2- Etude de la fonction d'atténuation | 40 |
| 4- Fonction de cohérence | 42 |
| 4-1- Définition | 42 |
| 4-2- Etude de la fonction de cohérence | 44 |
| | |
| CHAPITRE V : <i>EFFET DE SITE</i> | 46 |
| 1- Introduction | 47 |
| 2- Caractéristiques du site | 47 |
| 2-1- Vitesse de propagation des ondes et masses volumiques des roches | 47 |
| 2-2- Facteur de qualité | 48 |
| 2-3- Loi de SNELL | 50 |
| 2-4- Fonction de transfert | 50 |
| 3- Fonction de cohérence | 54 |
| 3-1- Définitions | 54 |
| 3-2- Etude de l'angle $\theta_{kl}(f)$ en fonction de la hauteur « h » | 56 |
| 3-3- Etude de l'angle $\theta_{kl}(f)$ en fonction des caractéristiques du milieu | 58 |
| | |
| CONCLUSION | 61 |
| | |
| ANNEXE | 64 |
| - Organigramme « Ich2 » | 65 |
| - Organigramme « Teta1 » | 67 |
| - Organigramme « Gama » | 69 |
| - Organigramme « FW » | 70 |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les effets spectaculaires des séismes et, surtout, les pertes en vies humaines qui sont souvent engendrées ont de tout temps stimulé l'intérêt des hommes pour ces phénomènes naturels. Les premières études sismologiques, en s'appuyant sur l'observation d'effets sensibles, se concentrèrent dans les zones lithosphériques, où ces effets sont le plus intenses.

Comme devant tout phénomène naturel à caractère désastreux, on doit placer en tête les priorités d'atténuation du danger encouru par les hommes. Cela implique à la fois une connaissance scientifique du phénomène et la possession des moyens techniques de protection. Il ne faut cependant pas sous-estimer l'intérêt de l'étude macrosismique, fondée sur la détermination, en un point donné, de l'intensité du séisme, c'est à dire de l'importance des effets constatés ou ressentis.

L'enregistrement, par quelques-uns des observatoires sismologiques du réseau mondial, des premières explosions nucléaires de grande puissance a permis, en 1954, de déterminer les coordonnées du lieu d'explosion à moins de 10 km près et de préciser les durées de propagations des ondes sismiques à travers le globe terrestre. Une expérimentation plus complète de la méthode sismique de détection comportait la mise en place d'un réseau de sismographes de grande sensibilité associés à des enregistreurs de haute qualité assurant une détermination très précise des heures d'arrivée des ondes sismiques

Dans le domaine du Génie Civil, la construction parasismique a essentiellement pour objectif la sauvegarde du plus grand nombre possible de vies humaines et, accessoirement, la limitation des dommages encourus par les ouvrages.

Parmi les causes majeurs des dommages subis par les constructions, on note la nature variable du mouvement sismique dans le temps et dans l'espace. En effet, cette dernière est très préjudiciable pour les structures étendues ou reposant sur appuis multiples en affectant considérablement les forces internes qui y sont créées.

Quatre phénomènes donnent une raison à l'étude de la variabilité spatiale du mouvement du sol provoqué par un séisme :

1. La perte de cohérence des ondes sismiques, due au diffraction des ondes dans un milieu hétérogène du sol, et à la superposition différentielle des arrivées des ondes d'une source étendue. Ce phénomène est appelé : *Effet d'incohérence*.
2. La différence dans le temps de l'arrivée des ondes à des stations séparées. Ce phénomène est appelé : *Effet du passage d'onde*.
3. La décroissance graduelle de l'amplitude de l'onde avec la croissance de la distance qu'elle a parcourue. Cette décroissance est due à l'expansion géométrique et à la dissipation d'énergie dans le milieu de propagation. Ces deux phénomènes sont appelés respectivement : *Effet d'atténuation géométrique et intrinsèque*.
4. La variation spatiale locale des profils de sol, et la manière avec laquelle ils influent sur l'amplitude et la fréquence du mouvement au rocher sous chaque station, ainsi que la différence des caractéristiques des deux milieux (rocher,sol), donnent naissance au quatrième phénomène appelé : *Effet de site*.

Tous ces effets sont modélisés à travers le concept de la « *fonction de cohérence* ».

Des études empiriques récentes ont permis d'étudier la nature et l'importance de l'incohérence et de l'effet de passage d'onde séparément. Elles sont basées essentiellement sur les enregistrements obtenus sur le site du réseau « SMART-1 » implanté à Taiwan où les conditions du sol sont plus ou moins uniformes.

Ces effets ont tendance à croître avec la croissance de la distance entre les stations ou avec la croissance de la fréquence du mouvement du sol.

Dans le cadre de ce présent travail, on traite les effets qui caractérisent la variabilité spatiale.

Dans le premier chapitre, on présente quelques notions de sismologie, qui élucident le rôle des ondes sismiques et leurs effets sur le mouvement obtenu au site d'enregistrement. Puis la définition et l'estimation de la fonction de cohérence.

Une fois les notions générales sont présentées, nous adoptons dans le présent travail la modélisation faite par Der KIUREGHIAN, (1996) afin de faire une investigation séparée sur les différents effets caractérisant la fonction de cohérence.

C'est ainsi qu'on est amené dans le chapitre II à analyser les variations des paramètres du modèle caractérisant l'effet d'incohérence.

Dans le chapitre III, on traite l'effet du passage d'onde à travers l'analyse du décalage temporel engendré par la propagation du paquet d'onde de la source étendue au site d'enregistrement.

Le chapitre IV nous amène à présenter l'influence de l'atténuation subie par les ondes sismiques durant leur trajet source - récepteur

Nous abordons dans le chapitre V l'effet de site en tant que paramètre de caractérisation de la fonction de cohérence. Nous évoluerons ce paramètre dans le cas de l'onde « SH » et pour un profil sismique simple composé d'un demi espace élastique surmonté d'une couche sédimentaire.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les principales conclusions relatives à notre travail, ainsi que les perspectives futures qui permettent de finaliser l'investigation présente et d'en affiner les principaux résultats.

Chapitre I

GENERALITES

GENERALITES

I.1. Notions de sismologie :

I.1.1. Introduction :

L'action sismique est un mouvement vibratoire du sol de forte amplitude. Elle correspond à la propagation d'une onde ayant naissance à l'intérieur de l'écorce terrestre de durée brève mais variable.

Les déformations lentes de la croûte terrestre entraînent une accumulation de tensions internes qui devient de plus en plus grande, jusqu'au dépassement de la résistance de la roche au cisaillement, ce qui produit une rupture à l'endroit en question. Cette dernière va se propager comme la fêlure d'une vitre.

Cette zone de faiblesse dans la croûte terrestre est appelée : *faille*.

Un séisme a toujours des propriétés qui dépendent de sa magnitude, du mécanisme au foyer et de la profondeur du foyer, comme elles dépendent aussi d'autres facteurs, tels que la direction de propagation, les propriétés géologiques, géotechniques et topographiques du site et la configuration des milieux traversés.

Pour les problèmes de sismologie, il est très adéquat de représenter la source par un point (source ponctuelle) dont la position correspond à celle de l'hypocentre. Mais pour une étude détaillée du mécanisme de la source, une représentation très réaliste est commode. Cette représentation s'appuie sur le modèle de propagation de la rupture le long de la ligne de faille.

Un point de sol animé par ce mouvement peut se déplacer dans les trois directions de l'espace.

Deux points extrêmement voisins sont animés d'un mouvement identique, par contre, les mouvements de deux points distants d'une distance finie sont décalés dans le temps d'une durée égale au rapport de cette distance par la vitesse de propagation. En outre, ces propagations ne sont pas identiques à cause de l'altération subie par le signal le long de sa propagation. Par conséquent, le mouvement sismique représente deux types de variation temporelle et une variation spatiale.

I.1.2. Ondes sismiques :

La secousse sismique se propage à partir du foyer sous forme d'ondes de divers types, qui nous donnent un mouvement complexe à la surface vu l'hétérogénéité du sol et des conditions géologiques du site.

On peut distinguer les types d'ondes suivants :

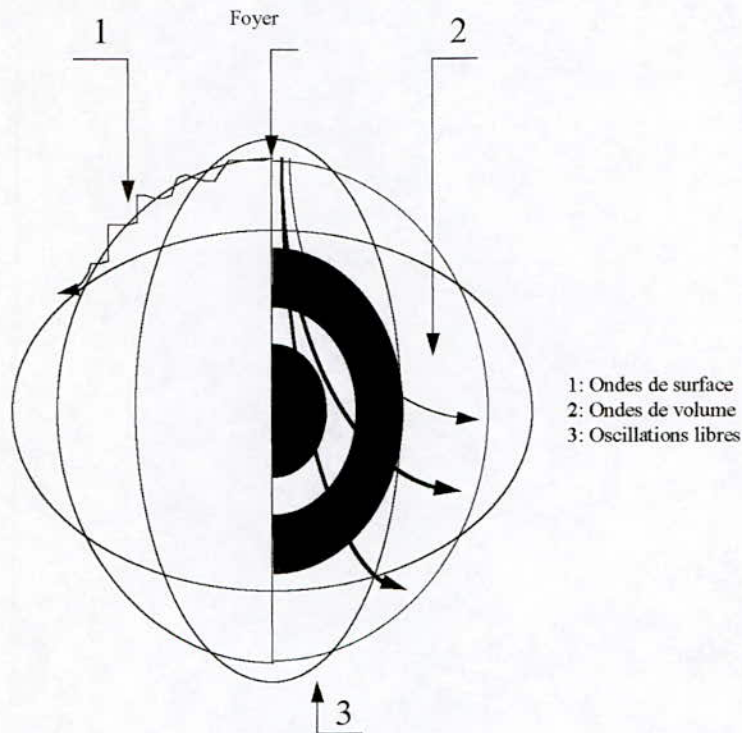


Fig. (I.1) : Types d'ondes

I.1.2.1. Ondes de volumes :

Quand une perturbation se produit à l'intérieur d'un solide homogène et isotrope, deux sortes d'ondes élastiques prennent naissance et se propagent dans toutes les directions :

- **Ondes « P » (ondes primaires) ou ondes longitudinales :**

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

Elles ont une vitesse de 7 à 8 km/s.

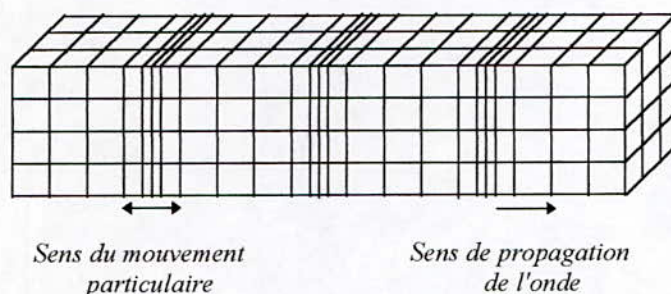


Fig. (I.2) : Mouvement des particules de sol au passage d'ondes P

- Ondes « S » (ondes de surface) ou ondes transversales :

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 propagation. Ces ondes sont les plus dangereuses pour les constructions.

Les ondes transversales ne peuvent se propager dans les milieux liquides ou gazeux, en raison de l'amplitude de ces milieux à transmettre les efforts de cisaillement.

Elles ont une vitesse de 4 à 5 km/s

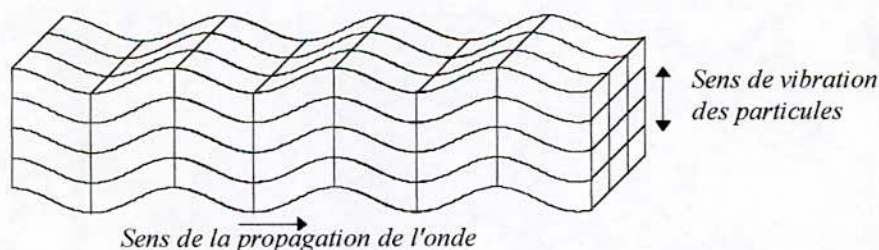


Fig. (I.3) : Mouvement des particules de sol au passage d'ondes S

I.1.2.2. Ondes de surface :

En arrivant à la surface, les ondes de volume produisent des ondes de surface qui affectent le sol sur une faible profondeur.

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.1.3. Caractérisation du mouvement sismique :

I.1.3.1. Paramètres caractéristiques du mouvement sismique:

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 digitilisation 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.1.3.2. Définitions :**a - L'épicentre géométrique:**

L'épicentre géométrique est la projection verticale du foyer sismique sur la surface libre (Voir fig. I.4).

b - La distance focale:

La distance focale d'un bâtiment est la distance qui le sépare du foyer sismique (Voir fig. I.4).

c - La distance épacentrale:

La distance épacentrale d'un bâtiment est la distance qui le sépare de l'épicentre géométrique (fig. I.4).

d - L'épicentre d'observation:

C'est le site où se produit le maximum de dégâts lors d'un séisme . Il n'est pas forcément confondu avec l'épicentre géométrique (fig. I.4).

e - Le foyer au centre: (hypocentre)

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

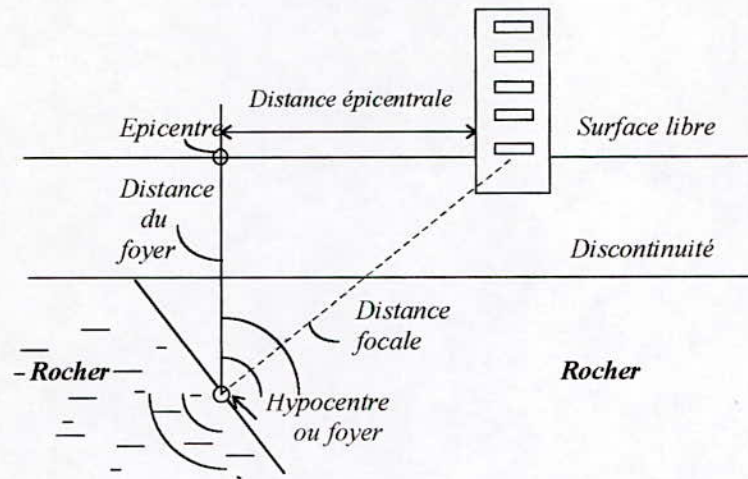


Fig. (I.4) : Caractéristiques du mouvement sismique

I.1.3.3. Durée d'un séisme :

La durée d'un séisme est très variable mais toujours brève (quelques secondes à quelques dizaines de secondes).

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 par :

$$h(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2 dt}{\int_0^T [a(t)]^2 dt} \quad h(t) : \text{est appelée tracé d'HUSID}$$

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*.

I.1.3.4. 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 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.2. Variabilité spatiale :

Les observations faites sur des enregistrements des mouvements sismiques en champ libre montrent que ceux-ci varient de manière significative sur des distances relativement faibles de l'ordre de la dizaine de mètres. Ce phénomène sera caractérisé dans ce qui suit par le concept de *la variabilité spatiale*.

Ainsi, la variabilité spatiale en champ libre a des effets non négligeables sur la réponse des structures étendues ou reposant sur des supports multiples. La quantification et la prise en compte de ce phénomène, s'avère une opération indispensable lors de la conception et du calcul de telles structures, sujettes à des sollicitations sismiques. Cela a été constaté après les observation des récents séisme.

Par conséquent, le mouvement agissant sur des structures relativement étendues, telles que les conduites, les ponts, les tunnels ...etc, ou sur des structures à supports multiples, ne peut être considéré comme étant uniforme mais plutôt variable tout le long de la base de ce type d'ouvrages.

Durant un séisme, une structure étendue ou à supports multiples est soumise non seulement aux forces d'inertie (due au chargement dynamique supposé uniforme) mais aussi à des forces additionnelles (engendrées par le mouvement différentiel des appuis) résultant de la variation spatiale du déplacement du sol. Cette caractéristique des mouvements forts est la source principale des forces sismiques agissant sur les structures souterraines (telles que les conduites, les réservoirs enterrés et les souterrains).

La variabilité spatiale peut être aussi l'origine des effets de torsion qui naissent dans les installations importantes caractérisées par de larges fondations, ainsi que des réductions des forces d'inertie qui y sont produites. Il est donc évident que les mouvements forts de sol exhibent outre une variabilité temporelle, une variabilité spatiale, la première a fait l'objet des travaux de recherche assez élaborés, mettant à la disposition de l'ingénieur des outils permettant actuellement sa prise en compte de manière relativement aisée.

En revanche, la variabilité spatiale reste un domaine peu développé car son étude nécessite la mise en place de denses réseaux de mesures destinés à enregistrer les mouvements forts engendrant ainsi des dépenses importantes pour l'acquisition d'un matériel spécifique.

I.3. Fonction de cohérence :

I.3.1. Définitions :

Pour définir la fonction de cohérence, on doit tout d'abord définir la covariance entre deux mouvements observés en deux points « u » et « u' » :

$$\begin{aligned} B(u, u', t, t') &= E[(X(u, t) - m_x)(X(u', t) - m_x)] \\ &= B(u-u', t-t') = B(v, \tau) \end{aligned} \quad (I.1)$$

τ étant égale à $(t-t')$

v est égale à $(u-u')$

m_x est la moyenne du processus $X(t)$

La fonction de la densité inter-spectrale spatiale $C(v, f)$ est obtenue par l'équation suivante :

$$C(v, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(v, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (I.2)$$

f : représente la fréquence.

Quand les deux localisations spatiales des mouvements sont les mêmes, c'est à dire :

$$u-u' = v = 0$$

alors :

$B(0, \tau)$ est noté $B(\tau)$ et $C(0, f)$ est noté $S(f)$

Dans ce cas, l'équation (I.2) se réduit à la relation unidimensionnelle de Wiener-Khintchine soit $B(\tau)$ et $S(f)$.

Nous définissons la fonction de cohérence par la fonction de densité inter-spectrale normalisée par sa valeur à $\nu = 0$, soit :

$$\gamma_{kl}(f) = \frac{C(\nu, f)}{C(0, f)} = \frac{C(\nu, f)}{S(f)} \quad (I.3)$$

I.3.2. Caractéristiques de la fonction de cohérence $\gamma_{kl}(f)$:

La fonction de cohérence γ_{kl} est généralement une valeur complexe, son module est compris entre 0 et 1 ($0 \leq |\gamma_{kl}(f)| \leq 1$). Elle est aussi une mesure de dépendance linéaire statistique entre les deux processus.

Si $\gamma_{kl} = 1$: la dépendance linéaire entre les deux stations est parfaite.

Si $\gamma_{kl} = 0$: il y a un manque complet de dépendance linéaire entre les deux stations qui est équivalent à une indépendance statistique si les processus sont des processus de Gauss.

L'équation (I.3) peut s'écrire sous la forme :

$$\gamma_{kl}(f) = |\gamma_{kl}(f)| e^{i \theta_{kl}(f)} \quad (I.4)$$

où $i = \sqrt{-1}$ et

$$\theta_{kl}(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im } \gamma_{kl}(f)}{\text{Re } \gamma_{kl}(f)} \quad (I.5)$$

est l'angle de phase de la dépendance fréquentielle, où « Im » et « Re » représentent les parties imaginaire et réelle d'une fonction complexe.

Dans l'équation (I.4), les deux termes caractérisent les différents effets de la variabilité spatiale. Le terme réel $|\gamma_{kl}(f)|$ caractérise l'effet d'incohérence, alors que le terme complexe $e^{i\theta_{kl}(f)}$ caractérise l'effet du passage d'onde et de l'effet de site. Le dernier terme représente la différence de phase entre les deux processus.

I.4. Densité spectrale :

Nous caractérisons la densité spectrale du mouvement en un site donné à partir de l'expression du modèle sismologique du spectre de source défini par [2] et repris par [3], et dont l'expression est donnée par :

$$A(f) = R_{\theta\phi} \frac{M_0}{4\pi\rho\beta^3} \frac{4\pi^2 f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^8} \right]^{1/2} \quad (I.6)$$

Où :

$R_{\theta\phi}$ est le facteur de radiation (il est défini ci-dessous)

M_0 est le moment sismique avec : $M_0 = \mu * d_0 * S$

μ est le coefficient de Lamé (pris égal à $3 * E + 11$)

d_0 est le glissement maximum (pris égal à 10 cm)

S est la surface de la faille ($S = 10 \text{ km}^2$)

f_c est la fréquence coin (prise égale à 2,038 Hz)

ρ est la masse volumique du milieu ($\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$)

β est la vitesse de propagation ($\beta = 6000 \text{ m/s}$)

f_m est la fréquence maximale dont la valeur est fixée dans notre étude à 15 Hz

Dans cette formule on a pris en considération l'effet de source, et cela par l'introduction du terme :

$$\left[\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_m} \right)^8} \right]^{1/2}$$

Tandis que l'effet de radiation des ondes de volume « S », est pris en considération par l'introduction du terme $R_{\theta\phi}$ qui est donné par la formule suivante :

$$R_{\theta\phi} = \sin(2\phi) \cos(\theta) \quad (I.7)$$

Où :

θ : est l'angle entre l'axe « z » et la droite source-récepteur (Voir la fig. I.5).

ϕ : est l'angle entre l'axe « x » et la projection de la droite source-récepteur sur le plan (Ox,Oy) (Voir la fig. I.5).

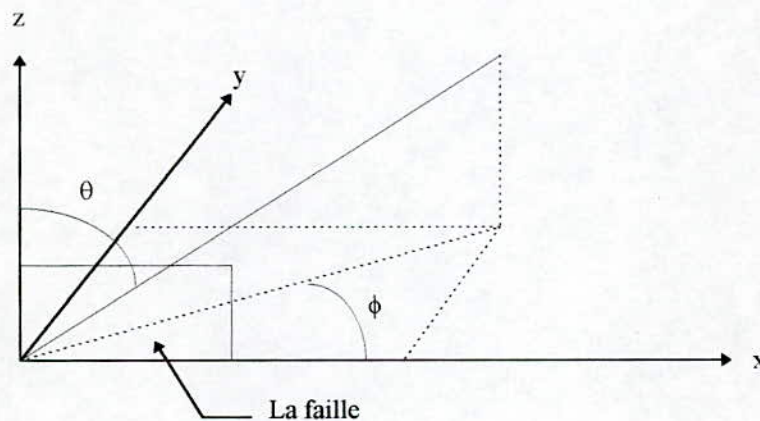


Fig. (I.5) : Représentation des paramètres de l'effet de radiation

I.5. Représentation discrète des processus en terme de fréquence :

On peut écrire la forme discrète d'un processus $a(t)$ comme suit :

$$a(t)^d = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (I.8)$$

Où

« d » rapporte la version discrète du processus.

i : l'indice associé à la fréquence, tel que : $f_i = (i - 1)\Delta f$

Δf étant l'incrément de fréquence conformément au théorème de NYQUIST.

A_i : l'amplitude de l'accélération à la station de réception

ω_i : l'impulsion, tel que : $\omega = 2\pi f$ « f » étant la fréquence.

ϕ_i : la phase à la station de réception

Chapitre II

EFFET D'INCOHERENCE

EFFET D'INCOHERENCE

II.1. Introduction :

L'effet d'incohérence des mouvements enregistrés en un site donné est dû à la dispersion des ondes dans le milieu hétérogène, domaine de leur propagation, ainsi qu'à leur superposition, du fait de leur provenance de différentes sources caractérisant la faille sismique.

Cet effet est dépend :

- de la distance « r » entre les sources et les stations d'enregistrement.
- de la fréquence d'onde « f ».
- du nombre d'interfaces rencontrées par l'onde le long du trajet source-récepteur.

En ce qui concerne les deux premières dépendances, qui sont l'objet de notre investigation dans ce chapitre, si la faille est en champ proche (c'est à dire $L^2 \ll \frac{\lambda r}{2}$ (Aki-Richards 1980)), les différents points sources sont alors supposés en foulure et la superposition des ondes qui en émanant se fait sans décalage temporel.

Dans le cas contraire (source en champ lointain, $L^2 > \frac{\lambda r}{2}$ (Aki-Richards 1980)), la superposition des ondes provenant des différents points sources se fait avec un décalage temporel représentant le temps de propagation « Δt » de la rupture d'un point source à un autre.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_f} \quad (\text{II.1})$$

Δx : représente la distance entre 2 points sources.

v_f : représente la vitesse de propagation de la rupture le long de la faille.

$v_f = 0,72 \beta$ β : vitesse de propagation de l'onde (fonction du milieu)

II.2. Représentation discrète des processus en terme de fréquence :

Considérons la version discrète de l'accélération développée à la station de réception « k » :

$$a_k(t)^{\text{incoherence}} = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (\text{II.2})$$

i : l'indice associé à la fréquence, tel que : $f_i = (i - 1)\Delta f$

Δf étant l'incrément de fréquence conformément au théorème de NYQUIST.

A_i : l'amplitude de l'accélération à la station « k »

ω_i : l'impulsion, tel que : $\omega = 2\pi f$ « f » étant la fréquence.

ϕ_i : la phase à la station « k » pour chaque fréquence.

L'accélération développée à une station de réception « l », située à une distance « d_{kl} » de la station « k », aura une amplitude d'onde et une phase différentes.

On peut écrire la version discrète de l'accélération à la station « l » comme suit :

$$a_l(t)^{\text{incoherence}} = \sum_{i=1}^n (p_{kl,i} A_i + q_{kl,i} B_i) \cos(\omega_i t + \phi_i + \xi_{kl}) \quad (\text{II.3})$$

Tel que :

$(p_{kl,i} A_i + q_{kl,i} B_i)$: l'amplitude de l'accélération à la station « l »

$\xi_{kl,i}$: la différence de phase entre les station « k » et « l », ayant comme moyenne 0 et comme variance $\alpha_{kl,i}^2$

B_i : l'amplitude à une station située à l'infini (station « b »).

$p_{kl,i}, q_{kl,i}$: les coefficients définis dans l'intervalle [0,1] tel que :

$$p_{kl,i}^2 + q_{kl,i}^2 = 1 \quad (\text{II.4})$$

Ces coefficients sont introduits pour commander l'ampleur d'incohérence entre les deux stations.

Il est préférable de mettre :

$p_{kl,i} = \cos(\beta_{kl,i})$ et $q_{kl,i} = \sin(\beta_{kl,i})$ pour satisfaire l'exigence (II.4)

où : $\beta_{kl,i}$ est un angle aigu, dépendant de la fréquence et de la distance entre les stations, et c'est pour cette raison qu'on va le noter $\beta(d_{kl}, f)$.

Pareil pour l'angle $\alpha_{kl,i}$ qu'on va noter : $\alpha_{kl,i}(d_{kl}, f)$

Comme $a_k(t)$ et $a_l(t)$ sont identiques quand d_{kl} tend vers zéro, on doit avoir :

$$\lim_{d_{kl} \rightarrow 0} \beta(d_{kl}, f) = \lim_{d_{kl} \rightarrow 0} \alpha(d_{kl}, f) = 0 \quad (\text{II.5})$$

Aussi, quand $f = 0$, on a une longueur d'onde infinie et le milieu est un corps rigide, ce qui donne une cohésion parfaite. D'où on a :

$$\lim_{f \rightarrow 0} \beta(d_{kl}, f) = \lim_{f \rightarrow 0} \alpha(d_{kl}, f) = 0 \quad (\text{II.6})$$

Tandis que si d_{kl} tend vers l'infini, ou si f tend vers l'infini, nous devons avoir l'incohérence parfaite entre les deux mouvements. D'où les tendances suivantes :

$$\lim_{d_{kl} \rightarrow \infty} \beta(d_{kl}, f) = \lim_{f \rightarrow \infty} \beta(d_{kl}, f) = \frac{\pi}{2} \quad (\text{II.7})$$

$$\lim_{d_{kl} \rightarrow \infty} \alpha(d_{kl}, f) = \lim_{f \rightarrow \infty} \alpha(d_{kl}, f) = \infty$$

II.3. Fonction de cohérence :

Comme il a été déjà dit auparavant, l'effet d'incohérence est caractérisé par sa fonction de cohérence :

$$\gamma_{kl}(f) = \cos[\beta(d_{kl}, f)] e^{-\frac{1}{2}\alpha^2(d_{kl}, f)} \quad (\text{II.8})$$

II.4. Etude des paramètres caractérisant l'effet d'incohérence :

Dans ce paragraphe, on étudiera les variations de la densité spectrale et la fonction de cohérence, ainsi que la variation de β et de α .

Pour cela, on suppose que la faille est verticale avec cinq points sources distant l'un de l'autre de 750 m, et que le premier point source se trouve à 500 m de la surface. On suppose aussi que le milieu est un demi espace homogène, isotrope et élastique.

On détermine ensuite les densités spectrales à la station de référence fixe « k » et à la station de réception « l » qui se situe à une distance « d_{kl} » de la station « k ».

Dans le travail qui va suivre, on prend quatre valeurs de « d_{kl} », on compare ensuite les résultats obtenus pour deux cas :

II.4.1. Cas où la station « k » se situe à l'épicentre : (Voir fig. II.1)

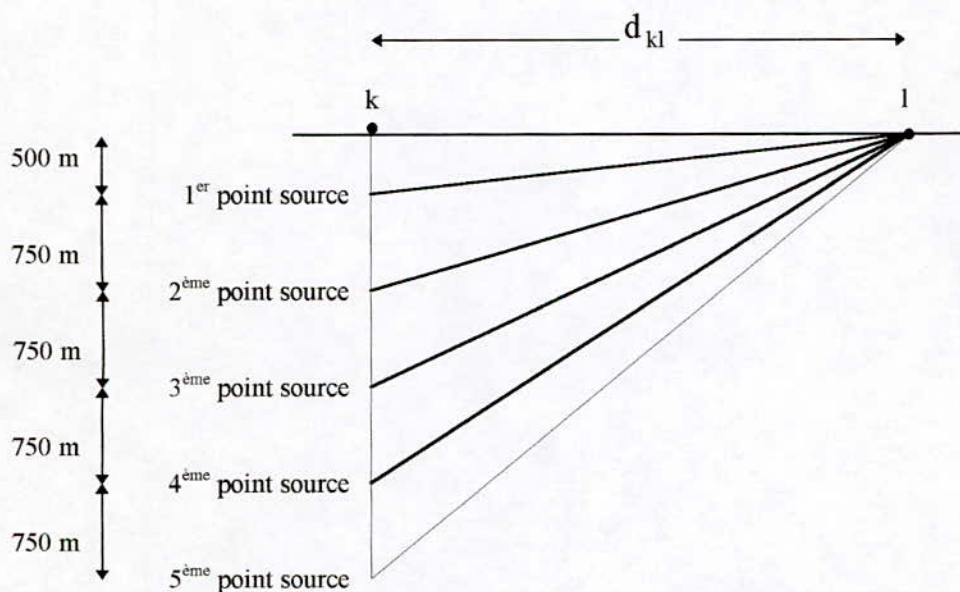


Fig. (II.1) : Cas où « k » se trouve à l'épicentre

a) Variation de la densité spectrale :

Les graphes de la densités spectrales en fonction de la fréquences faits pour plusieurs valeurs de d_{kl} sont représentés comme suit :

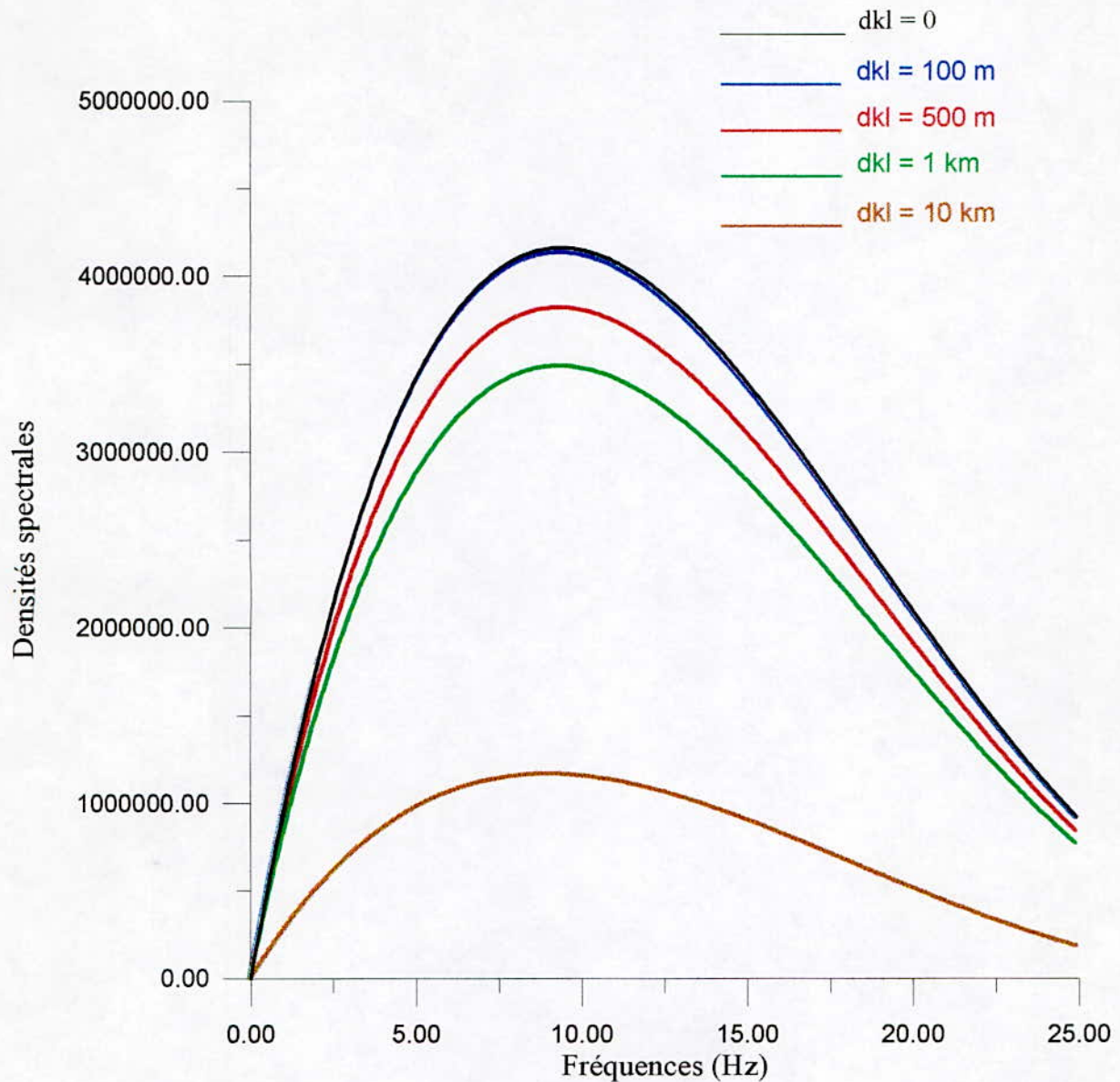


Fig. (II.2.) : Variation des densités spectrales

Ces graphes montrent que la fonction de la densité spectrale diminue avec l'augmentation de la distance « d_{kl} ».

En effet, la fonction de la densité spectrale est maximale à la station de référence « k » et diminue considérablement en s'éloignant de cette station.

Cependant, en fonction de la fréquence, la densité spectrale augmente montre une nette augmentation pour les basses fréquences (entre 0 et 10 Hz) puis elle diminue pour les autres valeurs de fréquence.

b) Variation de la fonction de cohérence :

L'étude de la fonction de cohérence pour les différentes valeurs de « d_{kl} » (100m, 500m, 1 km, 5 km et 10 km) a donné les graphes suivants :

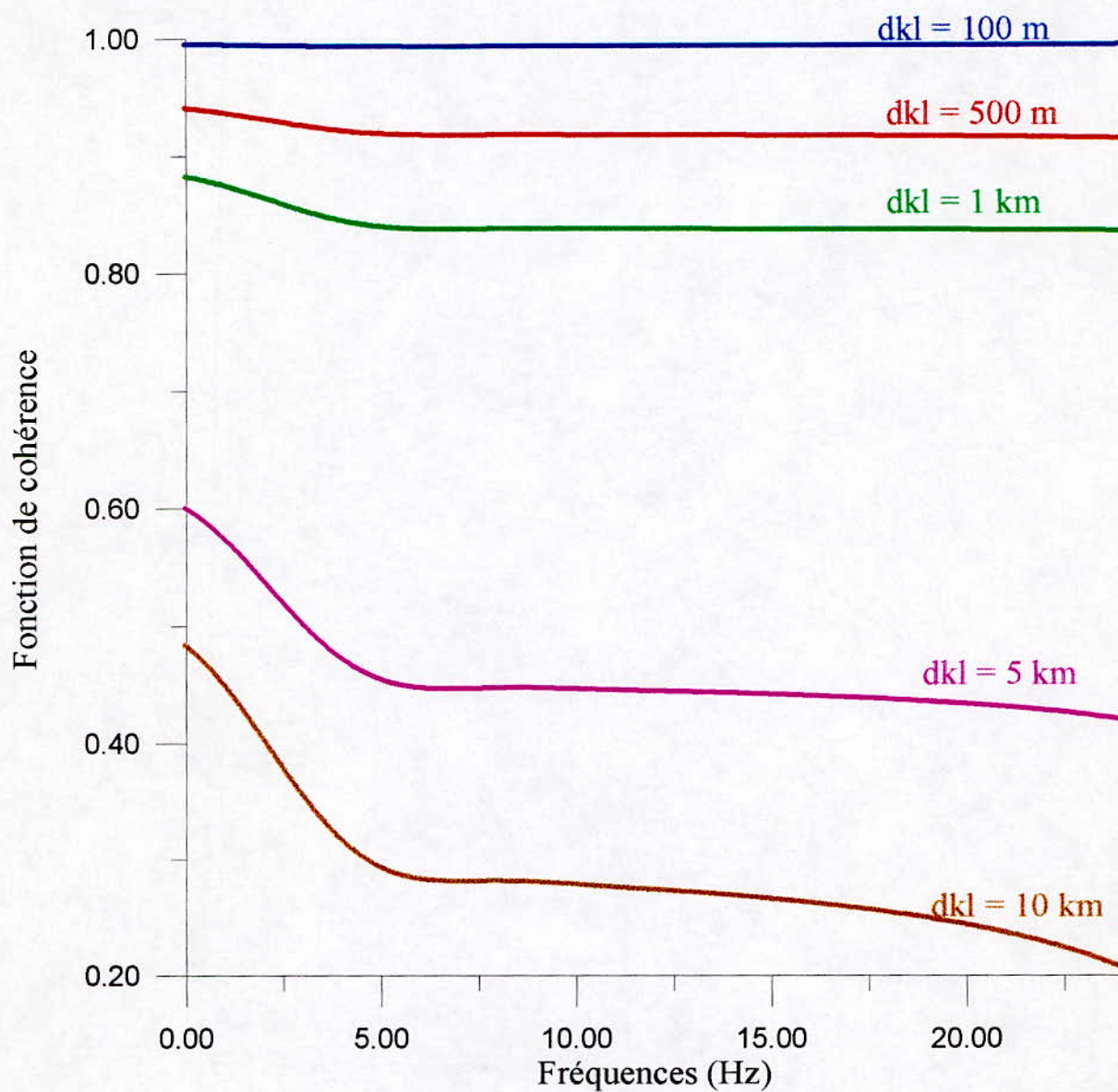


Fig. (II.3.) : Variation de la fonction de cohérence

Pour une distance « d_{kl} » relativement petite, la fonction de cohérence est proche de 1. Cette fonction commence à décroître en augmentant « d_{kl} » pour arriver à de très faibles valeurs pour « d_{kl} » important (de l'ordre de 10 km par exemple)

Pour chaque valeur de « d_{kl} », la fonction de cohérence décroît en augmentant la fréquence, cette décroissance est très significative pour les valeurs importantes de « d_{kl} », cela est très net pour la valeur de 10 km où la valeur de la fonction de cohérence pour les basses est plus grande que celle des fréquences moyennes.

c) Variation de l'angle « β » :

Dans ce paragraphe, on va tracer les graphes de l'angle « β » pour les différentes valeurs de « d_{kl} » allant de 100 m à 10 km.

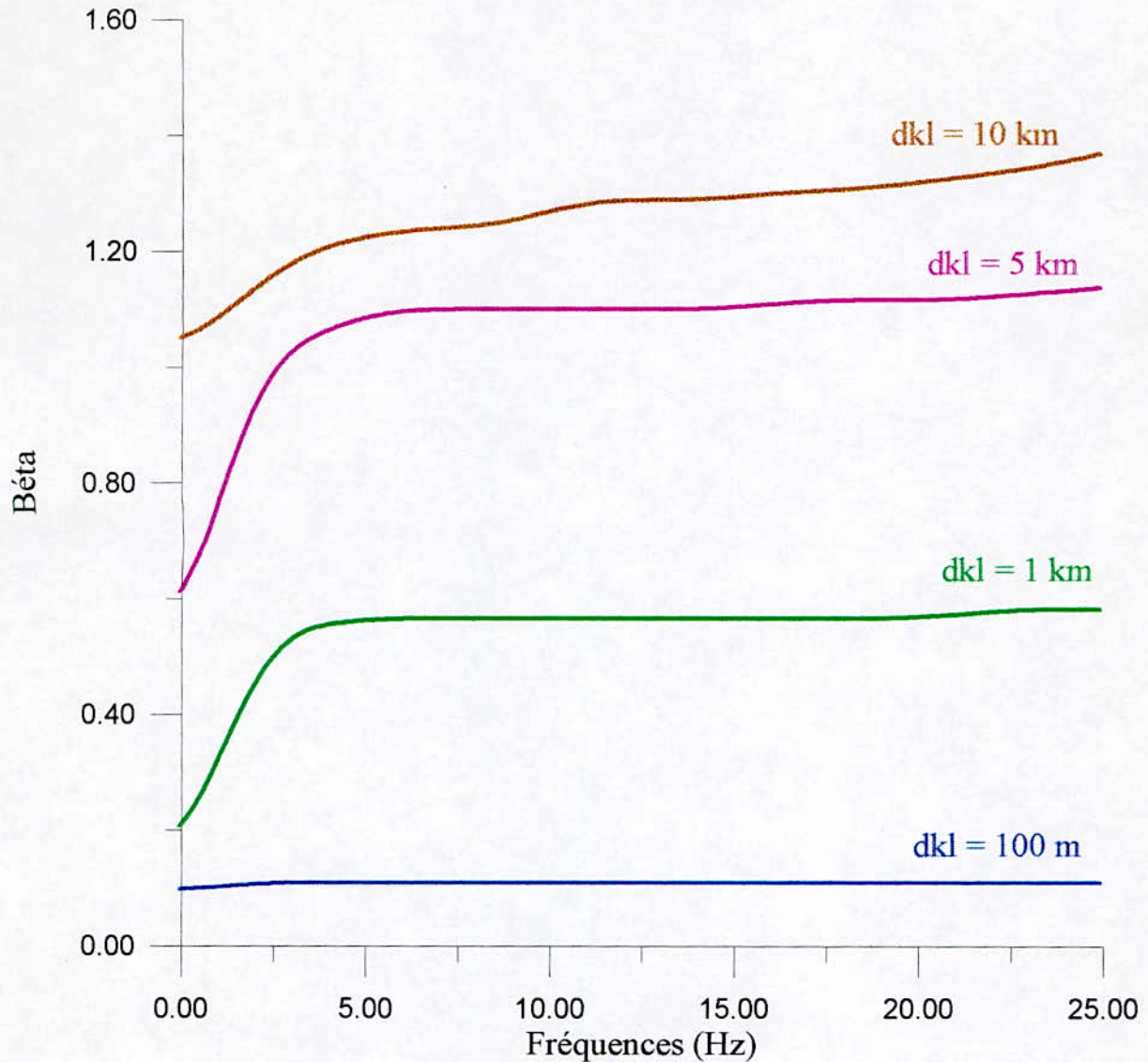


Fig. (II.4.) : Variation de l'angle « β »

Il est très clair que les valeurs de « β » augmente avec l'augmentation de la distance entre les deux station.

En effet, pour $d_{kl} = 10 \text{ km}$, la valeur de « β » tend vers 1,5. Ce qui nous montre la

tendance $\lim_{d_{kl} \rightarrow \infty} \beta(d_{kl}, f) = \frac{\Pi}{2} = 1.57$ vue précédemment.

Par contre, pour les petites valeurs de « d_{kl} », l'angle « β » est de l'ordre de 0,1 Rad, c'est à dire qu'elle tend vers zéro.

En revanche, « β » augmente avec l'augmentation de la fréquence « f », mais cela reste insuffisant pour voir la tendance de « β » quand la fréquence tend vers l'infini.

d) Variation de la valeur de « α » :

On trace les graphes de « $\alpha(f)$ » pour les valeurs 100m, 1 km, 5 km et 10 km de d_{kl} , ce qui nous donne :

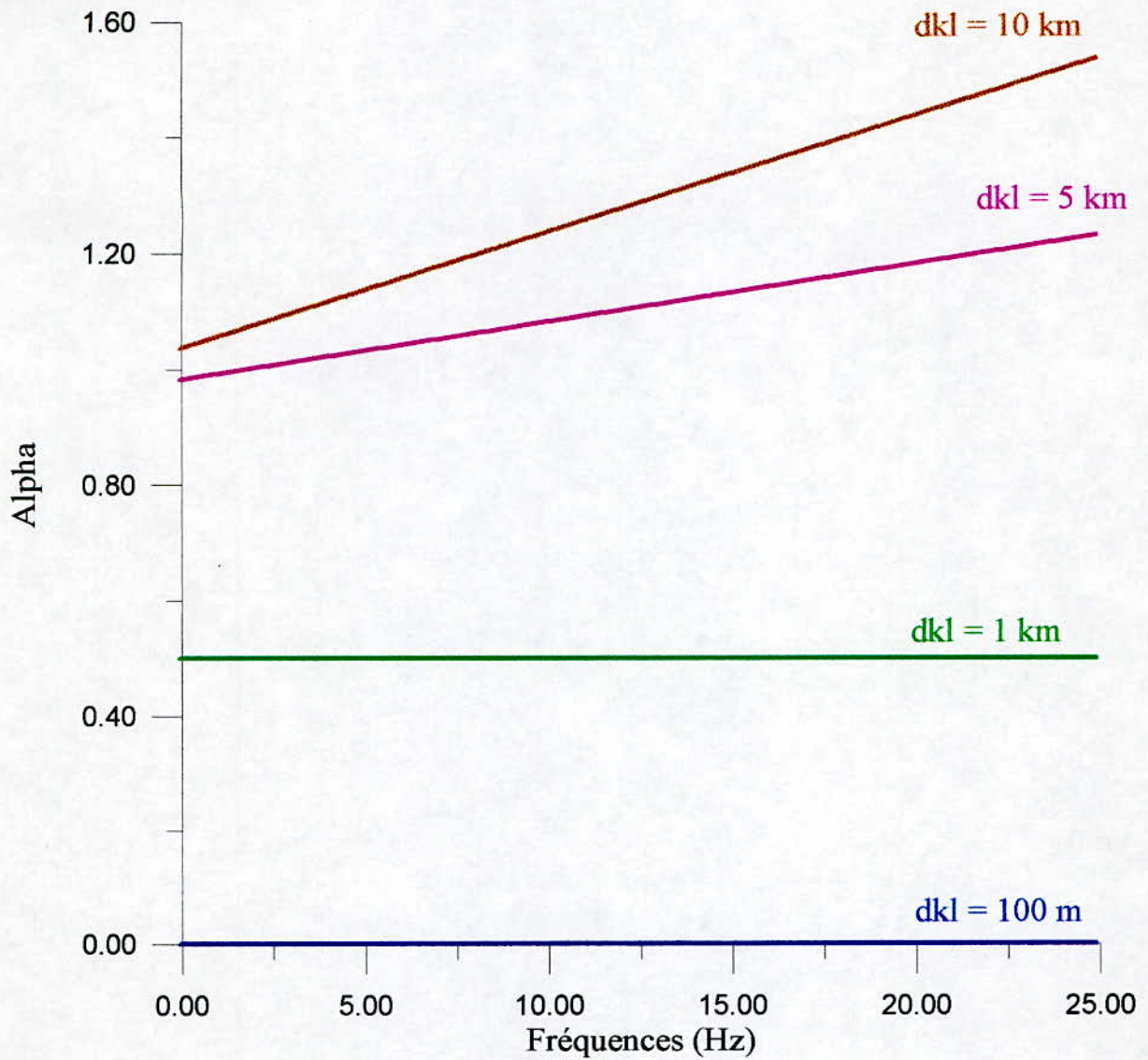


Fig. (II.5.) : Variation de « α »

De ces graphes on peut bien confirmer que $\lim_{d_{kl} \rightarrow 0} \alpha(d_{kl}, f) = 0$, car pour une valeur de d_{kl} relativement petite, la valeur de « α » est nulle quelque soit la fréquence, et cela est traduit par le graphe $\alpha(d_{kl}, f)$ pour $d_{kl} = 100$ m.

Ces graphes illustrent l'augmentation de « α » avec l'augmentation de la fréquence et cela est une preuve que $\lim_{f \rightarrow \infty} \alpha(d_{kl}, f) = \infty$. Cependant, il reste très difficile de démontrer que $\lim_{d_{kl} \rightarrow \infty} \alpha(d_{kl}, f) = \infty$, en balayant toutes les fréquences, mais cette limite est très clair pour les hautes fréquence et cela peut se traduire par l'écriture :

$$\lim_{\substack{d_{kl} \rightarrow \infty \\ f \rightarrow \infty}} \alpha(d_{kl}, f) = \infty$$

II.4.2. Cas où la station « k » se situe à une distance « d_k » de l'épicentre :

Dans ce cas on maintient une distance constante entre les deux stations « k » et « l » et on fait varier la distance « d_k » (500 m par exemple), qui est la distance entre la station de réception « k » et l'épicentre. (Voir la figure II.6)

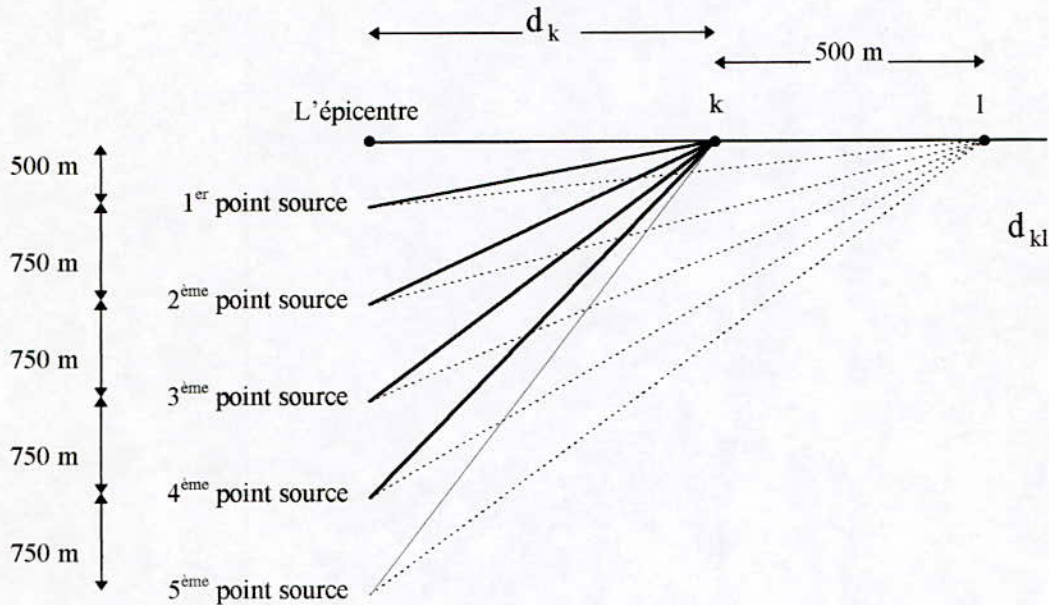


Fig. (II.6) : Cas où « k » se trouve à une certaine distance de l'épicentre

Pour bien illustrer la variation de la fonction de cohérence pour différentes valeurs de « d_k », on a tracé des graphes de cette fonction pour quatre valeurs de la distance « d_k » (100m, 5 km et 10 km).

Ces graphes ont donné les allures suivantes :

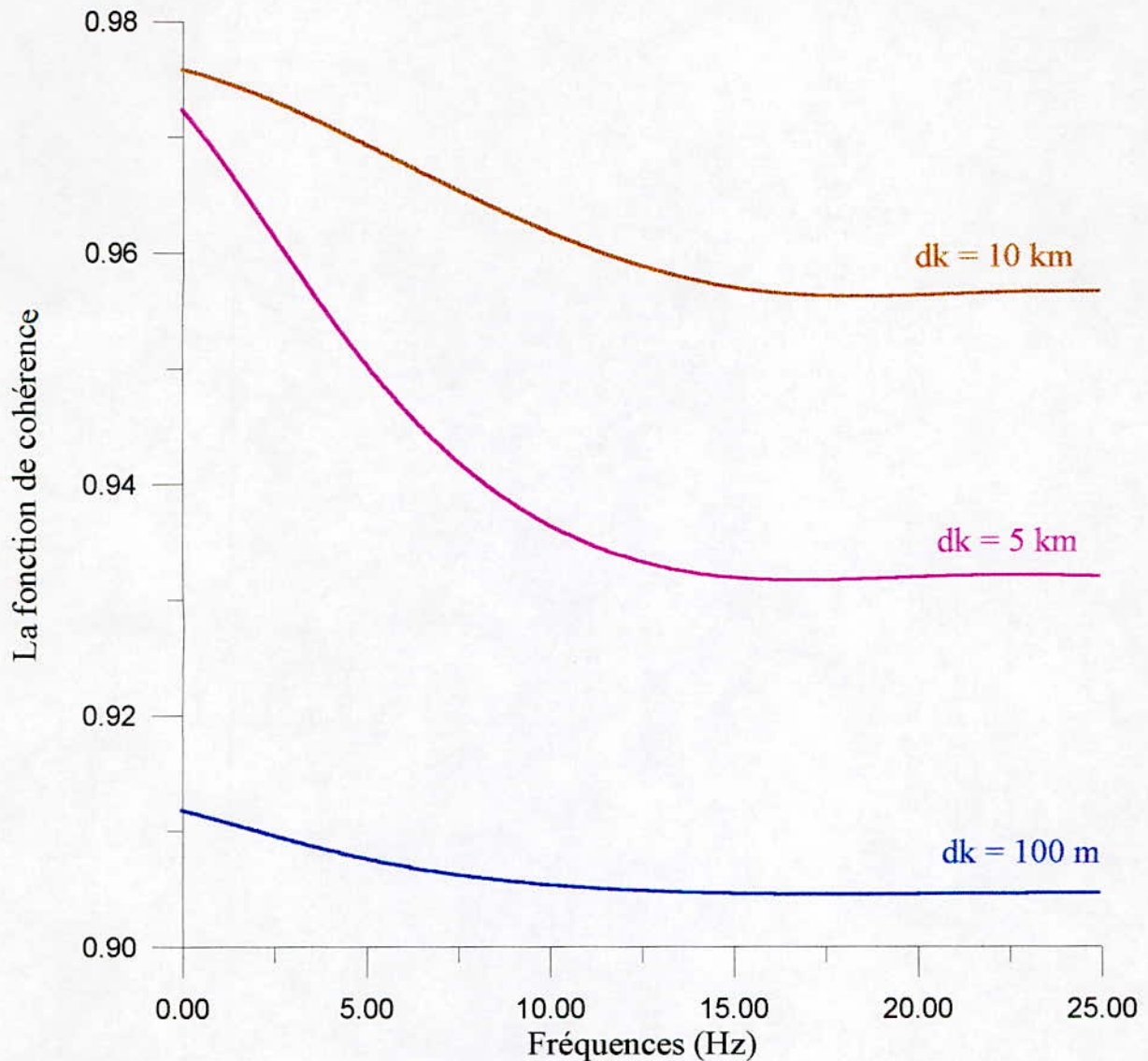


Fig. (II.7) : Variation de la fonction de cohérence

Les graphes nous permettent de voir clairement que les valeurs de la fonction de cohérence est comprise entre 0,9 et 1 , puisque la distance entre les stations reste inéchangeable.

Un autre résultat très évident, qu'en s'approchant de l'épicentre, la fonction de cohérence diminue.

En effet, pour $d_k = 10$ km, les valeurs de la fonction de cohérence sont comprises entre [0,96 et 0,98]. Ces valeurs diminuent pour $d_k = 5$ km, jusqu'à atteindre sa plus basse valeur pour $d_k = 100$ m.

Chapitre III

EFFET DU PASSAGE D'ONDE

EFFET DU PASSAGE D'ONDE

III.1. Introduction :

Considérant les ondes planes arrivant aux station « k » et « l » avec un angle d'incidence « ψ ». Pour estimer le retard fait de l'arrivée de l'onde à la station « l », on peut écrire la forme discrète du processus $a_l(t)^d$ comme suit :

$$a_k(t)^d = \sum_{i=1}^n (p_{kl,i}A_i + q_{kl,i}B_i) \cos[\omega_i(t - \tau_{kl,i}) + \phi_i + \xi_{kl}] \quad (\text{III.1})$$

Où :

$\tau_{kl,i}$: est le temps d'arrivée de la composante « i » de l'onde à la station « l », relativement à la station « k ».

La dispersion des ondes nous permet d'écrire :

$$\tau_{kl,i} = \frac{d_{kl}^L \sin(\psi)}{v(f)} = \frac{d_{kl}^L}{v_{\text{app}}(f)} \quad (\text{III.2})$$

Où :

d_{kl}^L : est la propagation de la distance entre les deux stations le long de la direction de propagation des ondes sur la surface du sol.

v_{app} : est la vitesse apparente de l'onde $v_{\text{app}}(f) = \frac{v(f)}{\sin(\psi)}$

III.2. Fonction de cohérence :

On note ici que dans l'équation (III.1), on a introduit l'effet d'incohérence entre les deux stations, comme on a fait précédemment, c'est à dire qu'on a utilisé la fonction d'inter corrélation entre les deux processus $a_k(t)^d$ et $a_l(t)^d$ en prenant leurs transformés de Fourier pour déterminer l'inter-densité spectrale. Après transformation

à une forme continue et en divisant par la racine carrée des densités spectrales des processus $a_k(t)^d$ et $a_l(t)^d$, on trouve que la fonction de cohérence est sous la forme :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{incohérence+passage d'onde}} = \cos[\beta(d_{kl}, f)] e^{\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(d_{kl}, f)\right]} e^{\left[-i\frac{2\pi f d_{kl}^L}{v_{\text{app}}(f)}\right]} \quad (\text{III.3})$$

En comparant cette fonction de cohérence qui introduit l'effet d'incohérence et du passage d'onde, avec la fonction de cohérence de l'effet d'incohérence, il est très clair que la composante de la fonction de cohérence due au passage d'onde est la suivante :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{passage d'onde}} = e^{\left[-i\frac{2\pi f d_{kl}^L}{v_{\text{app}}(f)}\right]} \quad (\text{III.4})$$

La formulation précédente permet la dispersion des ondes sismiques causées par la dépendance de fréquence des vitesses d'ondes. Mais, pour les ondes planes, et dans un milieu infini élastique, les vitesses d'ondes (ondes de volume) sont indépendante de la fréquence et la formule ci-dessus sera simplifiée :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{passage d'onde}} = e^{\left[-i\frac{2\pi f d_{kl}^L}{v_{\text{app}}}\right]} \quad (\text{III.5})$$

Avec v_{app} est constante.

III.3. Définition de la phase $\theta_{kl}(f)$:

L'équation (III.4) est une forme générale pour déterminer l'effet de dispersion des ondes, qui est importante quand le milieu est considéré non linéaire et non élastique. Il est clair en comparant l'équation (III.4) à l'équation :

$$\gamma_{kl}(f) = |\gamma_{kl}| e^{i\theta_{kl}(f)} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{que : } \theta_{kl} = -\frac{2\pi f d_{kl}^L}{v_{\text{app}}} \quad (\text{III.7})$$

La phase θ est proportionnelle à la fréquence et à la distance entre les deux stations, et inversement proportionnelle à la vitesse de l'onde.

III.4. Etude du décalage temporel « τ_{kl} » :

Afin d'illustrer la variation de « τ_{kl} » en fonction de la fréquence et de la distance « d_{kl} », on trace les graphes $\tau_{kl}(f)$ pour des différentes valeurs de « d_{kl} » (100m, 500m, 1 km et 10km)

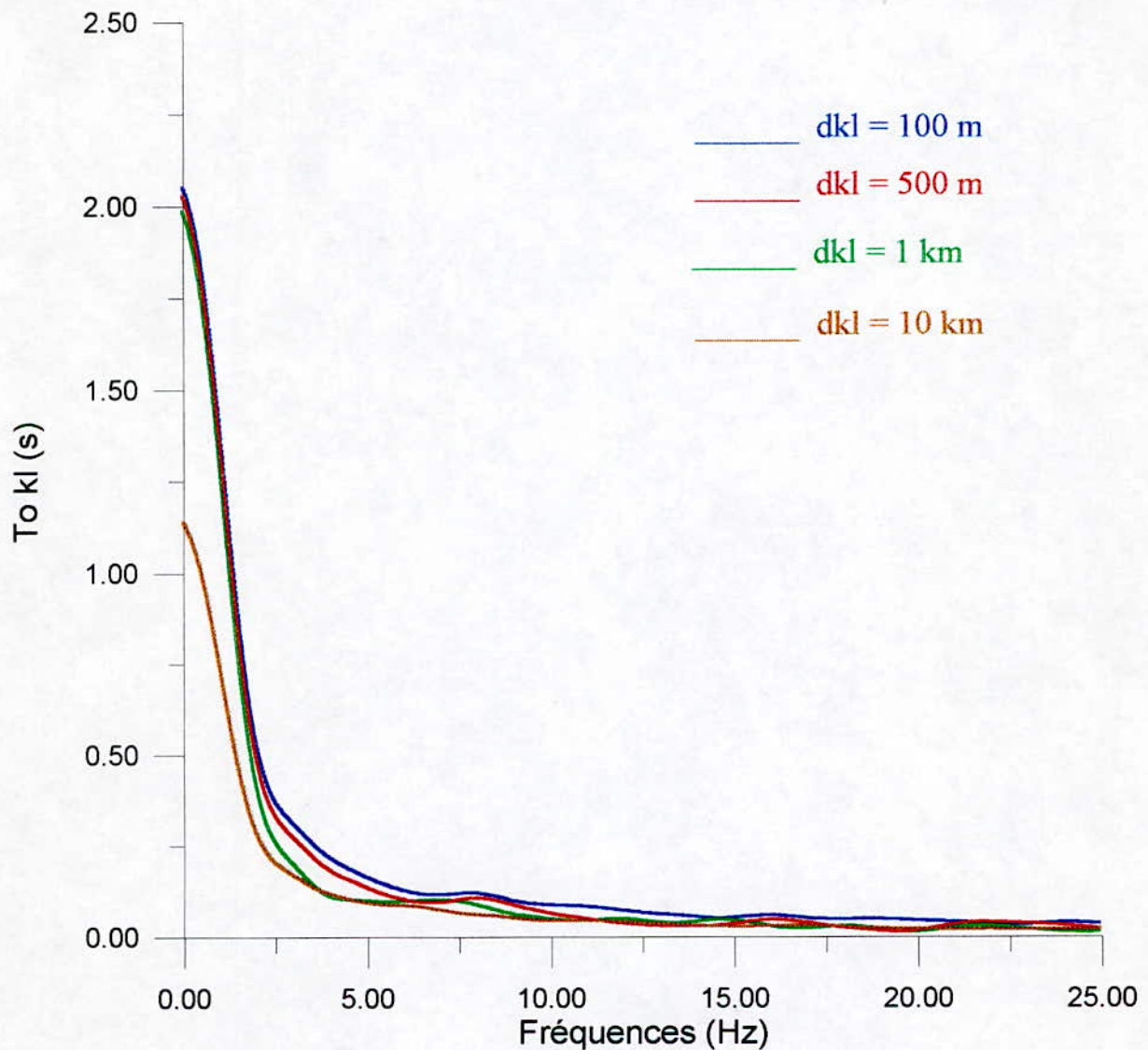


Fig. (III.1) : Variation du décalage temporel τ_{kl}

On remarque clairement que $\tau_{kl}(f)$ est une fonction décroissante, cela bien sur est dû au fait que la vitesse apparente soit en fonction de la fréquence.

Le décalage temporel « τ_{kl} » est très important pour les basses fréquence, puis elle devient de plus en plus faible en se progressant dans la fréquence.

Tandis que la diminution de la valeur de « τ_{kl} » reste faible surtout pour des incréments de « d_{kl} » très petits. Par contre, pour les basses fréquences, on peut aisément remarquer une diminution très significative de « τ_{kl} » pour des incréments relativement élevés. Cependant, « τ_{kl} » tend à s'annuler pour les hautes fréquences, et cela peut être expliqué du fait que pour les basses fréquences, la longueur d'onde soit très grande par rapport à celle des hautes fréquences.

Chapitre IV

EFFET D'ATTENUATION

EFFET D'ATTENUATION

IV.1. Introduction :

L'atténuation est due au déploiement géométrique et l'amortissement du milieu et à la diffraction des ondes, cette dernière diminue l'amplitude de chaque composante d'onde. En général l'amplitude est une fonction de la fréquence (les hautes fréquences tendent à les atténuer plus rapidement) et de la distance de la source de séisme.

IV.2. Types d'atténuation :

Il existe deux sortes d'atténuation :

IV.2.1. Atténuation géométrique :

Cette atténuation est caractérisée dans un milieu homogène, élastique, isotrope et continu.

En s'éloignant de la source, l'énergie de l'onde sismique par unité de surface diminue. En effet, l'énergie engendrée par la rupture de la faille se disperse de telle manière qu'à une distance « r » la même quantité d'énergie occupe une plus grande surface. En comparant l'énergie par unité de surface à cette distance « r » avec celle de la source, on constate une nette diminution, donc il y a une atténuation due à la géométrie, ce qui explique la présence du terme « $1/r$ » dans l'expression de l'amplitude.

IV.2.2. Atténuation intrinsèque :

elle est due au comportement anélastique du milieu, qui engendre une atténuation du mouvement en fonction du temps provoquée par les différents frottements entre les grains constituant ce milieu.

Cette atténuation représente le taux d'énergie dissipée durant une période « T », c'est à dire entre deux points situés à une distance « λ ».

La représentation d'énergie est tel que :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{Q\beta} = 2\gamma\lambda$$

$$\gamma = \frac{2\Pi}{Q2\lambda} = \frac{\Pi}{Q\beta T} = \frac{\omega}{2Q\beta}$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{\Pi f}{Q\beta}$$

$$U = U_0 e^{-\gamma x} e^{i(kx - \omega t)}$$

Le terme $e^{-\gamma r} = e^{-\frac{\Pi f}{Q\beta} r}$ représente l'atténuation

Par conséquent, pour tenir compte de cette dissipation d'énergie, l'amplitude du mouvement s'exprime par :

$$e^{-\frac{\Pi f}{\beta Q(f)} r} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Où : } Q(f) = 29,4 \frac{1 + \left(\frac{f}{0,3}\right)^{2,9}}{\left(\frac{f}{0,3}\right)^2}$$

IV.3. Fonction d'atténuation :

IV.3.1. Définition :

Afin de bien définir l'effet d'atténuation, on définit la fonction d'atténuation « P », qui prend en considération les deux types d'atténuation vus précédemment. Elle est décroissante de la fréquence « f » et de la distance « r » entre la source et les différentes stations de réception.

Nous notons que cette fonction ne représente pas les variations des amplitudes causées par la dispersion des ondes et de l'effet de site. Par ailleurs, elle représente la loi moyenne par laquelle les amplitudes des ondes chutent en décadence avec la distance.

La fonction « P » est définie comme suit :

$$P(f, r) = \frac{1}{r} e^{-\frac{\Pi f}{\beta Q(f)} r} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

r : La distance entre la source et la station de réception.

f : La fréquence.

β : La vitesse de propagation.

$Q(f)$: Le facteur de qualité, qui est fonction de la fréquence et qui a pour expression :

$$Q(f) = 29,4 \frac{1 + \left(\frac{f}{0,3}\right)^{2,9}}{\left(\frac{f}{0,3}\right)^2} \quad (\text{IV.2.1})$$

IV.3.2. Etude de la fonction d'atténuation :

Pour bien illustrer l'effet d'atténuation on a tracé la fonction d'atténuation « P » en fonction de la fréquence « f » pour trois valeurs de la distance « r » (50 km, 100 km et 150 km).

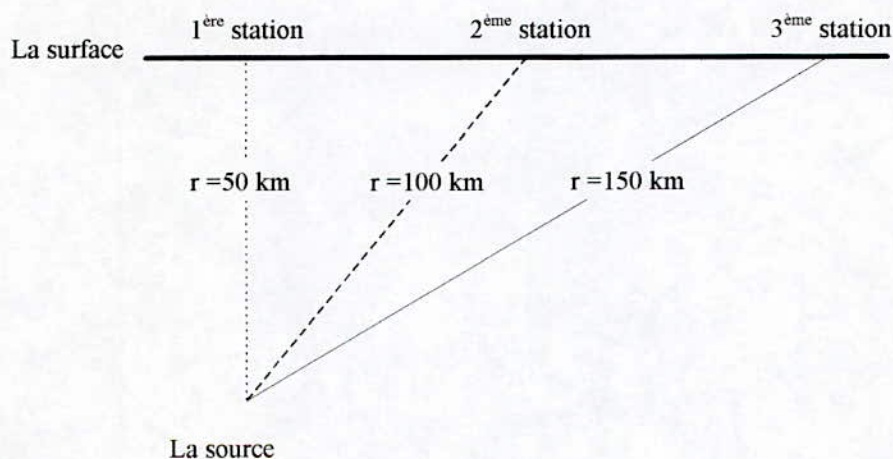


Fig. (IV.1) : Présentation de l'étude

Ce qui nous donne les graphes suivants :

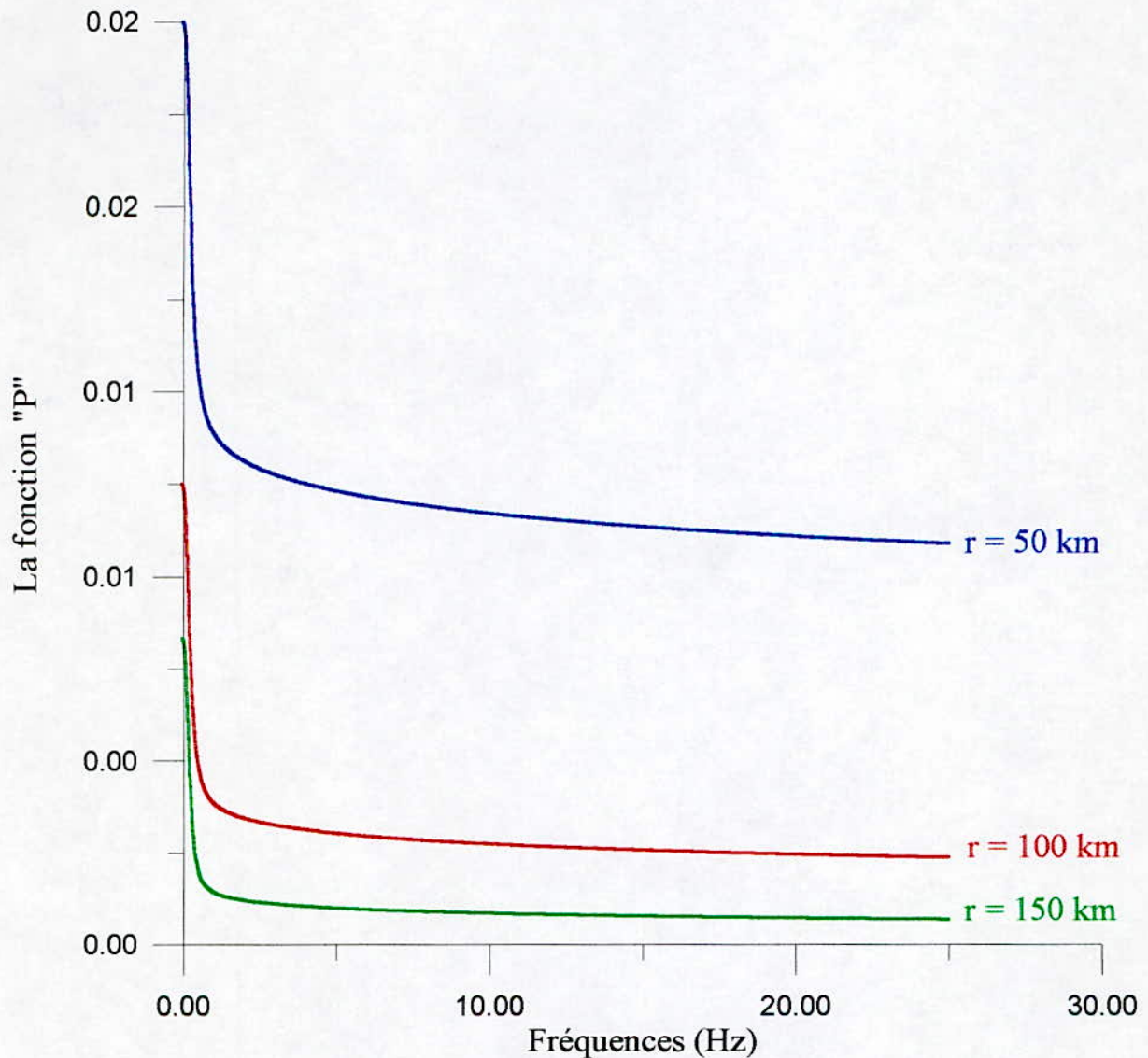


Fig. (IV.2) : graphe de $P(f, r)$

En comparant les trois graphes, il est très clair que les valeurs de la fonction d'atténuation « P » décroissent en faisant augmenter la valeur de « r ».

Comme on peut déduire aussi que la fonction « P » diminue avec l'augmentation de la fréquence. Ce qui est bien exprimé par les facteurs :

$$\ll \frac{1}{r} \gg \quad \text{et} \quad \ll e^{-\frac{\Pi f}{\beta Q(f)} r} \gg.$$

Il est à signaler aussi que la pente du graphe de « P » en fonction de « f » est très importante pour les basses fréquence, tandis que pour les valeurs de fréquence relativement grande (supérieur à 3 Hz), cette pente devient de plus en plus faible.

IV.4. Fonction de cohérence :

IV.4.1. Définitions :

Pour justifier les effets d'atténuation, nous écrivons les représentations discrètes des accélérations $a_k(t)$ et $a_l(t)$ respectivement aux stations « k » et « l » :

$$a_k(t)^{\text{attenuation}} = \sum_{i=1}^{npf} A_i P_k(f_i, r_k) \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (\text{IV.3})$$

$$a_k(t)^{\text{attenuation}} = \sum_{i=1}^{npf} (p_{kl,i} A_i + q_{kl,i} B_i) P_l(f_i, r_l) \cos[\omega_i (t - \tau_{kl,i}) + \phi_i + \xi_{kl,i}] \quad (\text{IV.4})$$

Où : La fonction d'atténuation $P_m(f_i, r_m) = \frac{1}{r_m} e^{-\frac{\Pi f_i}{\beta Q(f_i)} r_m}$ que nous supposons déterministe. Avec $0 \leq P_m(f_i, r_m) \leq 1$ pour $m = k, l$

A_i : l'amplitude de l'accélération à la station « k »

$(p_{kl,i} A_i + q_{kl,i} B_i)$: l'amplitude de l'accélération à la station « l »

B_i : l'amplitude à une station située à l'infini (station « b ») pour chaque fréquence.

$p_{kl,i}, q_{kl,i}$: ces coefficients sont définis précédemment (Chap. Effet d'incohérence)

ω_i : l'impulsion $\omega_i = 2\pi f_i$

ϕ_i : la phase à la station « k » pour chaque fréquence.

$\tau_{kl,i}$: le laps de temps de l'arrivée de la composante « i » de l'onde à la station « l » relativement à son arrivée à la station « k ».

$\xi_{kl,i}$: la différence de phase entre les station « k » et « l » pour chaque fréquence.

L'introduction du terme $P_m(f_i, r_m)$ dans les expressions des amplitudes des différentes ondes constituant le mouvement à la station « m », traduit l'effet conjugué de l'expansion géométrique et de l'amortissement du matériau.

L'auto densité spectrale et l'inter-densité spectrale pour les processus (IV.3) et (IV.4) sont déterminées par la fonction de l'inter-corrélation.

En prenant la transformé de Fourier, les résultats écrits sous une forme continue sont :

$$G_{a_k a_k}(f) = G_{aa}(f) \cdot P_k^2(f, r_k) \quad (IV.5)$$

$$G_{a_1 a_1}(f) = G_{aa}(f) \cdot P_1^2(f, r_1) \quad (IV.6)$$

$$G_{a_k a_1} = G_{aa}(f) \cos[\beta(d_{kl}, f)] e^{[-\frac{1}{2}\alpha^2(d_{kl}, f)]} e^{[-i\frac{2\pi f d_{kl}^L}{v_{app}(f)}]} P_k(f, r_k) P_1(f, r_1) \quad (IV.7)$$

Où :

$G_{aa}(f)$: l'auto densité spectrale commune des processus $a_k(t)$ et $a_1(t)$ en l'absence de l'effet d'atténuation.

β : l'angle qui dépend de la fréquence et des distances entre les station tel que :

$$\tan(\beta) = \frac{q_{kl,i}}{P_{kl,i}}$$

α^2 : la variance de la différence de phase $\xi_{kl,i}$.

v_{app} : la vitesse d'onde apparente.

d_{kl}^L : la projection de la distance d_{kl} le long de la direction de propagation des ondes sur la surface du sol

En supposant maintenant que les fonctions $P_k(f, r_k)$ et $P_1(f, r_1)$ sont aléatoires et indépendantes des amplitudes des ondes et de phases, on peut dire qu'à partir des équation (IV.5), (IV.6) et (IV.7) la composante de la fonction de cohérence due aux effets d'atténuation prend la forme suivante :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{attenuation}} = \frac{E[P_k(f, r_k)P_l(f, r_l)]}{\sqrt{E[P_k^2(f, r_k)P_l^2(f, r_l)]}} \quad (\text{IV.8})$$

IV.4.2. Etude de la fonction de cohérence :

Pour bien voir l'allure du graphe de la fonction de cohérence, on a tracé cette fonction qui dépend de la fréquence pour des valeurs moyennes des distances entre les différentes stations.

Ce qui nous a donné le graphe suivant :

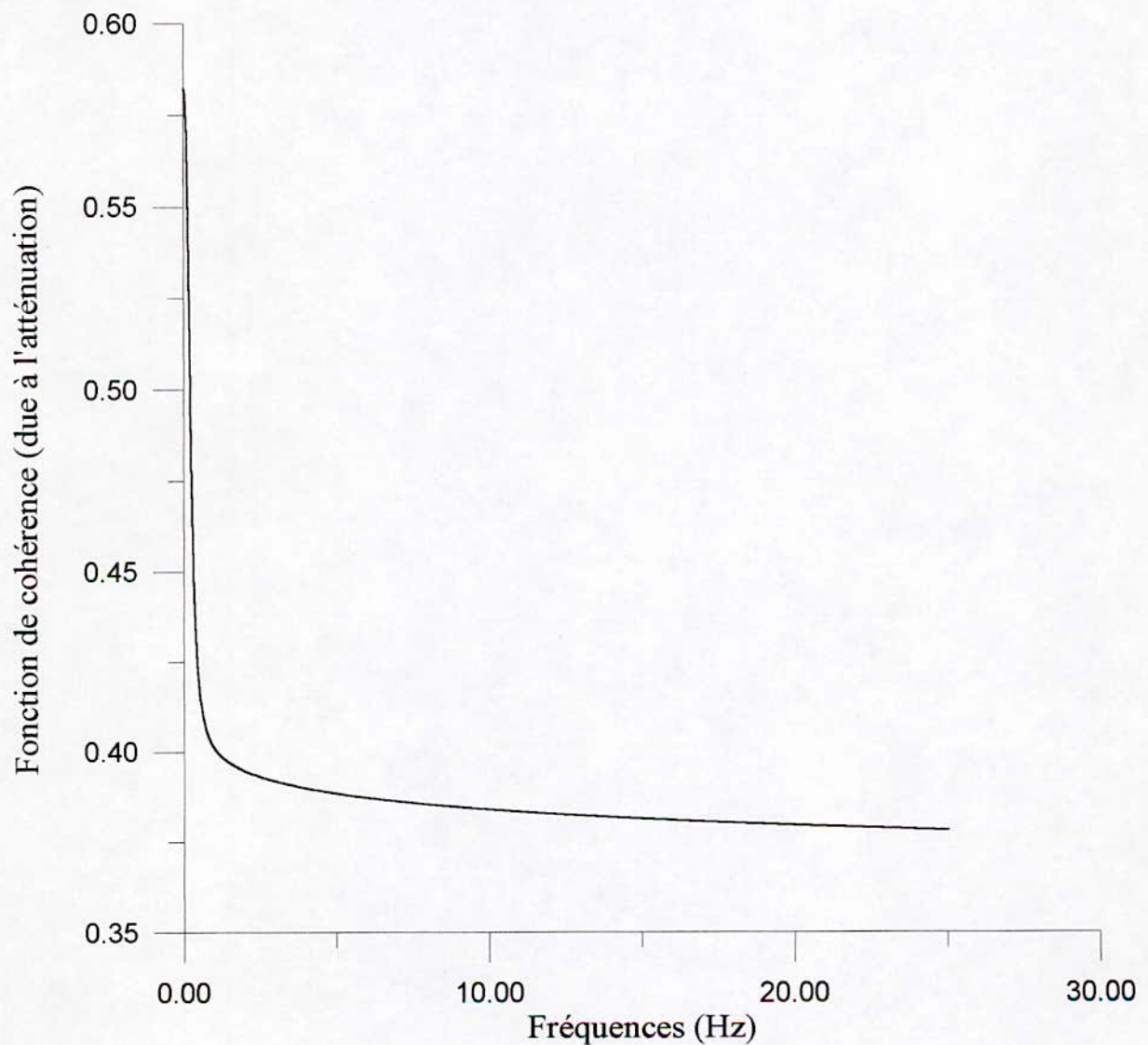


Fig. (IV. 3.) : Variation de la fonction de cohérence

A partir de ce graphe, on remarque aisément que la fonction de cohérence $\gamma_{kl}(f)^{\text{attenuation}}$ décroît avec l'augmentation de la fréquence. Cette diminution est très importante pour les basses fréquences (c'est à dire entre 0 et 2 Hz). Puis, la pente du graphe devient de plus en plus faible pour les fréquences relativement importantes.

Ce qui explique que l'influence de l'atténuation est relativement moins importante sur la fonction de cohérence.

Il est à noter aussi que cette fonction a des valeurs comprises entre 0 et 1, ce que le graphe nous montre de manière claire.

$$0 < \gamma_{kl}(f)^{\text{attenuation}} < 1$$

Chapitre V

EFFET DE SITE

EFFET DE SITE

V.1. Introduction :

L'effet de site est l'un des éléments les plus importants qui caractérise les effets de la variabilité spatiale. En effet, Une étude paramétrique révèle que de l'effet de site peut être plus considérable en courte ou moyenne durée pour les structures situés dans des régions où les conditions locales du sol sont très variables.

Supposant deux station sur des sites de différents profils, même si on a des mouvements identiques à la roche de fond au dessous des deux stations, le mouvement à la surface serait différent. Cette différence est due aux effets de filtrage des colonnes de sol situées au dessous de chaque station.

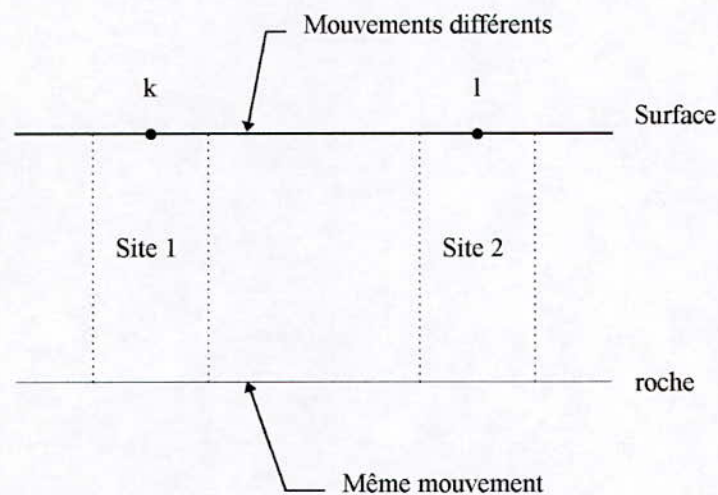


Fig. (V.1) : Présentation des sites.

V.2. Caractéristiques du site :

V.2.1. Vitesses de propagation des ondes et masses volumiques des roches :

La masse volumique et la vitesse de propagation caractérisent le sol et influent directement sur son comportement sous une excitation sismique, avec :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (\text{V.1})$$

V_s étant la vitesse de propagation des ondes « S »

V_p étant la vitesse de propagation des ondes « P »

λ et μ sont les coefficients de Lamé.

ρ : est la densité du milieu.

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 données dans le tableau représenté ci-dessous :

| Nature des terrains | Vitesse P (m/s) | Vitesse S (m/s) | Masse volumique (kg/l) |
|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 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 (V.1) : Ordre de grandeur des vitesses V_s , V_p et la densité ρ

V.2.2. Facteur de qualité :

Chaque milieu est caractérisé par son facteur de qualité. On a deux types de facteurs de qualité : Q_p et Q_s .

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

Qs : Facteur de qualité relatif aux ondes de cisaillement « S »

Les ordre de grandeurs de ces facteurs sont donnés dans le tableau suivant :

| Nature des terrains | Qp | Qs |
|----------------------------|-----------|-----------|
| 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 (V.2) : Ordres de grandeurs des facteurs de qualité Qp et Qs

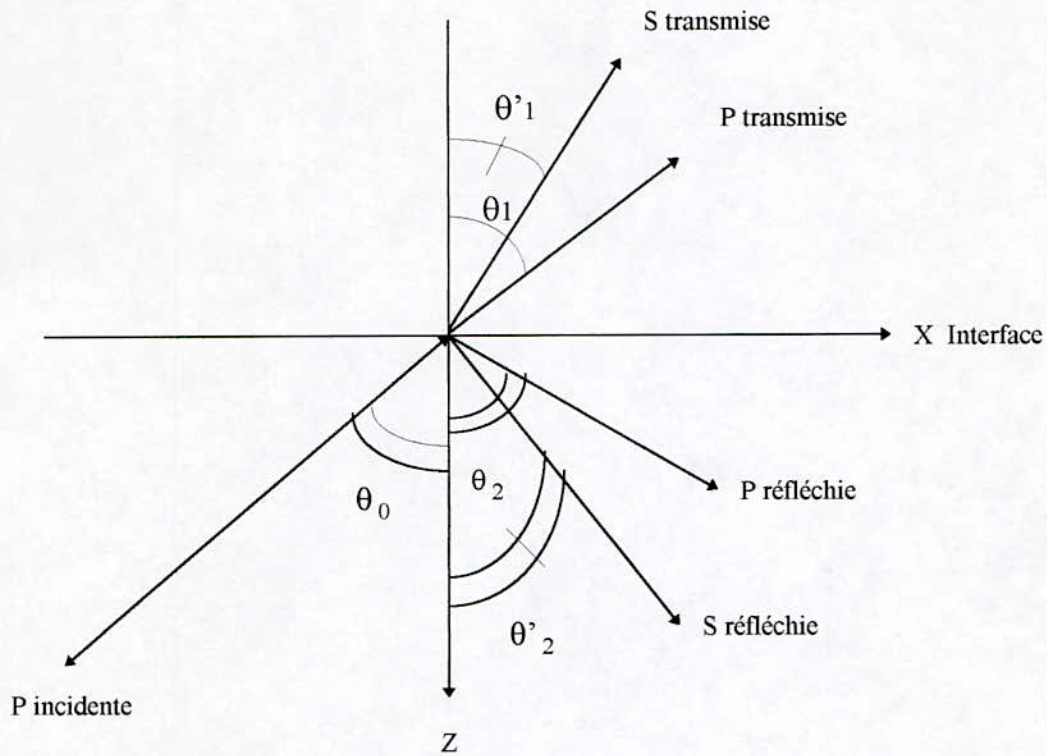
V.2.3. Loi de SNELL :

Fig. (V.2) : Réflexion et transmission des ondes sismiques aux interfaces.

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.

$$\frac{\sin(\theta_1)}{V_{p1}} = \frac{\sin(\theta'_1)}{V_{s1}} = \frac{\sin(\theta_2)}{V_{p2}} = \frac{\sin(\theta'_2)}{V_{s2}} = R = \text{cste} \quad (\text{V.2})$$

$\theta_1, \theta'_1, \theta_2, \theta'_2$: 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.

V.2.4. Fonction de transfert :

a) Généralités :

La détermination de la fonction d'amplification ou fonction de transfert d'un profil de sol nous permet de mettre en évidence le comportement de ce dernier vis-à-vis d'une excitation sismique générée à sa base.

La donnée de la fonction d'amplification présente une démarche considérable dans l'évaluation de la réponse sismique d'une couche de sol, d'autant plus qu'elle nous permet de prendre le mouvement sismique en tout point du profil du sol et plus particulièrement en surface libre à partir d'une excitation générée au niveau l'assise rocheuse.

Il s'agit donc de déterminer les caractéristiques du mouvement sismique au voisinage de la surface libre qui sont nécessaires au dimensionnement des ouvrages de Génie Civil.

b) Définition :

La fonction d'amplification est définie comme étant le rapport de l'amplitude du déplacement à la surface libre de la couche de sol (point A dans la figure V.3) à l'amplitude du déplacement à l'interface (point B dans la figure V.3)

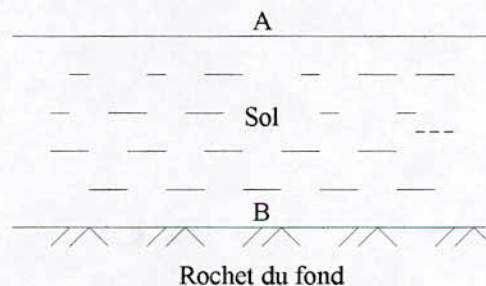


Fig. (V.3) : Modèle simple du sol.

c) Détermination de la fonction de transfert :

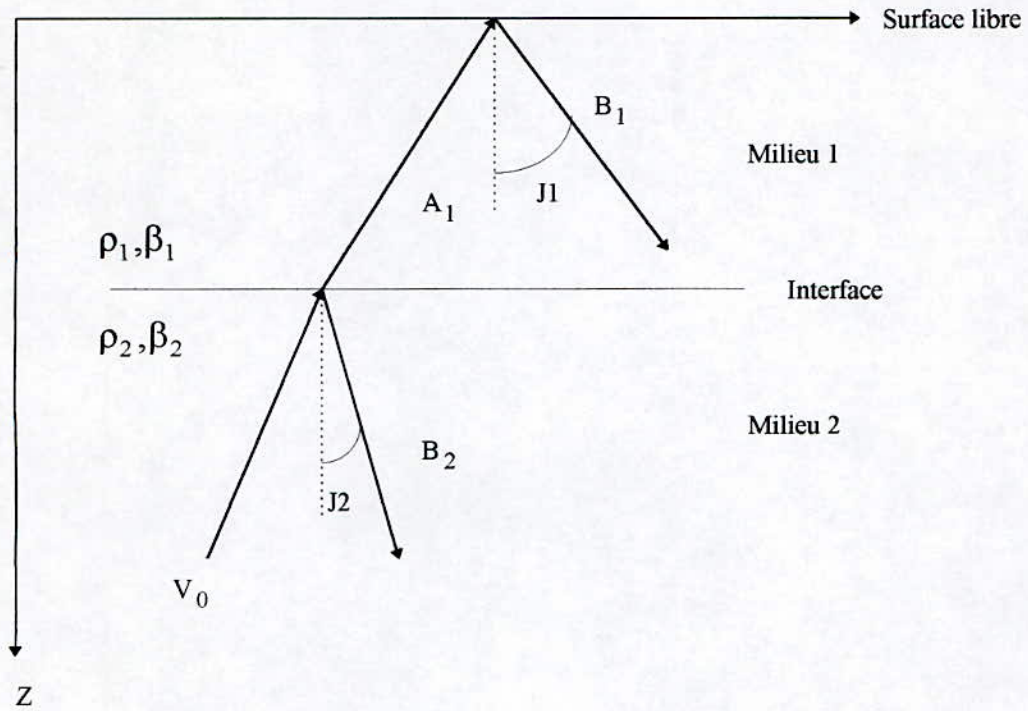


Fig. (V.4) : Réflexion et transmission d'une onde à l'interface.

$$\text{Condition de SNELL : } \frac{\sin(j_1)}{\beta_1} = \frac{\sin(j_2)}{\beta_2} = P \quad (\text{V.3})$$

$$v_1 = A_1 e^{i\omega t} e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) * z} + B_1 e^{i\omega t} e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) * z} \quad (\text{V.4})$$

$$v_2 = A_0 e^{i\omega t} e^{-i \frac{\omega}{\beta_2} \cos(j_2) * z} + B_2 e^{i\omega t} e^{-i \frac{\omega}{\beta_2} \cos(j_2) * z} \quad (\text{V.5})$$

- Contraintes à la surface :

$$\tau_{yz} = \mu_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} = \mu_1 A_1 \left(-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) \right) e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) * z} + \mu_1 B_1 \left(-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) \right) e^{-i \frac{\omega}{\beta_1} \cos(j_1) * z}$$

$$\tau_{yz}|_{z=0} = 0 \Rightarrow \frac{\mu_1 i \omega}{\beta_1} \cos(jl)(B_1 - A_1) = 0 \Rightarrow \boxed{A_1 = B_1}$$

Conséquence :

$$\text{Si } A_1 = B_1 \text{ alors } v_1 = 2A_1 \cos\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) * z\right)$$

• Contraintes à l'interface :

$$v_1 = v_2|_{z=h} \Rightarrow$$

$$2A_1 \cos\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) * h\right) = v_0 e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} + B_2 e^{i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} \quad (\text{V.6})$$

$$\tau_1 = \tau_2|_{z=h} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} & -2\mu_1 A_1 \frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) \sin\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) * h\right) \\ & = i\mu_2 \frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2) * \left(-v_0 e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} + B_2 e^{i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} \right) \end{aligned} \quad (\text{V.7})$$

$$(\text{V.6}) \Rightarrow$$

$$\frac{2A_1}{v_0} \cos\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) * h\right) - \frac{\beta_2}{v_0} e^{i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} = e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} \quad (\text{V.8})$$

$$(\text{V.7}) \Rightarrow$$

$$i \frac{2A_1 \rho_1 \beta_1 \cos(jl)}{\rho_2 \beta_2 v_0 \cos(j2)} \sin\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(jl) * h\right) - \frac{\beta_2}{v_0} e^{i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} = -e^{-i\frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2)*h} \quad (\text{V.9})$$

La soustraction (V.8) - (V.9) nous donne la valeur de A_1 :

$$A_1 = v_0 \frac{e^{-i \frac{\omega}{\beta_2} \cos(j2) * h}}{\cos\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(j1) * h\right) - i \frac{\rho_1 \beta_1 \cos(j1)}{\rho_2 \beta_2 \cos(j2)} \sin\left(\frac{\omega}{\beta_1} \cos(j1) * h\right)} \quad (V.10)$$

Avec :

ω : l'impulsion $\omega = 2\pi f$

f : la fréquence.

$J1$: angle d'incidence à l'interface

$J2$: angle de réflexion à l'interface

ρ_m et β_m : masse volumique et vitesse de propagation du milieu « m »

i : $i = \sqrt{-1}$

h : l'épaisseur du milieu 1

V.3. Fonction de cohérence :

V.3.1. Définitions :

Pour développer un modèle simple de fonction de cohérence qui caractérise cet effet, nous considérons des ondes de cisaillement unidimensionnelles qui se propagent verticalement dans le milieu sol.

Nous supposons aussi que la colonne de sol à chaque station est linéaire, et que ce sol ait des propriétés connues.

On note $H_m(f)$ la fonction de transfert de la colonne du sol à la station « m » ($m = k, l$), par définition cette fonction représente l'amplitude d'un mouvement harmonique à la surface du sol causé par un mouvement harmonique de la forme $e^{i\omega t}$ au rochet de la source (déjà vu au paragraphe V.2.4.). En utilisant les notions élémentaires de la théorie des vibrations aléatoires, la densité spectrale du mouvement à la surface en chaque station est obtenue à partir de la densité spectrale du mouvement à la source (la roche) correspondante.

$$G_{a_m a_m}(f)^{\text{surface}} = |H_m(f)|^2 G_{a_m a_m}(f)^{\text{roche}}, \quad m = k, 1 \quad (\text{V.11})$$

En outre, l'inter-densité spectrale du mouvement de la surface aux station « k » et « 1 » est donnée par :

$$G_{a_k a_1}(f)^{\text{surface}} = H_k(f)H_1(-f)G_{a_k a_1}(f)^{\text{roche}}, \quad m = k, 1 \quad (\text{V.12})$$

où :

$G_{a_k a_1}(f)^{\text{roche}}$ est l'inter-densité spectrale des deux mouvements de la roche de fond, cette dernière peut être écrite sous la forme :

$$G_{a_k a_1}(f)^{\text{roche}} = \gamma_{kl}(f)^{\text{roche}} \sqrt{G_{a_k a_k}(f)^{\text{roche}} G_{a_1 a_1}(f)^{\text{roche}}} \quad (\text{V.13})$$

où $\gamma_{kl}(f)^{\text{roche}}$ représente fonction de cohérence pour les deux mouvements de la roche. Nous supposons que $\gamma_{kl}(f)^{\text{roche}}$ justifie tous les effets de variabilité spatiale à l'exception de l'effet de site.

En divisant l'équation (V.13) par les racines carrées de l'équation (V.11), nous obtenons la fonction de cohérence à la surface $\gamma_{kl}(f)^{\text{surface}}$ tel que :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{surface}} = \gamma_{kl}(f)^{\text{roche}} e^{i[\theta_k(f) - \theta_1(f)]} \quad (\text{V.14})$$

où : $\theta_m(f) = \tan^{-1} \{ \text{Im}[H_m(f)] / \text{Re}[H_m(f)] \}$, $m = k, 1$.

Si les deux mouvements de roches sont supposés identiques $\gamma_{kl}(f)^{\text{roche}} = 1$ la fonction de cohérence due à l'effet de site est obtenue seule :

$$\gamma_{kl}(f)^{\text{site}} = e^{i[\theta_k(f) - \theta_1(f)]} \quad (\text{V.15})$$

Nous notons aussi que les effets de site causent une dépendance fréquentielle de la différence de phase des mouvements de surface dans les deux stations. L'angle de phase est donné par :

$$\theta_{kl}(f) = \theta_k(f) - \theta_l(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[H_k(f).H_l(-f)]}{\text{Re}[H_k(f).H_l(-f)]} \quad (\text{V.16})$$

Il est important de noter que la différence de phase est complètement défini en terme des deux (fonction de site H_k et H_l) qui dépendent uniquement des propriétés des deux colonnes de sol. En particulier, elle ne doit pas dépendre de la distance entre les deux station ou de la densité spectrale du mouvement à la roche de fond.

Il faut noter aussi que la réponse de site est qui est un élément de la fonction de cohérence ne justifie pas l'effet d'incohérence résultant de la dispersion d'ondes dans les deux colonnes de sol. Cela est évident en notons que $\gamma_{kl}(f)^{\text{site}} = 1$ si les deux station ont des propriétés identiques, même si le milieu est hétérogène. Cette contribution doit être incluse dans le terme de l'incohérence, $\gamma_{kl}(f)^{\text{incohérence}}$.

V.3.2. Etude de l'angle $\theta_{kl}(f)$ en fonction de la hauteur « h » :

Pour bien illustrer la variation de $\theta_{kl}(f)$ en fonction de la hauteur « h », on détermine les fonctions de transfert pour les deux stations « k » et « l » puis on détermine à l'aide de cette fonction les phases correspondantes aux deux stations $\theta_{k,i}$ et $\theta_{l,i}$.

En faisant la différence entre les deux angles (formule V.16), on obtient l'angle θ_{kl} et cela pour chaque fréquence.

Et traçant le graphe de $\theta_{kl}(f)$ pour trois valeurs de la hauteur « h » (5, 100 et 250 m), et en sachant les données suivantes :

$$\rho_1 = 1,9(\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$\beta_1 = 1500(\text{m} / \text{s})$$

$$\rho_2 = 2,6(\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$\beta_2 = 3000(\text{m} / \text{s})$$

$$\text{et } d_{kl} = 11,54 \text{ km}$$

Nous obtenons ce qui suit :

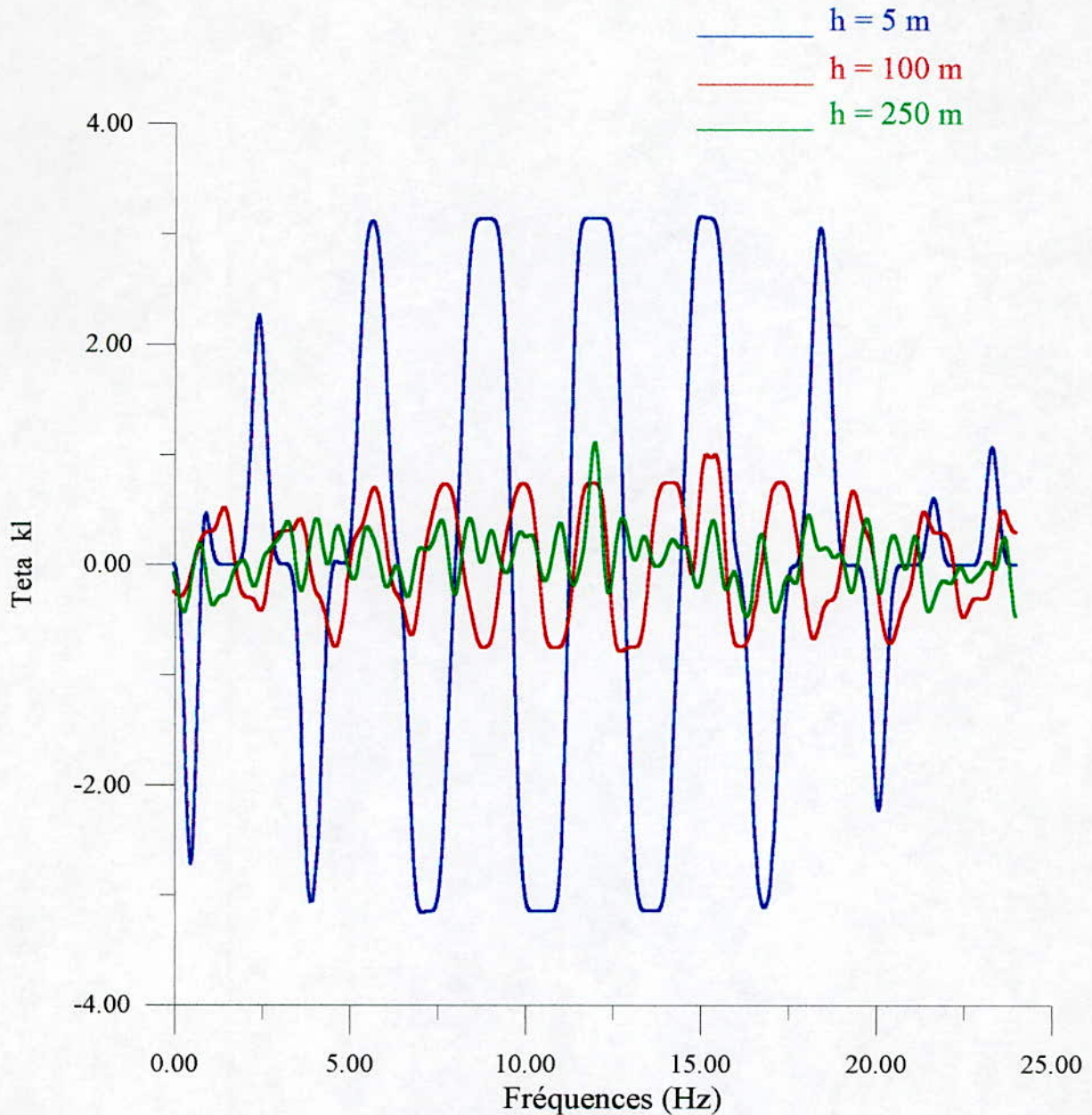


Fig. (V.5) : Variation de θ_{kl} en fonction de « f » pour plusieurs valeurs de « h »

En faisant augmenter « h », θ_{kl} diminue d'une manière considérable, ce qui est très bien illustré par le graphe ci-dessus.

En effet, pour $h=5$ m, θ_{kl} atteint la valeur de 2,5. Cette valeur devient cinq fois plus petite pour la valeur de $h=100$ m pour atteindre 0,4 comme valeur maximale. Pour $h=250$ m diminue encore, ce qui nous permet de dire que pour les petites valeurs de

« h », la diminution de θ_{kl} est importante, par contre elle devient de plus en plus faible pour des valeurs plus importantes de « h ». Comme il est remarquable aussi que la valeur de θ_{kl} augmente pour les basses fréquences puis elle devient presque constante pour les valeurs moyennes de fréquence, puis elle décroît pour les fréquences aiguës.

Remarque : Les courbes étudiées sont lissées à 5

V.3.3. Etude de l'angle $\theta_{kl}(f)$ en fonction des caractéristiques du milieu :

En gardant le même substratum et en changeant la couche de sol, nous avons automatiquement un changement de la vitesse de propagation et de la masse volumique. En faisant tout cela, on trace le graphe de θ_{kl} en fonction de la fréquence pour chaque type de sol (en prenant $h = 100$ m et $d_{kl} = 11,54$ km), puis on compare les différentes allures obtenues et on déduit la variation de θ_{kl} en fonction des caractéristique du milieu.

Ce qui nous donne :

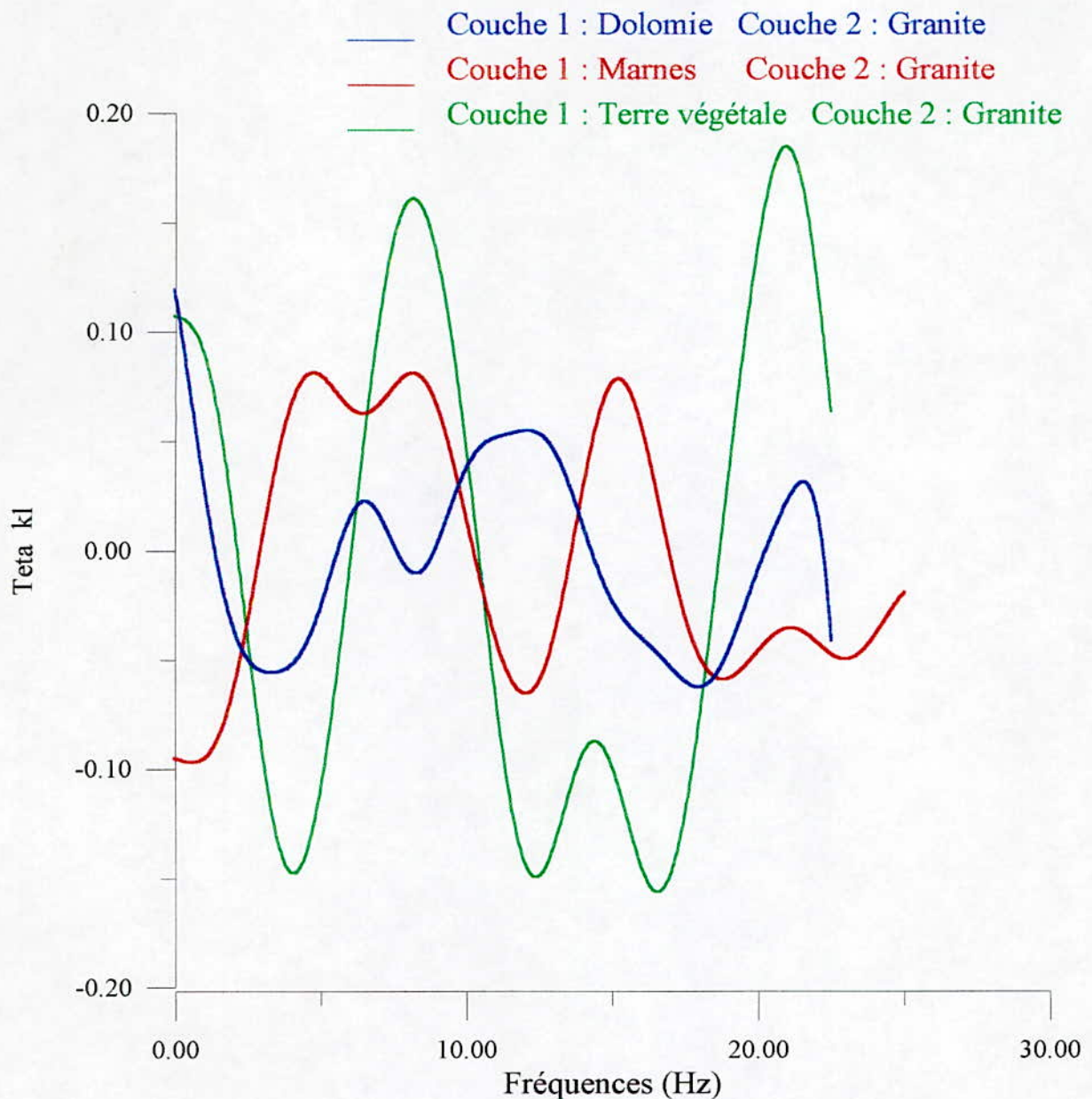


Fig. (V.6) : Variation de θ_{kl} en fonction de « f » pour plusieurs types de sol

En maintenant le même substratum (qui est le Granite dans notre cas) et en changeant la couche de sol juste au dessus et à partir du graphe, nous voyons clairement qu'en augmentant la masse volumique et la vitesse de propagation, c'est à dire en améliorant les capacités du sol, l'amplification de ce dernier devient de plus en plus faible.

En effet, pour la terre végétale, la valeur maximale de θ_{kl} est très importante et qui est de l'ordre de 0,16 Rad. Par contre, pour le Dolomie, l'amplification du mouvement par

le sol est importante. Cela nous donne une idée sur l'effet de cette composante (effet de site) sur la variabilité spatiale.

Remarque : Les courbes étudiées sont lissées à 50.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le modèle de fonction de cohérence utilisé dans ce travail a permis d'initialiser une analyse de la variabilité spatiale des mouvements sismiques forts du sol entre deux sites différents.

On a estimé la densité spectrale de puissance à l'aide de l'expression de la radiation du spectre de source donné en chapitre I. Il nous a été alors possible d'évaluer la fonction de cohérence à travers la fonction de densité inter-spectrale spatiale, mettant en jeu les densités spectrales des mouvements enregistrés en deux sites différents.

Ainsi, l'effet d'incohérence a pu être analysé en adoptant des densités spectrales débarrassés des effets de propagation, d'atténuation et du site. Seul la radiation du spectre de source et l'effet de propagation de la rupture ont été pris en compte. L'analyse des fonctions de cohérence met en évidence une accentuation de l'incohérence pour des structures proches de la faille sismique, alors que l'effet est inverse quand celles-ci s'en éloignent. D'autre part, pour une distance donnée la cohérence des mouvements décroît quand on passe des grandes longueurs d'ondes aux plus petites.

Le déphasage induit par l'effet d'incohérence augmente avec la distance et avec la fréquence. Par la suite nous avons dans le chapitre III analysé l'effet du passage d'onde. Pour cela on a considéré que les ondes partaient en même temps de divers points sources de la faille sismique. Cette manière de faire permet d'évaluer le déphasage pour chaque longueur d'onde propre à la durée de propagation. On a remarqué que le décalage temporel (ou retard) décroît avec les valeurs croissantes de la fréquence, de même que le retard dû au passage d'ondes décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source.

Enfin, l'analyse de l'effet d'atténuation qui est caractérisé dans le modèle adopté pour la fonction décrivant simultanément l'atténuation géométrique et l'atténuation intrinsèque des ondes, montre que celui-ci est plus important pour les hautes fréquences que pour les basses fréquences. De même, les valeurs de la fonction d'atténuation diminuent avec les distances croissantes ; cela met en relief un effet d'atténuation de plus en plus important avec les distances croissantes.

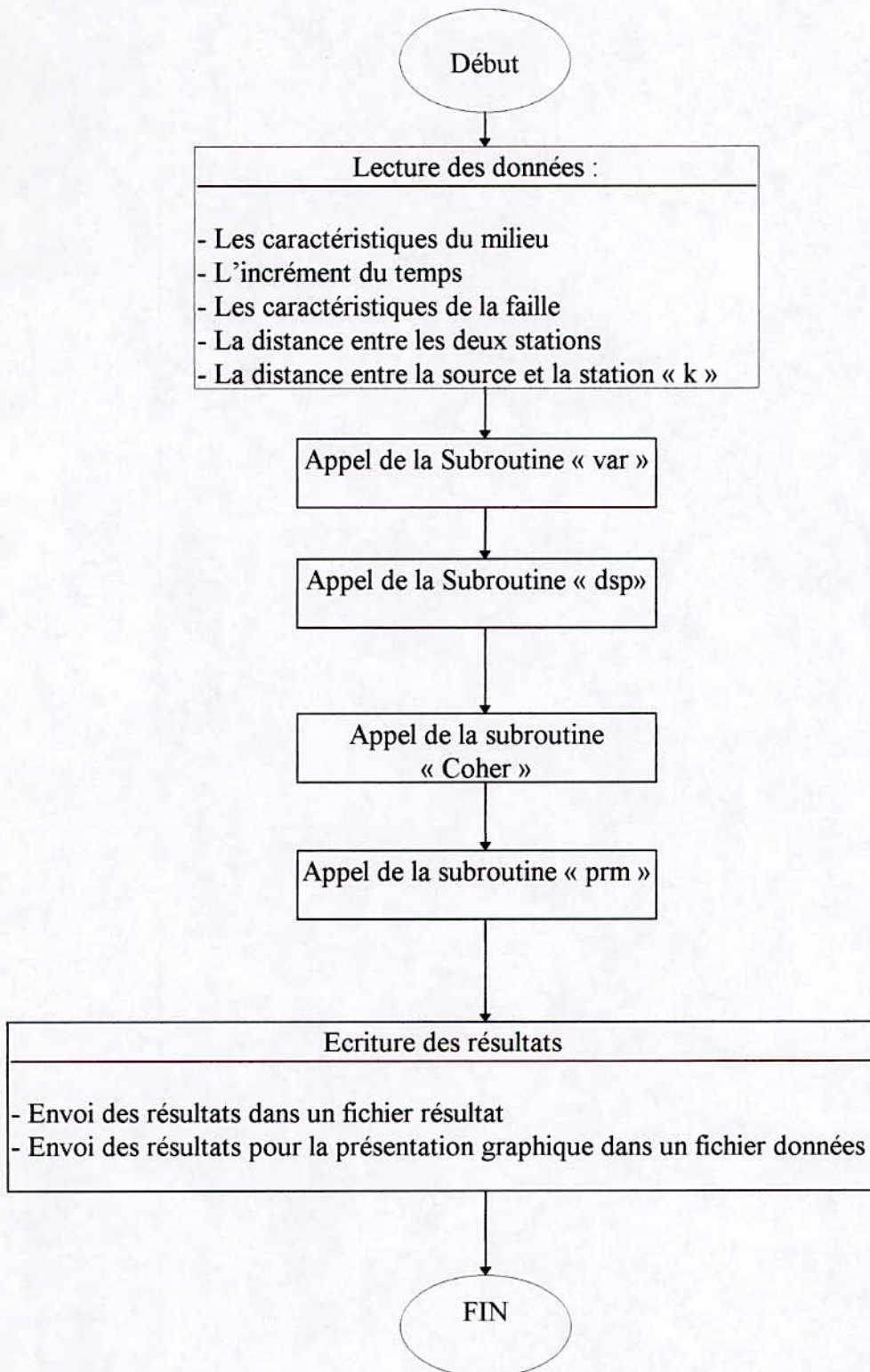
En outre, nous avons considéré la fonction de transfert obtenue pour l'onde « SH » unidimensionnelle afin de caractériser l'effet de site. Le modèle retenu pour cette étude

traduit de façon fort simple cet effet. Ayant considéré connues les propriétés du sol et du demi espace élastique représentant le rocher, la fonction de cohérence pour le sol est obtenue de celle du rocher à travers l'effet du déphasage traduit pour les fonctions de transfert aux deux stations. L'enregistrement de ce déphasage est totalement dépendant des propriétés des sols aux deux stations considérées ; il ne dépend pas de la distance ou de la densité spectrale du sol. Nous avons eu à remarquer une tendance à la croissance du déphasage pour des hauteurs croissantes du sol.

Ainsi, nous avons pu analyser l'importance relative de chacune des quatre composantes de la fonction de cohérence. Nous souhaitons poursuivre ce travail afin de conforter ces résultats par des analyses empiriques sur la base de données Algériennes. De plus il serait intéressant de développer sur la base de ce modèle, une procédure de simulation afin d'avoir des représentations dans le domaine temporel des signaux sismiques nécessaires à l'analyse des structures étendues sur appuis multiples.

ANNEXE

Organigramme « Ich2 »



Programme Ich2

Le programme Ich calcule les densités spectrales à chaque station « k », « l », et il calcule aussi les valeurs de la fonction de cohérence, les valeurs de l'angle β_{kl} et les valeurs de « α ».

Ce programme utilise plusieurs sous-programme :

Subroutine « var » :

Elle calcule les phases du spectre pour différentes valeurs de fréquences.

Subroutine « dsp » :

Elle calcule les densités spectrales.

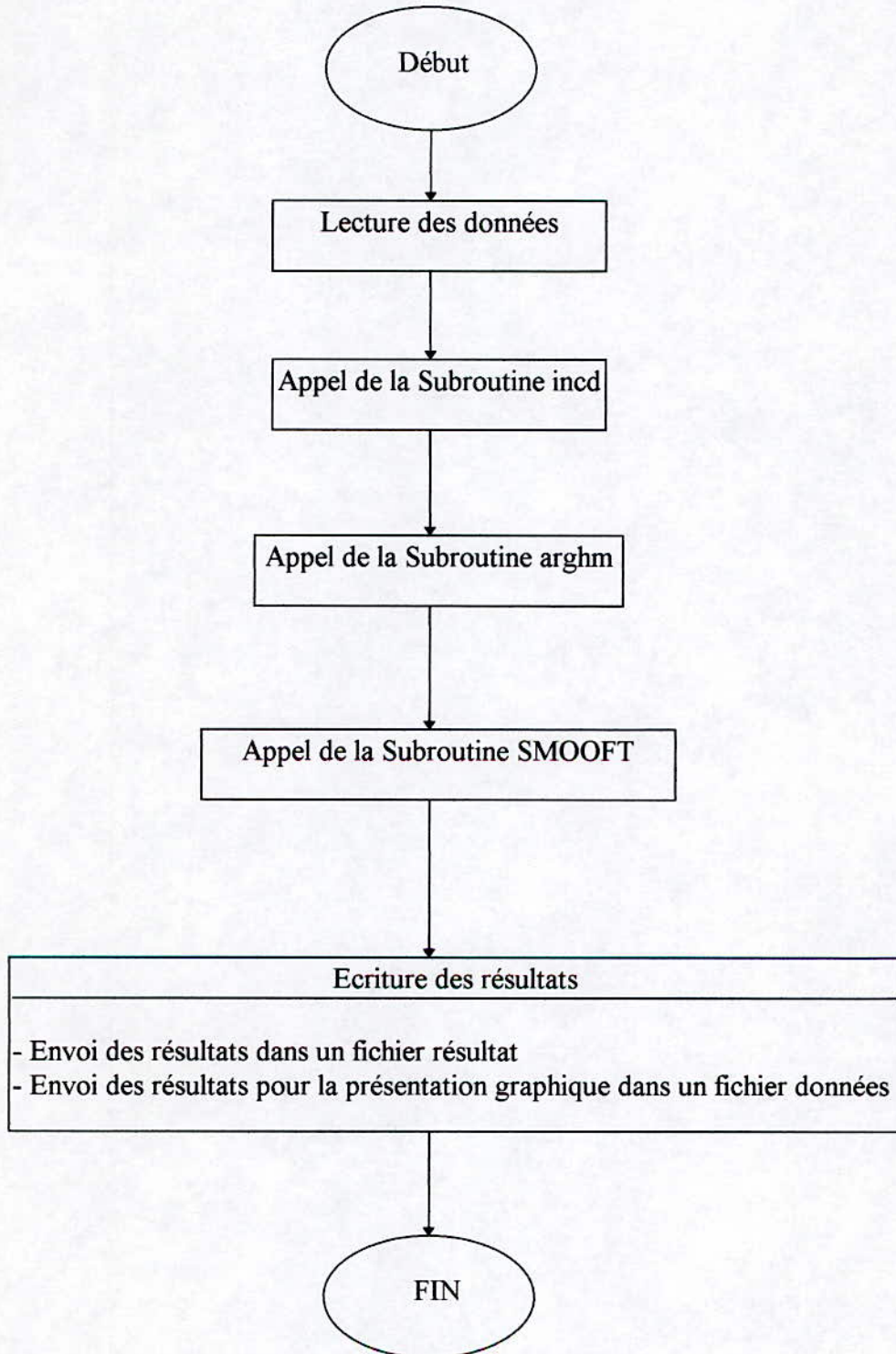
Subroutine « Coher » :

Elle calcule la fonction de cohérence.

Subroutine « prm » :

Elle calcule les angles α et β

Programme « Teta1 »



Programme « Teta1 »

Le programme « Teta1 » calcule les valeurs de l'angle θ_{kl} dû à l'effet de site.

Ce programme utilise plusieurs sous-programme :

Subroutine incd :

Elle calcule la valeur de Tss qui est donnée par la formule :

$$T_{ss} = \frac{\rho_1 \beta_1 \cos(jj1)}{\rho_2 \beta_2 \cos(jj2)} \quad \text{tel que : } \begin{cases} jj1 : \text{angle incident dans le milieu 1} \\ jj2 : \text{angle incident dans le milieu 2} \end{cases}$$

Subroutine arghm :

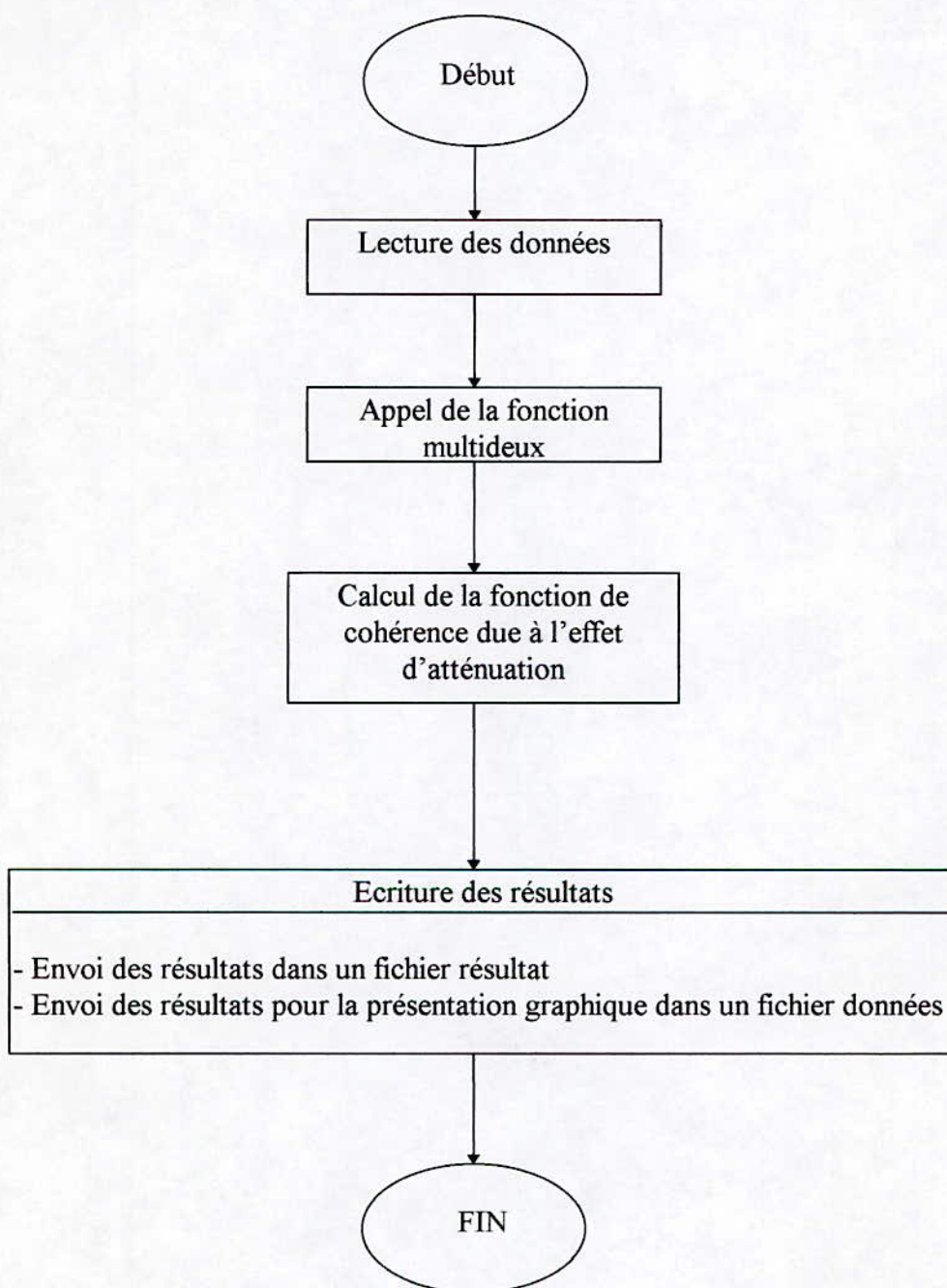
Elle calcule la valeur de la fonction de transfert Hm(f)

Subroutine SMOOFT :

Elle sert pour le lissage des différentes courbes obtenues.

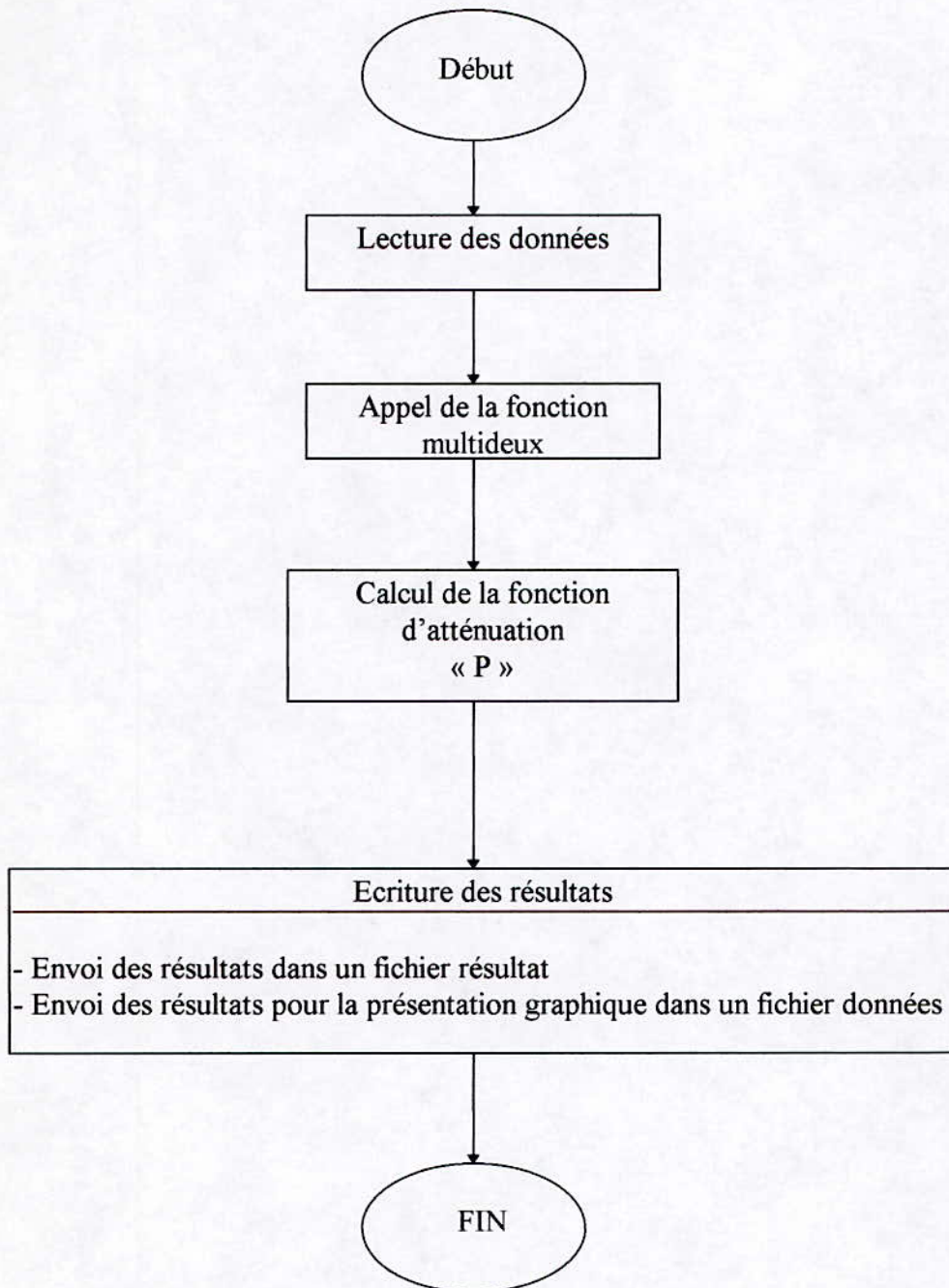
Organigramme « GAMA »

Le programme « GAMA » calcule les valeurs de la fonction de cohérence due à l'effet d'atténuation.



Programme « FW »

Le programme « FW » calcule les valeurs de la fonction d'atténuation $P(dkl, f)$.



BIBLIOGRAPHIE

[1] **ARMEN DER KIUREGHIAN**, 1996

« A coherency model for spatially varying of ground motions »
Journal of Earthquake Engineering and Structural dynamics,
Vol 25, P. 99-111

[2] **Brune J. N.**, 1970

« Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes »
J. Geophys. Res, 75, P. 4997-5009

[3] **Boore D. M.**, 1983

« Stochastic simulation of high frequency ground motion based on
seismological models of the radiated spectra »

[4] **Cherfa C.** 1995

« Inter-corrélation modal dans le cas d'excitation sismique non uniforme »
Thèse de magistère, ENP.

[5] **Aki K. & Richards P.G** 1980

« Quantitative seismology : theories and methods »
Vol 1 W.H. Freeman and Co.

[6] **CAMPILLO M.**

« Cours de sismologie »

Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique.

(L.G.I.T - I.R.I.G.M) Université de Grenoble

[7] **TOUNSI K. & ZERMOUT S.** 1996

« Modèle d'accélérogrammes pour le calcul des structures »

Projet de fin d'étude.

[8] **ABDESSEMED N. & AFIF CHAUCHE K.** 1996

« Définition d'un mouvement sismique induit par l'incidence d'une onde de cisaillement »

Projet de fin d'étude.

[9] **WILLIAM H.** 1986

« Numerical recipes - The art of scientific computing »

Cambridge University Press, London.

[10] **ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS**

ملخص :

يستعمل النموذج النظري لدالة الانسجام لوصف التغير الفضائي لحركات الزلازل القوية. هذا النموذج يتكون من أربع مركبات تمثل أربع تأثيرات مختلفة للتغير الفضائي و هي تأثير عدم الانسجام تأثير مرور الموجة تأثير التخامد و تأثير استجابة الوسط. هذا البحث يتضمن حساب و دراسة هذه العوامل الممثلة لكل مركبة من مركبات دالة الانسجام . الدراسة النظرية لهذا البحث تتم عن طريق تقدير الكثافة الطيفية لحركات الزلازل باستعمالنموذج الإشعاع للأطياف في المنبع .

ABSTRACT :

A theoretical model for the coherency function is used in this work in order to describe the spatial variability of earthquake strong ground motion. This model consists on four components characterizing four distinct effects of the spatial variability.

The investigation consists on the evaluation of the parameters of each component characterizing the coherency function.

The theoretical approach of this investigation is made through the estimation of the spectral density function of the seismic motions by the use of source radiated spectra model.

RESUME :

Un modèle théorique pour la fonction de cohérence est utilisé pour la description de la variabilité spatiale des mouvements sismiques forts du sol.

Ce modèle est constitué de quatre composantes caractérisant quatre effets distincts de la variabilité spatiale : l'effet de l'incohérence, l'effet du passage d'onde, l'effet de l'atténuation et l'effet de site.

L'investigation porte sur l'évaluation des paramètres caractérisant chacune des composantes de la fonction de cohérence.

L'approche théorique de cette investigation est faite à travers l'estimation de la densité spectrale des mouvements sismiques en utilisant un modèle de radiation des spectres de source.