

50376
1997
35

LABORATOIRE DE MECANIQUE DE LILLE (URA CNRS 1441)
LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES VIBRATIONS ET D'ACOUSTIQUE
(IEMN OAE UMR 9929 CNRS)
ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE DE DOCTORAT

Présentée à

l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité : Génie Civil

par

David MOREAUX

LOCALISATION DE CAVITES SOUTERRAINES PAR REFLEXION SISMIQUE HAUTE RESOLUTION: ETUDE NUMERIQUE, ETUDE DE TERRAIN

Soutenue le 13 Janvier 1997 devant la commission d'examen :

Président	L. RACZY	Université de Lille I
Rapporteurs :	D. GUYOMAR	INSA de Lyon
	P. COTE	LCPC de Nantes
Examineurs :	I. SHAHROUR	Ecole Centrale de Lille
	B. PIWAKOWSKI	Ecole Centrale de Lille
	J.P. PIGUET	Ecole des Mines de Nancy
	O. ABRAHAM	LCPC de Nantes
	B. BIVERT	Service d'Inspection des Cavités de Douai



à ma famille, Monsieur Robert CLERGUE, et Anne ...

Avant - propos

Ce travail de recherche est le fruit de la collaboration entre deux laboratoires situés à l'Ecole Centrale de Lille: le Département Sols-Structures du Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441) et le Groupe d'électronique et d'Acoustique de l'Institut d'Electronique et de Micro-électronique du Nord (OAE UMR 9929 CNRS).

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur B. PIWAKOWSKI, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille qui a encadré la partie in-situ de ce travail, et à Monsieur I. SHAHROUR, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille qui a assuré la direction de la partie numérique. A tous deux j'adresse mes remerciements pour l'extrême disponibilité dont ils ont fait preuve au cours de ces trois années d'étude.

Je remercie spécialement Monsieur L. RACZY, Professeur à l'Université de Lille I, pour avoir accepté la présidence du jury et m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur D. GUYOMAR, Professeur à l'INSA de Lyon, et à Monsieur P. COTE, du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nantes, pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail et consacré une partie de leur temps à l'examen de celui-ci.

Je remercie cordialement Madame O. ABRAHAM, Ingénieur de Recherche au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nantes, Messieurs J.P. PIGUET, Professeur à l'Ecole des Mines de Nancy, et B. BIVERT, Ingénieur au Service d'Inspection des Carrières Souterraines de Douai pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour avoir accepté de participer au jury.

Enfin, je voudrais saluer l'équipe du Laboratoire Sols-Structures de l'Ecole Centrale de Lille en remerciement de leur soutien et de l'ambiance chaleureuse qu'elle y fait régner.

SOMMAIRE

RESUME

NOTATIONS

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I

ETUDE DE LA DISPERSION NUMERIQUE DANS UNE MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION D'ONDES HAUTES FREQUENCES

I.1. Introduction

I.2. EQUATION D'ONDE SCALAIRE

I.2.1 Méthode d'analyse de la dispersion

I.2.2. Etude paramétrique

I.2.2.1. Incidence nulle

I.2.2.2. Incidence non nulle

I.3. EQUATION D'ONDE ELASTIQUE

I.3.1. Méthode d'analyse

I.3.2. Etude paramétrique

I.3.3. Influence du coefficient de Poisson

I.4. APPLICATION A UN PROBLEME DE PROPAGATION DANS UN MASSIF

I.4.1. Présentation de l'exemple

I.4.2. Maîtrise de la dispersion sur un sismogramme

I.5. CONCLUSION

CHAPITRE II

PRISE EN COMPTE DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL DANS LA MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION D'ONDE

II.1.Introduction

II.2. NOTION D'AMORTISSEMENT MATERIEL

- II.2.1 Décroissance de l'amplitude de l'onde
- II.2.2 Lien entre le coefficient de qualité Q et le coefficient d'amortissement α

II.3.MODELISATION DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL

- II.3.1. Amortissement de Rayleigh
- II.3.2. Relation $Q = f (a_M , a_K)$. Analogies avec l'électricité
- II.3.3. Introduction du paramètre χ_0
- II.3.4 Modification du code de calcul pour la prise en compte de l'amortissement matériel

II.4.ETUDE DE L'EFFET DE χ_0 SUR L'AMORTISSEMENT MATERIEL POUR LES SIMULATIONS

- II.4.1. Démarche pour la détermination de χ_0
- II.4.2. Choix de χ_0 pour un exemple
 - II.4.2.1.Présentation de l'exemple
 - II.4.2.2.Présentation des résultats
 - II.4.2.2.1.Illustration de l'obtention de R(f) pour un cas
 - II.4.2.2.2.Résultats en surface
 - II.4.2.2.3.Résultats en verticale
 - II.4.2.2.4.Détermination du χ_0 adéquat

II.5.APPLICATION: VISUALISATION DE L'EFFET DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL SUR UN SISMOGRAMME SYNTHETIQUE

- II.5.1. Présentation de l'étude
- II.5.2. Sismogrammes synthétiques obtenus
 - II.5.2.1.Sans amortissement matériel
 - II.5.2.2.Avec amortissement matériel
- II.5.3. Vérification de la prise en compte de l'amortissement par analyse spectrale
- II.5.4. Comparaison avec les données de terrain

II.6.CONCLUSION

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA SISMIQUE HAUTE RESOLUTION A LA LOCALISATION DE CAVITE: MODELISATION ET ETUDE PARAMETRIQUE

III.1.Introduction

III.2.PRESENTATION DU PROBLEME

III.3.SIMULATIONS NUMERIQUES: RESULTATS DE TIRS BRUTS

III.3.1.Simulation sans cavité

III.3.2.Simulation avec cavité

III.3.3.Visualisation des effets de la présence d'une cavité

III.4.IMAGERIE 2D PAR SISMIQUE HAUTE RESOLUTION

III.4.1.Processus d'obtention

III.4.2.Sismogramme obtenu sans cavité

III.4.3.Sismogramme obtenu avec cavité

III.4.4.Etude paramétrique sur la profondeur de la cavité

III.4.5.Conclusions concernant la localisation des cavités de section verticale carrée

III.4.6.Effets de la diminution des rapports L/λ et h/λ

III.4.7.Effets du changement de forme de la cavité

III.4.8.Remarques concernant la limite de détection d'une cavité

III.5.CONCLUSION

CHAPITRE IV

APPLICATION SUR UN SITE DU NORD DE LA FRANCE

IV.1.Introduction

IV.2.PROCESSUS D'OBTENTION DES DONNÉES DE TERRAIN

IV.2.1.Présentation du site

IV.2.1.1.Présentation du problème

IV.2.1.2.Données photographiques, gravimétriques et de forage

IV.2.2.Mise en oeuvre de la technique de réflexion sismique

IV.2.3.Reconnaitances sismiques préliminaires

IV.2.4.Choix des profils sismiques

IV.3.ANALYSE DES DONNEES SISMIQUES

IV.3.1.Analyse des profils significatifs de l'étude

IV.3.1.1.Analyse du profil AS

IV.3.1.2.Analyse du profil AP

IV.3.2.Comparaison d'un profil sismique avant et après injection de béton dans la cavité

IV.3.2.1.Analyse du profil après injection

IV.3.2.2.Analyse des rapports des niveaux d'énergie

IV.3.2.2.1.Traitement ciblant les interfaces E et C

IV.3.2.2.1.Traitement ciblant les interfaces plus profondes

IV.3.3.Application des conclusions du Chapitre III pour la localisation des cavités

IV.3.3.1. Analyse avant l'injection de béton

IV.3.3.2. Analyse après l'injection de béton

IV.3.3.3. Comparaison des erreurs de localisation numérique et de terrain

IV.3.4.Résultats de l'ensemble des profils réalisés

IV.3.4.1.Carte récapitulative

IV.3.4.2.Comparaison avec la méthode gravimétrique

IV.4.DISCUSSION SUR LA PRESENTATION DES SISMOGRAMMES

IV.5.CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

Annexe 1: Formulation du problème de propagation d'onde par éléments finis

Annexe 2: Justification de l'utilisation de la symétrie de révolution dans l'étude de la détection de cavité

Annexe 3: Processus de mise en oeuvre et de traitement sismique

RESUME

Le travail de ce mémoire a été réalisé dans le but d'étudier les possibilités de localisation de cavités peu profondes par la Réflexion Sismique Haute Résolution. Il se compose de trois parties.

La première partie consiste à développer des outils numériques pour simuler convenablement la propagation d'ondes sismiques hautes fréquences. Pour cela, on présente une méthode d'analyse de la dispersion numérique. On montre qu'un bon contrôle de cet aspect permet d'obtenir correctement les vitesses de propagations d'ondes ainsi que les réflexions. On propose dans un deuxième temps de prendre en compte l'amortissement matériel du sol dans les simulations en modifiant notre code de calcul. Cette prise en compte permet de respecter les aspects énergétiques et fréquentiels des différentes ondes.

La deuxième partie consiste à étudier la possibilité de localisation des cavités par simulation numérique. Cette possibilité dépend entre autre de la forme et de la taille de la cavité, de la hauteur qui la sépare de l'interface située immédiatement sous la cavité, de la disposition des différentes couches géologiques, de la disposition du système d'acquisition en surface, et de la longueur d'onde du sondage. On propose d'analyser indépendamment l'influence de certains de ces paramètres sur la possibilité et la précision de localisation des cavités.

La troisième partie consiste à mener une campagne de mesures utilisant la Réflexion Sismique Haute Résolution sur un site possédant des cavités souterraines. En profitant des conclusions de la partie précédente, on tente d'établir une carte de présence des vides sur les profils sismiques sondés.

NOTATIONS

Alphabet Latin

a_M, a_K	Coefficients de Rayleigh
A	Amplitude d'onde
C_g, C_m	Contribution des amortissements géométriques et matériels
c	Vitesse de propagation d'onde
C	Matrice d'amortissement
CDP	Common Depth Point (Point miroir)
d_n	Déplacement dans la base modale
E	Module d'Young
f	Fréquence
F	Vecteur force global
h	Profondeur d'anomalie détectable
H	Hauteur entre la cavité et le fond de la craie
k	Nombre d'onde
K	Matrice de rigidité
L	Dimension caractéristique d'une cavité dans une coupe verticale
M	Matrice de masse
M_C	Matrice de masse consistante
M_L	Matrice de masse concentrée
NMO	Normal Move Out
P	Onde de compression
p	Pas de temps normalisé
Q	Coefficient de qualité en Géophysique
r	Distance radiale
R	Rayon de la surface de Fresnel
R_a	Résistivité apparente
RSHR	Réflexion Sismique Haute Résolution
S	Onde de cisaillement
$s(t)$	Fonction source
u	Déplacement
v	Vitesse de propagation d'onde
V_{ph}	Vitesse de phase de l'onde
V_P	Vitesse des ondes de compression
V_S	Vitesse des ondes de cisaillement
Z	Impédance acoustique

Alphabet Grec

α	Coefficient de pourcentage entre les matrices de masse consistante et concentrée
α_P, α_S	Coefficients d'amortissement matériel pour les ondes P ou S
β, γ	Paramètres de Newmark
δ	Erreur de détection latérale théorique
Δt	Pas de temps
Δx	Pas d'espace
ϕ_n	Vecteur modal
χ_0	Paramètre numérique jouant sur l'amortissement matériel
ξ_n	Coefficient d'amortissement modal
λ	Longueur d'onde
λ_L, μ_n	Paramètres de Lamé
ν	Coefficient de Poisson
ρ	Masse volumique
θ	Incidence d'onde
ω	Pulsation d'onde
Ω	Domaine d'étude
Ω_e	Domaine élémentaire du maillage

INTRODUCTION GENERALE

Motivation

La présence de cavités souterraines peu profondes possède diverses origines. Ces origines peuvent être classées en deux catégories, l'origine humaine et l'origine naturelle. La première peut être due aux exploitations de matériaux, aux besoins de protection et de camouflage en temps de guerre (tranchées, sapes de guerre). L'origine naturelle est essentiellement due aux dissolutions de certains matériaux au cours du temps.

Lorsque cette présence de vide se situe en zone urbaine, elle constitue un danger pour les structures avoisinantes ainsi qu'un obstacle à l'extension de cette zone. Parfois, certaines montées de voûtes dues à l'érosion des cavités provoquent des effets en surface. Souvenons nous des affaissements d'Anzin (Nord, 1991), de l'éboulement de Tourettes (Var, 1987), de l'effondrement de Mesnil Panne Ville (Seine Maritime, 1995) dus à la présence de cavités dans le proche sous sol.

Des études sur la stabilité de ces vides peuvent être réalisées à condition de connaître leur position. Pour tenter de satisfaire cette condition, diverses méthodes géophysiques de reconnaissance du sous sol peu profond peuvent être utilisées.

Méthodes de reconnaissance du sous-sol

La plus ancienne des méthodes d'investigation du sous sol consiste dans l'utilisation de données de forages. Précise verticalement, elle est malheureusement coûteuse et à caractère très local. Cette technique destructrice ne permet pas d'avoir une image continue du sous sol. Avec le développement des méthodes géophysiques, on trouve actuellement d'autres méthodes de reconnaissance, notamment les méthodes de radars géophysiques, les méthodes électromagnétiques, gravimétriques, électriques, magnétiques, et sismiques.

La méthode du radar géophysique qui consiste à étudier les réflexions d'une onde électromagnétique émise dans le sol est actuellement en plein essor. Elle est fiable en très faible profondeur et possède une résolution de l'ordre du décimètre (Chan et al, 1996). Cette méthode est impraticable en milieux à forte teneur en eau comme les milieux argileux du fait de l'atténuation très forte des signaux dans ce contexte.

Les techniques gravimétriques sont basées sur la mesure des anomalies de densité du sous sol. Une anomalie d'une tranche de terrain horizontale d'épaisseur h et de densité relative ρ correspond à l'expression donnée en milligals:

$$\Delta g = \frac{\rho h}{24}$$

On considère en théorie qu'une anomalie peut être détectée par gravimétrie jusqu'à une profondeur h si sa dimension est supérieure à $h/6$ (Butler, 1983). Cela en fait un outil performant en faibles profondeurs mais revient cher pour des études où les anomalies sont de l'ordre du microgal, du fait de l'obligation de faire appel à des appareillages de haute précision (Olivier et al, 1996). L'inconvénient de la gravimétrie est que certaines anomalies présentant un défaut de densité relative peuvent être masquées par la présence sur la même verticale d'anomalies d'excès de densité, ou inversement. Malgré cela, cette méthode peut être considérée comme la plus fiable à ce jour pour la détection de cavités.

Les méthodes électriques sont fondées sur la mesure de la résistivité en surface. L'une d'entre elles consiste à générer un courant I dans le sol et à mesurer la différence de potentiel V entre deux électrodes. La résistivité apparente R_a est alors calculée en fonction de I , V et K_e (constante dépendant des électrodes) par:

$$R_a = K_e \frac{V}{I}$$

La limite d'investigation en profondeur de cette méthode pour détecter une anomalie est en théorie h si sa dimension est supérieure à $2h/3$ (Owen, 1983). Ce sont des méthodes rapides à mettre en oeuvre mais limitées en profondeur. A l'heure actuelle, on ne trouve pas de références concernant des applications efficaces de ces méthodes pour la détection des cavités.

D'autres méthodes électriques, magnétiques, électromagnétiques sont actuellement en développement mais leur application à la détection de vides sont encore peu étudiées (Butler, 1983).

Les méthodes sismiques consistent à exciter la surface pour générer des ondes qui se propagent dans le sol. On enregistre ensuite la réponse du terrain provoquée en partie par les contrastes d'impédance acoustique Z entre les différentes couches du sous sol. Cette réponse est entre autre constituée de réflexions et de réfractions. En fonction du type de signal retenu et de traitement utilisé, deux techniques se distinguent, la réfraction sismique et la réflexion sismique.

La technique de réfraction sismique se base sur les phénomènes de réflexion totale d'onde sur une interface. Elle n'utilise que les premières arrivées, ce qui facilite l'exploitation

des données. L'interprétation de ces données peut procurer des renseignements sur la structure géologique du terrain, les vitesses de propagation des ondes dans les couches, et l'épaisseur de ces couches. Cependant, cette technique ne permet pas de détecter les couches dont les vitesses de propagation sont inférieures à celles des couches immédiatement moins profondes. Son utilisation pour la détection des cavités est limitée.

La technique de réflexion sismique utilise les informations contenues dans les réflexions d'ondes sur les interfaces des couches du sous sol ou sur différentes anomalies. Elle nécessite un traitement des données plus complexe que la réfraction sismique. Son application aux faibles profondeurs (de 0 à moins 50 mètres) a été développée par les travaux de Steeples et Knapp (Steeple, 1984; Knapp et Steeples, 1986a,b). Le fait de travailler dans de telles profondeurs nécessite une résolution verticale élevée. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des longueurs d'onde λ comparables à l'épaisseur des couches que l'on désire détecter. Etant donné que $f = v / \lambda$ (où v est la vitesse de propagation de l'onde et f la fréquence) on doit travailler dans ces conditions avec de hautes fréquences, considérant le domaine de la réflexion sismique.

L'utilisation de ces hautes fréquences pose alors un problème en milieu très atténuant pour les ondes sismiques. L'atténuation étant croissante avec la fréquence, il est nécessaire de travailler avec une instrumentation de haute précision. L'utilisation de cette technique connaît un succès pour la localisation de couches, mais très peu d'études se sont révélées fructueuses pour la détection de cibles diffractantes de dimensions réduites comme les cavités (Steeple, 1987; Branham, 1988).

La technique de Réflexion Sismique Haute Résolution est depuis une quinzaine d'années en plein développement. Ceci est en grande partie dû à la diminution du coût et à la progression de son instrumentation.

Avancée de la Réflexion Sismique Haute Résolution dans les laboratoires d'accueil

Certains problèmes rencontrés au niveau de l'instrumentation, de la mise en oeuvre et de l'interprétation ont été étudiés sur le terrain et par simulations physiques au Laboratoire de Physique des Vibrations et d'Acoustique de l'École Centrale de Lille (Tricot et al, 1989; Piwakowski et al, 1989, 1991; Pernod et al, 1988, 1989) et par simulations numériques au Laboratoire de Mécanique de Lille - Ecole Centrale de Lille (Eiselt et al, 1991, 1993). Une méthodologie d'utilisation de la technique de réflexion sismique a été développée pour apporter des éléments de réponses aux problèmes régionaux de localisation de cavités dans le sous-sol (Piwakowski et al, 1994). Ces travaux ont donné des résultats positifs. La détection

des cavités s'est essentiellement réalisée de manière indirecte par observation de masquage des réflecteurs plus profonds (Figure 1). Ces résultats ont été obtenus sur des terrains non urbanisés. Récemment, le laboratoire a fourni des résultats encourageants pour la localisation d'anciennes mines de gypse en région Parisienne (Piwakowski et al, 1996).

Cette méthode est difficile à utiliser en zone urbaine où de nombreux paramètres peuvent rendre les mesures très difficiles à analyser à cause de la présence de constructions, de remblais et de bruit ambiant important.

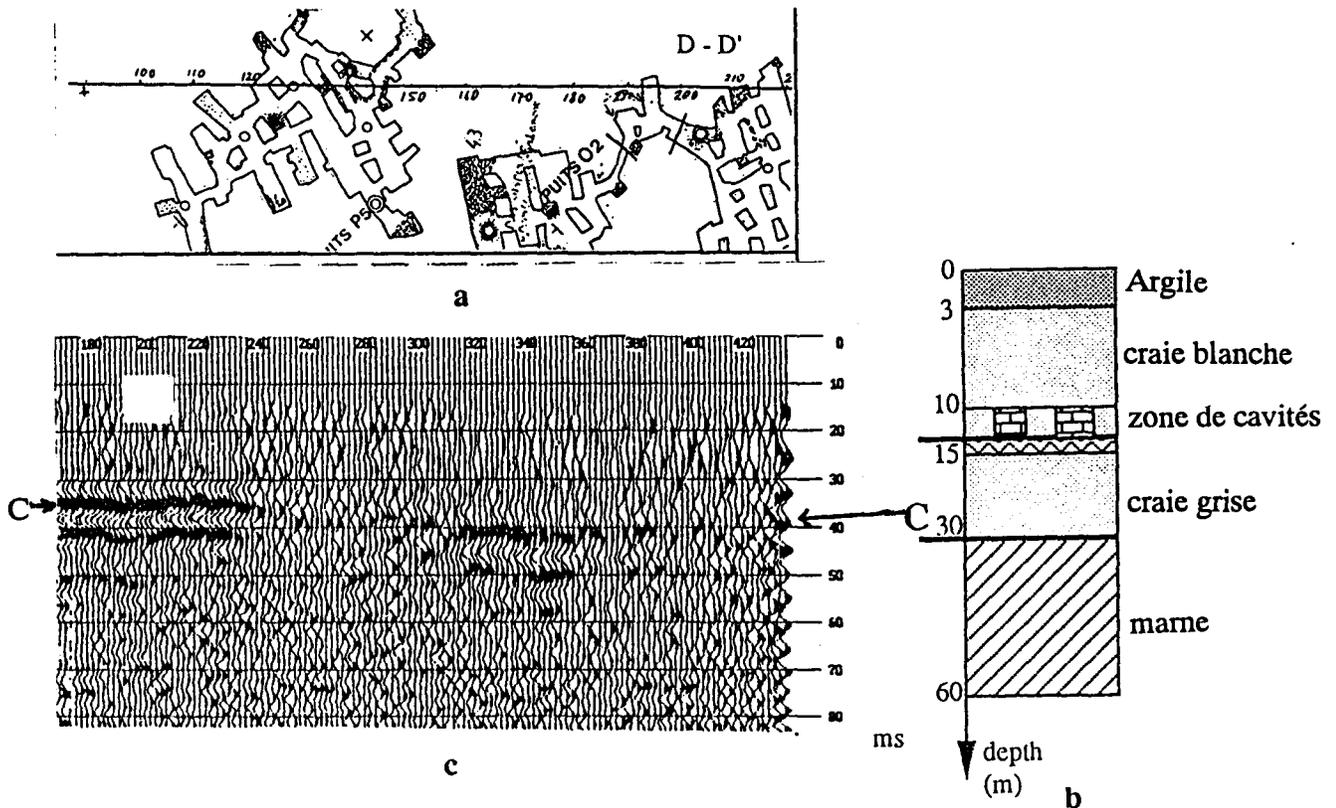


Figure 1: Application de la Méthode Sismique au site de Villeneuve d'Ascq. a) Carte des cavités et profil DD' prospecté, b) données géologiques de forages réalisés à proximité du site, c) section sismique du profil DD' présentant une image sismique (en noir sur le sismogramme) de l'interface C, fond de la craie grise. La discontinuité de l'image de C peut être assimilée à l'effet d'ombre de la cavité sur cette image. Ce masquage de C est bien corrélé avec la position des cavités connues (tirée de Piwakowski, 1994).

Problèmes actuels

Etant donné les résultats positifs obtenus dans le laboratoire d'accueil, on tente de poursuivre les travaux en précisant certains aspects tels que la précision de la localisation des cavités. La technique de réflexion sismique peut être assimilée à un dispositif acoustique ponctuel caractérisé par une résolution dépendant de la longueur d'onde λ utilisée. On admet que la limite de détection dépend entre autre du rapport λ / D où D est la taille de l'objet à détecter. Il serait intéressant d'étudier l'influence de ce rapport sur la possibilité de localisation des cavités.

Un autre paramètre qui affecte la localisation de cavités est l'amortissement matériel du sol sur les ondes sismiques. Cet amortissement agit comme un filtre passe-bas sur les ondes, et modifie ainsi leur aspect fréquentiel. Par l'intermédiaire de cette modification, l'amortissement influe sur la résolution de localisation de cavités.

Les travaux de terrain du laboratoire d'accueil ont mis en évidence deux effets dus à la présence des cavités. Le premier est celui de créer une sorte d'ombre gênant le sondage du réflecteur situé sous la cavité. Cette ombre se caractérise par un masquage de l'image sismique de ce réflecteur (Figure 1). C'est l'effet prédominant. Au contraire, l'effet direct dû à la présence des réflexions sur le toit des cavités est pratiquement impossible à visualiser. Comment cet effet de masquage influe-t-il sur la possibilité et la précision de localisation des cavités ? Il serait intéressant d'étudier cette influence en fonction du type, de la forme, et de la position des cavités dans le sous-sol ainsi que de la disposition du système d'acquisition en surface.

Pour se procurer des renseignements concernant les effets liés à la présence des cavités ainsi que la possibilité de localisation de cavités, il est nécessaire de bien connaître l'influence des divers phénomènes présentés plus haut agissant sur ces effets et sur cette résolution. Ces phénomènes, se présentant simultanément, peuvent être analysés par simulation numérique. De cette manière, il est possible d'étudier indépendamment les effets de ces paramètres et de travailler sur des conditions de terrain bien définies. On peut tenter d'observer de cette manière l'influence de la présence d'anomalies sur les sismogrammes synthétiques.

But de l'étude

Le but de l'étude est de développer des outils numériques permettant la résolution des problèmes de propagation d'ondes hautes fréquences et leur application à l'étude de

l'influence des différents paramètres qui affectent la possibilité et la précision de détection d'une cavité par réflexion sismique haute résolution.

Ce moyen d'analyse peut permettre de mieux comprendre les phénomènes physiques qui accompagnent la présence des cavités, d'ajuster certaines règles empiriques utilisées sur le terrain et de donner des conseils pratiques sur la localisation de cavités in-situ. On pourrait ainsi mettre à la disposition des géophysiciens un outil d'investigation précis, permettant son utilisation dans de larges cas de figures.

Diverses méthodes numériques existent pour modéliser la propagation d'ondes sismiques. Parmi elles, les méthodes aux frontières se basent sur le calcul des fonctions de Green empiriques (Bouchon, 1987; George, 1987). Les méthodes de différences finies et d'éléments finis utilisent des formulations d'équations différentielles qui décrivent les propagations d'ondes (Modaressi, 1987; Eiselt, 1991; Robertsson, 1994). Pour notre part, nous utilisons la méthode des éléments finis qui nous procure certaines libertés de modélisation. La formulation de cette méthode pour une résolution des problèmes de propagation d'ondes est présentée en Annexe 1. Avec cette méthode, il est possible de simuler aisément cette propagation d'ondes dans des sols hétérogènes, en particulier si l'on s'intéresse au champ proche, c'est à dire à un domaine compris entre la source et les points d'observation dont l'étendue est comparable à la longueur d'onde de l'excitation.

Certains aspects de la modélisation restent à étudier, aspects qui ne sont pas toujours pris en compte dans la littérature. Parmi ceux-ci, on peut citer l'analyse de la dispersion numérique et la prise en compte de l'amortissement matériel qui n'ont pas été abordés dans les précédents travaux des laboratoires d'accueil (Eiselt, 1993). Une originalité consisterait à modéliser des campagnes de mesures entières en appliquant aux données numériques le traitement utilisé pour le terrain. Un travail de modélisation est à réaliser pour se rapprocher au mieux des conditions in-situ.

Travail réalisé

Ce mémoire se décompose en trois parties.

La première partie consiste à développer des outils numériques en éléments finis pour simuler la propagations d'ondes de façon plus précise que ce qui avait déjà été fait dans notre laboratoire. Elle comporte deux chapitres. Dans le premier, on aborde la dispersion numérique qui peut induire des erreurs sur les vitesses de propagation d'ondes puis déformer les signaux. Un premier outil est développé pour analyser cette dispersion en étudiant indépendamment l'effet des paramètres influant sur ces phénomènes. Cette étude procure des

conseils pour maîtriser la dispersion numérique. Le second chapitre est consacré à la prise en compte de l'amortissement matériel du terrain dans la modélisation numérique. Dans nos simulations, nous introduisons un amortissement de type Rayleigh. Une étude est réalisée pour arrêter l'équivalence entre ce mode d'amortissement et le coefficient de qualité Q généralement utilisé en géophysique. L'influence de la prise en compte de l'amortissement est ensuite illustré sur un cas type.

La deuxième partie consiste à appliquer les outils numériques pour simuler des campagnes de mesures sismiques. On propose de mener une étude de l'influence de la profondeur, de la taille et de la forme des cavités sur la possibilité et la précision de leur détection.

Dans la troisième partie, on réalise une campagne de mesures in-situ utilisant la Réflexion Sismique Haute Résolution. L'étude se situe dans le Nord de la France en zone urbaine. On propose de tester l'utilisation de cette technique sur ce type de terrain et d'appliquer les conclusions de la deuxième partie aux données sismiques obtenues pour améliorer leur interprétation.

CHAPITRE I

ETUDE DE LA DISPERSION NUMERIQUE DANS UNE MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION D'ONDES HAUTES FREQUENCES

Résumé

Ce chapitre comporte deux parties. La première consiste à développer un outil pour réaliser des études paramétriques de la dispersion en observant l'évolution de la vitesse de phase des ondes. La seconde partie consiste à appliquer cette analyse à des données sismiques numériques pour minimiser les perturbations introduites par la dispersion. Ces perturbations se manifestent par le masquage de certains événements, l'affectation des vitesses de propagation et la déformation des signaux.

I.1.Introduction

La méthode des éléments finis peut servir pour la modélisation de propagations d'ondes sismiques, mais sa mise en oeuvre en sismique haute résolution se heurte à diverses difficultés. Parmi les difficultés rencontrées, on peut citer la dispersion numérique qui résulte essentiellement d'une absence de cohérence entre les discrétisations géométrique et temporelle (Bamberger, 1980; Marfurt, 1984). Cette dispersion induit une perturbation sensible des signaux, notamment la modification de leur vitesse de propagation ce qui entraîne leur déformation (Figure I.1).

Dans ce chapitre, on présente le développement d'un outil pour le contrôle de cette dispersion. L'analyse de la dispersion est réalisée pour les équations d'onde scalaire et élastique. Cet outil est ensuite utilisé pour l'élaboration de recommandations concernant les discrétisations géométrique et temporelle. Enfin, une application de ces recommandations est présentée sur un cas type.

I.2. EQUATION D'ONDE SCALAIRE

I.2.1. Méthode d'analyse de la dispersion

Considérons l'équation d'onde scalaire:

$$(I.1) \quad \nabla^2 u - \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

où la vitesse de propagation pour les ondes de compression P est:

$$v_{0p} = \left(\frac{\lambda_L}{\rho} \right)^{1/2}$$

et pour les ondes de cisaillement S :

$$v_{0s} = \left(\frac{\mu_L}{\rho} \right)^{1/2}$$

où λ_L , μ_L sont les paramètres de Lamé, ρ la densité, et $u(x,z,t)$ le champ de déplacement.

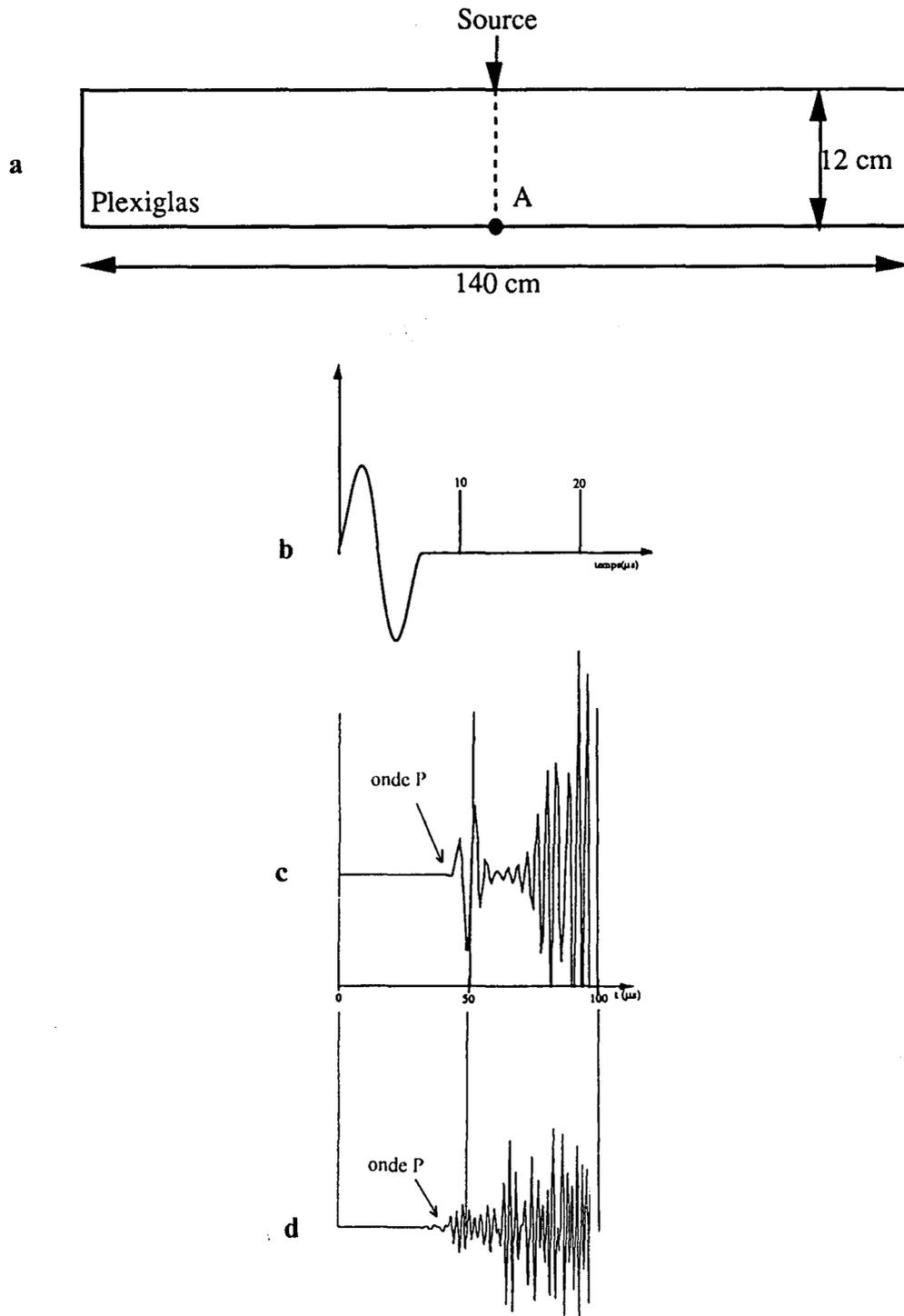


Figure I.1. Visualisation de l'effet de la dispersion numérique sur une onde de compression P (à $42\mu\text{s}$) pour une simulation sur bloc de Plexiglas selon deux choix différents de discrétisations temporelles Δt et géométriques Δx . a) Présentation du bloc de Plexiglas et du point A où est observé le déplacement. b) Présentation du signal source. Présentation du déplacement avec c) $\Delta x/\Delta t = 3750 \text{ m/s}$: faible dispersion, on retrouve la signature de l'excitation, d) $\Delta x/\Delta t = 11\ 100 \text{ m/s}$: forte dispersion, on ne retrouve plus cette signature (Tiré de Eiselt, 1993).

Le système d'équations d'éléments finis correspondant à cette équation scalaire peut être écrit sous la forme (voir l'annexe 1) :

$$(I.2) \quad [M] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = 0$$

où U est le vecteur déplacement, M la matrice de masse, K la matrice de rigidité. M peut être calculée par une combinaison de matrice de masse consistante et concentrée (voir annexe 1).

Si l'on utilise une discrétisation temporelle sur trois pas de temps (Zienkiewicz, 1977) avec la méthode de Newmark pour discrétiser l'équation (I.2), on obtient:

$$(I.3) \quad \sum_{K=1}^n \left\{ \begin{aligned} & \left(M_{IK} + \beta \Delta t^2 K_{IK} \right) u_{K,J+1} \\ & + \left(-2 M_{IK} + (0.5 - 2\beta + \gamma) \Delta t^2 K_{IK} \right) u_{K,J} \\ & + \left(M_{IK} + (0.5 + \beta - \gamma) \Delta t^2 K_{IK} \right) u_{K,J-1} \end{aligned} \right\} = 0$$

pour $I = 1, 2, \dots, n$

où: β, γ , sont les paramètres de Newmark,
 Δt le pas de discrétisation temporelle,
 K l'indice de localisation géométrique,
 J l'indice de localisation temporelle,

Dans le cas d'un domaine homogène, infini, où Δx et Δz sont constants, et si l'on recherche une solution pour effectuer une étude qualitative sous la forme (Marfurt, 1984) :

$$u_{K,j} = A_K e^{i(k_x X_K + k_z Z_K - \omega t_j)}$$

où: A_K est l'amplitude de l'onde au point K ,
 X_K, Z_K les coordonnées du point K ,
 ω la pulsation de l'onde,
 k le nombre d'onde où :

$$k = (k_x^2 + k_z^2)^{1/2}$$

$$k_x = k \sin \theta$$

$$k_z = k \cos \theta$$

et où θ est l'angle d'incidence de l'onde (Figure I.2a).

L'équation (I.3) devient :

$$(I.4) \quad \sum_{K=1}^n \left\{ \left[\begin{aligned} & (M_{1K} + \beta \Delta t^2 K_{1K}) e^{-i\omega t_{j+1}} \\ & + (-2M_{1K} + (0.5 - 2\beta + \gamma) \Delta t^2 K_{1K}) e^{-i\omega t_j} \\ & + (M_{1K} + (0.5 + \beta - \gamma) \Delta t^2 K_{1K}) e^{-i\omega t_{j-1}} \end{aligned} \right] e^{i(k_x X_K + k_z Z_K)} \right\} = 0$$

Le système (I.3) est dégénéré d'ordre n . Pour une étude 2D avec des éléments rectangulaires à quatre noeuds, il suffit de prendre $n = 9$ pour obtenir les termes M_{1K} et K_{1K} de l'équation (I.4), K variant de 1 à 9 (Figure I.2b).

De l'équation (I.4) on peut alors obtenir ω , pulsation de l'onde, qui nous permet d'obtenir la vitesse de phase $v_{ph} = \omega / k$. En l'absence de dispersion numérique, on devrait obtenir le rapport:

$$(I.5) \quad \frac{v_{ph}}{v_0} = 1 \quad \text{où } v_0 \text{ est la vitesse de propagation d'onde P ou S.}$$

Afin de quantifier cette dispersion, on va calculer le rapport :

$$(I.6) \quad \frac{v_{ph}}{v_0} = \frac{\omega}{k v_0}$$

en fonction des paramètres de discrétisations et des propriétés mécaniques.

I.2.2. Etude paramétrique

L'analyse de la dispersion a été menée suivant l'évolution de trois paramètres:

- Le paramètre α , défini comme le coefficient de pourcentage entre les matrices de masse consistante M_C et concentrée M_L (Voir Annexe 1).

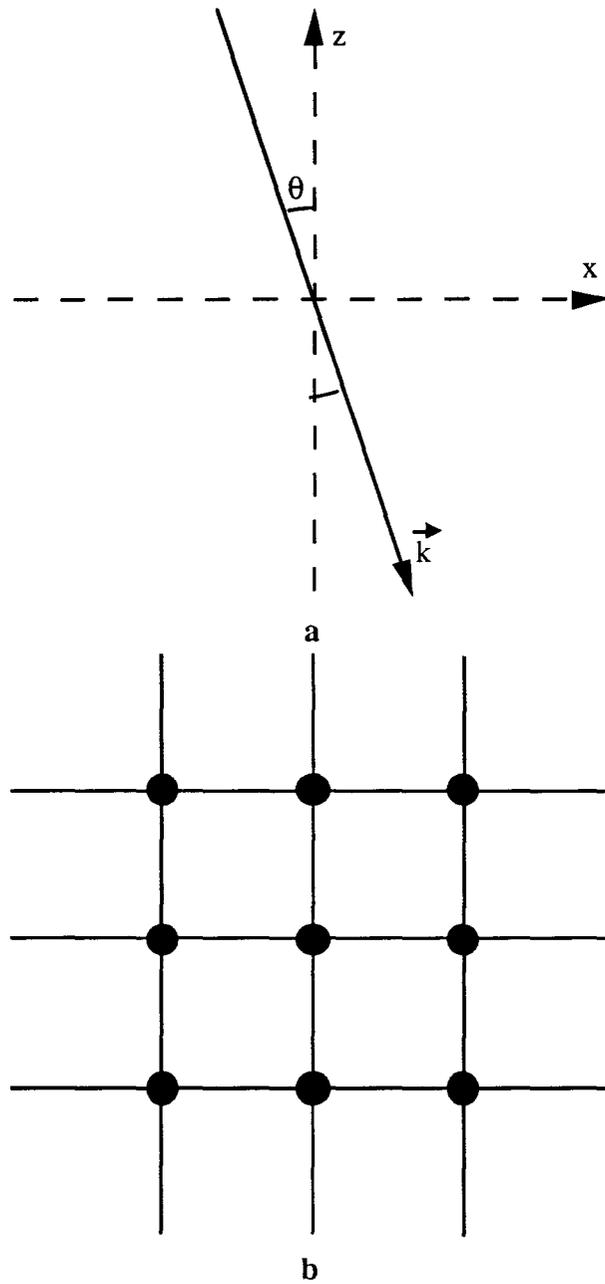


Figure I.2 : a) Représentation du nombre d'onde k et de l'angle d'incidence de l'onde θ .
 b) Représentation des 9 points de calcul du maillage utilisés pour l'équation (I.4).

- Le paramètre $p = v_0 \frac{\Delta t}{\Delta x}$, qui représente le pas de temps normalisé (ou paramètre de Courant-Friedrickson-Lewy) à considérer pour garder une certaine cohérence entre la vitesse de l'onde et les discrétisations temporelle et géométrique (Bamberger, 1980).

- Le paramètre θ , qui définit l'angle d'incidence de l'onde dans le milieu.

Dans la suite de l'étude, les paramètres de Newmark sont fixés à $\beta = 0,25$, $\gamma = 0,5$ ce qui assure la stabilité du schéma implicite et nous affranchit de la présence d'un amortissement numérique (Hughes, 1978). Nous présentons les résultats avec en abscisse le rapport $\Delta x/\lambda$ (λ est la longueur d'onde), et en ordonnée le rapport v_{ph}/v_0 . Rappelons que l'absence de dispersion est caractérisée par le rapport $v_{ph}/v_0 = 1$.

I.2.2.1. Incidence nulle

Dans cette partie, nous considérons une onde d'incidence $\theta = 0$ et faisons varier les paramètres α et p définis précédemment.

Choisissons de traiter le cas d'une matrice concentrée pure et d'analyser la dispersion en faisant varier le paramètre p (Figure I.3.a). Nous observons une estimation par défaut de v_{ph} . Notons également que la précision baisse lorsque p augmente. L'utilisation de cette matrice crée une dispersion numérique importante due à la non consistance de cette matrice de masse. De manière générale, on remarque que plus le maillage est fin, plus la dispersion est faible.

Choisissons de traiter le cas d'une matrice consistante 100% et faisons varier le pas de temps normalisé p pour évaluer son influence sur l'évolution de la dispersion (Figure I.3.b). Nous observons une estimation par défaut de v_{ph} pour $p \geq 0,7$ et une estimation par excès de v_{ph} pour $p < 0,7$. La dispersion pour $p \approx 0,6$ n'excède pas 1% pour un maillage de quatre divisions par longueur d'onde. Notons également que pour $p \geq 0,7$, la précision diminue lorsque p augmente alors que pour $p < 0,7$, la précision diminue lorsque p diminue. Considérant un p fixé, l'utilisation d'une matrice consistante nous procure une dispersion moins importante qu'avec une matrice concentrée.

L'intérêt d'une combinaison des matrices M_C et M_L n'intervient donc que pour $p < 0,7$ puisque les estimations avec $M_C=100\%$ et $M_L=100\%$ sont dans ce cas de signes opposés. Sinon, pour $p \geq 0,7$, la précision des $M_C=100\%$ est plus grande quelque soit p pris sur cet intervalle. On propose de confirmer ce commentaire en réalisant l'analyse de la dispersion pour un p fixé à 0,2 en utilisant des combinaisons où $\alpha=0,5$ et $\alpha=0,65$ (Figure

I.3c). On observe les dispersions attendues, plus faibles que pour les cas $\alpha=0$ et $\alpha=1$. Dans la suite de l'étude, nous nous servons des combinaisons de matrices de masse en considérant les remarques précédentes.

I.2.2.2. Incidence non nulle

Dans cette partie, nous considérons une onde d'incidence non nulle et faisons varier les paramètres α et p définis précédemment. Rappelons que nous nous situons dans un milieu isotrope.

Choisissons d'abord de fixer le paramètre p à 0,8, valeur où les dispersions avec l'incidence $\theta = 0$ étaient de même signe quelle que soit la consistance de la matrice de masse. Analysons les trois cas d'une matrice de masse consistante, concentrée, et consistante à 50 % et faisons varier l'incidence de l'onde (Figure I.4). L'on remarque que dans ces trois cas, la dispersion numérique augmente avec l'incidence ($0 < \theta < \pi/4$) et que la vitesse de phase est estimée par défaut. Les variations de dispersion en fonction de l'incidence ne sont pas cohérentes avec le caractère isotrope du milieu. Ces variations caractérisent l'anisotropie créée par la discrétisation géométrique utilisée.

Choisissons maintenant de fixer le paramètre p à 0,2, valeur où les dispersions avec l'incidence $\theta = 0$ étaient de signes opposés selon le choix d'une matrice consistante ou concentrée. Analysons les cas d'une matrice consistante, concentrée, consistante à 50% et consistante à 65% en faisant varier l'angle d'incidence de l'onde (Figure I.5).

Dans le cas d'une matrice concentrée (Figure I.5b), on remarque que la précision baisse lorsque l'incidence augmente et que les vitesses de phase sont estimées par défaut, comme c'était le cas pour un $p = 0,8$.

Au contraire, le cas d'une matrice consistante pure (Figure I.5a) fait apparaître des vitesses de phase estimées par excès, avec une augmentation de la précision lorsque l'incidence augmente.

L'utilisation d'une matrice consistante à 50% (Figure I.5c) nous donne une meilleure précision qu'avec l'utilisation des matrices consistante pure et concentrée pure, ce qui est conforme à nos prévisions puisque nous nous trouvons dans un domaine où $p < 0,7$. Les vitesses de phase sont estimées par défaut et la précision diminue lorsque l'incidence augmente, nous incitant à modifier le pourcentage entre les matrices pour augmenter la précision.

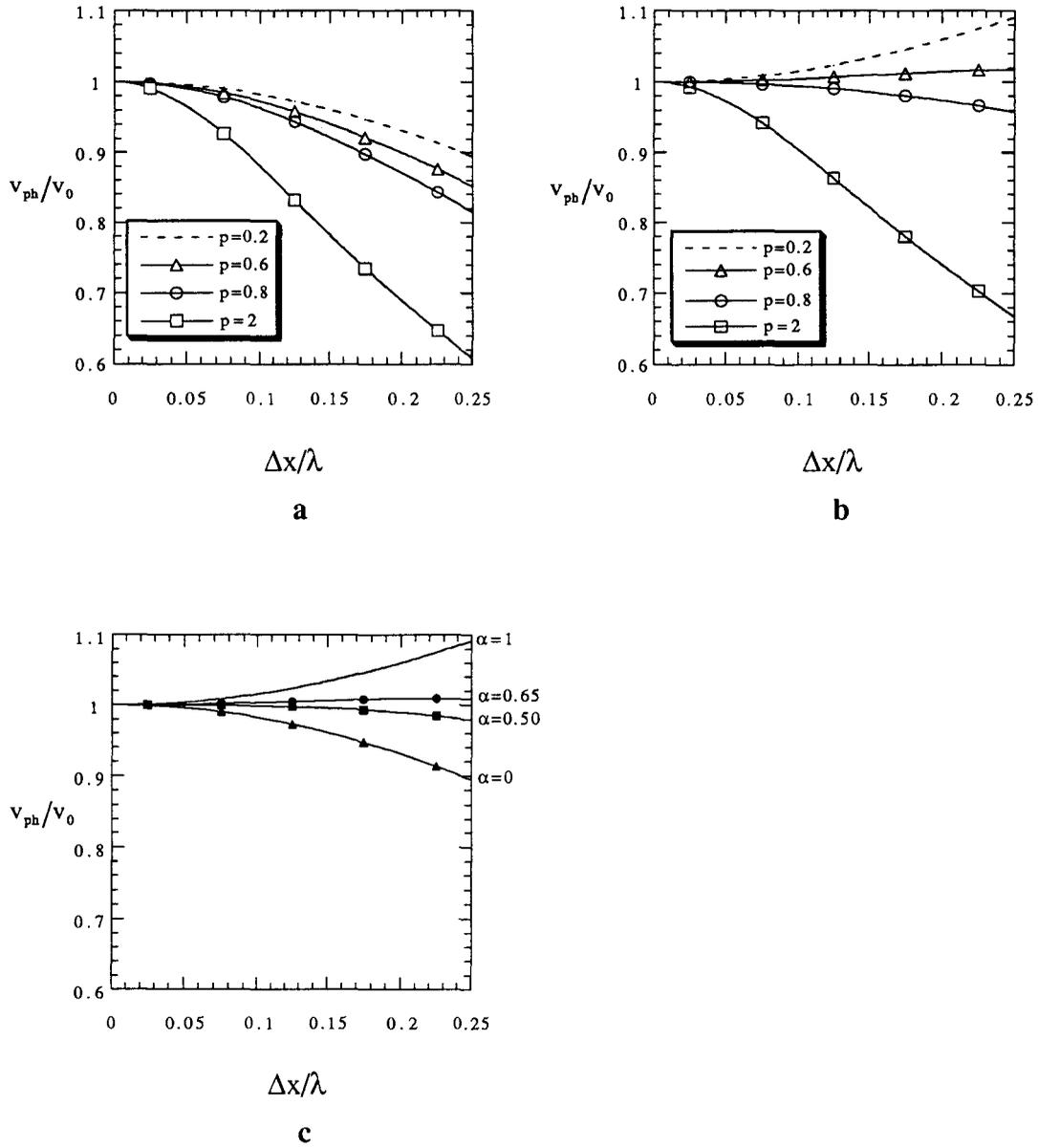
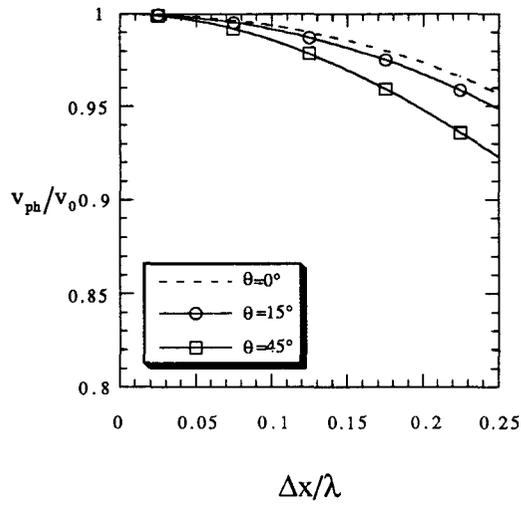
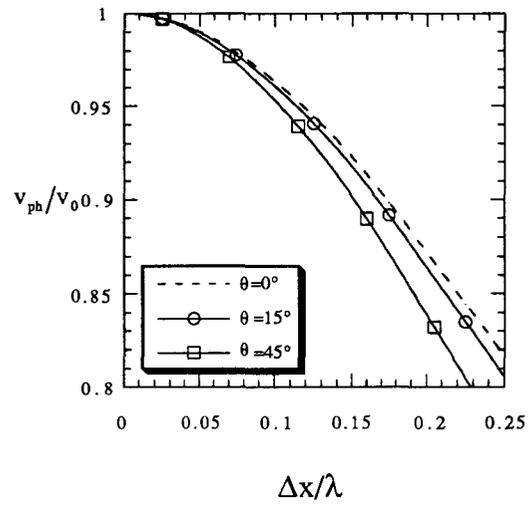


Figure I.3 : Etude de l'influence du pas de temps normalisé p et de la discrétisation géométrique sur la dispersion numérique d'une onde à incidence nulle.

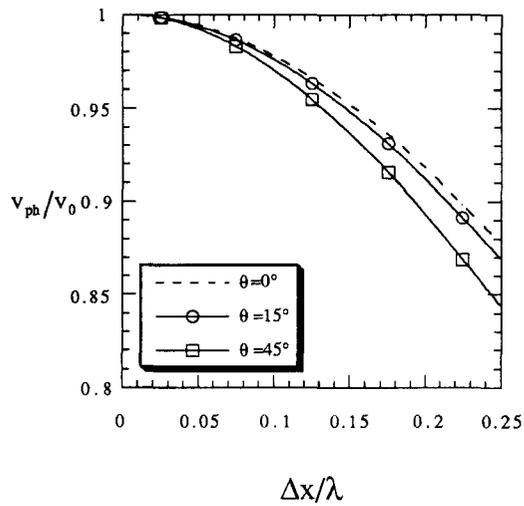
- a) Matrice de masse concentrée ($\alpha = 0$).
- b) Matrice de masse consistante ($\alpha = 1$).
- c) Combinaisons de matrices de masse pour $p=0,2$.



a



b



c

Figure I.4: Etude de l'influence de l'angle d'incidence de l'onde et de la discrétisation géométrique sur la dispersion pour $p = 0,8$.

a) Matrice consistante ($\alpha = 1$).

b) Matrice concentrée ($\alpha = 0$).

c) Combinaison de matrices ($\alpha = 0,5$).

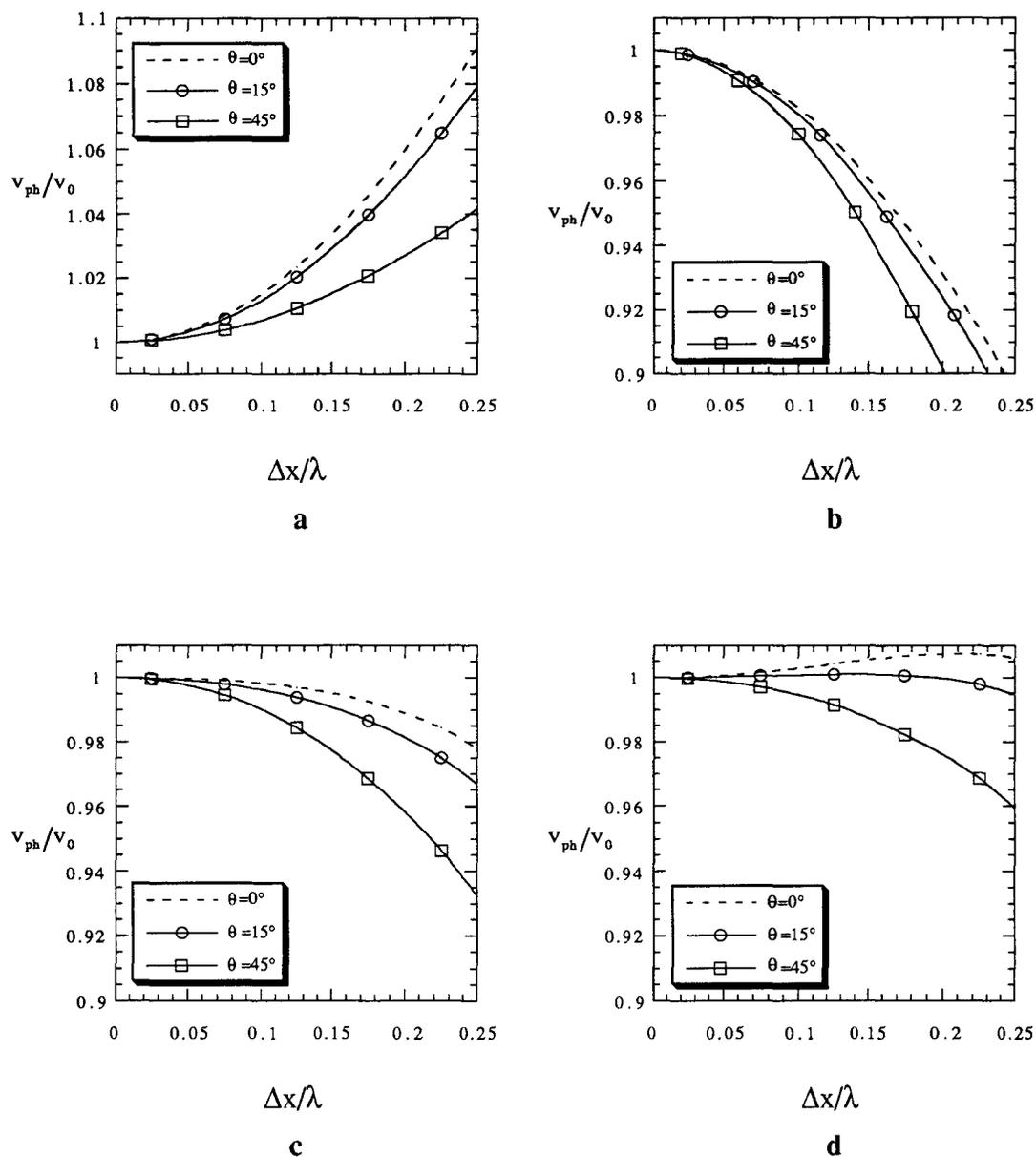


Figure I.5: Etude de l'influence de l'incidence de l'onde et de la discrétisation géométrique sur la dispersion pour $p = 0,2$.

- a) Matrice consistante ($\alpha = 1$).
- b) Matrice concentrée ($\alpha = 0$).
- c) Combinaison de matrices ($\alpha = 0,5$).
- d) Combinaison de matrices ($\alpha = 0,65$)

Si l'on désire privilégier la précision pour une incidence de $\theta=15^\circ$, on peut choisir une matrice consistante à 65% (Figure I.5d). Ici, les variations ne sont plus linéaires et l'on peut très bien trouver une précision meilleure avec un maillage géométrique moins fin : c'est le cas, par exemple, pour $\theta=0^\circ$, avec 0,7 % d'erreur pour $\frac{\lambda}{\Delta x} = 5$ et 0,5% pour $\frac{\lambda}{\Delta x} = 4$. On peut donc adapter le pourcentage de la combinaison au problème devant lequel l'on se trouve, suivant l'incidence de l'onde considérée et le pas de temps normalisé p utilisé.

Dans tous les cas et pour p et $\frac{\lambda}{\Delta x}$ fixés, l'anisotropie numérique pour $\theta \neq 0$ s'est caractérisée par une estimation par défaut des vitesses de phase obtenues pour $\theta = 0$.

I.3. EQUATION D'ONDE ELASTIQUE

I.3.1. Méthode d'analyse

Considérons l'équation d'onde élastique:

$$(I.7) \quad (\lambda_L + \mu_L) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu_L \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0$$

Pour effectuer une étude qualitative de la même manière que pour l'équation d'onde scalaire, on recherche la solution du champ de déplacement sous la forme (Bamberger, 1980):

$$(I.8) \quad u_i(X_K, Z_K, t_j) = A_{iK} e^{i(k_x X_K + k_z Z_K - \omega t_j)}$$

Le système d'équations d'éléments finis correspondant peut toujours s'écrire sous la forme du système (I.2).

Utilisons la discrétisation temporelle sur trois pas de temps (I.3), et une solution de u sous la forme (I.8). Si l'on se place encore une fois dans un domaine homogène, infini, où Δx et Δz sont constants, on peut passer d'un système de $(2n \times 2n)$ équations à un système (2×2) , le système étant dégénéré d'ordre n . Il suffit alors de prendre $n=18$ pour résoudre ce système qui nous procure deux modes de propagation, ceux des ondes de compression et de cisaillement dont les vitesses de propagation sont :

$$v_{0p} = \left(\frac{\lambda_L + 2\mu_L}{\rho} \right)^{1/2} \text{ pour les ondes P, et}$$

$$v_{0s} = \left(\frac{\mu_L}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{pour les ondes S.}$$

De manière analogue à l'étude de l'équation scalaire, on peut de nouveau évaluer la dispersion du schéma numérique utilisé.

I.3.2. Etude paramétrique

Si l' incidence de l'onde dans le milieu est nulle ($\theta = 0$), on retrouve exactement les mêmes évaluations qu'avec l'utilisation de l'équation scalaire. Les variations de la dispersion selon le paramètre p et les combinaisons de matrices de masse sont donc identiques à celles déterminées grâce à l'équation scalaire.

Si l' incidence de l' onde dans le milieu est non nulle ($\theta \neq 0$), les dispersions sont cette fois modifiées par rapport à celles obtenues lors de l'utilisation de l'équation scalaire. Cette différence est due à la prise en compte du couplage entre les deux directions x et z par l'équation élastique, couplage n'intervenant pas dans le cas $\theta = 0$. On remarque que, quelque soient la combinaison α de matrices de masse employée et le paramètre p utilisé :

- pour les ondes S, le rapport v_{ph}/v_0 croît avec l'incidence, que l'on estime par défaut ou par excès la valeur analytique $v_{ph}/v_0 = 1$. Cela signifie que la dispersion n'augmente pas forcément avec l'incidence. Des exemples illustrent cette remarque sur la figure I.6.

- pour les ondes P, c'est l'inverse qui se produit : le rapport v_{ph}/v_0 décroît lorsque l'incidence augmente. Ici non plus, la dispersion n'augmente pas forcément avec l'incidence. Des exemples illustrent cette remarque sur la figure I.7.

L'anisotropie est ainsi caractérisée différemment selon que l'on considère des ondes de compression ou de cisaillement. Ce phénomène peut être dû aux différences de direction de déplacement de ces deux ondes.

I.3.3. Influence du coefficient de Poisson ν .

Dans la littérature, on associe souvent le coefficient de Poisson ν aux causes de la dispersion numérique (Marfurt, 1984). En réalité, l'influence de ν sur la dispersion intervient dans le pas de temps normalisé 'p' par l'intermédiaire de la vitesse de propagation de l'onde. On a :

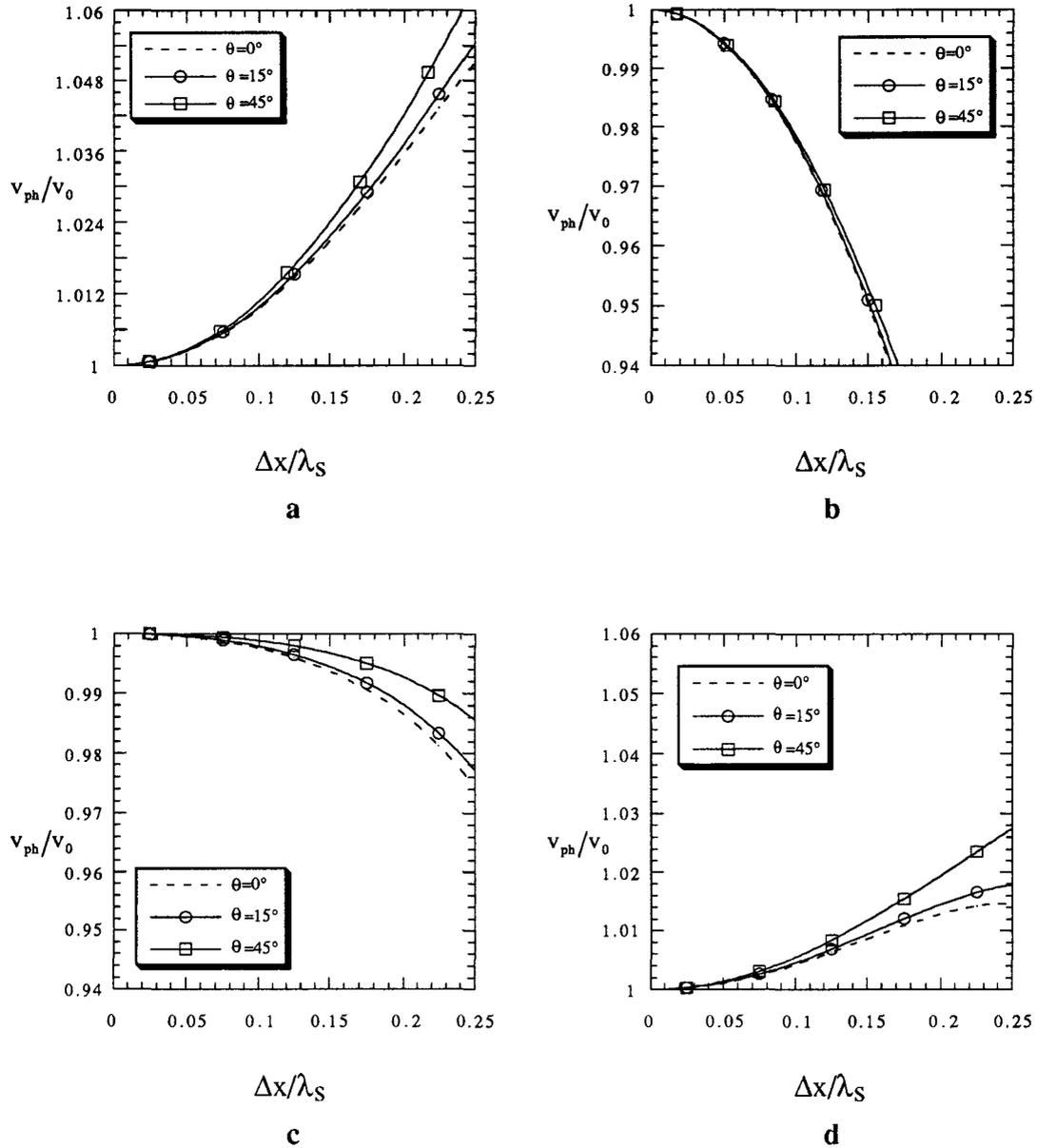


Figure I.6: Etude de l'influence de l'incidence de l'onde et de la discrétisation géométrique sur la dispersion pour les ondes de cisaillement.

- a) $p=0,45$, $\alpha=1$
- b) $p=0,45$, $\alpha=0$
- c) $p=0,45$, $\alpha=0,64$
- d) $p=0,045$, $\alpha=0,64$

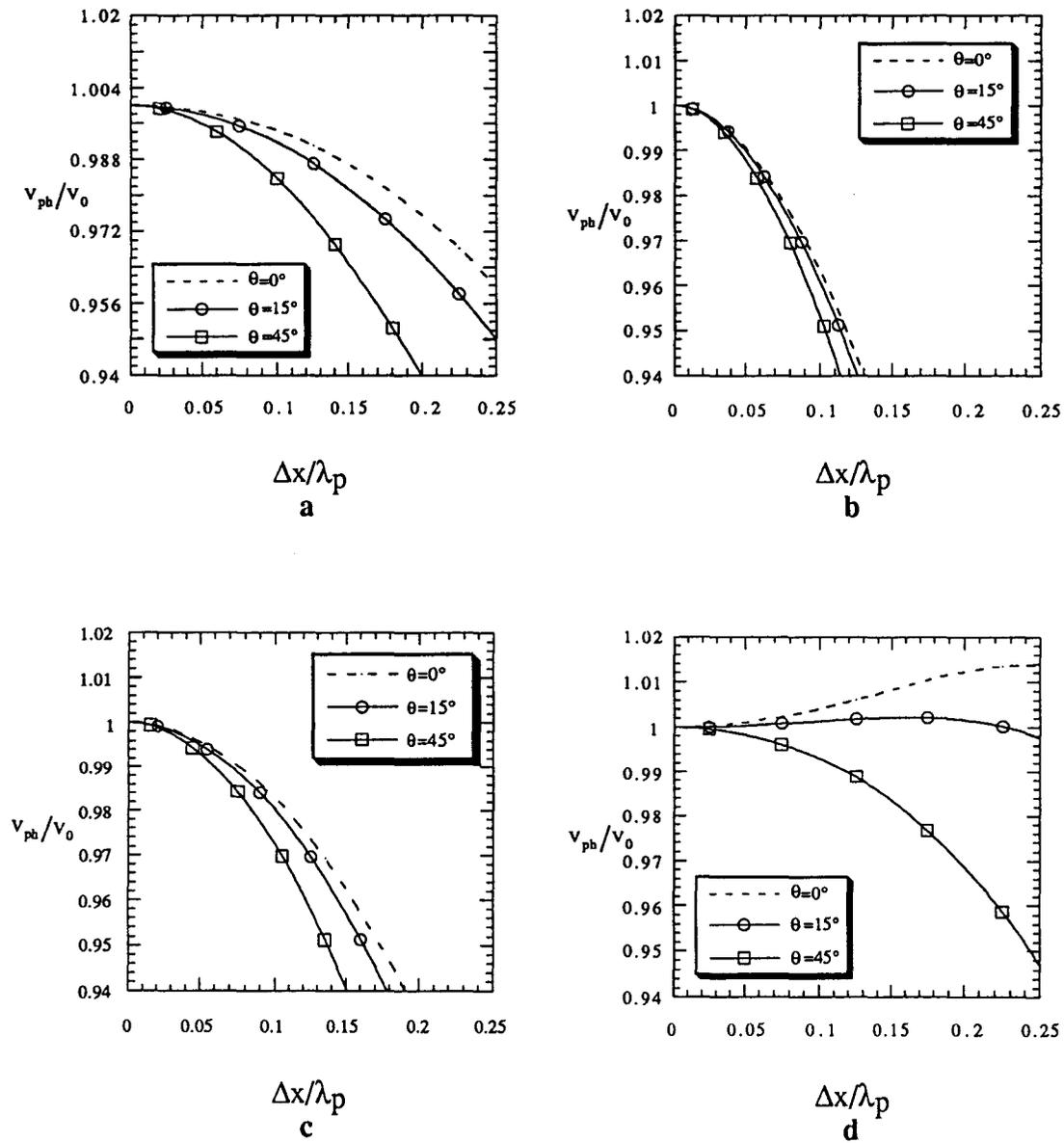


Figure I.7: Etude de l'influence de l'incidence de l'onde et de la discrétisation géométrique sur la dispersion pour les ondes de compression.

- a) $p=0,81, \alpha=1$
- b) $p=0,81, \alpha=0$
- c) $p=0,81, \alpha=0,64$
- d) $p=0,081, \alpha=0,64$

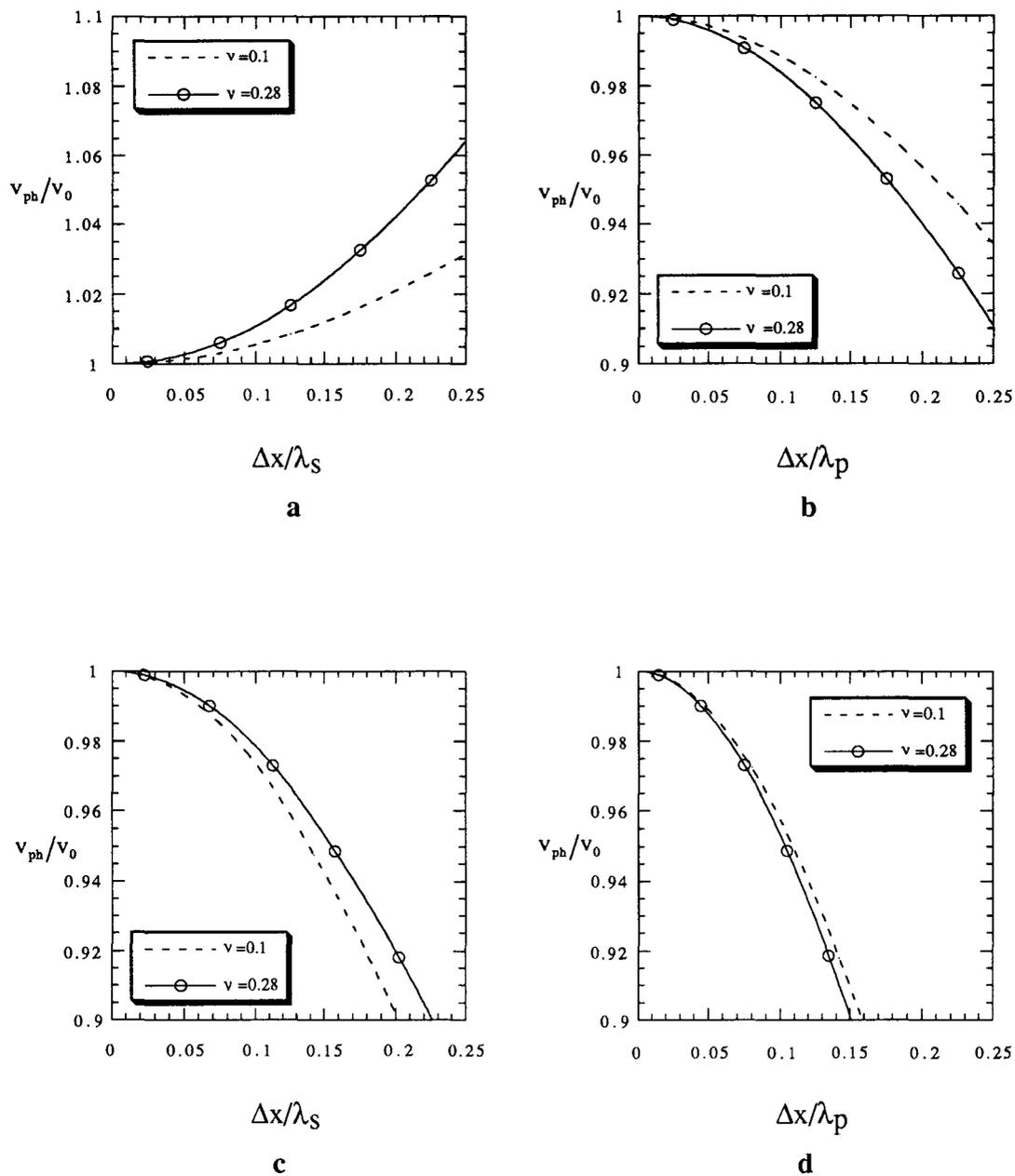


Figure I.8: Etude de l'influence du coefficient de Poisson et de la discrétisation géométrique sur la dispersion pour une incidence fixée à $\theta = 45^\circ$.

$$\nu = 0,1 \Rightarrow p_s = 0,48 \text{ et } p_p = 0,73$$

$$\nu = 0,28 \Rightarrow p_s = 0,45 \text{ et } p_p = 0,81$$

Cas $\alpha = 1$, a) onde S, b) onde P.

Cas $\alpha = 0$, c) onde S, d) onde P.

$$p_P = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \text{correspondant aux ondes P.}$$

$$p_S = \left[\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{1/2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \text{correspondant aux ondes S.}$$

Où E est le module d'Young.

On peut poser ces deux équations sous la forme:

$$p_P = f(E, \rho, \Delta t, \Delta x) \cdot g(\nu)$$

$$p_S = f(E, \rho, \Delta t, \Delta x) \cdot h(\nu)$$

$$\text{avec } g(\nu) \text{ croissante sur } I = \left] 0, \frac{1}{2} \right[$$

et $h(\nu)$ décroissante sur I.

Donc, si ρ , E, Δt et Δx sont fixés et si ν croît alors p_P croît et p_S décroît. Par contre si ν décroît alors p_P décroît et p_S croît.

Faire varier ν revient donc à faire varier p . Des exemples illustrent cette remarque sur la figure I.8. Pour une incidence θ fixée, on retrouve bien les variations de dispersions obtenues précédemment lorsque l'on faisait varier p .

I.4. APPLICATION A UN PROBLEME DE PROPAGATION DANS UN MASSIF DE SOL

I.4.1. Présentation de l'exemple

L'analyse précédente peut nous servir pour traiter les problèmes de dispersions présents sur les sismogrammes synthétiques. Un exemple simple d'application peut être présenté en traitant le cas d'un modèle physique à deux couches dont la seconde est semi infinie (Figure I.9a). Une source S appliquée verticalement génère un front d'onde dans le massif. Dans le sismogramme représentatif de ce modèle, nous allons nous intéresser à la réflexion d'onde de compression **Pr** et aux deux ondes directes de compression et de cisaillement **Pd** et **Sd** (Figure I.9b).

Les ondes directes se propagent le long de la surface ce qui implique un temps d'arrivée variant de façon linéaire en fonction de la distance X entre la source et les récepteurs. Cette variation linéaire se traduit par une droite sur les sismogrammes. La réflexion provenant d'une interface plane infinie se traduit quant à elle sur les sismogrammes par une hyperbole dont l'équation est fonction du temps t_0 d'aller retour entre l'interface et la surface. Cette hyperbole possède une asymptote dont la pente est la vitesse de propagation moyenne entre l'interface et la surface.

Ici, la dispersion des ondes **Pd** et **Sd** est traitée en considérant que leur incidence dans le milieu est $\theta = \pi/2$. L'incidence de l'onde de compression réfléchie **Pr** sera différente pour chaque récepteur r_i (Figure I.9c). Bien sur, plus le récepteur r_i sera éloigné de la source, plus l'incidence θ_i de cette onde sera grande, θ_i restant toutefois inférieur à $\pi/4$. L'on pourra considérer la même incidence θ pour les deux trajets **SM** et **MR** de l'onde réfléchie **Pr** (Figure I.9a), cette onde se réfléchissant symétriquement par rapport à l'axe vertical.

I.4.2. Maîtrise de la dispersion au niveau d'un sismogramme synthétique

Pour illustrer ceci, prenons le cas du Plexiglas où la vitesse des ondes de compression est $V_P = 2750$ m/s et celle des ondes de cisaillement $V_S = 1500$ m/s. Si l'on se fixe par exemple un pourcentage de 10% de dispersion à ne pas dépasser pour un maillage de quatre divisions par longueur d'onde, nous pouvons choisir par tâtonnements un pas de temps normalisé $p_P = 0,8$ pour les ondes de compression P (impliquant $p_S = 0,44$ pour les ondes de cisaillement S), ainsi qu'une matrice de masse consistante 100%. Dans ce cas, les dispersions des trois ondes de la figure I.9a sont représentées dans la figure I.10 : la dispersion ne dépasse pas 10%. Soulignons que la dispersion de l'onde de compression réfléchie doit être considérée indépendamment pour chaque récepteur (Figure I.11), l'incidence à considérer variant selon la position de ce récepteur en surface (Figure I.9c).

La figure I.12 représente les sismogrammes obtenus avant et après le contrôle de la dispersion pour une étude sur bloc de Plexiglas de hauteur 120 mm. Les simulations numériques utilisent les recommandations de l'Annexe 1. Ce bloc est excité en sa surface par une force constituée d'une fonction Ricker de fréquence dominante 100 kHz, de point d'inflexion $t_S = 3,18 \cdot 10^{-6}$ s, définie en Annexe 1. Cinquante récepteurs sont disposés en surface à partir de 25 mm de la source et la distance entre récepteurs est de 5 mm. Selon les vitesses des ondes et la profondeur de la couche, on peut analytiquement donner les temps d'aller retour sous la source des ondes réfléchies **Pr** et **Sr** : $t_{0P} = 0,08$ ms et $t_{0S} = 0,16$ ms.

Le premier sismogramme est obtenu sans analyse de la dispersion (Figure I.12b). La matrice de masse est consistante 100%, le pas de temps normalisé est de $p_p = 1.52$ pour les ondes de compression. L'observation des événements sur ce sismogramme se situe dans la zone Z1, avant l'arrivée de l'onde **SdB** de cisaillement directe réfléchi sur le bord gauche du bloc de Plexiglas. Il est très difficile de distinguer les ondes réfléchies **Pr** et **Sr** des autres événements **Sd** et **Pd**. La dispersion des deux ondes directes masque la visualisation des ondes réfléchies. L'analyse de la dispersion nous montre son importance sur les résultats (Figure I.11). Les vitesses de propagation d'ondes observées sont inexactes au regard de leurs valeurs analytiques introduites comme données dans la simulation (Pour les ondes directes, on observe $V_P = 3000$ m/s et $V_S = 1860$ m/s).

Le sismogramme de la figure I.12c est obtenu en maîtrisant la dispersion numérique comme dans la figure I.11 (Choix d'une matrice consistante 100% , $p_p = 0,8$). Grâce à cela, les vitesses de propagation sont respectées ($V_P = 2750$ m/s et $V_S = 1500$ m/s), ainsi que les valeurs de t_0 pour les ondes **Pr** et **Sr**. Cela montre que la simulation est correcte en ce qui concerne ces aspects. Une meilleure visualisation d'événements réfléchis **Pr** et **Sr** est alors possible. On peut remarquer la présence d'ondes notées **Og** qui pourraient être interprétées comme des ondes guidées dont l'observation par différences finies a été réalisée par Robertsson (1994).

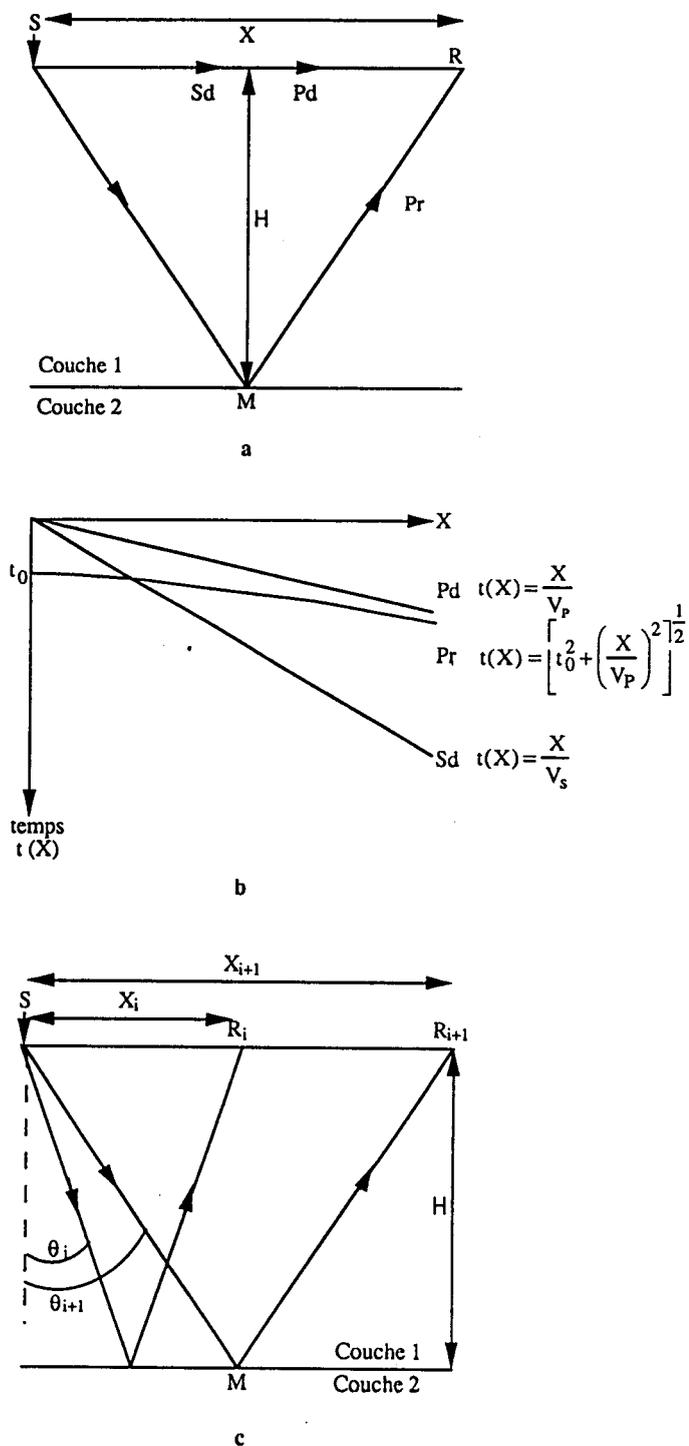


Figure I.9: Représentation d'un modèle à deux couches. **S** est la source, **R** le capteur, **Pd** l'onde directe de compression, **Sd** l'onde directe de cisaillement, **Pr** la réflexion d'onde de compression, **M** le point de la réflexion, **H** l'épaisseur de la première couche, **X** la distance entre la source et le capteur. V_P et V_S sont les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement. a) Représentation dans une coupe verticale, b) Présentation des temps d'arrivée des trois ondes en fonction de **X**, c) Représentation de l'arrivée de l'onde de compression réfléchi sur deux récepteurs distincts R_i et R_{i+1} , θ est l'angle d'incidence de l'onde.

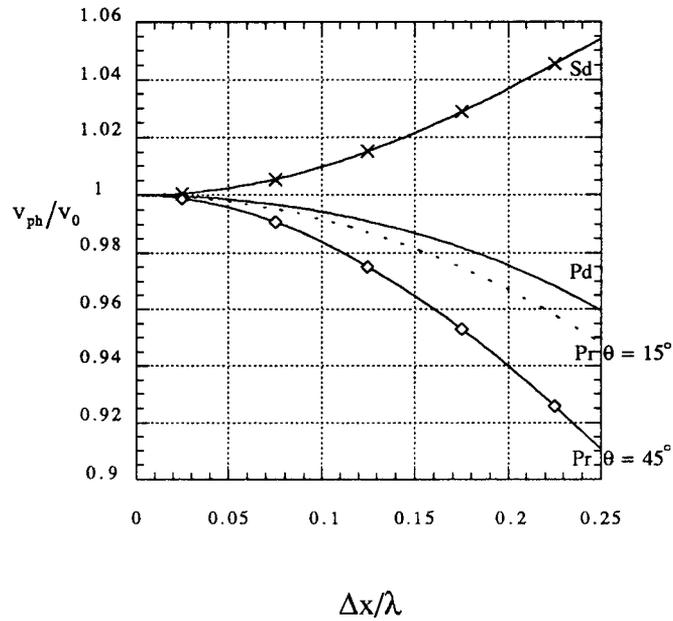


Figure I.10 : Dispersion des trois ondes de la figure I.9 avec $p_p=0,8$ et $p_s=0,44$. Pour la réflexion d'onde de compression Pr , les exemples de deux récepteurs où l'angle d'incidence de l'onde est de 15 et 45 degrés ont été représentés.

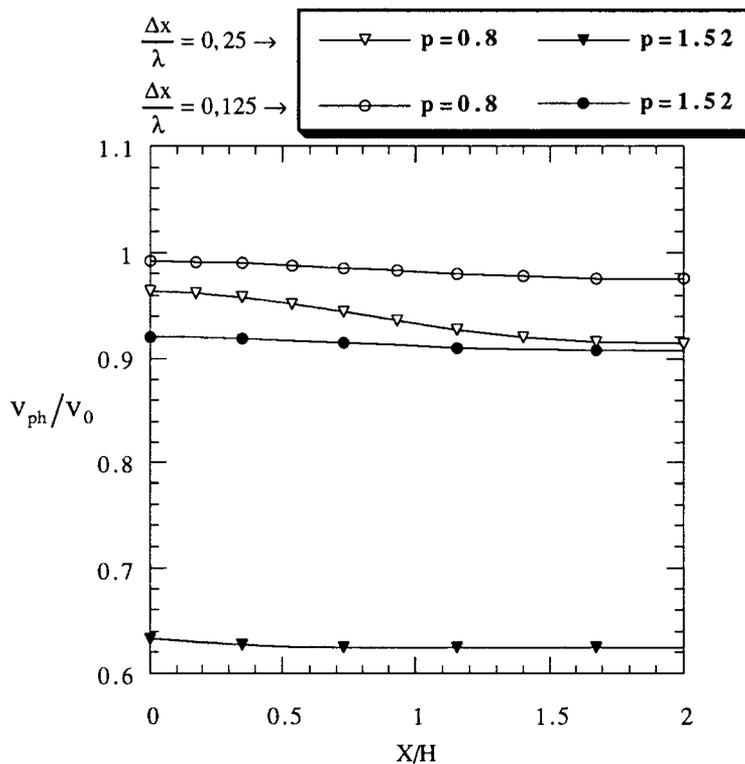


Figure I.11: Dispersion de l'onde de compression de la figure I.9a selon la disposition des récepteurs en surface (Figure I.9c) et les choix de p et de $\Delta x/\lambda$. Ici, α vaut 1.

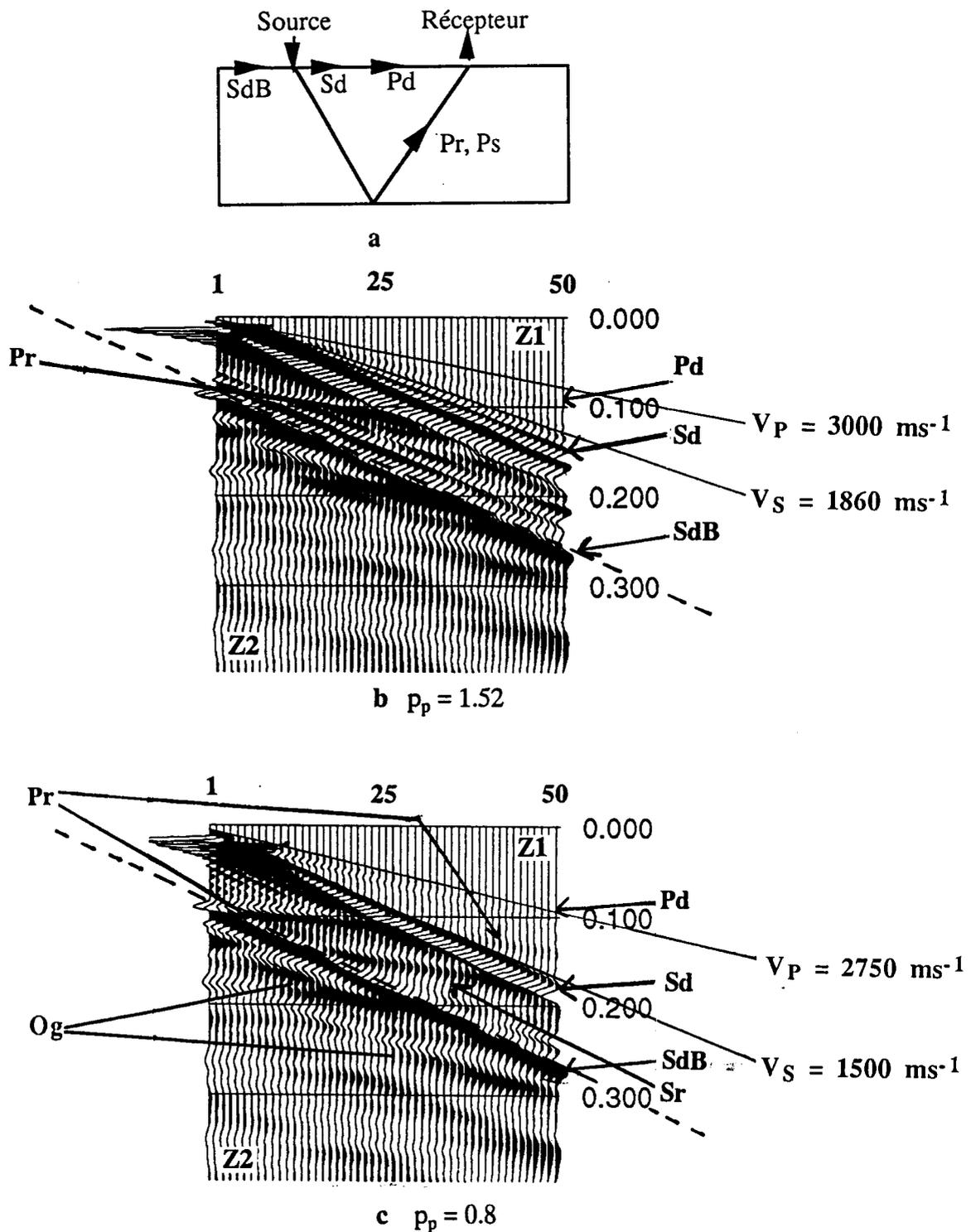


Figure I.12: a) Présentation des notations d'ondes arrivant sur les sismogrammes (b) avant, (c) après le contrôle de la dispersion, Pd onde directe de compression, Sd onde directe de cisaillement, Pr réflexion d'onde de compression, Sr réflexion d'onde de cisaillement, SdB réflexion d'onde de cisaillement directe sur le bord gauche, les zones Z1 et Z2 sont séparées par la ligne pointillée:

en abscisse: numérotation des récepteurs (intertrace 5 mm),
 en ordonnées: temps d'arrivée (en ms).

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un outil numérique permettant l'évaluation de la dispersion. Cet outil permet de fixer les paramètres de discrétisation (maillage, pas de temps, combinaison des matrices de masse) en fonction du seuil de dispersion souhaité connaissant la vitesse de propagation et l'incidence de l'onde dans le milieu (Shahrour et Moreaux, 1995a).

Les études réalisées montrent qu'une combinaison des matrices de masse consistante et concentrée est conseillée pour un pas de temps normalisé $p < 0,7$. Au delà de cette valeur, l'utilisation d'une matrice de masse consistante donne une meilleure précision. Dans les simulations numériques, il est prudent de garder p dans un intervalle compris entre 0,5 et 1. Pour p grand (exemple: $p = 2$) la dispersion est tout de suite très importante même si le maillage est fin (exemple: $\Delta x/\lambda = 0,1$).

Une application menée sur une barre de Plexiglas a montré l'importance de l'analyse de la dispersion pour simuler correctement les vitesses de propagation d'ondes et pour éviter les déformations de certains événements. Le travail réalisé a procuré un outil et des recommandations permettant le contrôle de la dispersion numérique.

CHAPITRE II

PRISE EN COMPTE DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL DANS LA MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION D'ONDES

Résumé

Le travail de ce chapitre est composé de trois parties. La première consiste à relier le coefficient de qualité Q , qui exprime en géophysique l'amortissement matériel du terrain, aux paramètres utilisés dans l'amortissement de type Rayleigh qui est introduit dans notre code de calcul.

La seconde partie consiste à étudier les effets des paramètres de Rayleigh sur l'amortissement matériel. Cette étude débouche sur des recommandations au niveau du choix de ces paramètres selon le type de sol et le type d'onde privilégiée.

La troisième partie consiste à tester la prise en compte de l'amortissement sur un cas type en observant les effets énergétiques et fréquentiels de l'amortissement. Cette étude permet de montrer l'importance de la prise en compte de cet amortissement dans les simulations pour s'approcher des phénomènes observés in-situ.

II.1.Introduction

Le chapitre précédent a permis de présenter un outil de maîtrise de la dispersion numérique. Un autre problème de modélisation de propagation d'ondes sismiques est celui de la prise en compte de l'amortissement matériel. Ce phénomène doit être pris en considération pour respecter l'aspect énergétique et fréquentiel de différents événements présents sur les sismogrammes. Cette prise en compte rapproche les simulations des phénomènes observés sur le terrain et peut aider à améliorer l'étude de la possibilité de localisation de cavités par réflexion sismique.

II.2.NOTION D'AMORTISSEMENT MATERIEL

II.2.1. Décroissance de l'amplitude de l'onde

Une onde qui se propage dans un matériau est soumise à une dissipation d'énergie due aux frottements internes. Ce phénomène, couramment nommé amortissement matériel, est caractérisé par une décroissance exponentielle de l'amplitude de l'onde. Cet amortissement vient s'ajouter à l'amortissement géométrique dû à la répartition de l'énergie sur le front d'onde (Figure II.1). La décroissance de l'amplitude peut être écrite sous la forme (Dym, 1976):

$$(II.1) \quad A(r_2) = A(r_1) C_g C_m$$

où $A(r)$ est l'amplitude de l'onde à une distance r de la source, $r_1 \leq r_2$.

Les termes C_g et C_m désignent respectivement les facteurs dus aux contributions de l'amortissement géométrique et de l'amortissement matériel. Le terme C_m peut s'exprimer sous la forme:

$$(II.2) \quad C_m = \exp(-d(r_2 - r_1)),$$

où $d(r)$ est une fonction tenant compte de la décroissance de l'onde.

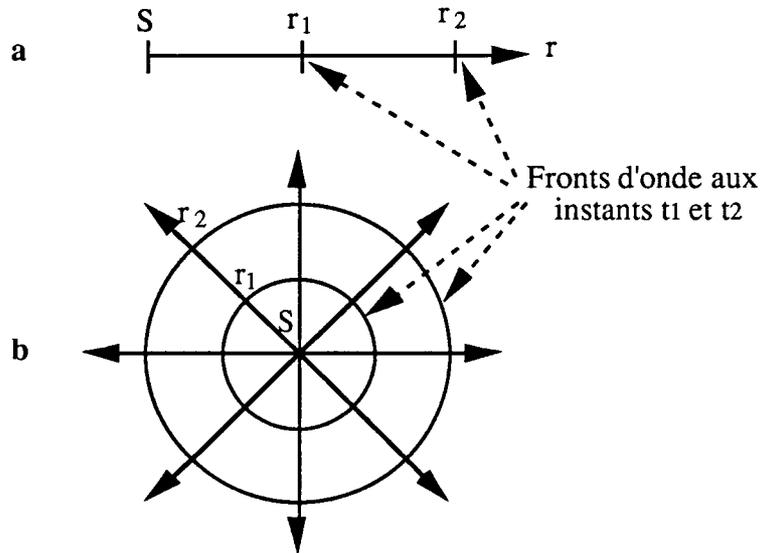


Figure II.1: Représentation schématique de la propagation d'onde sphérique a) en une dimension b) en deux dimensions. L'onde naît en S à t_0 .

II.2.2 Lien entre le coefficient de qualité Q et le coefficient d'amortissement α

D'un point de vue géophysique, on caractérise généralement l'amortissement matériel d'un matériau par son facteur de qualité Q (Aki, 1980):

$$(II.3) \quad Q = -\frac{2\pi E}{\Delta E}$$

avec E énergie fournie au système
 - ΔE énergie dissipée par le système au cours d'un cycle.

Pour un milieu ayant un comportement linéaire, l'amplitude de l'onde A est proportionnelle à:

$$(II.4) \quad A = E^{\frac{1}{2}}$$

En posant $\Delta E = 2A\Delta A$ et en utilisant la relation (II.3), on obtient:

$$(II.5) \quad Q = -\frac{\pi A}{\Delta A}$$

Aki, 1980, a montré que la décroissance de l'amplitude de l'onde due à l'amortissement matériel pouvait être observée de façon mono dimensionnelle suivant x :

$$(II.6) \quad \Delta A = \left(\frac{dA}{dx} \right) \lambda$$

avec $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}$ longueur d'onde,
 v vitesse de propagation de l'onde,
 ω pulsation de l'onde.

Si l'on substitue (II.6) dans (II.5), et si l'on intègre suivant x , on obtient l'amplitude de l'onde au point d'observation x :

$$(II.7) \quad A(x) = A_0 \exp\left(-\frac{\omega}{2Qv} x\right)$$

avec A_0 amplitude à l'origine de l'onde.

En comparant les équations (II.7) et (II.1) utilisée pour $r_1 = 0$, on peut retrouver une relation couramment employée dans la littérature (Hatherly, 1986). Si l'on pose $r_2 = x$, on obtient:

$$d(x) = -\frac{\omega}{2Qv} x$$

où l'on peut poser:

$$(II.8) \quad \alpha = \frac{\omega}{2Qv}$$

où α est le coefficient d'amortissement matériel rendant compte de la décroissance exponentielle de l'onde. Cette formulation est couramment utilisée en géophysique (Aki et al, 1980).

La question qui se pose est de savoir comment introduire cet aspect dans notre simulation numérique.

II.3.MODELISATION DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL

II.3.1.Amortissement de Rayleigh

Dans la loi de comportement, il est possible d'utiliser un module d'Young complexe pour tenir compte d'un amortissement, sous la forme:

$$E^* = E(1 + iE_i)$$

où E est le module d'Young,
 E^* le module d'Young complexe,
 E_i la partie imaginaire de E^* .

Cette utilisation nous procure une matrice de rigidité complexe du type:

$$K^* = K(1 + iK_i)$$

où K est la matrice de rigidité,
 K^* la matrice de rigidité complexe,
 K_i la partie imaginaire de K^* .

Dans ce cas, la résolution du système d'équations devient plus lourde et la taille mémoire doit être doublée. Afin d'éviter ce problème, on propose d'utiliser l'amortissement de Rayleigh qui est couramment utilisé en analyse dynamique des structures.

Considérons le système d'équations différentielles:

$$(II.9) \quad \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

D'après cette méthode, la matrice d'amortissement \mathbf{C} s'écrit sous la forme d'une combinaison linéaire des matrices de masse et de rigidité :

$$(II.10) \quad \mathbf{C} = \mathbf{a}_M \mathbf{M} + \mathbf{a}_K \mathbf{K}$$

où l'unité de \mathbf{a}_M est inverse au temps et celle de \mathbf{a}_K est le temps.

Dans une base modale, l'équation (II.9) peut s'écrire sous la forme :

$$(II.11) \quad \mathbf{m}_n \ddot{\mathbf{d}}_n + \mathbf{c}_n \dot{\mathbf{d}}_n + \mathbf{k}_n \mathbf{d}_n = \mathbf{f}_n$$

où d_n est le déplacement dans la base modale,
 $m_n = \phi_n^T M \phi_n$
 $c_n = \phi_n^T C \phi_n$
 $k_n = \phi_n^T K \phi_n$
 $f_n = \phi_n^T F$
 ϕ_n le vecteur modal.

On peut écrire (II.11) avec de nouveaux paramètres sous la forme :

$$(II.12) \quad \ddot{d}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{d}_n + \omega_n^2 d_n = \bar{f}_n$$

$$(II.13) \quad \text{où} \quad \xi_n = \frac{c_n}{2\omega_n m_n} = \frac{a_M}{2\omega_n} + \frac{a_K \omega_n}{2}$$

est le coefficient d'amortissement modal,

$$\omega_n^2 = \frac{k_n}{m_n} \quad \text{la pulsation,}$$

$$\bar{f}_n = \frac{f_n}{m_n} \quad \text{la force effective.}$$

Le coefficient a_M joue un rôle d'amortissement sur les basses fréquences, a_K sur les hautes fréquences (Figure II.2). Pour un matériau donné, il est suffisant de connaître deux coefficients d'amortissement ξ_n obtenus pour deux fréquences ω_n distinctes pour déterminer les coefficients a_M et a_K . En géophysique, on ne dispose que d'un coefficient de qualité Q pour un matériau. Ceci nous amène à chercher une alternative reliant Q à nos coefficients a_M et a_K .

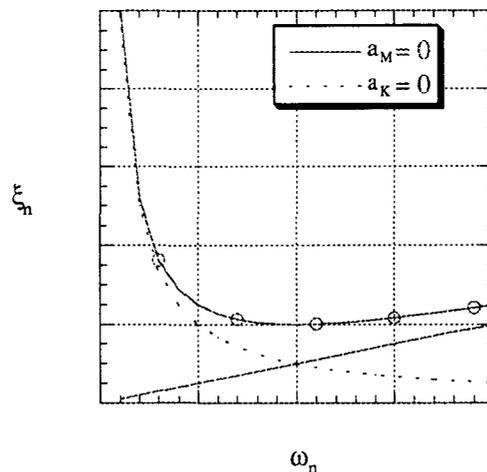


Figure II.2: Représentation du coefficient d'amortissement modal ξ_n en fonction de la fréquence ω_n .

II.3.2. Relation $Q = f(a_M, a_K)$. Analogies avec l'électricité.

L'équation similaire à (II.12) pour un circuit RLC en électricité s'écrit :

$$(II.14) \quad \frac{d^2 i}{dt^2} + 2\xi_e \omega_n \frac{di}{dt} + \omega_n^2 i = 0$$

où $\xi_e = \frac{R}{2L\omega_n}$ est le coefficient d'amortissement en électricité,

$$\omega_n^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{la pulsation,}$$

i l'intensité,

R la résistance,

L l'inductance,

C la capacité.

Recherchons une solution du type $i = i_0 \exp(rt)$. Dans le cas d'un amortissement donnant une solution oscillatoire ($\xi_e < 1$), on a la solution :

$$(II.15) \quad r_{1,2} = -\xi_e \omega_n \pm j\omega_r$$

$$\text{avec } \omega_r^2 = \omega_n^2 (1 - \xi_e^2) \cong \omega_n^2$$

Par définition, le coefficient de qualité en électricité Q_e est donné comme le rapport des tensions dues à l'inductance et à la résistance, ou:

$$(II.16) \quad Q_e = \frac{\omega_r L}{R}$$

On remarque que plus la résistance est élevée, plus le coefficient de qualité est faible, le circuit RLC étant plus amorti. On a aussi, avec (II.14) :

$$(II.17) \quad \xi_e = \frac{\omega_r}{2Q_e \omega_n} \quad \text{ou encore} \quad \xi_e \cong \frac{1}{2Q_e}$$

On remarque que la condition $\xi_e < 1$ implique $Q_e > 0,5$, ce qui restreint le domaine d'utilisation de Q_e .

Par analogie on peut relier le coefficient de qualité en mécanique Q_m à a_M et a_K avec, (II.7) et (II.17) par :

$$(II.18) \quad a_M + a_K \frac{k_n}{m_n} = \frac{\omega_{rm}}{Q_m} \cong \frac{\omega_n}{Q_m}$$

où

$$\omega_{rm}^2 = \omega_n^2 (1 - \xi_n^2) \cong \omega_n^2$$

ce qui nous donne Q_m en fonction de a_M et a_K :

$$(II.19) \quad \frac{1}{Q_m} = \frac{a_M}{\omega_n} + a_K \omega_n$$

II.3.3. Introduction du paramètre χ_0

Pour résoudre l'équation (II.19) à deux inconnues a_M et a_K , il est nécessaire d'introduire un paramètre supplémentaire χ_0 aux côtés du coefficient de qualité Q . On construit ainsi :

$$(II.20) \quad \begin{cases} a_M = \chi_0 \frac{\omega_n}{Q} \\ a_K = (1 - \chi_0) \frac{1}{\omega_n Q} \end{cases}$$

avec $0 \leq \chi_0 \leq 1$ paramètre sans dimension.

Ici, l'amortissement matériel cible une fréquence ω_n pour un Q fixé. Puisque Q dépend du coefficient d'amortissement matériel α (équation II.8), on doit ainsi pouvoir observer dans nos résultats de calculs un α correspondant au choix de a_M et a_K .

L'amortissement matériel modélisé dépend du paramètre χ_0 . Il est donc nécessaire de réaliser une étude selon ce paramètre.

II.3.4. Modifications du code de calcul pour la prise en compte de l'amortissement matériel

Les modifications apportées au code de calcul PECPLAS (Shahrour, 1992) pour l'introduction de l'amortissement matériel sont résumées dans la figure II.3. Elles sont essentiellement portées sur la formation des matrices \bar{K} et \bar{F} présentées dans l'Annexe 1. Les modifications de ces matrices sont dues à l'implémentation de l'équation (II.10) dans leurs écritures. \bar{F} dépend maintenant de K , M , et F :

$$[\bar{\mathbf{K}}] = (\mathbf{a}_M \gamma \Delta t + 1)[\mathbf{M}] + (\beta \Delta t^2 + \mathbf{a}_K \gamma \Delta t)[\mathbf{K}]$$

$$\begin{aligned} \{\bar{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}\} &= \beta \Delta t^2 \{\mathbf{F}_{t+\Delta t}\} \\ &+ [\mathbf{M}] \left((1 + \mathbf{a}_M \gamma \Delta t) \{\mathbf{U}_t\} + \Delta t (1 + \Delta t (\gamma - \beta)) \{\dot{\mathbf{U}}_t\} + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta + \Delta t (\gamma - 2\beta)) \{\ddot{\mathbf{U}}_t\} \right) \\ &+ \mathbf{a}_K [\mathbf{K}] \left(\gamma \Delta t \{\mathbf{U}_t\} + \Delta t^2 (\gamma - \beta) \{\dot{\mathbf{U}}_t\} + \frac{\Delta t^3}{2} (\gamma - 2\beta) \{\ddot{\mathbf{U}}_t\} \right) \end{aligned}$$

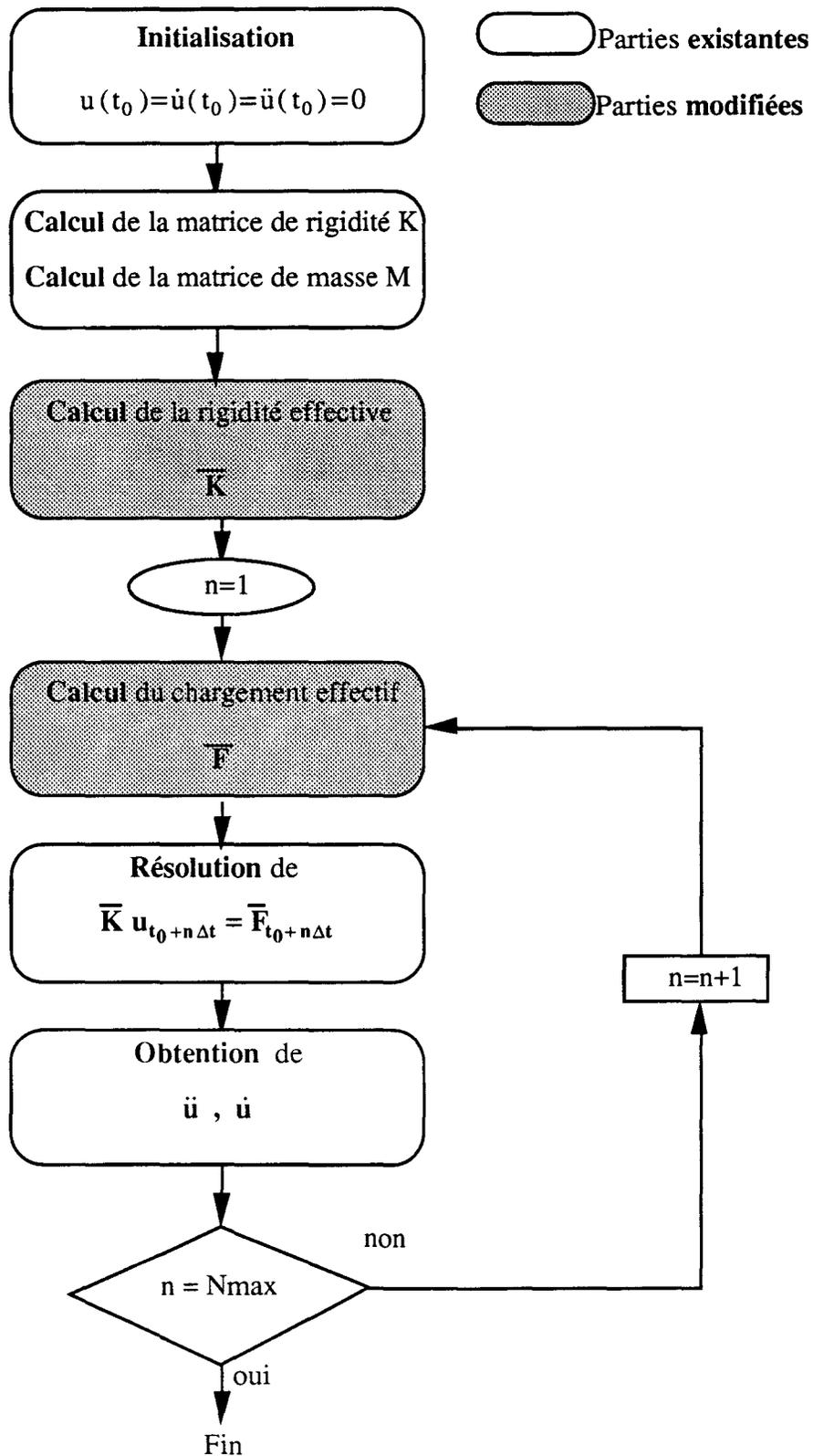


Figure II.3: Schéma de modification du code de calcul PECPLAS pour l'introduction de l'amortissement matériel.

II.4.ETUDE DE L'EFFET DE χ_0 SUR L'AMORTISSEMENT MATERIEL POUR LES SIMULATIONS

II.4.1.Démarche pour la détermination de χ_0

Les différentes valeurs de χ_0 vont agir différemment sur l'amortissement matériel. Pour analyser leurs effets, on propose de suivre la démarche suivante : les équations (II.1) et (II.8) nous permettent d'écrire:

$$(II.21a) \quad A(r_2, t) = A(r_1, t) Cg \exp(-\alpha(r_2 - r_1))$$

Cette dernière équation peut s'écrire dans le domaine fréquentiel sous la forme :

$$|A(r_2, f)| = |A(r_1, f)| Cg \exp(-\alpha(r_2 - r_1))$$

où $|A(r, f)|$ est le module du spectre de l'onde en r , et f la fréquence.

Si l'on applique le logarithme népérien à cette équation en posant $|A(r, f)| > 0$, on obtient:

$$\ln|A(r_2, f)| = \ln|A(r_1, f)| + \ln(Cg) - \alpha(r_2 - r_1)$$

ce qui nous permet de dresser le rapport :

$$(II.21b) \quad R(f) = \frac{\ln|A(r_2, f)| - \ln|A(r_1, f)| - \ln(Cg)}{-\alpha(r_2 - r_1)}$$

Ce rapport vaut 1 si le calcul reproduit exactement l'amortissement souhaité. Lors de simulations, le numérateur de R , obtenu par calcul, doit approcher le dénominateur, introduit comme donnée. Le terme Cg d'amortissement géométrique est déterminé au préalable lors d'une étude utilisant $Q = \infty$ en observant cet amortissement entre r_1 et r_2 par l'équation (II.21a). Ce terme Cg a été étudié dans des travaux précédents du laboratoire (Eiselt, 1993). L'obtention de $R(f)$ réalisée pour différentes valeurs de χ_0 permet de comparer les effets de χ_0 sur l'amortissement matériel. Ainsi, on peut choisir le χ_0 correspondant au mieux à la valeur analytique $R = 1$.

II.4.2.Choix du paramètre χ_0 sur un exemple

II.4.2.1.Présentation de l'exemple

L'étude paramétrique sur χ_0 est menée à titre d'exemple sur l'étude présentée dans la figure II.4. Le domaine se compose d'une couche de craie de profondeur et largeur 23 mètres. Une force dont la signature temporelle correspond à une impulsion de type Ricker (définie en Annexe 1, de fréquence dominante 170 Hz, de point d'inflexion $t_s=1.87 \cdot 10^{-3}$ s) est appliquée en surface. Le maillage uniforme est choisi de telle sorte que :

$$\Delta x \equiv \frac{\lambda_p}{5} \quad \text{et} \quad \Delta x \equiv \frac{\lambda_s}{3}$$

où Δx est le côté d'un élément carré du maillage,
 λ_p la longueur d'onde dominante pour les ondes P,
 λ_s la longueur d'onde dominante pour les ondes S.

La dispersion est maîtrisée en utilisant les recommandations du chapitre I. Le coefficient de qualité pour la craie est choisi $Q = 5$. L'amortissement matériel simulé par l'intermédiaire des coefficients a_M et a_K cible la fréquence dominante de la source: $f = 170$ Hz.

Les points d'observation de l'évolution des ondes P et S sont situés à 12 et 15 mètres de la source, en surface et à la verticale de la source.

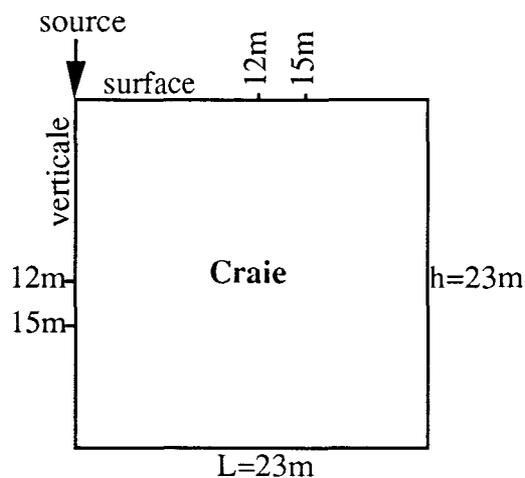


Figure II.4: Présentation du domaine de l'étude.

II.4.2.2. Présentation des résultats

II.4.2.2.1. Illustration de l'obtention de $R(f)$ pour un cas

Dans cette section, on propose d'illustrer la démarche suivie dans les équations II.21a et II.21b pour obtenir le rapport $R(f)$ pour le cas $\chi_0 = 0$ pour l'onde de compression en surface. La figure II.5 représente les étapes intermédiaires nécessaires à l'obtention de ce rapport. On sélectionne d'abord une fenêtre contenant l'onde d'intérêt sur les points $r_1 = 12\text{m}$ et $r_2 = 15\text{m}$ ($A(r_1, t)$ et $A(r_2, t)$). Les limites de cette fenêtre sont choisies telles qu'elles coupent le signal pour des valeurs de celui-ci proches de 0 pour éviter les phénomènes de déformations spectrales. On calcule ensuite le module du spectre des signaux et le terme C_g observé entre r_1 et r_2 pour pouvoir calculer le rapport $R(f)$ final.

II.4.2.2.2. Résultats le long d'un profil en surface du massif

Les courbes obtenues représentent le rapport $R(f)$. Les valeurs de χ_0 sont successivement prises à 0, 1/4, 1/2, 3/4, et 1. La diminution de χ_0 entraîne dans C une diminution du terme dû à la contribution de la masse ($a_M M$) et une augmentation du terme dû à la contribution de la rigidité ($a_K K$). Lorsque $R < 1$, la simulation sous-amortit l'onde considérée.

Les résultats obtenus pour l'onde de compression P en surface sont présentés dans la figure II.6a. Pour les basses fréquences ($f < 100\text{ Hz}$), le cas $\chi_0 = 1$ ($a_K = 0$) a un effet de sur-amortissement de l'onde. Au contraire, le cas $\chi_0 = 0$ ($a_M = 0$) sous amortit l'onde. Ces deux remarques concordent avec l'aspect théorique présenté auparavant dans la figure II.2.

Le meilleur compromis est ici un choix de $\chi_0 = 3/4$ qui donne 7% de sous-amortissement sur la fréquence ciblée 170 Hz et moins de 10% d'erreur sur un fenêtre fréquentielle utile 100-200 Hz. Les erreurs pour la fréquence ciblée peuvent être dues à divers paramètres. Elles dépendent de la finesse du maillage qui peut être améliorée. L'approximation du calcul en éléments finis est à considérer, l'obtention du facteur C_g en dépend. Enfin, le choix de la fenêtre temporelle sur laquelle les analyses spectrales sont effectuées peut également être une source d'erreur dans l'obtention de $R(f)$.

Les résultats obtenus pour l'onde de cisaillement en surface sont donnés dans la figure II.6b. Le dénominateur de $R(f)$ diffère de celui utilisé pour les ondes P car le coefficient α dépend de la vitesse de propagation de l'onde considérée. On observe une moins bonne précision sur l'amortissement matériel souhaité. L'erreur minimale sur la fréquence ciblée (170 Hz) est un sous-amortissement de 30% pour les valeurs de $\chi_0 = 1/4$,

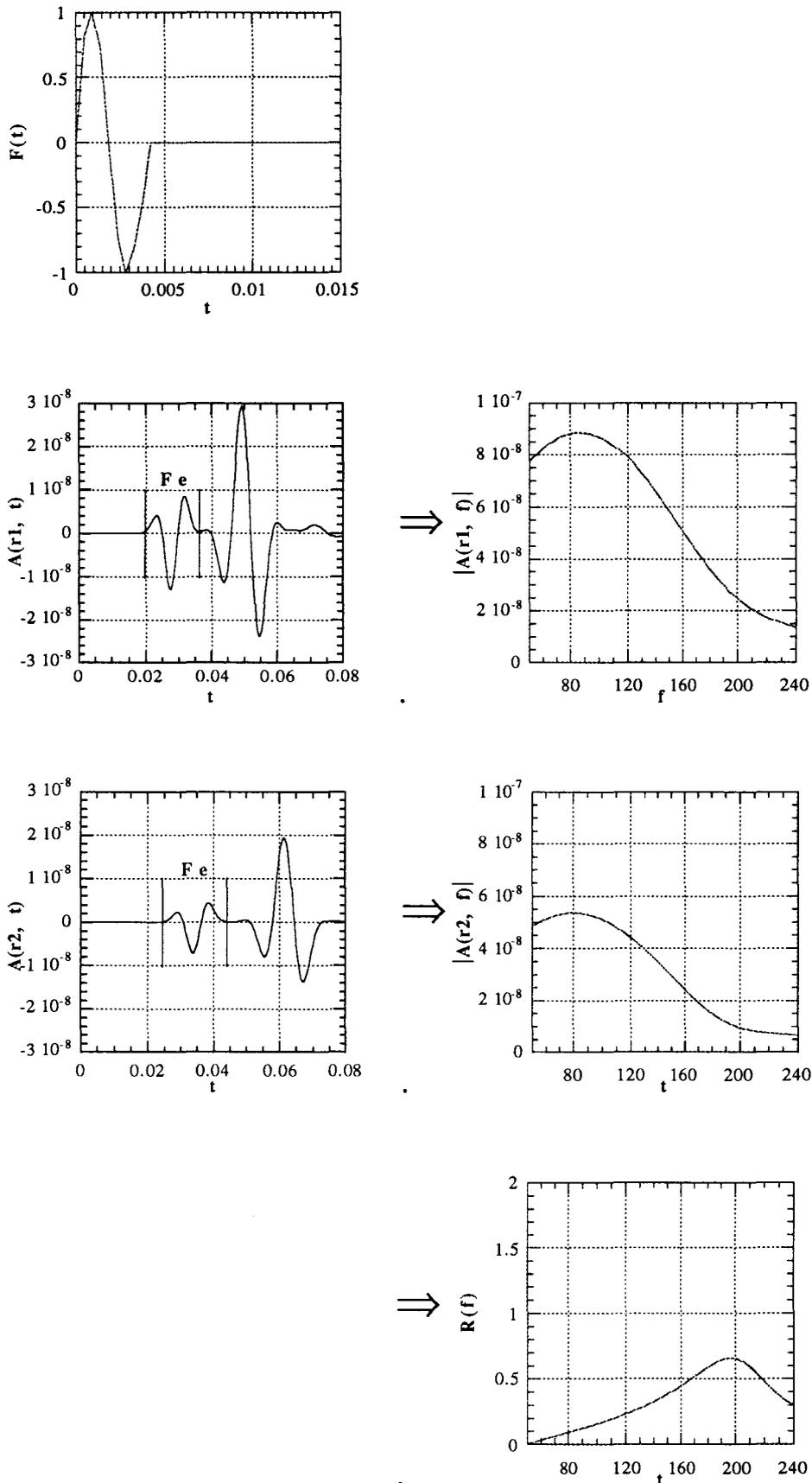


Figure II.5: Présentation de la démarche suivie pour construire le rapport $R(f)$ pour $\chi_0 = 0$ pour l'onde de compression en surface. $F(t)$ est la force appliquée au système, Fe la fenêtre de sélection du signal.

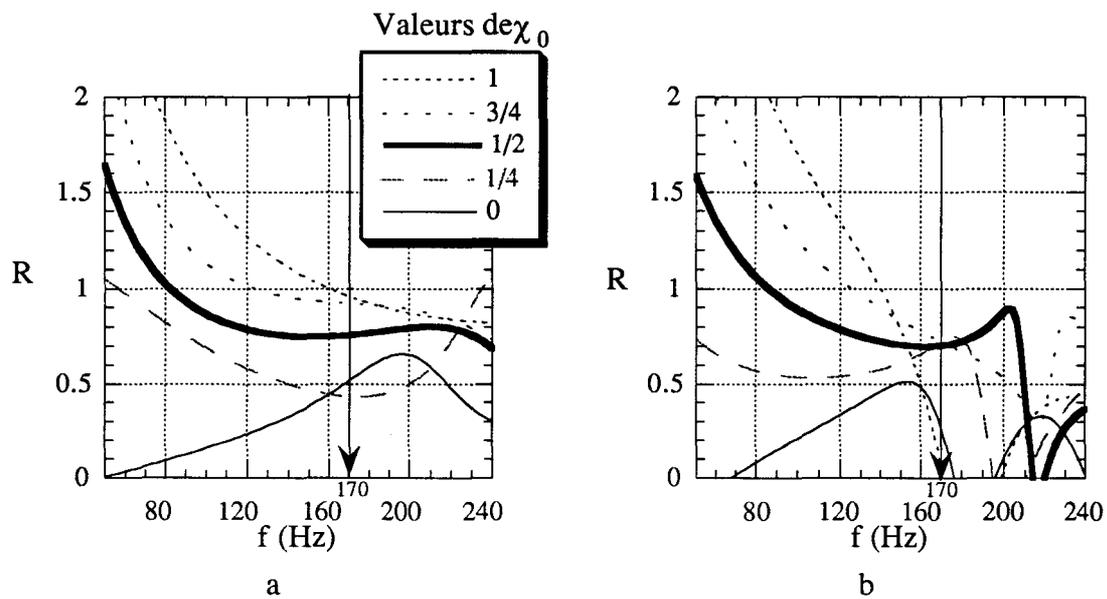


Figure II.6: Rapport $R(f)$ en surface pour les ondes
 a) de compression P,
 b) de cisaillement S.

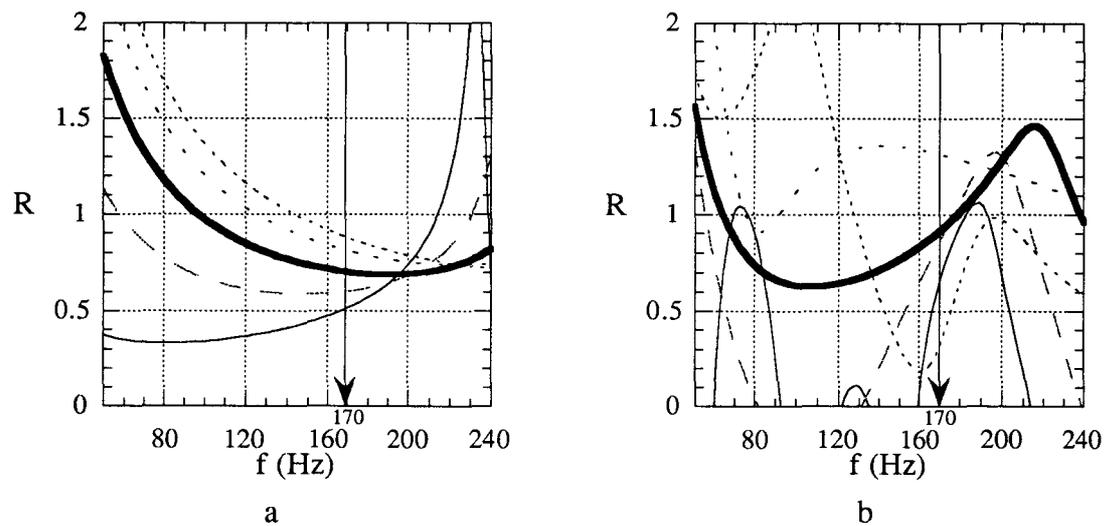


Figure II.7: Rapport $R(f)$ en verticale pour les ondes
 a) de compression P,
 b) de cisaillement S.

1/2, et 3/4. Le meilleur compromis est ici un choix de $\chi_0 = 1/2$ pour lequel le sous-amortissement ne dépasse pas 30% sur la fenêtre utile 100-200 Hz.

Cette moins bonne approximation de l'amortissement pour les ondes S par rapport aux ondes P est essentiellement due à deux facteurs. Tout d'abord le maillage de l'étude est plus grossier pour les ondes S ($\frac{\lambda_S}{3}$) que pour les ondes P ($\frac{\lambda_P}{5}$). Ensuite, la difficulté est plus grande pour les ondes S de sélectionner une fenêtre temporelle pour effectuer l'analyse spectrale. En effet, l'onde S arrive plus tardivement que l'onde P qui est la première arrivée plus facile à isoler du reste des événements.

II.4.2.2.3. Résultats le long d'un profil vertical

Les mêmes remarques peuvent être appliquées à la figure II.7. Ici, l'obtention de $R(f)$ pour l'onde P montre un sous-amortissement sur la fréquence 170 Hz de 15 et 18% pour les choix de $\chi_0 = 1$ et 3/4. Cela nous incite à choisir un $\chi_0 = 3/4$ pour lequel l'erreur ne dépasse pas 25% sur la fenêtre de fréquence utile 100-200 Hz (Figure II.7a). L'obtention d'une moins bonne précision que pour l'onde P en surface peut être due à l'imprécision sur l'obtention du terme C_g .

En ce qui concerne l'onde S (Figure II.7b), l'amortissement matériel simulé accuse une erreur de 8% par défaut pour les cas $\chi_0 = 1/2$ et 1/4 sur la fréquence ciblée 170 Hz. Cependant, sur la fenêtre fréquentielle utile 100-200 Hz, un choix de $\chi_0 = 3/4$ nous procure le meilleur compromis, l'erreur n'excédant pas 30%.

II.4.2.2.4. Détermination du χ_0 adéquat

Lors de campagnes de mesures utilisant la technique de réflexion sismique, les traitements ciblent les réflexions d'ondes P sur les interfaces du sous-sol. Ces réflexions contiennent les informations susceptibles de nous renseigner sur l'organisation du sous-sol. C'est pourquoi ce sont ces mêmes réflexions dont nous allons favoriser la simulation. Le choix du paramètre χ_0 doit donc être essentiellement fait en considérant ces ondes P.

Dans l'étude précédente, un choix de $\chi_0 = 3/4$ doit nous permettre d'utiliser une combinaison linéaire (II.10) donnant le meilleur compromis sur l'amortissement matériel souhaité. Il est donc nécessaire pour chaque étude, de déterminer χ_0 selon le type de sol et d'onde choisis.

II.5. APPLICATION: VISUALISATION DE L'EFFET DE L'AMORTISSEMENT MATERIEL SUR UN SISMOGRAMME SYNTHETIQUE

II.5.1.Présentation de l'étude

L'étude est réalisée sur un massif bi-couche composé d'une couche d'argile de 4 mètres en surface et d'une couche de craie de 10 mètres (Figure II.8a). La source appliquée est une force de fréquence dominante 170 Hz du même type que précédemment. Le maillage est uniforme, constitué d'éléments rectangulaires à quatre noeuds vérifiant :

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{5}$$

avec Δx côté d'un élément carré du maillage,

λ longueur d'onde P dominante du matériau considéré.

La dispersion numérique est minimisée par l'utilisation d'un pas de temps et d'une combinaison de matrice de masse adéquats (voir Chapitre I, pour les ondes de compression dans l'argile et la craie $p_a = 0,5$, $M_c = 50\%$, $p_c = 1,5$, $M_c = 100\%$). 48 récepteurs sont placés en surface. La distance inter récepteur est choisie 0,5 mètres, la distance source - premier récepteur un mètre (offset minimum) pour positionner nos outils sismiques de la même manière que sur le terrain pour cette configuration du sous-sol. Les calculs sont effectués en symétrie de révolution autour de l'axe vertical sur lequel la source est appliquée. Le bord vertical droit du modèle est bloqué en déplacements, les autres surfaces étant libres.

Dans ce type de domaine, les principales ondes d'intérêts sont (Figure II.8b) :

- Su les ondes de surface,
- Sd l'onde de cisaillement directe,
- Pd l'onde de compression directe,
- Pr1 l'onde de compression réfléchie sur l'interface argile craie,
- Sr1 l'onde de cisaillement réfléchie sur l'interface argile craie,
- Pr2 l'onde de compression réfléchie sur le fond de la craie,
- Sr2 l'onde de cisaillement réfléchie sur le fond de la craie,
- Pref l'onde de compression réfractée sur l'interface argile craie.

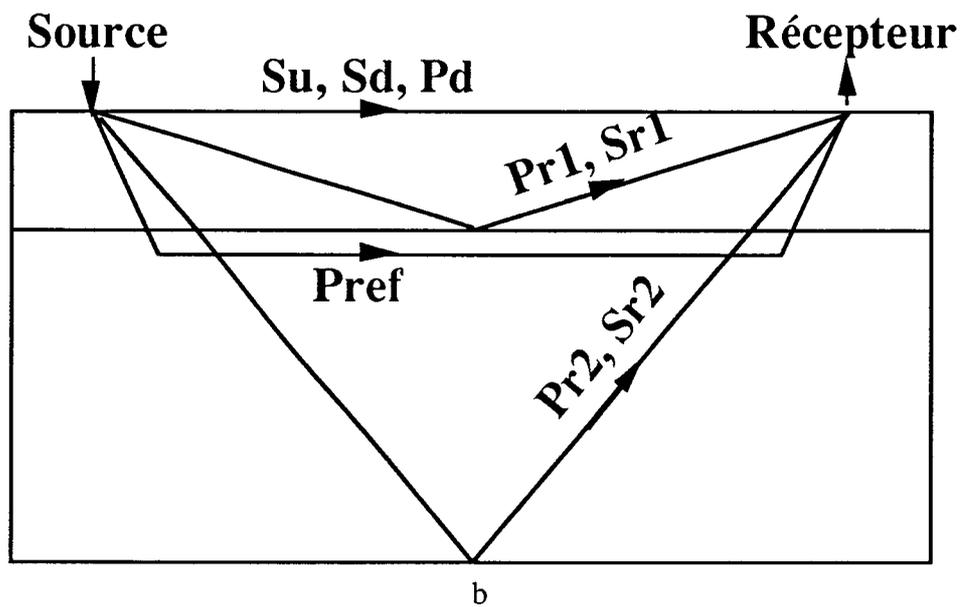
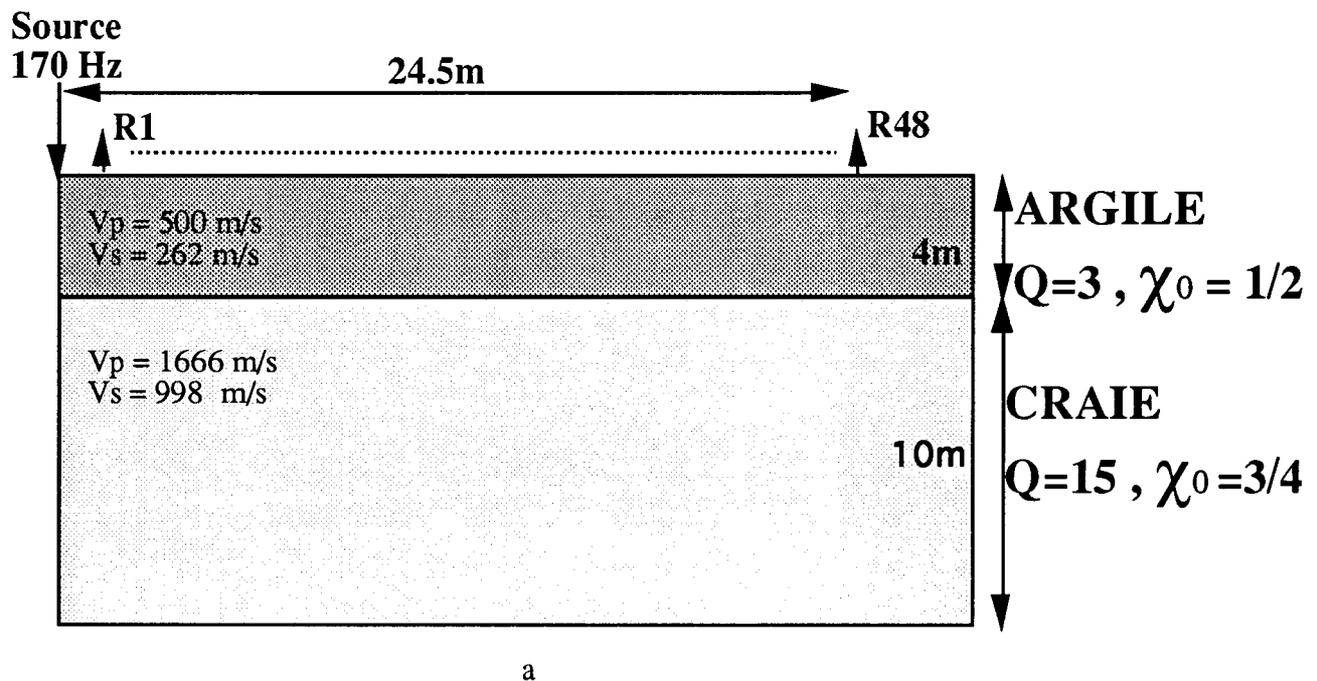


Figure II.8: Présentation du massif bi-couche argile craie utilisé pour la simulation.

- a) Présentation du domaine.
- b) Représentation schématique des différentes ondes d'intérêt se propageant dans le massif.

II.5.2.Sismogrammes synthétiques obtenus

II.5.2.1.Cas sans amortissement matériel

On se propose dans un premier temps d'effectuer le calcul sans prise en compte d'amortissement matériel (Figure II.9a). Ce cas correspond à un coefficient de qualité $Q = \infty$. On retrouve les principales ondes définies sauf Pref, Sr1 et Sr2 qui ne sont pratiquement pas visibles ici. Il existe également une présence d'oscillations parasites de fréquences plus élevées que celles de la source. Ce bruit numérique dégrade la qualité du sismogramme synthétique. Il est dû à la discrétisation géométrique adoptée et à l'absence de prise en compte de l'amortissement matériel. La finesse de la discrétisation suffit cependant à une représentation des principales ondes d'intérêt. Dans les travaux précédents du laboratoire (Eiselt, 1993), le bruit numérique était limité par un amortissement numérique artificiel introduit grâce aux coefficient de Newmark (voir l'Annexe 1).

II.5.2.2.Cas avec amortissement matériel

La prise en compte de l'amortissement matériel pour la même étude se base sur le choix des coefficients de qualité $Q_a = 3$ pour l'argile, $Q_c = 15$ pour la craie. Ces valeurs sont proposées dans la littérature, obtenues par expérimentation (Piwakowski, 1989). Par une étude paramétrique sur χ_0 du même type que précédemment, les paramètres χ_0 pour l'argile et la craie sont respectivement choisis $\chi_0 = 1/2$ et $\chi_0 = 3/4$ pour une fréquence ciblée de 170 Hz.

Le sismogramme ainsi obtenu est présenté dans la figure II.9b. L'effet le plus marquant de l'amortissement matériel est visible sur l'onde Sd qui disparaît pratiquement dès le 30 ième récepteur. Les oscillations numériques parasites sont maintenant très atténuées, rendant le sismogramme plus facile à interpréter. D'autres événements arrivent à partir de 70 ms tels que les ondes converties P en S réfléchies ou les ondes de compression et de cisaillement multiples. Ces événements s'entrecoupent et sont donc difficiles à suivre sur ce sismogramme.

Il semble que des événements ou association d'événements soient de pente négative après 60 ms, ce qui n'est pas interprétable physiquement. Ce phénomène pourrait être dû au bruit numérique amplifié par l'application du contrôle automatique de gain. Dans la figure II.9a, ce phénomène n'apparaîtrait pas à cause de la présence des événements non amortis constituant la réponse de la structure à l'excitation. Cette observation nous incite à ne tirer des informations de la simulation uniquement qu'avant ce temps de 60 ms. Les ondes

intéressantes pour l'étude de la réflexion sismique haute résolution (Pr1 et Pr2) se situent dans une fenêtre temporelle située avant ce temps.

Les réflexions d'ondes Pr1 et Pr2 sont paradoxalement plus visibles sur cette figure que dans le cas $Q = \infty$. Celles-ci ont pourtant été amorties mais l'utilisation d'un contrôle automatique de gain dans les deux figures tend à relativiser la comparaison de leurs énergies respectives. De même, la réfraction Pref et les réflexions Sr1 et Sr2 sont maintenant nettement visibles et arrivent à des temps t_0 corrects d'aller retour sous la source (t_0 vaut 30 ms pour Sr1 et 67 ms pour Sr2). La prise en compte de l'amortissement matériel permet donc de renforcer la visualisation des ondes P réfléchies au regard des autres événements. Ces ondes P sont cependant moins amorties que les ondes S. Ceci s'explique par le fait que le coefficient α d'amortissement est inversement proportionnel à la vitesse de propagation de l'onde considérée (Equation II.8). Ainsi, pour le coefficient de qualité Q d'un même matériau, on a :

$$\alpha_p < \alpha_s$$

avec α_p coefficient d'amortissement matériel pour les ondes P,
 α_s coefficient d'amortissement matériel pour les ondes S.

L'aspect énergétique de l'effet de l'amortissement est respecté sur ce sismogramme jusqu'à 60 ms, ce qui est bien visible lorsque l'on regarde l'arrivée des ondes pour un récepteur donné. Il est cependant essentiel de vérifier plus précisément les effets de cet amortissement en comparant les spectres d'une même onde au même récepteur avant et après l'application de l'amortissement matériel.

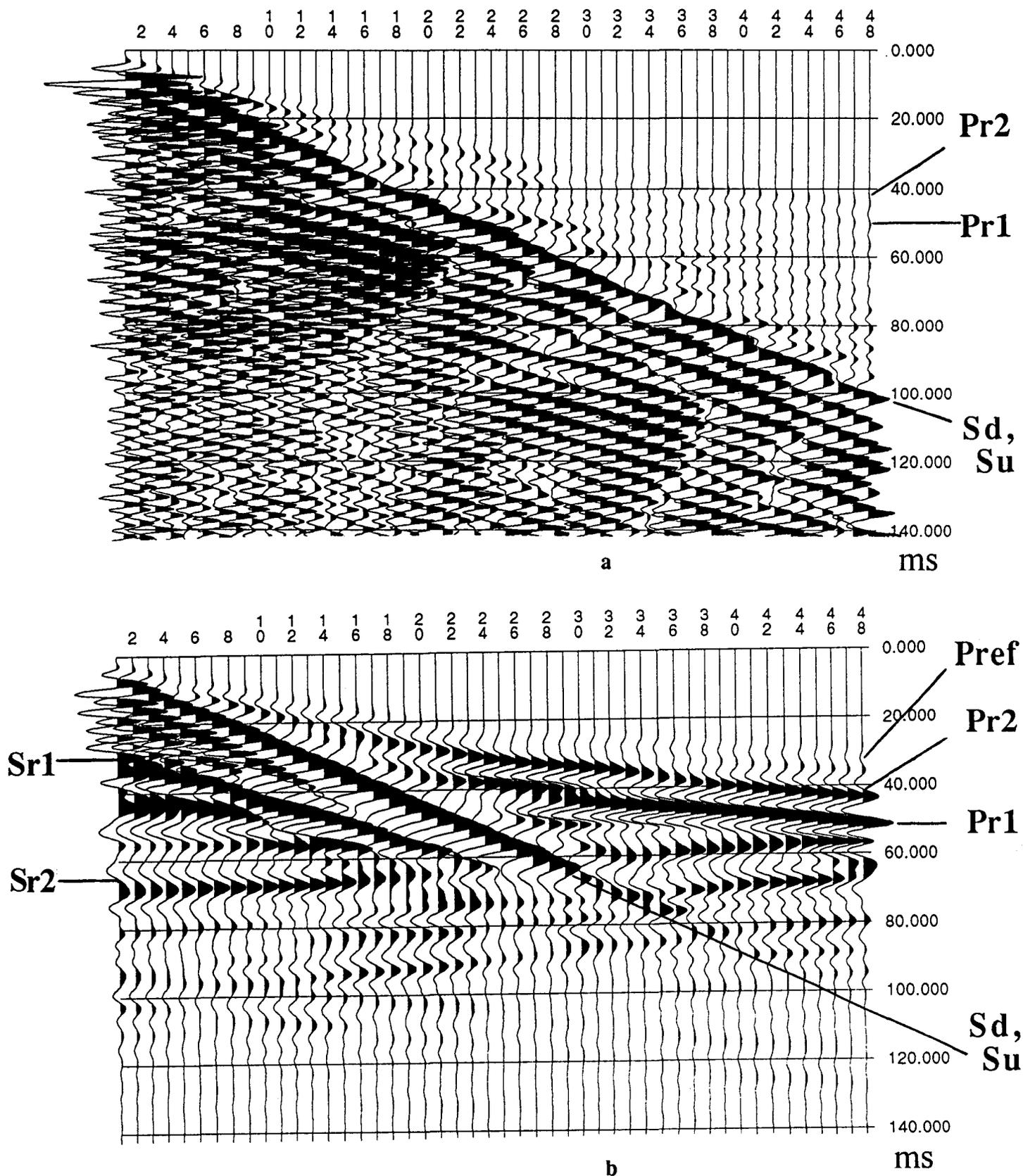


Figure II.9: Présentation des sismogrammes synthétiques (obtenus avec l'utilisation d'un contrôle automatique de gain)

a) avant la prise en compte de l'amortissement matériel ($Q = \infty$),

b) après la prise en compte de l'amortissement matériel ($Q_a = 3, Q_c = 15$).

II.5.3.Vérification de la prise en compte de l'amortissement matériel par analyse spectrale

Pour effectuer cette comparaison, appliquons l'équation (II.1) à $r_1 = 0$ et $Q = \infty$. On a:

$$(II.22) \quad A(r_2) = A_0 Cg$$

avec A_0 amplitude à l'origine de l'onde.

Si $Q \neq \infty$, les équations (II.1) et (II.8) nous donnent :

$$(II.23) \quad A'(r_2) = A_0 Cg \exp(-\alpha r_2)$$

avec $A'(r_2)$ amplitude de l'onde en r_2 avec amortissement matériel.

En travaillant dans le domaine fréquentiel et en appliquant le logarithme népérien de la même manière que pour la construction du rapport $R(f)$, le rapport de ces deux équations nous donne :

$$(II.24) \quad \ln|A'(r_2, f)| - \ln|A(r_2, f)| = -\frac{\pi r_2}{Qv} f$$

que l'on peut noter sous la forme :

$$(II.25) \quad DIF = -T f$$

le terme DIF étant obtenu par calcul, le terme $-T f$ étant introduit comme donnée. L'équation (II.25) permet de vérifier si la prise en compte de l'amortissement matériel est correcte pour la fréquence ciblée.

L'application de (II.25) à notre étude bi-couche est réalisée pour l'onde Pr2 au récepteur R48. Cette onde de compression est choisie en raison de son intérêt dans le cadre de cette thèse et pour la relative facilité à sélectionner sa fenêtre temporelle d'apparition dans les données. Les spectres obtenus pour cette onde sans et avec amortissement sont présentés dans la figure II.10a. Le maillage a un effet de filtre coupe haut sur les signaux (Eiselt, 1993, voir l'Annexe 1), c'est pourquoi le spectre du cas $Q = \infty$ n'est pas centré sur la fréquence d'excitation 170 Hz. On observe une évolution du spectre vers les basses fréquences pour $Q \neq \infty$. Cette évolution correspond-elle à l'amortissement matériel souhaité? La figure II.10b

présente les termes DIF est $-T f$ de l'équation (II.25). On obtient bien l'amortissement matériel désiré pour la fréquence ciblée et son voisinage. Les faibles erreurs sont dues à la difficulté de sélectionner les fenêtres temporelles pour réaliser les spectres.

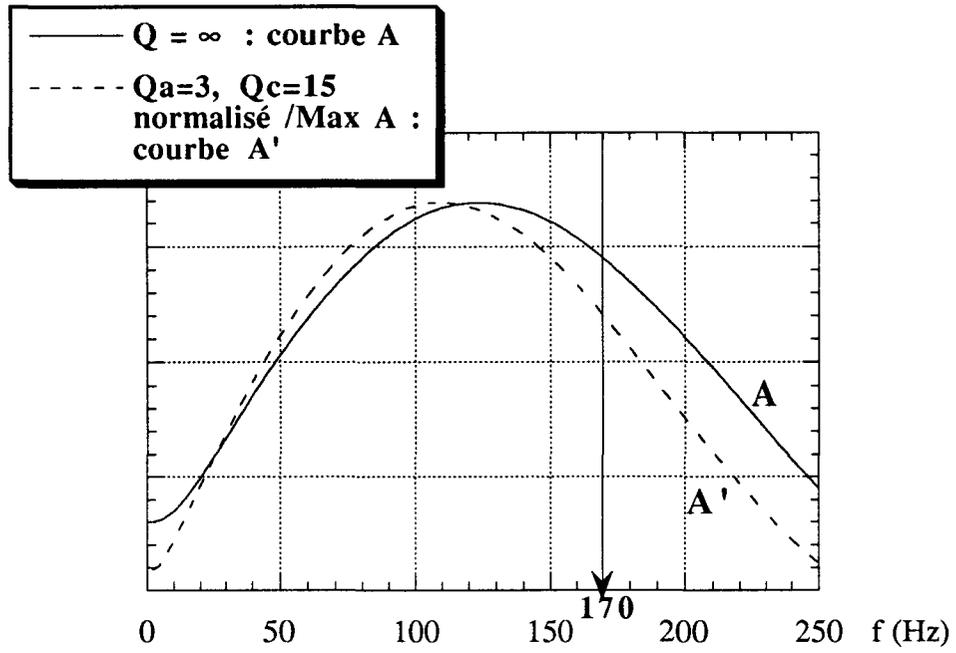
II.5.4.Comparaison avec des données de terrain

Cette prise en compte de l'amortissement matériel correspond-elle aux phénomènes rencontrés sur le terrain? C'est ce que l'on va préciser en comparant nos résultats à un sismogramme obtenu lors d'une campagne de mesure in situ.

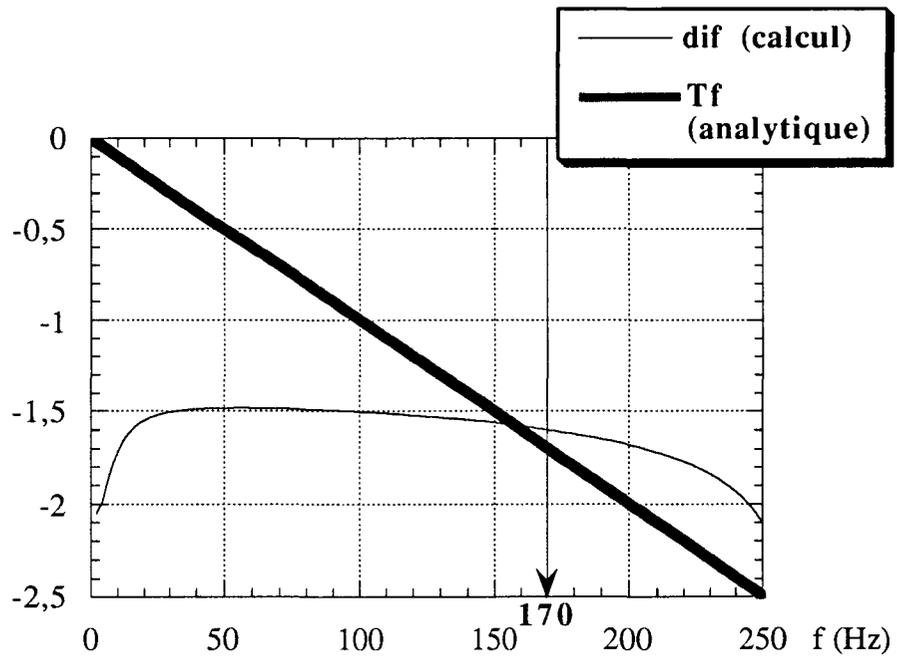
Ce sismogramme (Figure II.11) a été réalisé par notre laboratoire sur un terrain de dimension identique à celui simulé dans la figure II.9. La disposition des récepteurs est la même, ainsi que l'utilisation de la fenêtre temporelle du contrôle automatique de gain. On peut comparer cette figure II.11 à la figure II.9b.

Les rapports d'amplitude entre les différents événements d'un même sismogramme sont comparables. Dans les deux cas l'onde Pref est pratiquement invisible comparée à Pr2. Les ondes Pr2 et Pr1, s'affirment de la même manière sur les deux sismogrammes au regard des autres événements. Cependant, l'onde Sd disparaît beaucoup plus tôt sur le terrain. De même, on observe sur le sismogramme de terrain une présence de ground roll (Gr sur la figure II.11) due aux différents modes des ondes de Love, ce qui n'apparaît pas sur les simulations.

Les arrivées des différentes ondes sont les mêmes sur les deux sismogrammes. La prise en compte de l'amortissement matériel améliore la qualité de la simulation en s'approchant encore plus des résultats obtenus in situ.



a



b

Figure II.10: a) Présentation du spectre de l'onde Pr2 au récepteur R48 sans et avec amortissement, et b) vérification de l'amortissement matériel ciblé à 170 Hz.

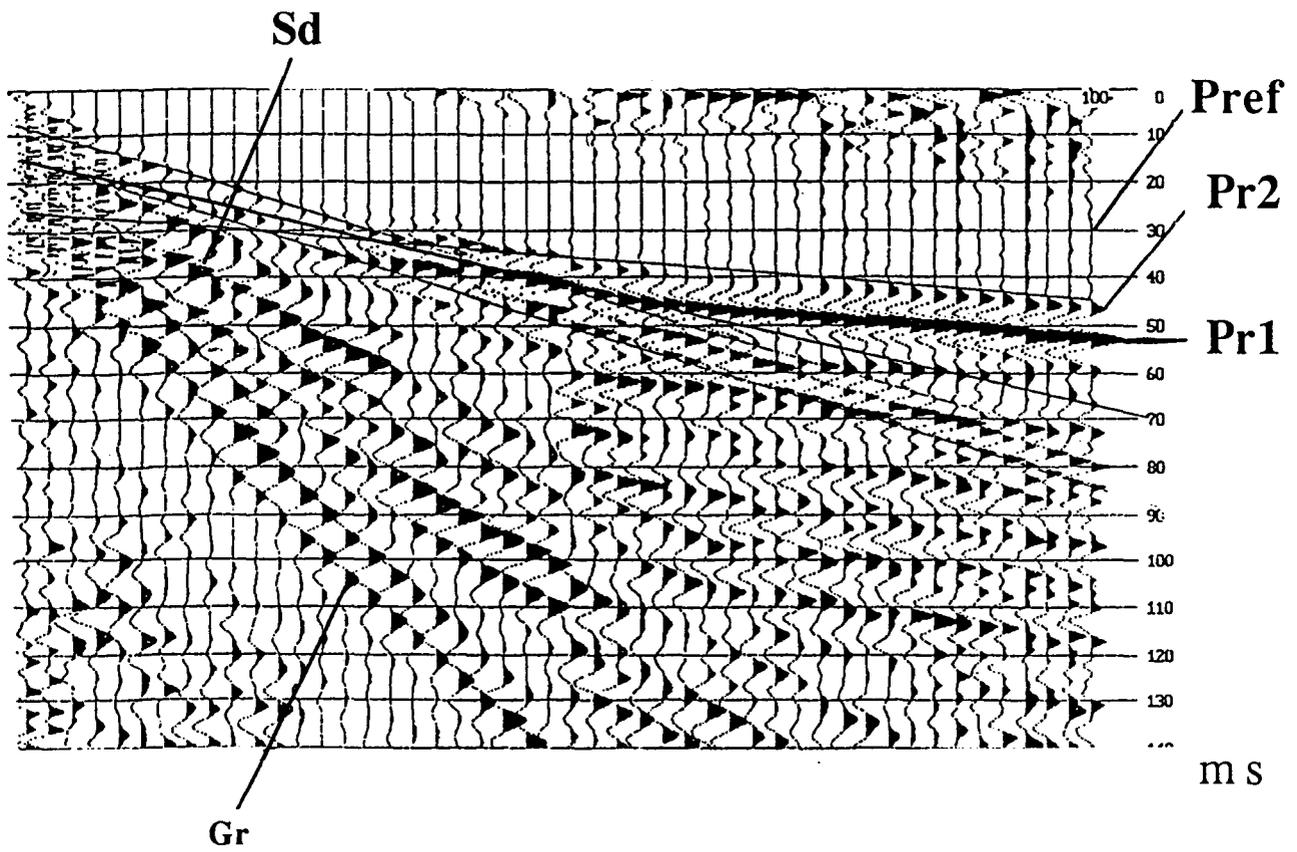


Figure II.11: Sismogramme de terrain obtenu avec un contrôle automatique de gain.

II.6.CONCLUSION

Les études réalisées dans ce chapitre ont montré que la prise en compte de l'amortissement matériel dans les simulations s'avère très utile pour respecter les aspects énergétiques et fréquentiels des différents événements. Ceci a pour effet de procurer une meilleure modélisation de la propagation des ondes sismique.

Cette prise en compte a été développée pour cibler une fréquence et son voisinage en associant le coefficient de qualité Q connu en géophysique aux coefficients d'amortissement de type Rayleigh. Une analyse paramétrique de l'effet de ces coefficients sur l'amortissement a été réalisée permettant de donner des conseils sur leur utilisation. Les études ont montré que les paramètres numériques introduisant l'amortissement matériel dépendent du type de sol ainsi que du type d'onde privilégiée . Cela permet à nos simulations de s'approcher des résultats obtenus in-situ (Shahrour et Moreaux, 1995b). Ce travail constitue un progrès en ce qui concerne la modélisation des propagations d'ondes sismiques dans notre laboratoire.

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA SISMIQUE HAUTE RESOLUTION A LA LOCALISATION DE CAVITE: MODELISATION ET ETUDE PARAMETRIQUE

Résumé

Le travail de ce chapitre est présenté en deux parties. La première consiste à visualiser les effets liés à la présence d'une cavité sur un tir brut. Pour cela, des simulations sont réalisées sur un domaine bi - couche représentatif d'un terrain couramment rencontré dans le Nord de la France. La deuxième consiste à observer ces effets dans des sections sismiques synthétiques obtenues avec un traitement typique à la réflexion sismique haute résolution. On propose de faire varier la profondeur de la cavité, le rapport taille de la cavité / longueur d'onde, et la forme de la cavité pour observer l'influence de ces paramètres sur les effets liés à la présence des cavités. Cette étude permet de tirer certaines conclusions concernant la possibilité de localisation de cavité sur le terrain par réflexion sismique haute résolution.

III.1.INTRODUCTION

Grâce aux outils numériques développés dans les chapitres précédents, il est possible d'étudier les possibilités de localisation des cavités par sismique haute résolution.

Pour cela, on propose de simuler une campagne de mesures sur un terrain bi - couche représentatif du sous-sol pouvant être rencontré dans le Nord de la France. Une étude paramétrique suivant la profondeur de la cavité est menée. On examine les effets de la dimension et de la forme de la cavité sur les données.

III.2.PRESENTATION DU PROBLEME

Le cas choisi pour la simulation est couramment rencontré dans le Nord de la France. Le sol se compose d'une couche d'argile de quatre mètres en surface et d'une couche de craie de vingt mètres (Figure III.1).

La source appliquée est une force dont la signature temporelle est de type Ricker de fréquence dominante 170 Hz et de point d'inflexion $t_s = 1.87 \cdot 10^{-3}$ s. Cette fréquence correspond aux fréquences utiles pour l'interprétation des données de terrain sur ce même type de sol (Piwakowski, 1991). Le maillage non uniforme retenu pour l'étude est constitué d'éléments quadrilatères à quatre noeuds et vérifie, selon les conseils de l'Annexe 1 :

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{5}$$

avec Δx longueur d'un côté d'éléments dans le sens de la propagation,
 λ longueur d'onde de compression dominante du matériau considéré.

La transition entre le maillage de la zone Z_1 d'argile et le celui de la zone Z_3 de craie est constituée d'une zone intermédiaire Z_2 de craie. Dans cette zone Z_2 , la longueur des éléments en profondeur progresse selon une raison géométrique, respectant les règles de Celep (1983) pour éviter les réflexions numériques artificielles.

La dispersion numérique est minimisée (grâce à son étude paramétrique selon les conseils du Chapitre 1) par l'utilisation d'un pas de temps normalisé et d'une combinaison de matrices de masse adéquats. L'amortissement matériel est introduit en considérant des coefficients de qualité de $Q = 5$ pour l'argile et $Q = 10$ pour la craie (Piwakowski, 1989). Les calculs sont effectués en symétrie de révolution (voir l'Annexe 2).

Pour se placer dans des conditions habituelles d'application de la réflexion sismique, il s'agit d'abord de réaliser une simulation de test de tir (walkaway test) pour obtenir un sismogramme procurant une vue d'ensemble des événements sismiques du profil. Ensuite, on sélectionne sur ce sismogramme une zone de récepteurs pour cibler au mieux notre profondeur d'intérêt qui n'est autre que le fond de la craie. Cette zone correspond à la notion de fenêtre optimale introduite par Hunter (1984). Dans notre étude, la distance inter récepteur est de un mètre, la distance source - premier récepteur de 2 mètres, et l'on dispose 50 récepteurs en surface.

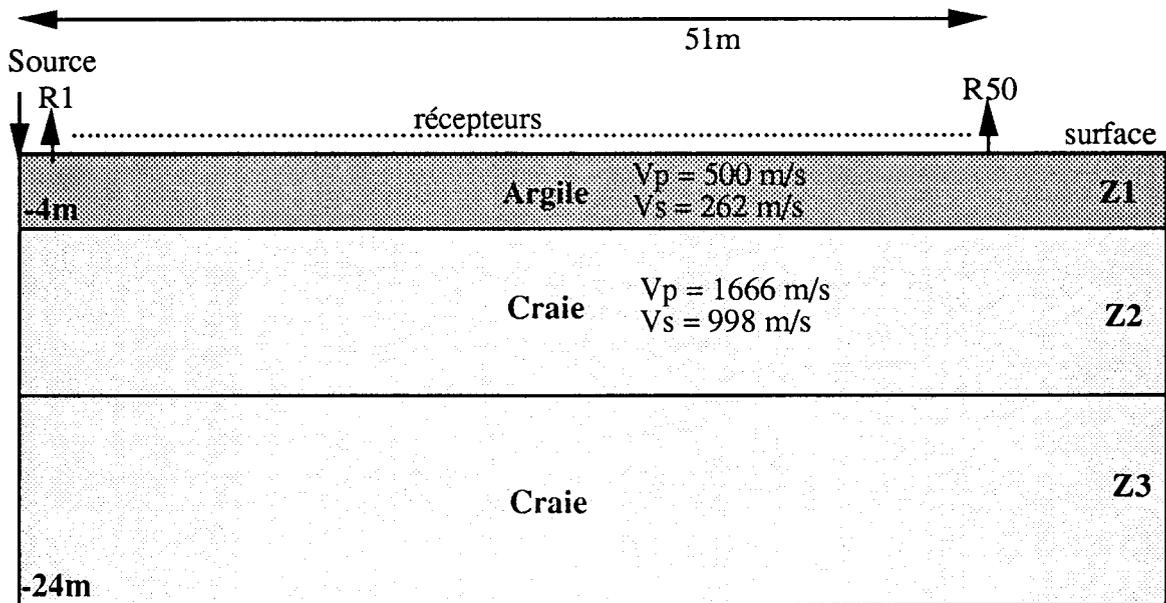


Figure III.1: Configuration du terrain étudié et disposition des outils sismiques.

III.3.SIMULATION NUMERIQUE: RESULTATS DE TIR BRUT

III.3.1.Sol sans cavité

Les précautions prises pour cette simulation ainsi que l'utilisation d'un contrôle automatique de gain permettent d'obtenir un sismogramme sur lequel les événements sont facilement identifiables (Figure III.2). Connaissant leurs vitesses de propagation, on reconnaît les ondes suivantes grâce à leurs temps d'arrivée sur les récepteurs:

- Pref: onde de compression réfractée sur l'interface argile craie,
- Sr1: onde de cisaillement réfléchi sur l'interface argile craie,
- Pr2: onde de compression réfléchi sur le fond de la craie,
- Sr2: onde de cisaillement réfléchi sur le fond de la craie
- Pr2M: onde de compression réfléchi multiple sur le fond de la craie,
- PSr2: onde de compression réfléchi convertie en onde de cisaillement sur le fond de la craie,
- Sd: onde de cisaillement directe,
- Pd: onde de compression directe.

Il est maintenant intéressant de visualiser les effets de la présence d'une cavité sur ce sismogramme.

III.3.2.Sol avec cavité

On se propose de réaliser la même étude en plaçant un vide dans la craie, à une distance verticale $H = 4$ m du fond de la craie, de telle sorte que le milieu de la cavité soit centré sur le 38^{ème} récepteur (Figure III.3).

La dimension d'un côté de la cavité carrée est de $L=6$ m ($L = h$), ce qui correspond à $\frac{L}{\lambda} = 0,3$, où λ est la longueur dominante de l'onde de compression dans la craie ($\lambda = 20$ m). Ce rapport représente des conditions difficiles de détection au regard de l'expérience acquise in - situ (Piwakowski, 1996).

Le sismogramme résultant de cette configuration est présenté dans la figure III.4. Il est obtenu en appliquant aux données un contrôle automatique de gain identique au cas sans cavité. Les ondes identifiées sur la figure III.2 sont retrouvées sur ce sismogramme, sans être modifiées sensiblement. Un événement est apparu entre 80 et 120 ms (zone Z de la figure III.4) identifiable comme la superposition d'ondes diffractées sur le toit de la cavité et

d'autres événements déjà présents dans la figure III.2. D'autres perturbations moins visibles sont également apparues, difficilement identifiables, d'où la nécessité de disposer d'un moyen plus adéquat d'analyse des effets dus à la cavité.

III.3.3. Visualisation des effets de la présence d'une cavité

La différence algébrique des données sans contrôle automatique de gain obtenues avec et sans cavité peut nous permettre de faire ressortir les effets de la présence de cavité. Cette différence est présentée en figure III.5a,b. On observe des phénomènes de type parabolique dont le maximum est centré sur le milieu de la cavité. Ils correspondent aux diffractions sur le toit de cette cavité dont l'illustration est présentée sur les figures III.5c,d. Ces diffractions sont identifiées comme :

- DPC: la diffraction de l'onde de compression sur le toit de la cavité,
- DPSC: la diffraction de l'onde de compression convertie en cisaillement sur le toit de la cavité,
- DSC: la diffraction de l'onde de cisaillement sur le toit de la cavité,

On remarque sur la figure III.5b que les ondes DPC et DPSC sont plus énergétiques que DSC. On peut aussi voir qu'aux abords de la cavité, le niveau d'amplitude est plus élevé du côté de la source. Cela confirme les précédents résultats de modélisation du laboratoire (Eiselt, 1993, Piwakowski, 1989).

L'artifice d'effectuer une différence algébrique des données permet une analyse plus facile des effets dus à la présence de cavité. Remarquons que la figure III.5.a est obtenue sans contrôle automatique de gain avec un gain graphique 10 fois supérieur à celui de la figure III.4. Ceci montre que les effets liés à la présence de la cavité sont 10 fois plus faibles que le niveau du bruit cohérent dû à la réponse de la structure à l'excitation. Ce faible niveau explique la difficulté rencontrée sur le terrain dans la détection des cavités de faibles tailles. Cette détection nécessite l'utilisation d'un traitement spécifique pour renforcer la visualisation de ces effets. C'est ce traitement que l'on propose d'appliquer aux données numériques dans la suite de l'étude.

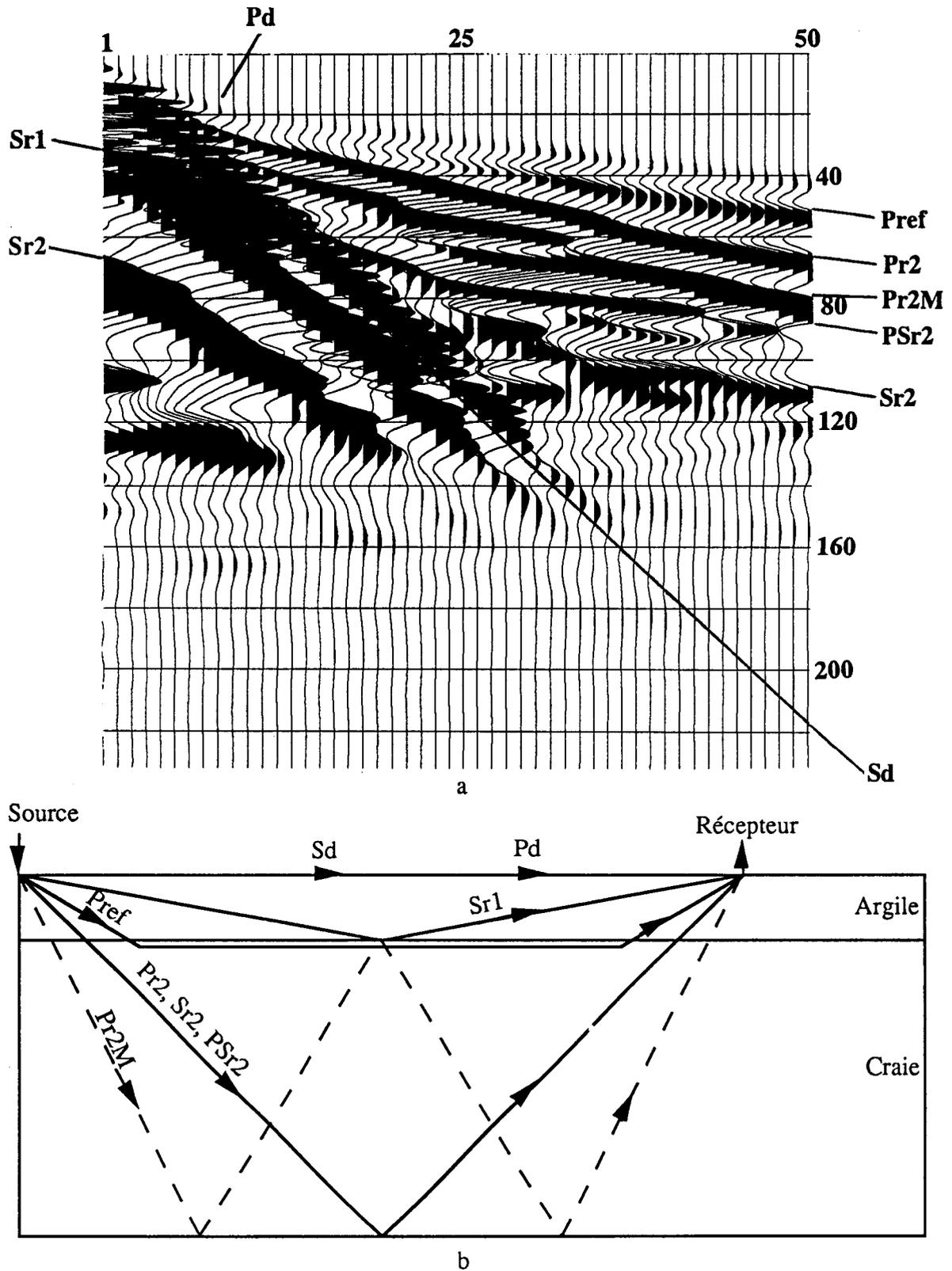


Figure III.2: a) Présentation du sismogramme obtenu sans cavité avec un contrôle automatique de gain de fenêtre de moyennage de 20 ms. b) Explications des notations utilisées pour les ondes de la figure III.2a.

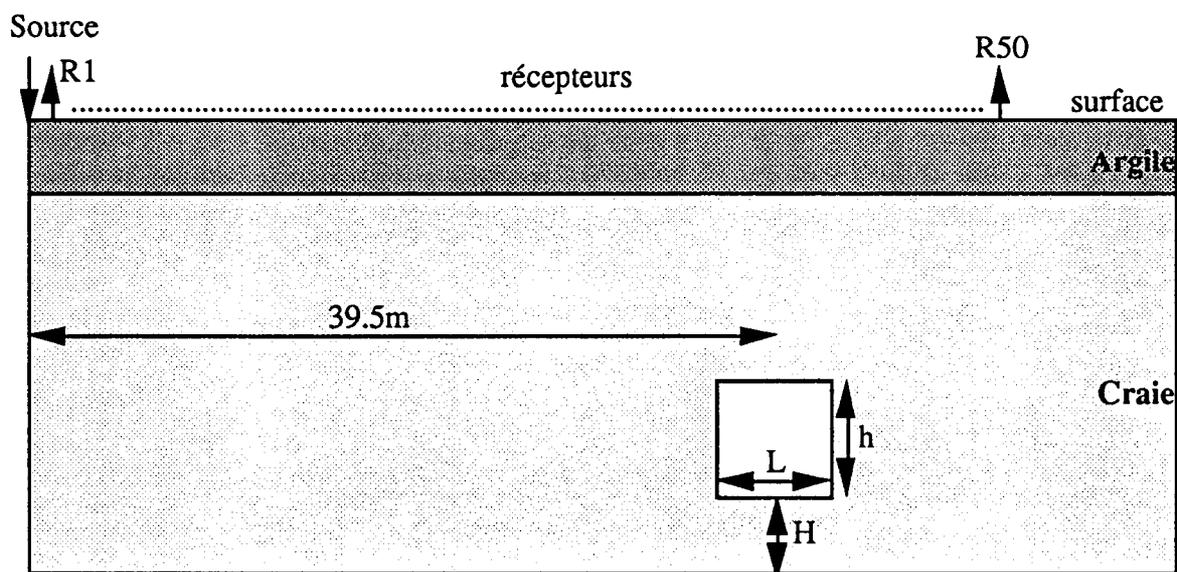


Figure III.3: Position de la cavité dans le domaine.

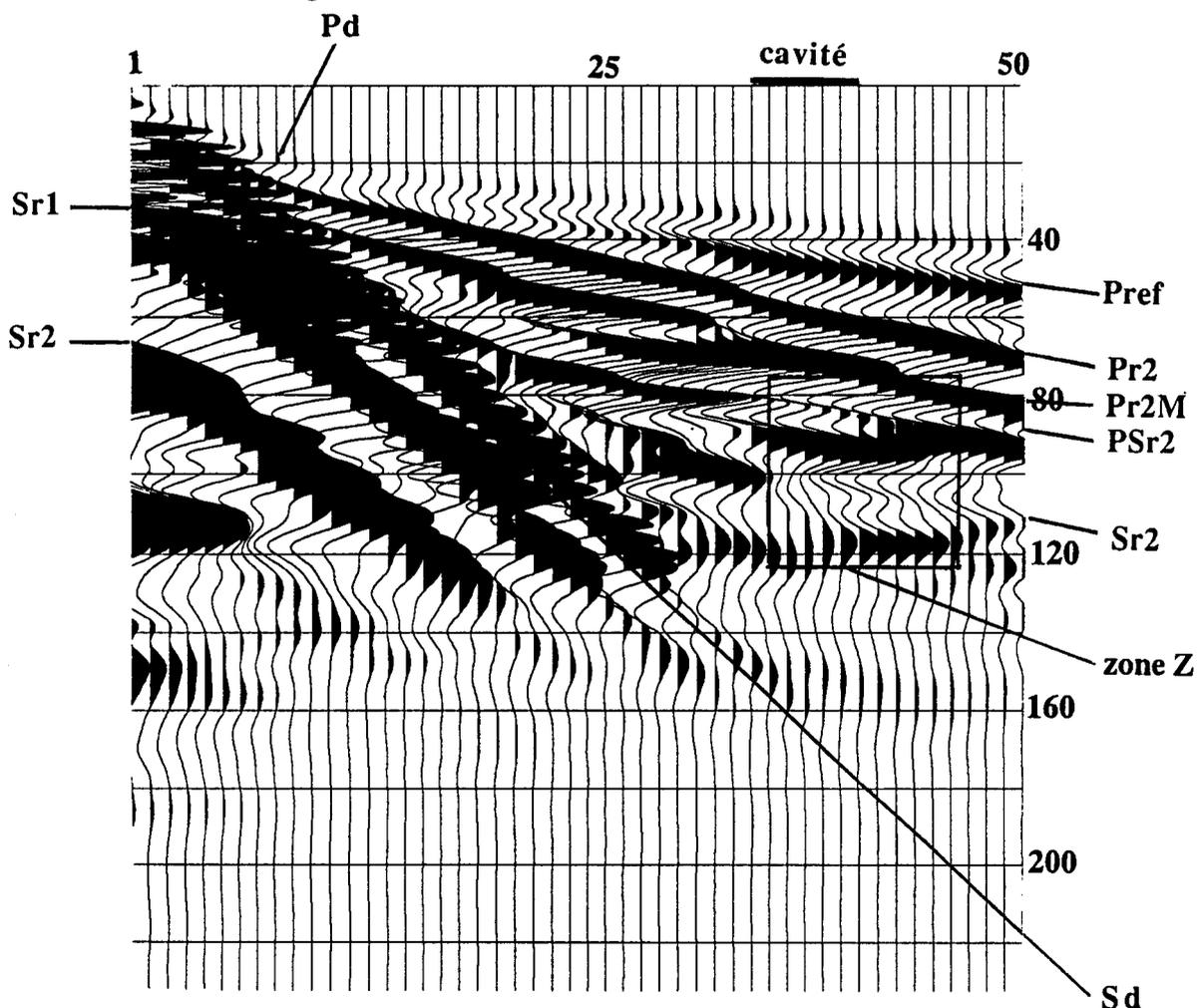
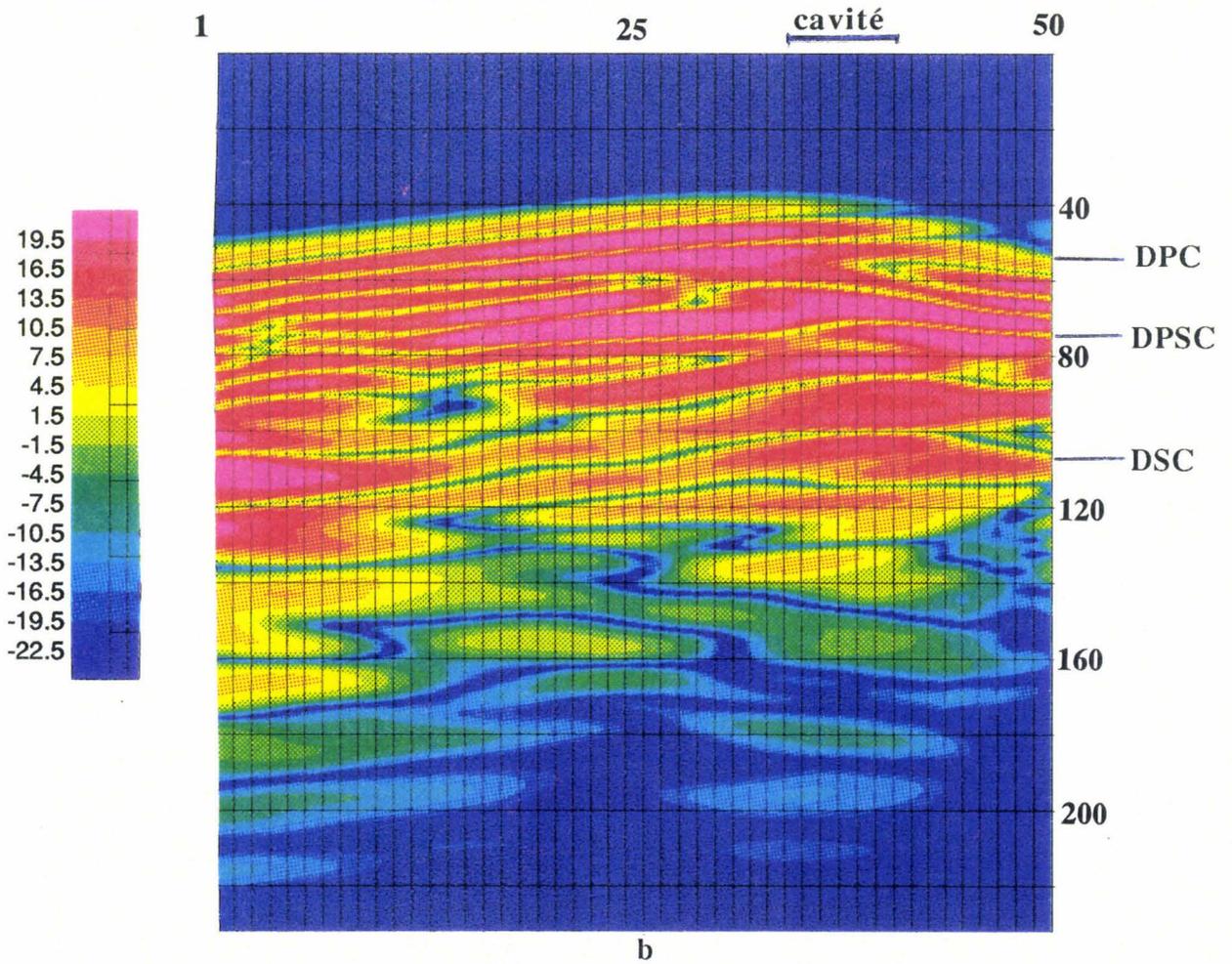
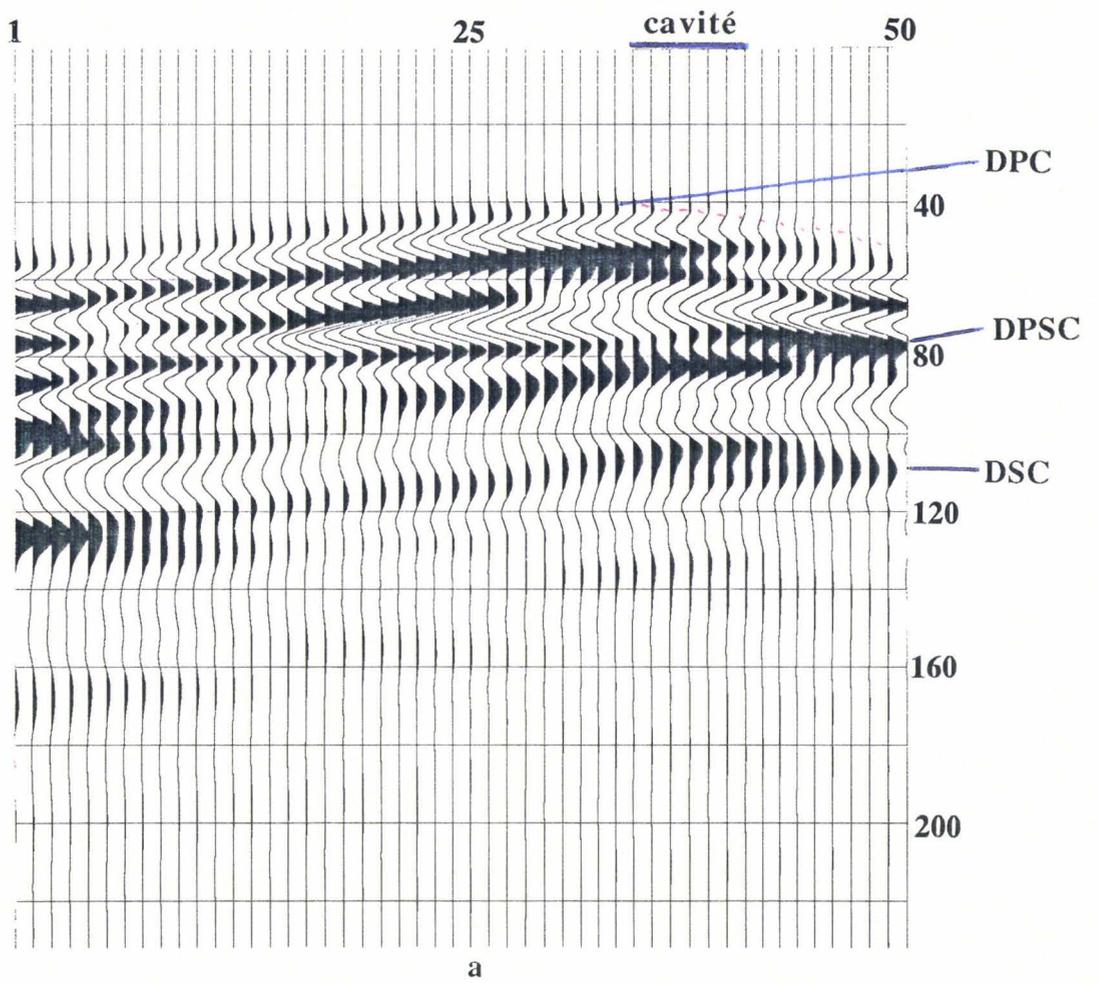


Figure III.4: Présentation du sismogramme obtenu avec la cavité de la figure III.3 avec $L= 6\text{m}$ et $H= 4\text{m}$. Utilisation d'un contrôle automatique de gain de fenêtre de moyennage de 20 ms.



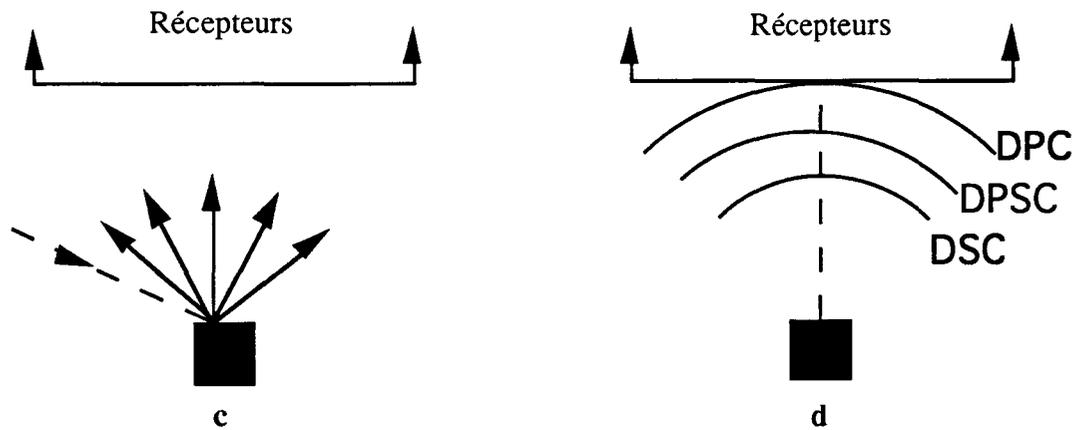


Figure III.5: Présentation de la différence algébrique des données sans contrôle automatique de gain obtenues sans et avec cavité pour la configuration de la figure III.3.

- a) Représentation du sismogramme obtenu avec un gain 10 fois supérieur à celui des figures III.2 et III.4.
- b) Représentation en couleur (avec une échelle en dB) des niveaux d'amplitude des signaux (Mode d'obtention en Annexe 3).
- c) Illustration du phénomène de diffraction sur le toit de la cavité.
- d) Fronts d'ondes de diffractions sur le toit de la cavité.

III.4.IMAGERIE 2D PAR SISMIQUE HAUTE RESOLUTION

III.4.1.Processus d'obtention

Pour la suite de l'étude, on choisi de travailler dans une fenêtre optimale dans laquelle la réflexion Pr2 sur le fond de la craie est au mieux séparée des autres événements. Cette fenêtre est comprise entre les récepteurs 27 et 50 (Figure III.2). La procédure qui suit est similaire à celle utilisée sur le terrain. On simule 37 tirs pour obtenir une image sismique du sous-sol. Ils sont effectués de manière à avancer la source et les récepteurs d'un mètre à chaque tir sur une même ligne (Figure III.6).

Les tirs sont traités et regroupés selon un processus résumé en Annexe 3. A la sortie, on obtient une image du sous-sol de 96 CDP compris entre les CDP 30 et 125. La distance inter récepteur étant d'un mètre, la distance inter CDP est de 0,5 mètres.

Le traitement appliqué n'utilise pas toutes les opérations citées dans l'Annexe 3 en raison du fait que les signaux ne sont pas bruités, qu'il n'existe pas de voies mortes ni de signal aérien, et qu'un filtrage n'est pas utile pour des données numériques. Les opérations effectuées sont les suivantes :

1) Contrôle automatique de gain

On applique d'abord un contrôle automatique de gain sur chaque tir avec une fenêtre de moyennage de 40ms pour rééquilibrer le niveau des réflexions par rapport aux autres événements.

2) Choix de la fenêtre optimale

On enlève les 9 premières traces de chaque tir qui ne sont pas indispensables à l'image de Pr2. Les événements arrivant après 100 ms sont coupés, ne concernant pas Pr2.

3) Couverture multiple

On regroupe les 37 tirs selon leurs points miroirs communs (Common Depth Point). Cette opération consiste à générer une couverture multiple (fold) pour chaque CDP (ici la couverture multiple vaut $(24-9) / 2 = 7,5$).

4) Correction de vitesse NMO

On applique une vitesse de correction moyenne v_{nmo} (Normal Move Out) appliquée pour visualiser l'onde réfléchie sur le fond de la craie Pr2. Cette vitesse est calculée connaissant les vitesses et épaisseurs des différentes couches grâce à:

$$\frac{h_a}{v_a} + \frac{h_c}{v_c} = \frac{h_a + h_c}{v_{nmo}}$$

où h_a et h_c sont les épaisseurs des couches d'argile et de craie,
 v_a et v_c sont les vitesses des ondes de compression dans l'argile et la craie,

En utilisant les données de la figure III.1, on peut déterminer $v_{nmo} = 1200$ m/s ce qui donne un temps t_0 d'aller retour sur le trajet vertical entre la source et la couche de 40 ms pour Pr2 (on rappelle que $t_0 = 2(h_a + h_c)/v_{nmo}$). On somme enfin les différentes voies pour obtenir un sismogramme final. Dans un premier temps, une étude sans cavité sera menée, suivie d'un étude avec cavité.

III.4.2.Sismogramme obtenu sans cavité

Le sismogramme résultant de l'étude sans cavité est donné dans la figure III.7. Il représente une image sismique du sous-sol entre les points CDP 48 et 116 de la figure III.6, après avoir supprimé 10 traces en début et fin de profil, les 7 premières traces ayant une couverture multiple non maximale.

La réflexion d'onde de compression Pr2 sur le fond de la craie est retrouvée à un temps d'arrivée correspondant comme prévu au temps d'aller retour de l'onde sous la source (40 ms). Le signal obtenu entre 20 ms et 40 ms représente la réfraction Pref qui n'a pas été supprimée entièrement par le traitement. Les phénomènes arrivant après 55 ms sont également présents sur les tirs bruts et non éliminés par le traitement. Ces observations montrent que le signal recherché (ici Pr2) est toujours entouré d'autres signaux qui ne peuvent être totalement supprimés. Ces signaux constituent le bruit cohérent du profil.

III.4.3.Sismogramme obtenu avec cavité

Dans cette partie, on propose de réaliser la même campagne de mesures avec cette fois une cavité placée de la même façon que dans la section III.3.2 ($L = h = 6m$). La cavité se trouve entre les points CDP 75 et 87. Le sismogramme obtenu est présenté dans la figure III.8. On note une évolution très marquée par rapport au cas sans cavité.

Nous observons que la présence de cavité crée un affaiblissement de l'onde Pr2 avant et après la position de la cavité, deux fois sur une distance comparable à la grandeur du vide. Cet affaiblissement est dû à l'effet d'ombre que joue la cavité sur l'image du fond de la craie. Ce phénomène connu sous le nom de masquage est symétrique par rapport au centre de la cavité. Il est important de souligner que Pr2 n'est absolument pas altérée sous la cavité. Ces modifications du signal sont dus à l'impossibilité de la réflexion Pr2 d'atteindre le fond de la craie ou bien d'en remonter, à cause de la présence du vide (Figure III.9).

L'onde réfractée Pref est légèrement perturbée sous la cavité. Ceci est dû à la présence de diffractions d'ondes de compression sur le toit de la cavité qui arrivent en même temps que Pref sur les récepteurs situés au dessus de cette cavité (Figure III.5). Cette faible perturbation de Pref confirme que les réflexions directes sur le toit de la cavité existent mais qu'elles sont en pratique généralement noyées dans le bruit cohérent. Ceci explique pourquoi la détection directe des cavités de faibles tailles est si difficile sur le terrain et qu'il est plus facile d'observer les masquages d'un réflecteur plus profond.

Dans le cas où cette zone de masquage figurerait sur un sismogramme de terrain, on pourrait l'interpréter par erreur comme une présence de vide exactement sous cette zone (Piwakowski, 1994a,b). Il y aurait une erreur de localisation de cavité qui correspond à la distance D entre le début (respectivement la fin) du masquage et le début (respectivement la fin) de la cavité. Dans notre exemple, on remarque que $D = 20$ CDP (10 m) ce qui est plus grand que la longueur de la cavité elle-même (6 m) (Figure III.10)

Comment les effets de masquage peuvent-ils varier si la cavité est différemment positionnée en profondeur? C'est ce que l'on se propose d'observer en faisant varier la hauteur H entre la cavité et le fond de la craie.

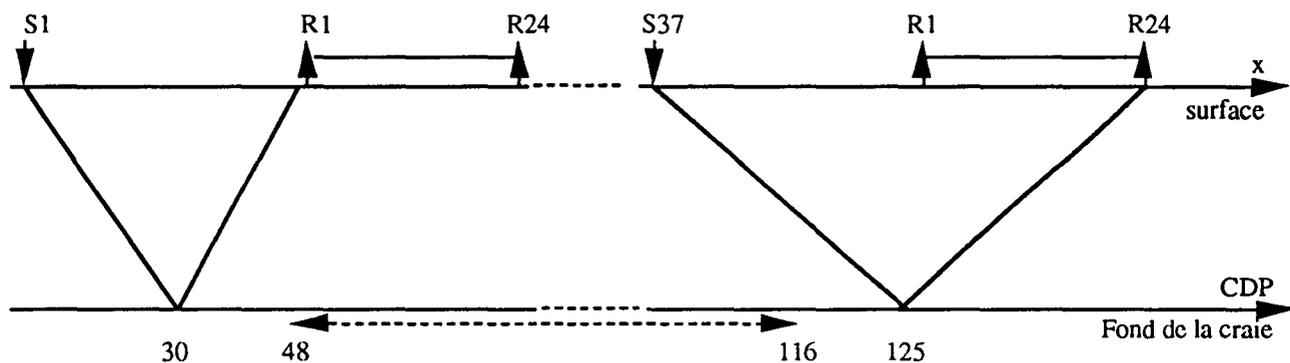


Figure III.6: Présentation de la géométrie des mesures et de la correspondance avec les points CDP

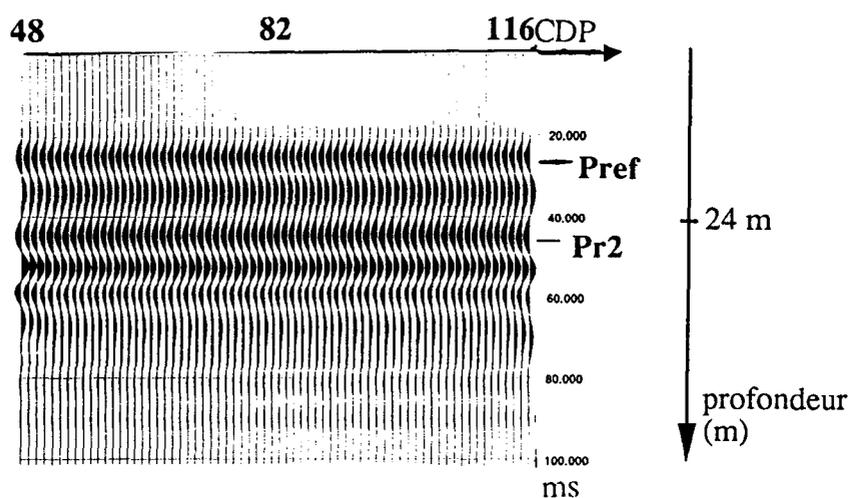


Figure III.7: Sismogramme synthétique 2D du profil sans cavité.

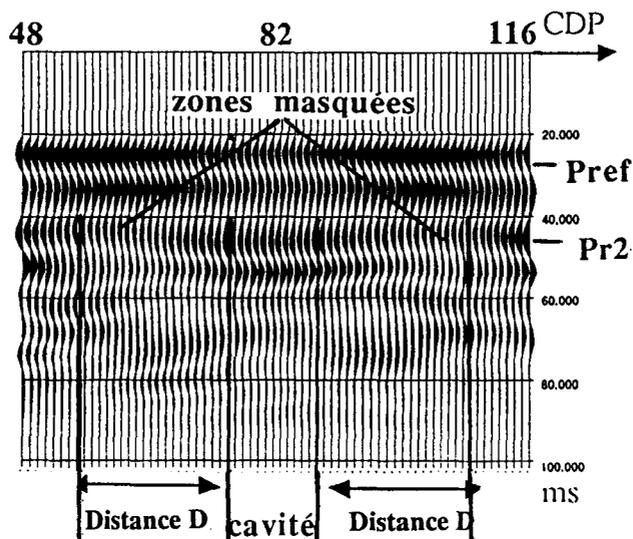


Figure III.8: Sismogramme synthétique 2D du profil avec cavité entre les points CDP 75 et 87 ($L = h = 6m$). La hauteur H entre la cavité et le fond de la craie est $H = 4 m$.

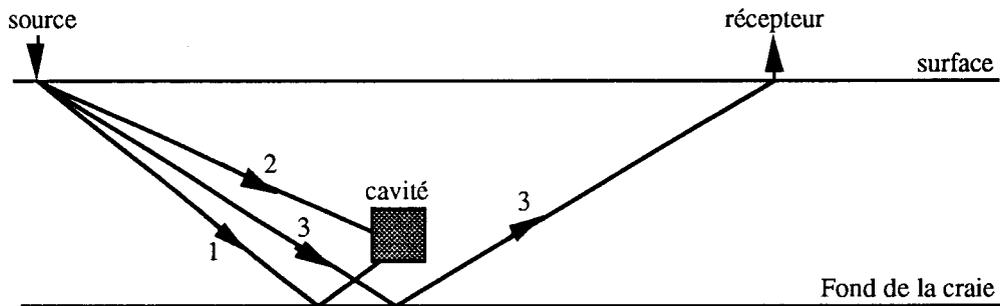


Figure III.9: Présentation des trois cas de figure pour l'onde Pr2 au voisinage de la cavité:

Cas 1: impossibilité de remonter du fond de la craie.

Cas 2: impossibilité d'atteindre le fond de la craie.

Cas 3: CDP sous la cavité éclairé par le sondage.

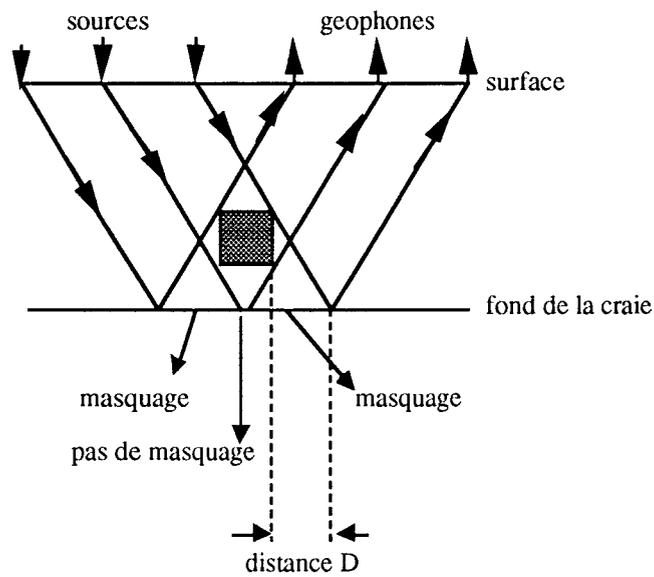


Figure III.10: Interprétation de la figure III.8. D est la distance entre la fin de la cavité ($L = h = 6\text{m}$) et la fin du masquage du fond de la craie.

III.4.4. Etude paramétrique sur la profondeur de la cavité

Dans la suite du travail, on propose de supprimer la réfraction P_{ref} sur les sismogrammes. Ceci permet d'observer plus facilement le masquage du fond de la craie par l'intermédiaire de P_2 .

Refaisons l'étude en diminuant la distance H entre la cavité et le fond de la craie et en utilisant la même cavité ($L = h = 6m$). Dans le cas $H=2$ m (Figure III.11a, b), le masquage du fond de la craie est du même type que précédemment, symétrique par rapport au centre de la cavité. Le fait d'avoir diminué la hauteur H n'a pas fait varier sensiblement la longueur des deux zones de masquage, toujours comparable chacune à la longueur L de la cavité. Par contre, la longueur de la partie non masquée située sous la cavité a diminué d'environ 20% (Figure III.11a). Ceci est dû au fait que lorsque H diminue, moins de points situés sous la cavité sont éclairés par le sondage (Figure III.11b). La distance D définie auparavant vaut dans ce cas 16 CDP (8 m). Cette distance est donc en diminution par rapport au cas $H = 4m$.

Dans le cas où la cavité est posée sur le fond de la craie ($H = 0$, figure III.11c, d), le masquage est toujours symétrique par rapport au centre de la cavité. Il s'effectue sur une longueur comparable à 3 fois la longueur de la cavité. La partie non masquée située sous la cavité pour les cas précédents a maintenant totalement disparu, puisque la cavité touche le fond de la craie. La distance D définie auparavant vaut dans ce cas 12 CDP (6 m), ce qui correspond à la longueur de la cavité. Cette distance est donc plus faible que pour les cas $H \neq 0$.

Cependant, pour la même étude, une cavité de dimension plus petite peut-elle être détectée par notre simulation ? C'est ce que nous proposons d'étudier maintenant.

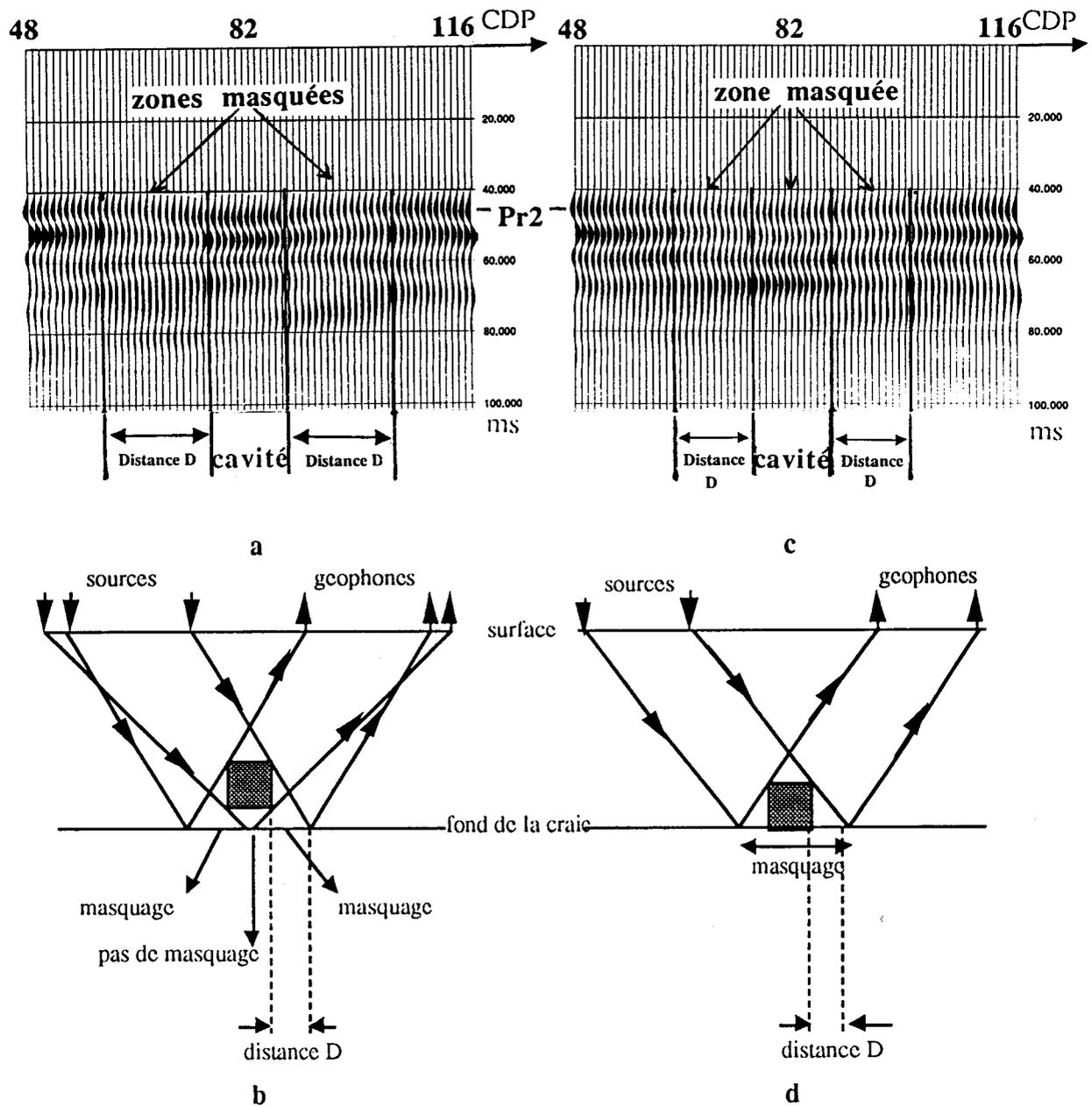


Figure III.11: Sismogrammes synthétiques 2D obtenus avec cavité ($L = h = 6\text{m}$) pour deux cas:

- a) cas $H=2\text{ m}$, b) interprétation,
- c) cas $H=0\text{ m}$, d) interprétation.

III.4.5. Conclusions concernant la localisation de cavités de section carrée

Dans l'étude précédente d'une cavité carrée, le masquage du réflecteur plus profond s'est effectué de manière symétrique par rapport au centre de la cavité. Lorsque la cavité ne touche pas le réflecteur plus profond, deux zones de masquage de ce réflecteur se présentent sur une longueur comparable à la dimension d'un côté de la cavité carrée. Lorsque la cavité est posée sur ce réflecteur, un masquage est observé sur une longueur de trois fois celle de la cavité. Cette étude permet de montrer que lorsque H diminue, la distance D entre le début du masquage et le début de la cavité diminue également.

De manière générale, les simulations ont montré que le masquage avait une nature physique comparable avec une ombre optique. Par un schéma géométrique simple, cela peut permettre d'avoir une idée sur la forme du masquage que peut créer la présence d'une cavité de type quelconque. Cette analogie acoustico - optique est cependant complexe dans le sens où plusieurs positions de sources et de capteurs sont utilisées pour réaliser une imagerie sismique (couverture multiple).

Les simulations réalisées nous permettent de donner des conseils sur la localisation in situ de cavités (de section carrée dans le plan vertical du profil) selon le degré de connaissance du sous-sol que l'on possède avant les mesures. Ce degré concerne la hauteur H séparant le fond de la cavité et le premier réflecteur plus profond, ainsi que la dimension d'un côté L de la cavité carrée. Cette localisation est donnée par la distance D pour une longueur d'onde λ et un dispositif de mesures fixées :

Premier degré de connaissance:

Si sur le terrain on n'a aucune idée ni du fait que la section de la cavité soit carrée, ni de la hauteur H, il est impossible de préciser la distance D.

Deuxième degré de connaissance:

Si l'on sait uniquement que la section de la cavité est carrée, on peut dire que le centre de la cavité est situé sur l'axe de symétrie du masquage.

Troisième degré de connaissance:

Si l'on sait que la section de la cavité est un carré de côté 6 mètres et que $0 \leq H \leq 4$ m , on peut écrire:

$$6 \leq D \leq 10\text{m}$$

et être plus précis si l'on connaît exactement H:

si $H = 4\text{m}$: $D = 10$ m, si $H = 2\text{m}$: $D = 8$ m , si $H = 0\text{m}$: $D = 6$ m.

III.4.6. Effets de la diminution des rapports $\frac{L}{\lambda}$ et $\frac{h}{\lambda}$

Choisissons de répéter la même étude en diminuant la dimension des côtés de la cavité carrée d'un facteur 3: $L = h = 2\text{m}$. Le rapport défini plus haut devient alors $\frac{L}{\lambda} = 0,1$, ce qui rend la détection de la cavité à priori plus difficile. Positionnons cette petite cavité pour qu'elle touche le fond de la craie ($H=0$), entre les points CDP 79 et 83.

La section obtenue (Figure III.12) ne laisse apparaître aucune différence visible avec le cas sans cavité (Figure III.7). Cela veut dire que la limite de détection est dépassée. On peut dire que, pour les conditions de la simulation, cette limite est comprise entre les valeurs suivantes:

$$\frac{L}{\lambda} = 0.1 < \text{limite de détection} < \frac{L}{\lambda} = 0.3$$

Cette étude comparée à celle de la figure III.11.c,d montre que le masquage ne varie pas de façon linéaire avec la dimension du côté de la cavité carrée. On aurait en effet pu s'attendre à ce que pour une cavité carrée de 2 m de côté on ait un masquage de 6 m, ce qui n'est pas le cas. Cette observation permet de conclure que, pour une disposition d'outils sismiques et une utilisation de source fixées, les deux zones de masquage de la figure III.8 ne peuvent pas être interprétées comme la présence de deux cavités carrées de 2 m de côté posées sur le fond de la craie.

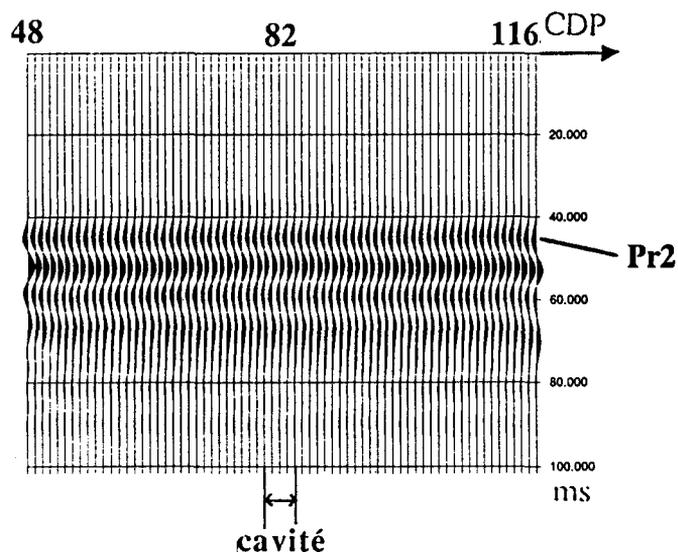


Figure III.12: Sismogramme synthétique 2D obtenu avec une petite cavité ($L = h = 2\text{ m}$) entre les points CDP 79 et 83. La hauteur H entre la cavité et le fond de la craie est $H = 0\text{ m}$.

III.4.7. Effets du changement de forme de la cavité

Etudions maintenant l'effet de la forme d'une cavité sur les résultats. Plaçons une cavité rectangulaire de hauteur $h = 6$ m et de largeur $L = 0,5$ m à une hauteur $H = 4$ m de la base de la craie, entre les points CDP 80 et 81 du profil. Cette cavité peut-elle être détectable sachant que sa largeur vérifie $\frac{L}{\lambda} = 0,025$, ce qui est très faible en ce qui concerne la possibilité de détection, mais que sa hauteur vérifie $\frac{h}{\lambda} = 0,3$, cas pour lequel une cavité carrée est détectée?

Le sismogramme obtenu (Figure III.13a) présente un double masquage symétrique par rapport au centre de la cavité, du même type que pour le cas de la cavité carrée (Figure III.8). Les dimensions des zones masquées et de la partie centrale non masquée sont identiques à celles de la figure III.8. Les seules légères différences sont au niveau de l'étendue du masquage qui est plus étroit (2 CDP à droite et à gauche). Ce phénomène est dû au fait que la cavité soit plus étroite en horizontal que dans le cas de la cavité carrée (Figure III.13b). L'image du fond de la craie est plus lisse que dans le cas de la cavité carrée (Figure III.8). Cela peut s'expliquer par une plus faible présence des ondes diffractées qui viennent perturber Pr2. Ces ondes perturberaient moins l'onde réfléchie sur le fond de la craie. La distance D est pour ce cas d'environ 24 CDP (12m), donc un peu plus grandes que dans le cas de la cavité carrée (10m).

Il est donc difficile de distinguer les deux sismogrammes des figures III.13a et III.8. Par conséquent, pour un sismogramme de ce type issu de mesures de terrain, les deux interprétations ne peuvent à priori se départager. Il peut y avoir présence de cavité carrée de côté $L = 6$ m ou d'une cavité rectangulaire mince de hauteur $h = 6$ m. Cette étude montre qu'il est possible en sismique haute résolution de détecter des anomalies telles que des fentes verticales (anomalies karstiques) et que la connaissance de la longueur du masquage ne suffit pas pour connaître la forme de la cavité.

Cette étude confirme l'analogie acoustique - optique présentée plus haut. En se basant sur cette analogie, on peut essayer de prévoir l'allure des zones de masquage pour d'autres cas. Dans le cas de la même cavité rectangulaire mais positionnée cette fois horizontalement, le même type de masquage apparaîtra (Figure III.14a). Par contre, la distance D entre le début du masquage et le début de la cavité sera moins grande. On voit dans cette étude qu'un paramètre important dans la création des masquages est la surface d'exposition S_e de la cavité face aux fronts d'ondes des différents tirs. Cela implique que ce paramètre joue également sur l'évaluation de la distance D .

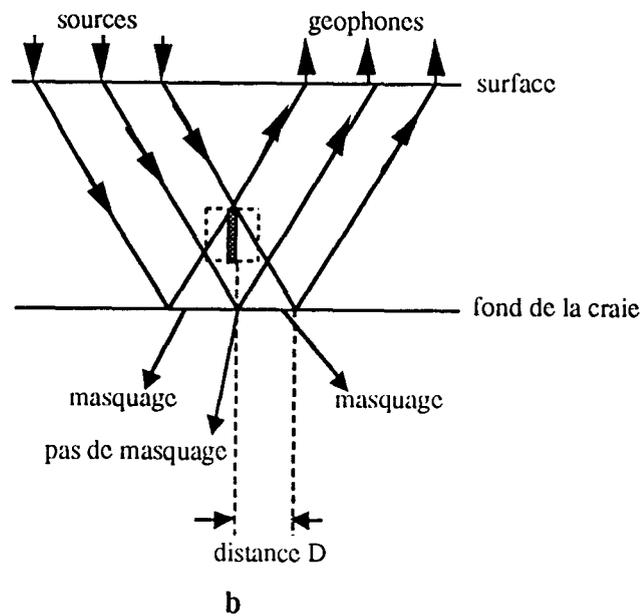
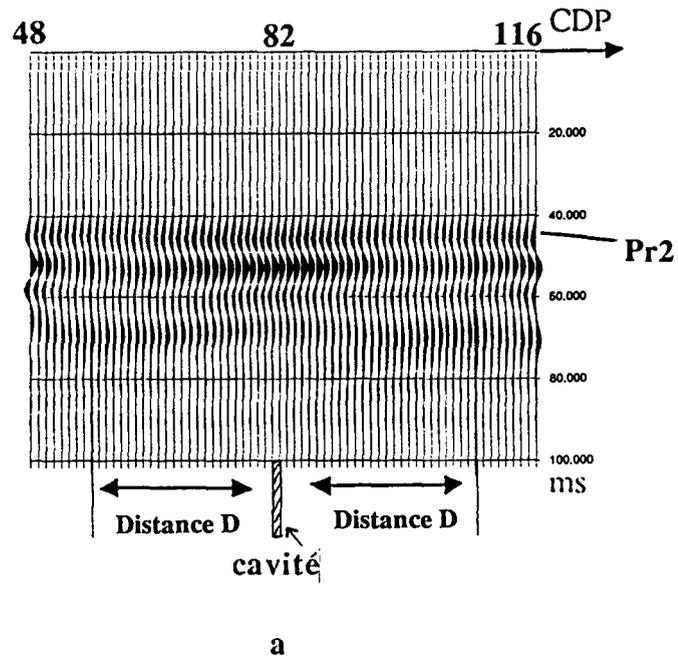


Figure III.13: a) Présentation sismogramme synthétique 2D obtenu avec cavité rectangulaire verticale ($L = 0,5\text{m}$ et $h = 6\text{m}$) placée entre les points CDP 80 et 81, $H = 4\text{m}$. b) Interprétation des effets observés sur la figure III.13a.

Si maintenant on incline la cavité rectangulaire (Figure III.14b), on peut prévoir que le masquage ne sera plus symétrique par rapport au centre de la cavité et la distance D n'est pas la même à gauche qu'à droite de la cavité. Cette observation montre l'effet complexe de la localisation de cavité par masquage et que, sur le terrain, il est nécessaire d'avoir une idée de la forme de la cavité pour évaluer D .

II.4.8. Remarques concernant la limite de détection d'une cavité

Piwakowski et al (1994) ont montré qu'il était intéressant d'étudier la possibilité de détection d'une cavité par l'intermédiaire du rapport:

$$(III.1) \quad AN = \frac{S_c}{S_F}$$

où S_c est la surface de la coupe horizontale de la cavité dans le plan de la surface de Fresnel S_F (Figure III.15). Dans cette figure, on assimile le sondage acoustique à une sonde verticale qui réalise un sondage en un point CDP. Le dispositif crée une zone d'observation dont le rayon est évalué comme R_F , rayon de la surface de Fresnel (Steeple, 1989). Ceci permet de caractériser l'anomalie causée par la cavité par le rapport AN .

On peut écrire ce rapport en fonction de l'angle d'incidence θ de la cavité vue par le sondage, ce qui revient à considérer AN en fonction de la profondeur η_c de la cavité:

si l'on pose :

$$R_F = \sqrt{\frac{\lambda \eta_c}{2}} \quad \text{où } \lambda \text{ est la longueur d'onde,}$$

et $\tan \frac{\theta}{2} \cong \frac{\theta}{2}$, on a :

$$(III.2) \quad AN \cong \frac{1}{2} \frac{\theta D}{\lambda} \quad \text{ou encore} \quad AN \cong \frac{1}{2} \frac{D^2}{\eta_c \lambda}$$

Cette formulation de AN souligne la dépendance de la limite de détection en fonction de la longueur d'onde du sondage et de la profondeur de la cavité. On peut également dire que, selon (III.2), la détection d'une cavité dépend de sa grandeur D , par rapport à λ , et de l'angle de vue θ . Si la profondeur de la cavité augmente ($D / \lambda = \text{const.}$), θ diminue, donc AN diminue.

La limite de détection sur un type de terrain proche de celui de la modélisation a été évaluée à $AN = 0,5$ (Piwakowski et al, 1996). En dessous de cette valeur, il a été montré qu'il était très difficile de détecter la cavité. Il est intéressant de déterminer AN pour les simulations réalisées dans ce Chapitre.

Dans le cas d'un modèle à deux dimensions (Annexe 1), S_F et S_C peuvent être respectivement considérés comme $2R_F$ et L , la largeur de la cavité. L'équation (III.1) peut alors s'écrire :

$$AN = \frac{L}{2R_F}$$

où L est la largeur de la cavité.

Pour le cas de la cavité carrée de côté $L = h = 6m$ qui était détectée, nous obtenons $0,22 < AN < 0,25$. Ces valeurs de AN sont inférieures à la limite de détection observée sur le terrain ($AN = 0,5$). Cet écart entre les valeurs de AN numérique et de terrain pouvait être attendu à cause de la présence de bruits de profil et d'anomalies naturelles pour les mesures in - situ. Cela montre que pour des géométries simulées et de terrain comparables, la valeur de AN nécessaire pour détecter une cavité doit être plus grande sur le terrain. Un rapport de 2 entre les valeurs de AN in - situ et numérique représente correctement la différence entre le modèle et les conditions pratiques.

Pour le cas de la petite cavité carrée ($L = h = 2m$) qui n'était pas détectée, nous avons $AN = 0,06$. Pour nos simulations, on peut dire que la limite de détection d'une cavité carrée se situe pour :

$$0,06 < AN < 0,22.$$

En ce qui concerne la cavité rectangulaire (fente de dimensions $L = 0,5$ et $h = 6m$), on a $AN = 0,02$ si on prend en compte L et $AN = 0,25$ si on applique h au calcul de AN . Cela montre que l'on doit tenir compte de la surface d'exposition S_e de la cavité face aux fronts d'ondes des différents tirs pour calculer AN . Dans l'équation (III.2), l'angle θ doit donc s'écrire en fonction de cette surface S_e , sinon la cavité de la figure III.13 ne serait pas détectée ($\theta = 0$).

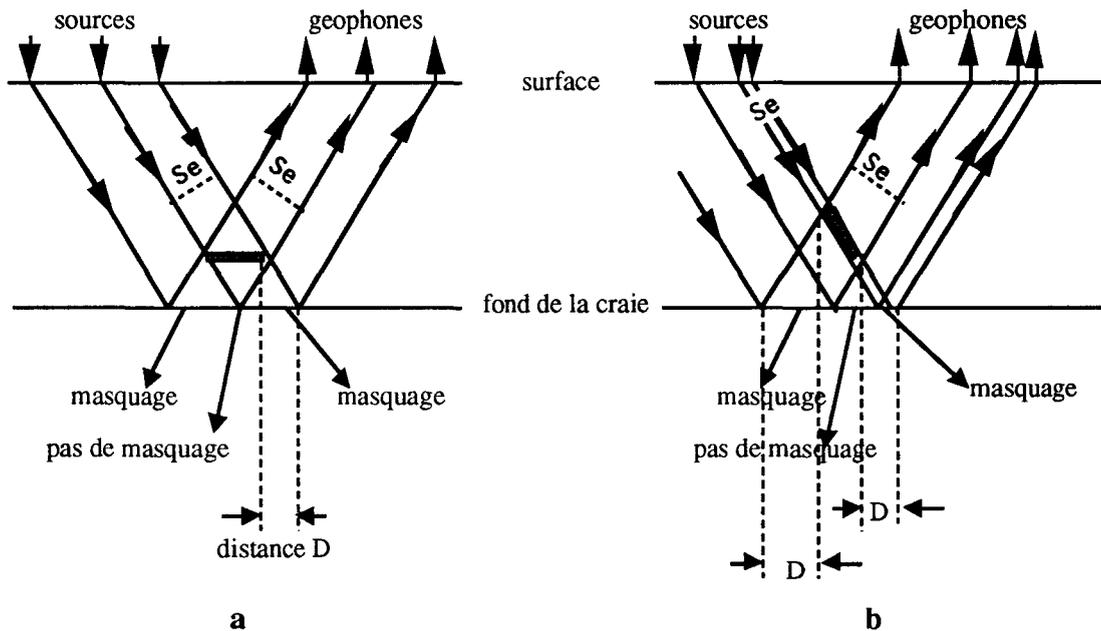


Figure III.14: Présentation de l'allure des masquages prévus dans le cas d'une cavité rectangulaire ($L = 6\text{m}$, $h = 0,5\text{m}$) a) horizontale, b) inclinée. Se est la surface d'exposition de la cavité face aux fronts d'ondes des différents tirs

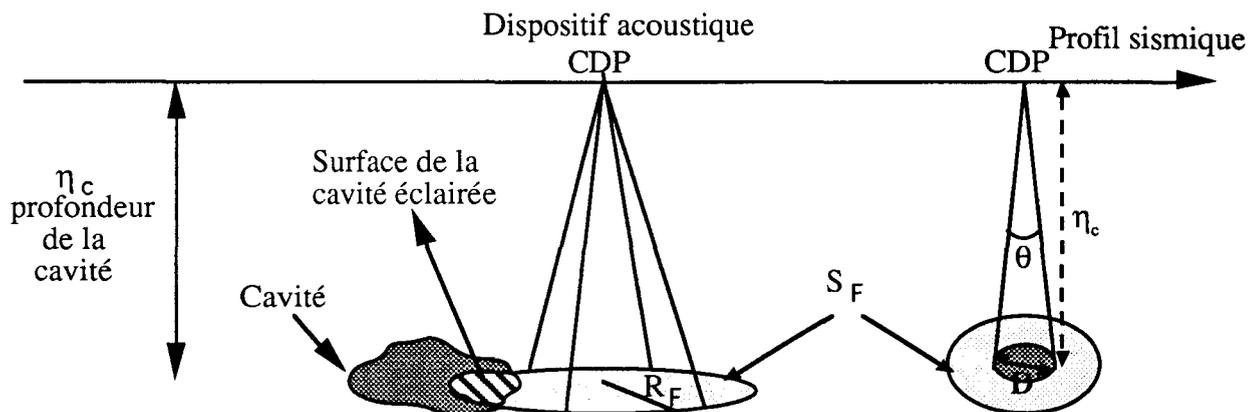


Figure III.15: Représentation de la surface de Fresnel S_F dans une coupe de terrain. R_F est le rayon de S_F .

III.5.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nos simulations ont montré la difficulté de détecter une cavité de manière directe, par visualisation de réflexions sur son toit. Par contre, cette détection est réalisable de manière indirecte par masquage de réflecteur plus profond. Cela confirme les observations tirées de mesures de terrain (Piwakowski, 1994a, b).

L'observation du phénomène de masquage a permis de préciser qu'il dépendait entre autre des dimensions et de la forme de la cavité et de la hauteur entre le fond de la cavité et l'interface masquée. Cela implique que la distance D entre le début du masquage et le début de la cavité dépend également de ces paramètres. La connaissance de D peut permettre de préciser la localisation d'une cavité sur le terrain.

Des simulations en deux dimensions menées pour des cavités de section carrée ont permis de tirer certaines conclusions concernant la possibilité de localisation de ce type de cavités in - situ (Moreaux et al., 1996). Il a été montré que le masquage ne variait pas de façon linéaire avec la dimension du côté de la cavité carrée. L'étude a également permis de donner un encadrement de la limite de détection (pour les simulations) d'une cavité carrée de côté L en fonction de la longueur d'onde λ . Pour les conditions des simulations numériques réalisées, cette limite se caractérise par l'inégalité $0,1 \lambda < L < 0,3 \lambda$.

L'étude qui consistait à changer la forme de la cavité a montré qu'un paramètre essentiel jouant sur la création du masquage était la surface d'exposition S_e de la cavité face aux fronts d'ondes des différents tirs.

Le calcul du rapport AN, concernant la possibilité de détection d'une cavité, pour les simulations numériques s'est avérée être deux fois plus faible que celui observé in - situ dans les mêmes conditions. Cet écart caractérise la différence de condition entre les mesures simulées et celles de terrain.

L'étude a montré que les phénomènes de masquages pouvaient être comparés, selon une analogie acoustico - optique, à une ombre sur l'interface masquée. La création de cette ombre est pourtant plus compliquée que dans le cas d'une source optique: le rapport L / λ plus faible en acoustique privilégie la contribution des diffractions. Le nombre de sources et de récepteurs utilisés pour la couverture multiple complique aussi cette analogie.

CHAPITRE IV

APPLICATION SUR UN SITE DU NORD DE LA FRANCE

Résumé

Le travail de ce chapitre consiste à utiliser les conclusions du Chapitre précédent pour localiser des cavités avec la réflexion sismique haute résolution. Il comporte deux parties. Dans la première, la mise en oeuvre d'une campagne de mesures sismiques de terrain sur site urbain est présentée. La seconde partie consiste à analyser les données de terrain en leur appliquant les conseils du Chapitre III. Cette application permet de dresser une carte de présence de vide sur les profils sismiques sondés.

IV.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer les conseils du Chapitre III à la localisation de cavités en zone urbaine. Après une présentation du site, on décrit le processus de mise en oeuvre de la technique de réflexion sismique. L'étude située en zone urbaine constitue un test pour cette technique sur ce type de terrain. On propose d'étudier un cas peu banal de profil sondé avant et après injection de béton dans une cavité. Cette injection a été réalisée pour empêcher l'effondrement en surface . L'étude de ce profil constitue un moyen de vérifier si la réflexion sismique peut être utilisée pour tester la qualité du remplissage de cavité. On présente l'application des conclusions du Chapitre III aux données de terrain dans le but d'estimer l'erreur de la localisation par masquage. On propose enfin de comparer nos résultats avec ceux de la méthode gravimétrique.

IV.2.PROCESSUS D'OBTENTION DES DONNEES DE TERRAIN

IV.2.1.Présentation du site

IV.2.1.1. Présentation du problème

Le site d'étude est situé dans le Nord de la France, en pleine ville, à cheval sur des propriétés privées et un cimetière. Il présente certains affaissements en surface provoqués par la présence dans le sous sol d'anciennes galeries d'extraction de craies vieilles de plusieurs siècles. Ce site est une préoccupation pour les autorités locales en ce qui concerne la sécurité publique. Aucun plan complet de ces galeries n'existe et il est impossible de s'y aventurer à cause de la teneur toxique en CO₂ qui y règne. Nous disposons d'une carte des galeries établie sur une partie du site grâce à l'utilisation de photographies (Service de l'Inspection des Carrières Souterraines de Douai). Celles-ci ont été réalisées par l'introduction d'appareils photographiques dans des forages tubés à proximité des affaissements. Nous disposons également de résultats de forages dont certains ont signalé la présence de vide.

Une étude gravimétrique réalisée sur ce site donne une carte des anomalies de densités du terrain où les défauts de densité peuvent être analysés comme indicateurs de présence de cavités. Certaines parties des cavités connues par photographies n'étant pas détectées par gravimétrie, les autorités locales font appel à la méthode de réflexion sismique pour réaliser une complémentarité d'informations sur la localisation des galeries. On profite de cette étude pour se procurer des indications quant à la possibilité d'utilisation de la méthode de réflexion sismique en zone urbaine.

IV.2.1.2. Données photographiques, gravimétriques et de forage

Les données provenant des études gravimétriques et photographiques sont récapitulées dans la figure IV.1 ainsi que les positions des forages effectués. L'interprétation du type géologique des réflecteurs rencontrés sur nos sismogrammes est possible grâce aux données de forages récapitulées dans la figure IV.2. Les différentes interfaces géologiques sont symbolisées par des lettres qui seront utilisées dans la suite de ce Chapitre. L'exploitation de la craie s'effectuait dans la craie blanche, située entre les interfaces notées C et C1. Les dimensions L et h (voir figure IV.2) des galeries non dégradées dans une coupe verticale sont estimées en moyenne à $L \cong 6\text{m}$ et $h \cong 3\text{m}$. La hauteur H entre l'interface C1 et le fond des galeries est de l'ordre de 2 mètres. C1 est l'interface d'intérêt, susceptible d'être masquée dans nos données sismiques par la présence des galeries.

IV.2.2. Mise en oeuvre de la technique de réflexion sismique

Le processus de mise en oeuvre de la réflexion sismique est présenté dans l'Annexe 3. Pour la campagne de mesures de ce Chapitre, on utilise comme source le fusil de chasse alimenté de balles de type "gros gibier" étudié dans le laboratoire d'accueil. Cette source permet de générer des fréquences comprises entre 100 et 400 Hz, fréquences utiles au regard de la résolution désirée. La bonne répétabilité du fusil en fait également un type de source appréciable pour l'association des signaux enregistrés à différents tirs. C'est également une source que l'on manipule aisément.

On utilise pour cette étude des capteurs qui possèdent les caractéristiques d'un filtre passe haut de fréquence de coupure 100 Hz. Cette fréquence de coupure permet d'éviter la saturation à l'enregistrement du convertisseur analogique - numérique par les ondes de Rayleigh basses fréquences qui dominent les sismogrammes (Knapp, 1986a).

Le système d'acquisition est un sismographe de type EGG 2401 composé d'un convertisseur analogique numérique 15 bits d'une dynamique de 84 dB. Il comporte 24 voies, ce qui nous permet d'enregistrer simultanément les réponses de 24 récepteurs pour un tir effectué. La distance entre récepteurs est de un mètre, le déplacement de la source à chaque tir est de un mètre, ce qui donne la distance entre CDP égale à 0,5 m.

En fonction de l'effet très absorbant du tuffeau et de la profondeur visée (voir l'Annexe 3), les choix des distances source - premier récepteur (nearest offset) et source - dernier récepteur (maximal offset) sont respectivement choisis à 13 m et 36 m.

Les sismogrammes obtenus sont présentés avec en abscisse la longueur du profil (intertrace 0,5m) et en ordonnée le temps (en ms) mis par les ondes pour effectuer le trajet aller retour entre la source et l'interface détectée. Pour chaque profil, nous avons choisi de présenter les sismogrammes sous trois formes. Ces représentations correspondent aux notations C, NBN, et C+NBN dont l'obtention est présentée en Annexe 3.

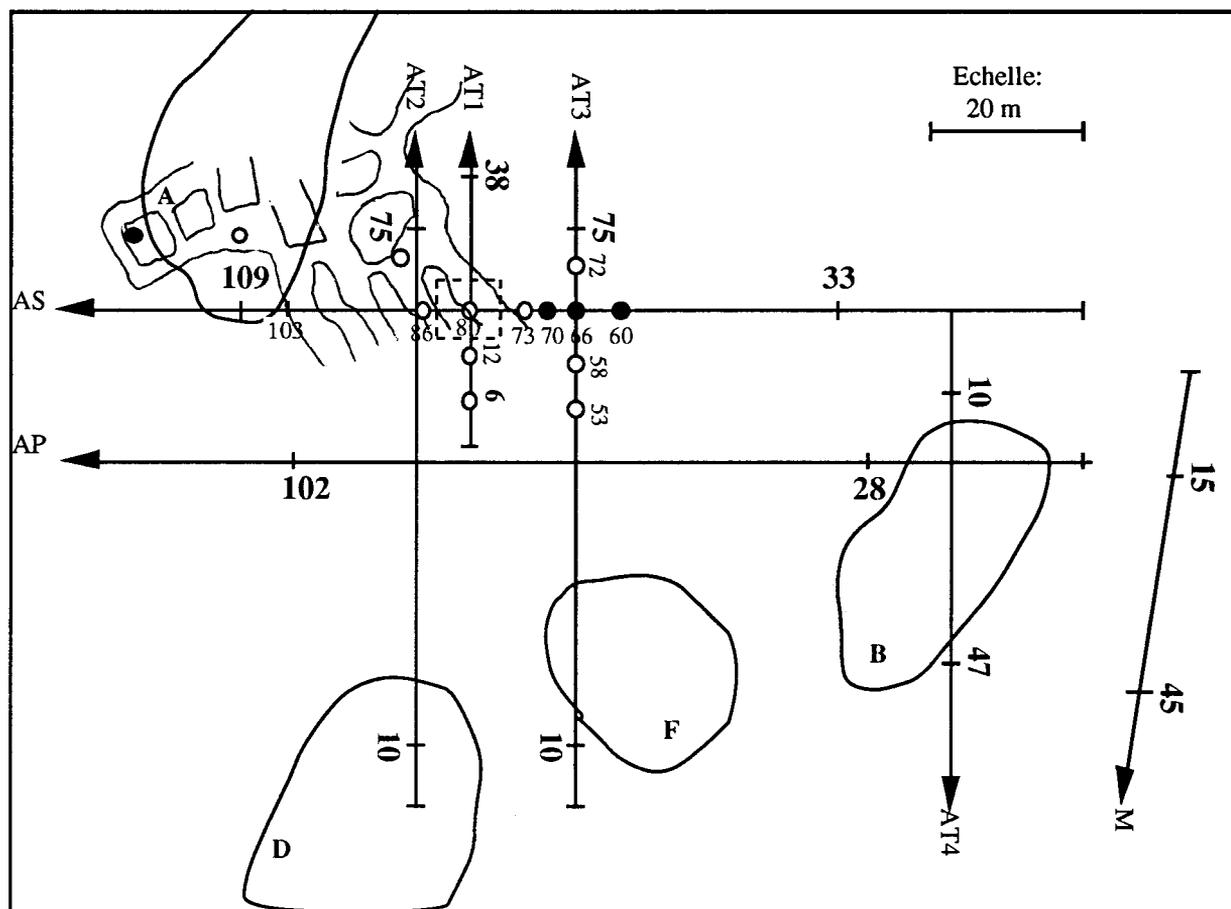
La résolution sur la profondeur est améliorée en utilisant dans le traitement un filtre passe bande de fréquences plus élevées. Etant moins faciles à interpréter, les sismogrammes résultant ne sont pas présentés. Cette profondeur est calculée grâce aux temps d'arrivée des réflexions et à la vitesse V_{nmo} retrouvée par le traitement (voir l'Annexe 3).

IV.2.4.Reconnaitances sismiques préliminaires

Le profil noté M était supposé sans cavité avant les mesures sismiques car éloigné des zones où certains affaissements avaient pu être constatés (voir figure IV.1). Ce profil a été réalisé en premier pour servir de référence aux autres profils (Figure IV.3). Nous avons appris qu'une usine se trouvait auparavant au niveau de ce profil ce qui implique la présence dans le sous sol d'anciennes fondations. Ce contexte de terrain hétérogène présente un obstacle à la propagation des ondes et provoque un affaiblissement des signaux et de la qualité des sismogrammes.

Les résultats obtenus sur ce profil sont plutôt de mauvaise qualité. On essaye toutefois de les interpréter. La première interface détectée située vers 18 mètres de profondeur pourrait être interprétée comme l'association nappe phréatique - banc de pierre notée E sur la figure IV.2. La deuxième, située vers 24 mètres de profondeur, pourrait correspondre avec l'interface tuffeau - craie blanche notée C. L'événement présent vers 27 mètres de profondeur correspondrait avec la fin de la craie blanche notée C1. Un réflecteur remarqué vers 36 mètres de profondeur n'apparaît pas sur les données de forages: il est noté C2. L'interface présente vers 45 mètres de profondeur s'apparenterait à la limite entre la craie grise et la marne notée C3.

Ce profil nous permet de caler notre méthode sur l'identification des principales réflexions malgré des conditions de surface défavorables qui illustrent les difficultés de la sismique en zone urbaine.



- Forages réalisés avant les mesures sismiques :
- sans détection de vide
 - avec détection de vide
 - Zone d'affaissements
- Ⓐ Anomalie gravimétrique
 - ✍ Plan des galeries obtenu par photographie
 - Profil sismique

Figure IV.1: Plan du terrain représentant les données photographiques, gravimétriques et de forages ainsi que les profils sismiques choisis.

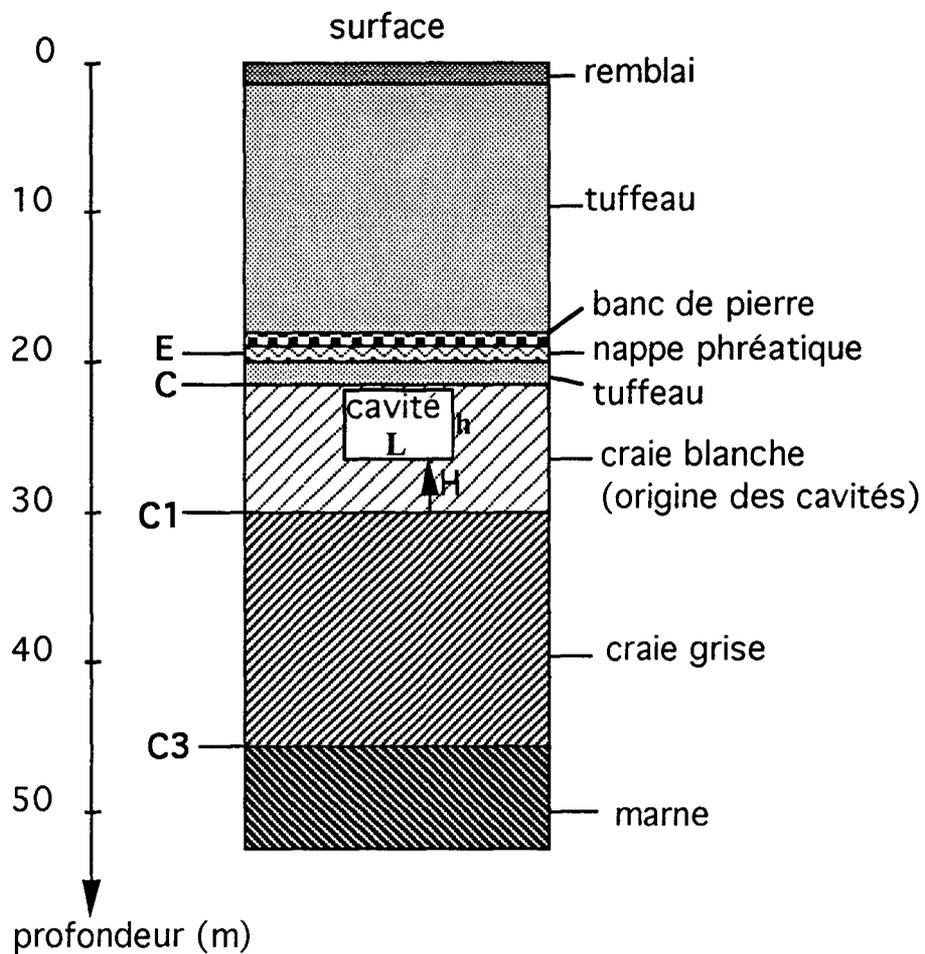


Figure IV.2 . Données de forages effectués sur le site. H est la hauteur entre C1 et le fond de la craie grise, L et h les longueur et hauteur de la cavité.

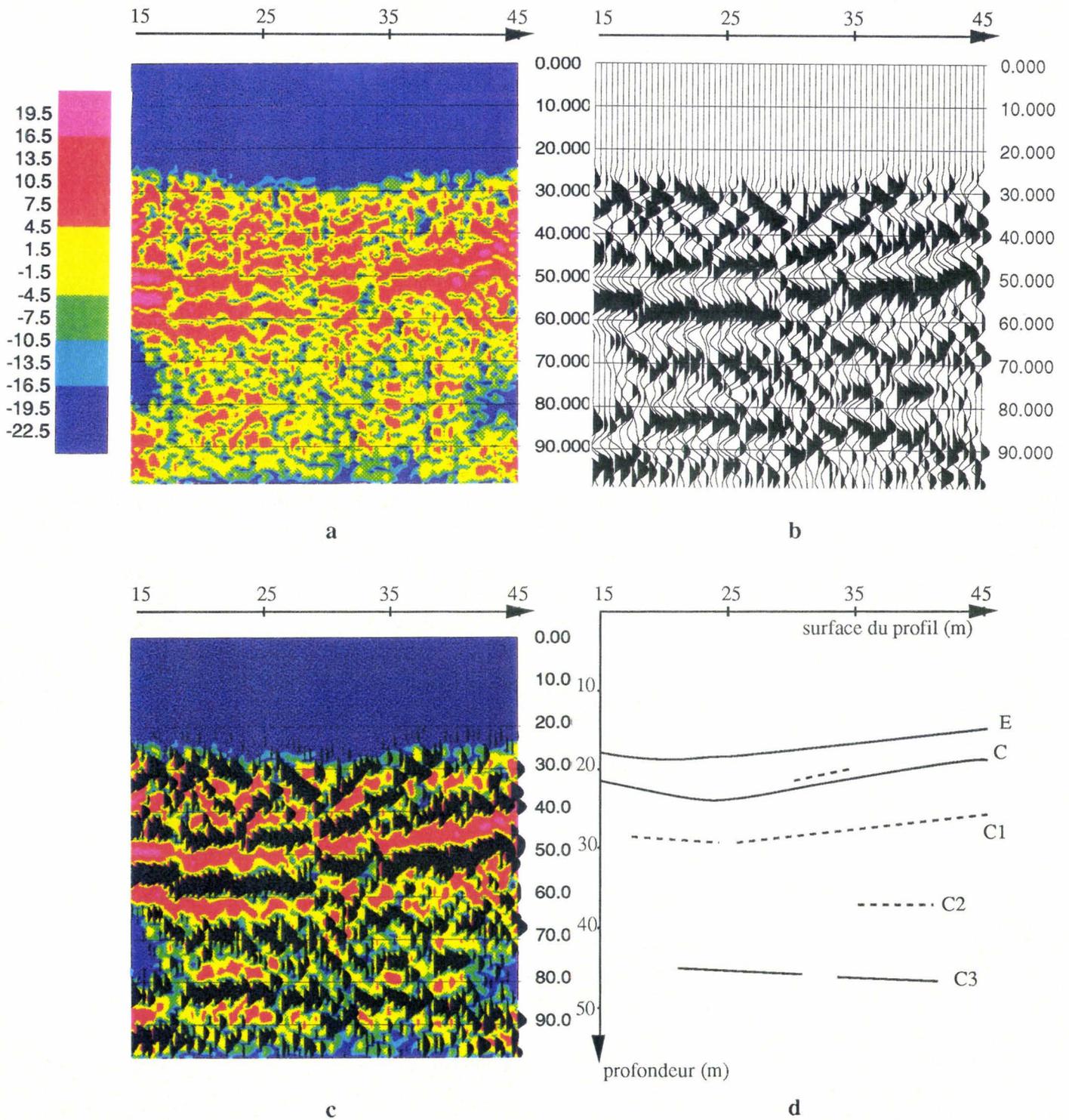


Figure IV.3: Profil M a) représentation C, b) représentation NBN, c) représentation C+NBN, d) interprétation.

IV.2.4.Choix des profils sismiques

Les profils sismiques sont choisis d'une part à proximité d'une zone d'affaissement et de cavités connues et d'autre part sur certaines parties du site où des anomalies gravimétriques ont été mesurées (Figure IV.1). Ces profils se situent tous à proximité de tombes en surface.

Une première campagne de mesures est réalisée en hiver (profils M, AS, AP, AT1) nous procurant des résultats préliminaires. Un remplissage par béton de cavité connue est ensuite effectué pour éviter certains risques d'effondrements en surface. Une deuxième campagne de mesures est menée en été (profils AT2, AT3, AT4, AS une deuxième fois). On analyse le profil AS avant et après remplissage afin de pouvoir montrer l'effet de l'injection de béton à cet endroit.

IV.3.ANALYSE DES DONNEES SISMIQUES

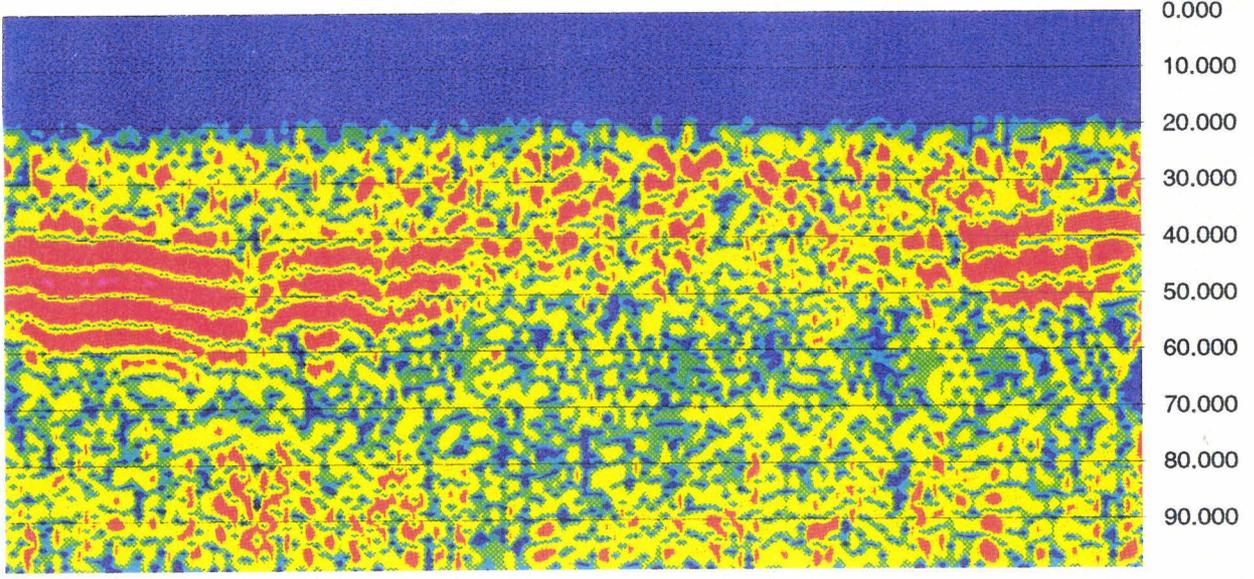
IV.3.1.Analyse des profils significatifs de l'étude

IV.3.1.1.Analyse du profil AS

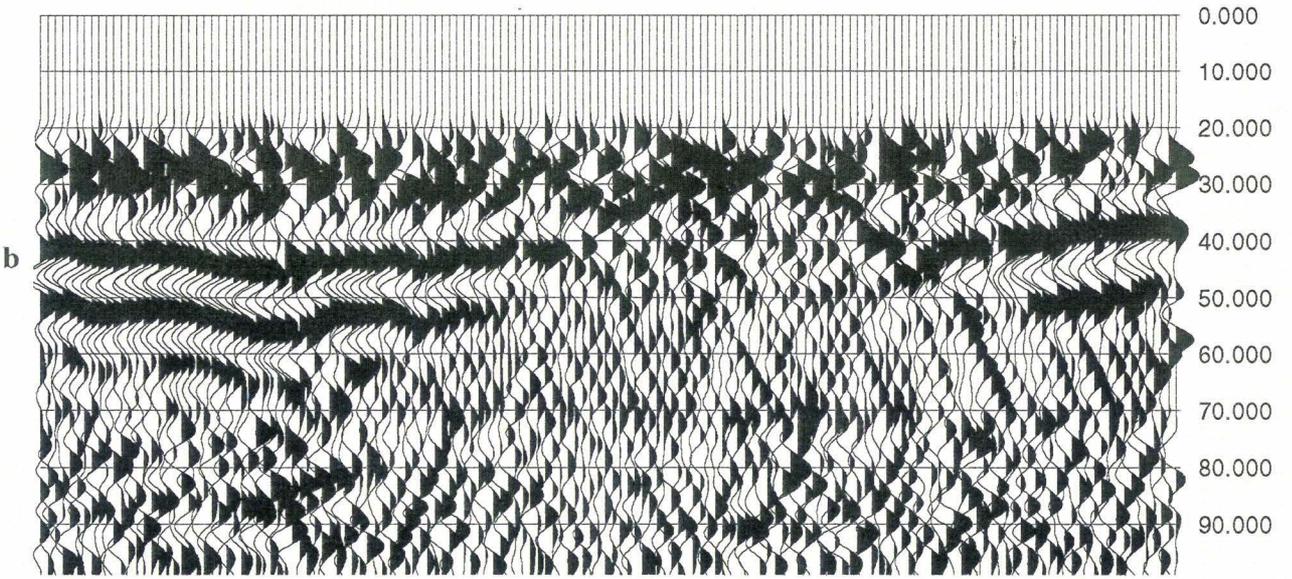
Le profil AS est situé près d'une zone d'effondrement et traverse les cavités connues. Les sismogrammes obtenus pour ce profil réalisé en hiver sont présentés avec des traitements utilisant des fenêtres optimales différentes. La première pour faciliter la visualisation du réflecteur E (offsets faibles, figure IV.4a, b, c), la seconde pour favoriser celle du réflecteur C et des plus profonds (offsets grands, figure IV.4d, e, f).

On remarque que la partie du sismogramme entre les points 33 - 53 mètres donne une bonne représentation de la structure du sous-sol connue par forage (Figure IV.2). Cette partie représente une donnée sismique de référence comparée à celle obtenue sur le profil M. Ceci est en partie dû à l'absence de remblai sur ce profil. Globalement, l'identification des réflecteurs profonds C1,C2,C3 est plus aisée que sur le profil M. Les interfaces E, C et C1 sont très marquées sur ces sismogrammes de 33 à 63 m et de 103 à 109 m (Figure IV.4g). Ceci montre qu'une présence de galerie pourrait être exclue dans cette zone, la continuité des interfaces n'étant pas altérée (Figure IV.4h). On observe une absence des interfaces C et C1 dans la zone 63 - 103 m ce qui peut être interprété comme une présence de galerie qui empêche la continuité de ces interfaces dans cette zone. L'absence de E dans la zone 69 - 90 m peut être due au dépassement de cette interface par une galerie dégradée. On peut donc estimer qu'un risque d'effondrement existe dans la zone 69 - 90 m, puisque l'interface E est proche du banc de pierre très rigide au regard du tuffeau supérieur. La présence de C et C1 à

33 43 53 63 73 83 93 103 109 →
surface du profil (m)



33 43 53 63 73 83 93 103 109 →
surface du profil (m)



33 43 53 63 73 83 93 103 109 →
surface du profil (m)

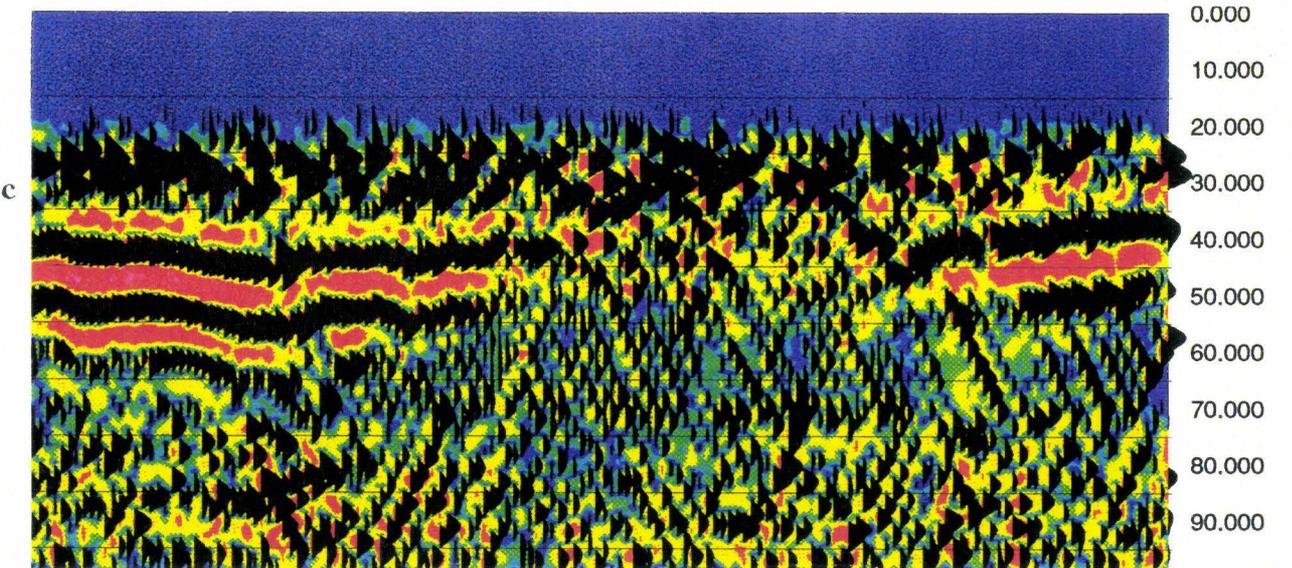


Figure IV.4

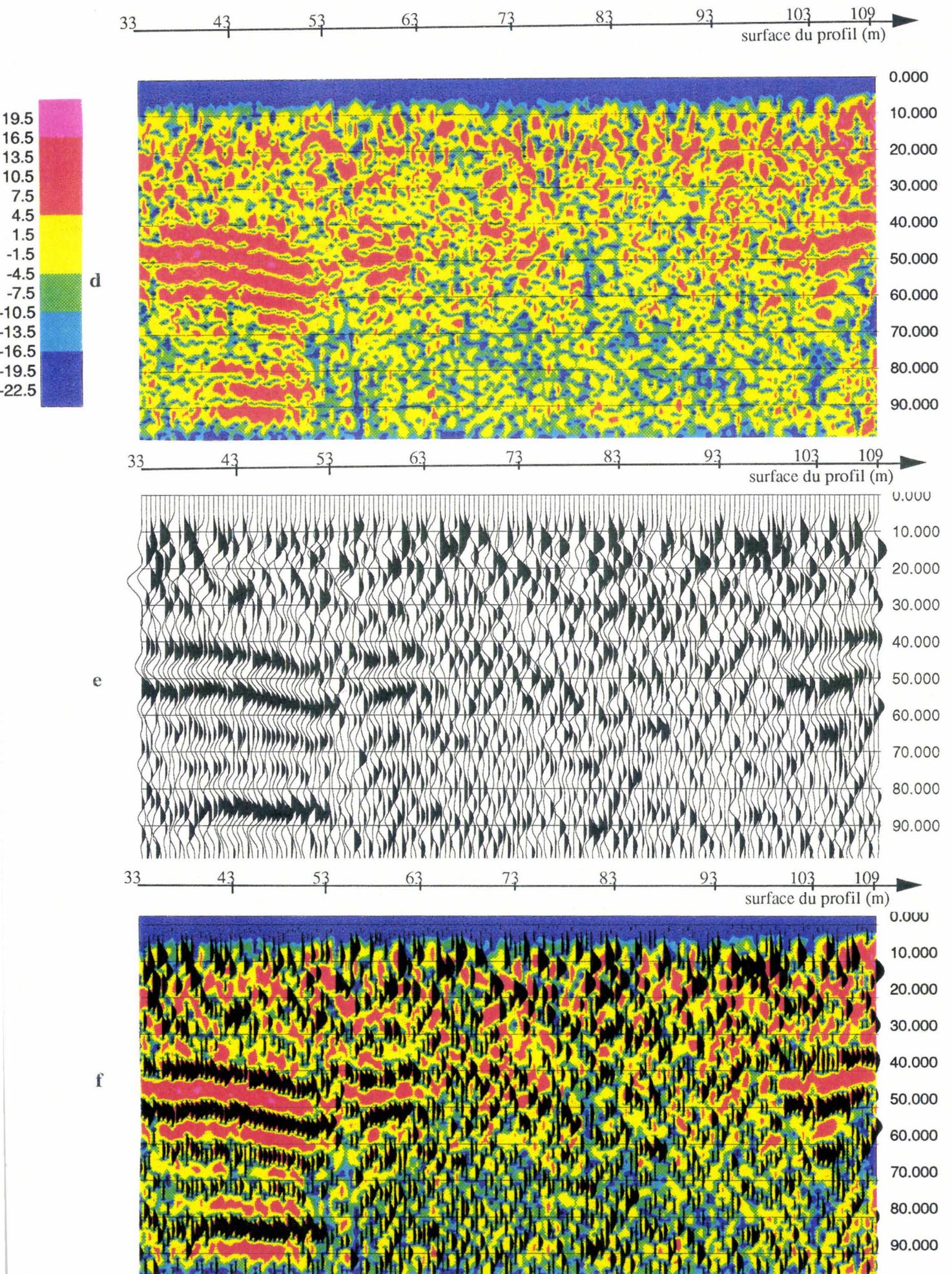


Figure IV.4

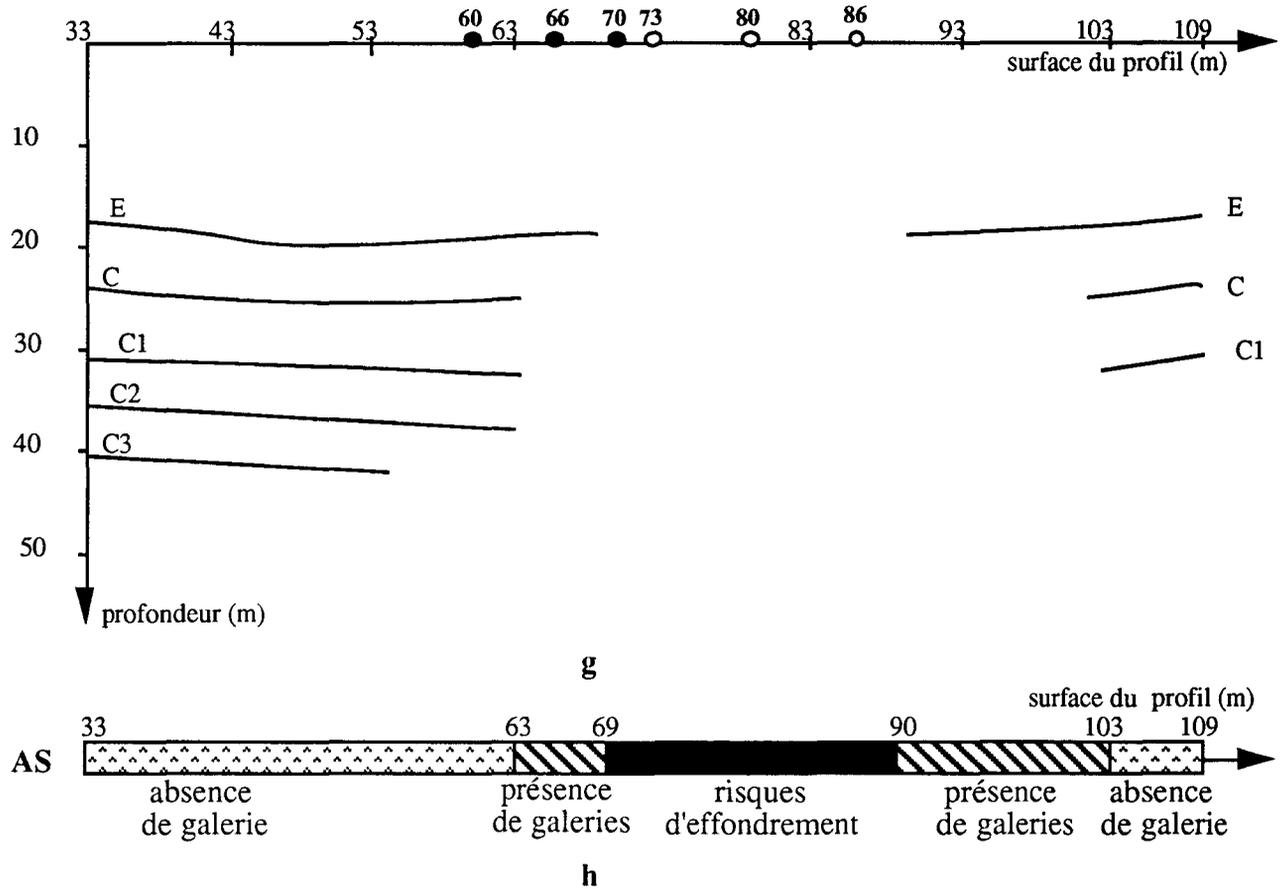


Figure IV.4: Profil AS a) représentation C, b) représentation NBN, c) représentation C+NBN, d) représentation C avec traitement destiné à faire ressortir les événements plus profonds, e) représentation NBN, f) représentation C+NBN, g) récapitulatif des observations des sismogrammes précédents, h) interprétation. La position des forages est indiquée en gras (point noir : pas de vide, point blanc présence de vide).

partir de 103 m coïncide avec la fin d'une galerie connue à cet endroit (Figure IV.1).

IV.3.1.2. Analyse du profil AP

Situé sur l'allée principale, le profil AP comporte une couche d'asphalte et du remblai en surface. Ceux-ci promettent de constituer des sources d'anomalies en ce qui concerne la propagation d'ondes et la réussite de l'exploitation de données sismiques. De plus, des canalisations et des sépultures se trouvent à proximité de ce profil, pouvant introduire des parasites dans nos données. On essaye d'interpréter les sismogrammes obtenus, malgré la qualité douteuse de ce profil (Figure IV.5).

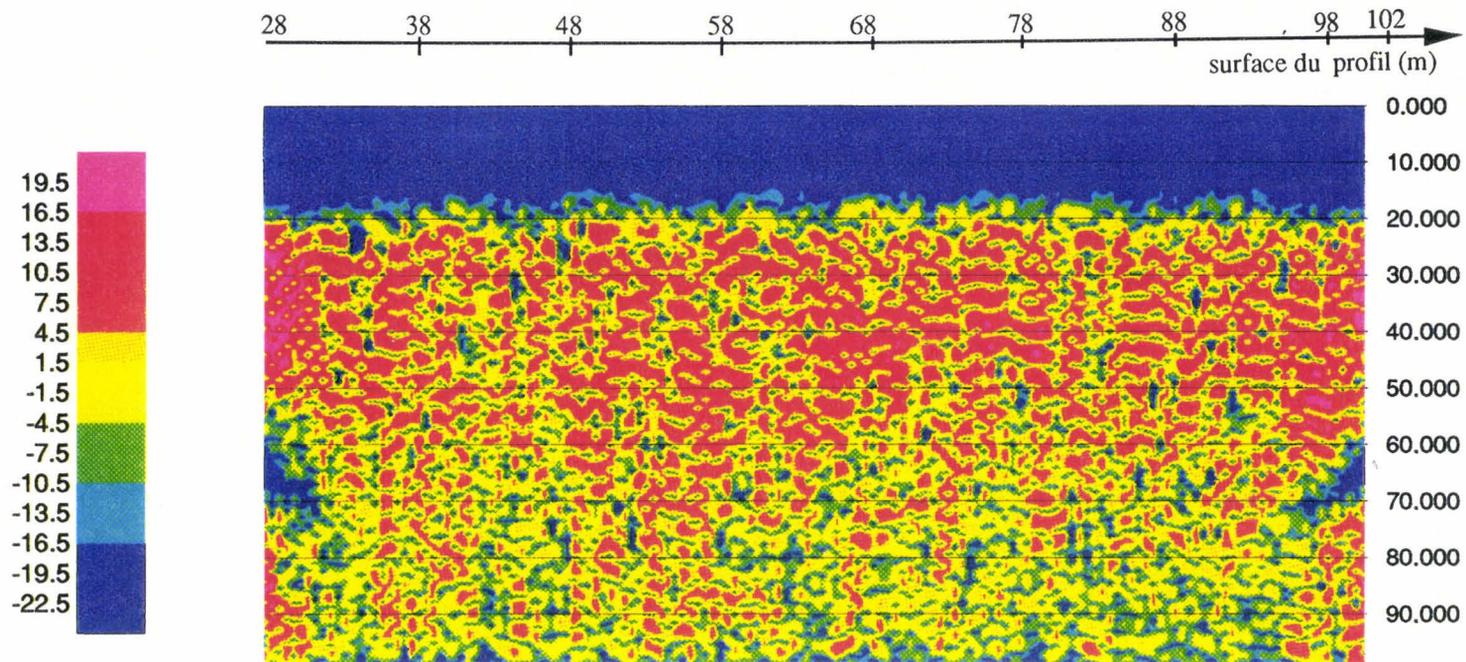
On constate la disparition des interfaces E et C entre les points 28 - 63 mètres qui pourrait être assimilée selon notre principe d'interprétation à une existence de cavité dans cette zone avec un risque d'effondrement (Figure IV.5e). On observe une réapparition de ces réflecteurs de manière assez faible dans la zone 63 - 95 m. Cela suggère une absence de galerie dans cette zone. Deux événements aux points 83 et 93 mètres sont remarqués, pouvant être dus à des présences de galeries à proximité. Seule la zone 95 - 102 m laisse apparaître une forte présence des interfaces E et C qui pourrait signifier l'absence de galerie dégradée dans cette zone. Notons que la réapparition de E et C à 95 m coïncide avec la fin du remblai. La détection des interfaces plus profondes C1, C2, C3 est pratiquement impossible, l'effet du remblai sur la propagation des ondes étant important. La difficulté d'observer E et C avant 95 mètres est-elle due à la présence de cavités ou à celle du remblai ?

Des forages effectués sur ce profil dans la zone 35 - 55 mètres après nos mesures n'ont déterminé aucune présence de vide contrairement aux points 65, 68 et 75 mètres (Ce qui coïncide avec les résultats du profil AT3 présentés dans la suite du Chapitre). Les présences de tombes à proximité ainsi que d'une couche d'asphalte sur toute la longueur du profil créent des réflexions parasites que l'on peut interpréter par erreur comme les interfaces E et C (dans la zone 63 - 95 m). En fait, ces réflexions parasites peuvent aussi masquer les réflexions de ces interfaces géologiques (cas de la zone 28 - 63 m). La mauvaise qualité des données obtenues sur ce profil caractérise les limites d'utilisation de la technique de réflexion sismique sur ce type de terrain.

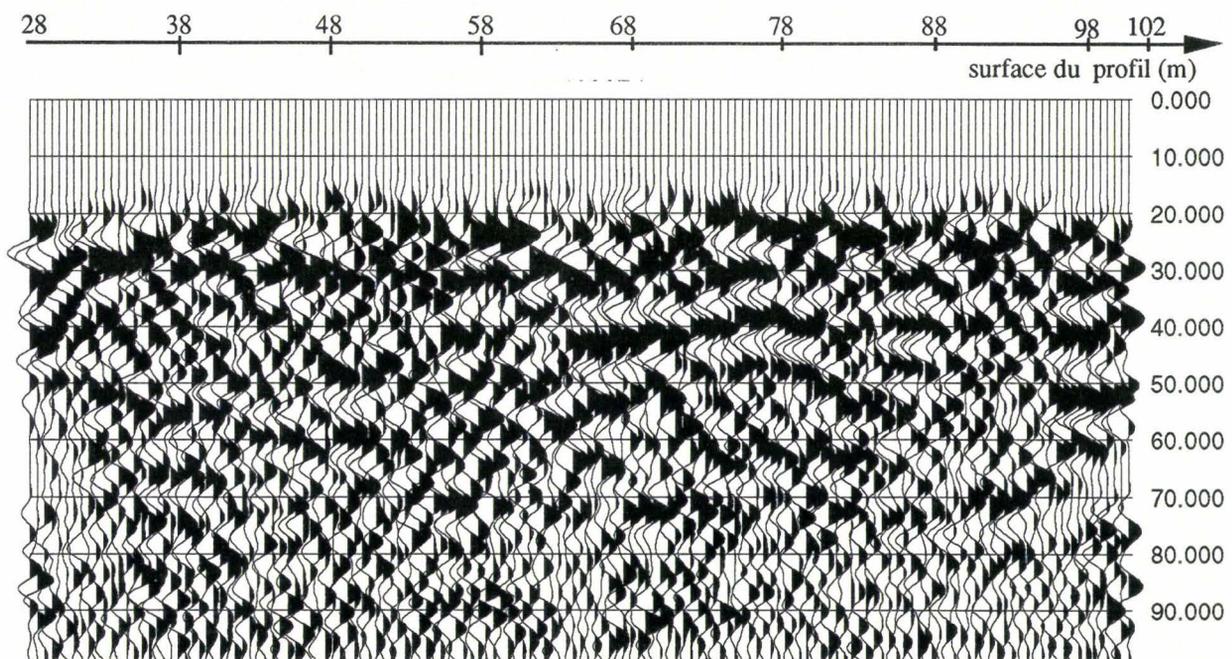
IV.3.2. Comparaison d'un profil avant et après injection de béton

La ligne sismique AS est prospectée une fois dans chacune des deux campagnes de mesures. L'objectif est d'essayer de visualiser l'effet du remplissage par béton en comparant les sismogrammes d'hiver et d'été réalisés au même endroit. On propose d'utiliser un style original de présentation permettant de favoriser la visualisation de la présence de galeries,

remplies ou non de béton. Pour cela, des rapports de niveaux d'énergie des signaux sont effectués entre les sismogrammes d'après remplissage et d'avant remplissage pour essayer de faire apparaître plus fortement ces effets d'injection de béton.

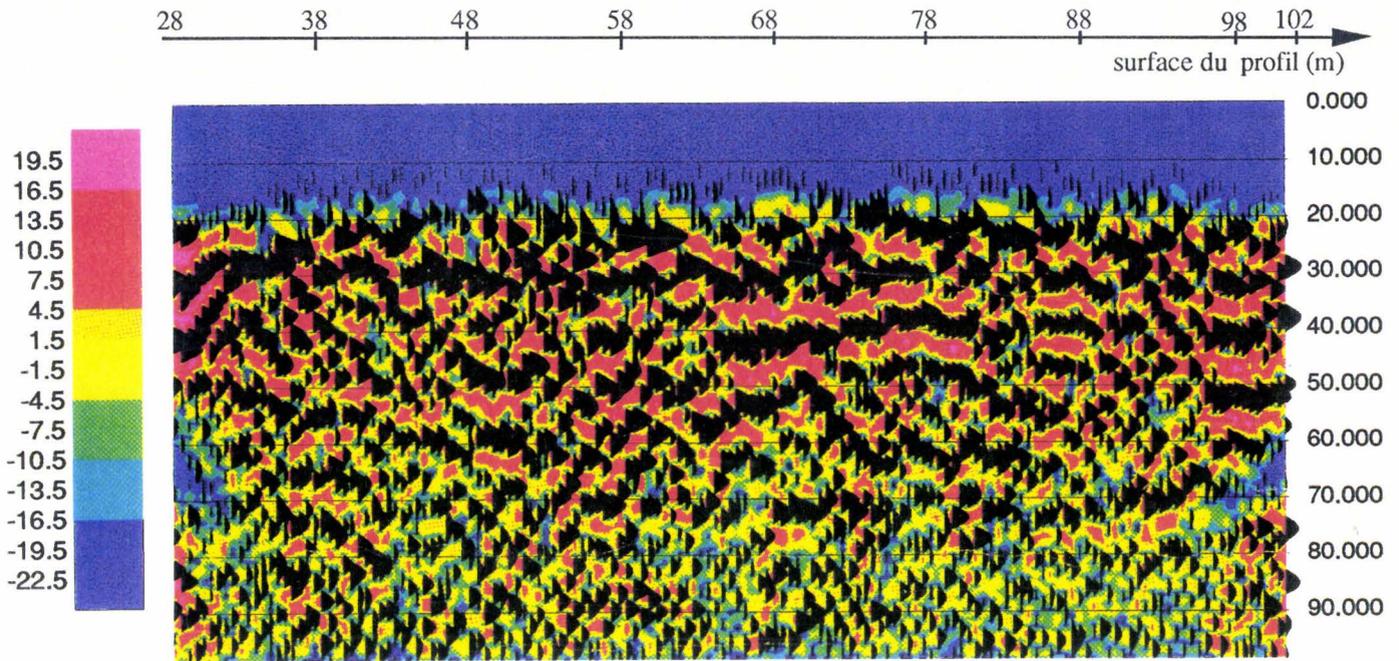


a

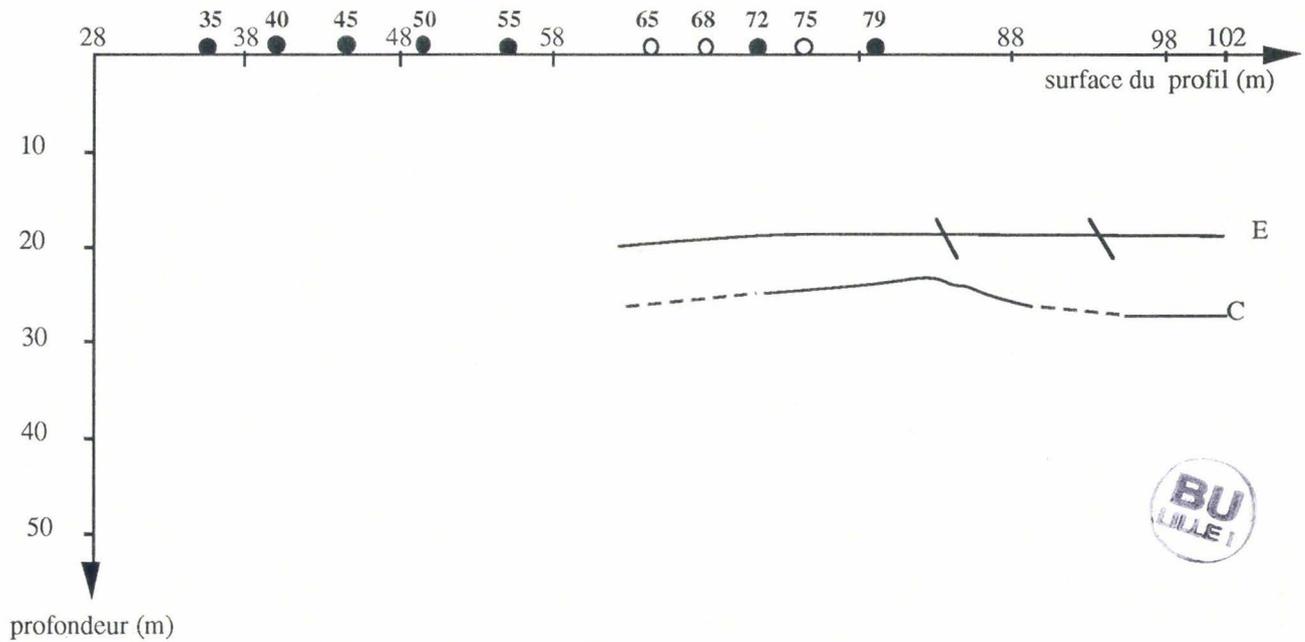


b

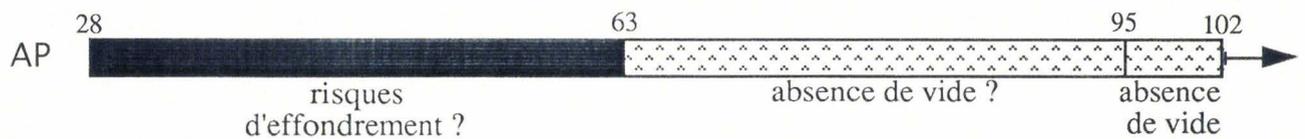
Figure IV.5



c



d



e

Figure IV.5: profil AP a) représentation C, b) représentation NBN, c) représentation C+NBN, d) récapitulatif des observations e) interprétation. La position des forages est indiquée en gras (point noir : pas de vide, point blanc présence de vide).

IV.3.2.1. Analyse du profil après injection

Comme dans le cas du sondage d'hiver, les sismogrammes de ce profil AS sont représentés sous deux versions différentes. La figure IV.6 représente le sismogramme traité pour visualiser les interfaces E et C. La figure IV.7 représente le sismogramme traité pour faire ressortir les réflexions plus profondes (C1, C2, C3).

En comparant les figures IV.4 et IV.6,7, on remarque tout d'abord une bonne correspondance entre les mesures réalisées en hiver et en été. Cela prouve la précision et la répétabilité de la technique de réflexion sismique malgré les cinq mois d'écart et les conditions climatiques différentes (20°C de différence pour la température en surface).

En comparant les figures IV.4g et IV.8a l'on constate l'apparition de faibles traces des réflecteurs C1, C2, C3 entre les points 79 - 108 mètres ce qui signifierait que l'injection de béton a permis aux ondes sismiques de se propager jusqu'à ces interfaces à cet endroit (Figure IV.8b). Par contre, entre les points 68 - 103 mètres, l'interface C n'est toujours pas détectée: la galerie remplie de béton pourrait dépasser cette interface. D'autre part, l'on note une apparition de réflexions situées légèrement sous l'interface E entre les points 68 - 90 mètres difficilement interprétable mais dû à la présence de béton dans la galerie. Les réflecteurs C1, C2, C3 ne sont toujours pas visibles entre les points 63-79 mètres.

IV.3.2.2. Analyse des rapports des niveaux d'énergie

IV.3.2.2.1. Traitement ciblant les interfaces E et C

La figure IV.9 représente le rapport des niveaux d'énergie des sismogrammes après et avant remplissage (respectivement les figures IV.6a et IV.4a). La procédure utilisée pour obtenir ce rapport est présentée en Annexe 3. Si l'on note $A_{Map}(x)$ et $A_{Mav}(x)$ les amplitudes moyennes des signaux relevés avant et après remplissage, le rapport $R(x)$ représenté suivant une échelle de couleur en dB est calculé par :

$$R(x) = 10 \log \left(\frac{A_{Map}^2(x)}{A_{Mav}^2(x)} \right)$$

Ce rapport est effectué à partir du temps 28 ms pour supprimer les rapports des signaux bruités apparaissant avant ce temps, évitant de surcharger inutilement les figures. L'échelle de couleur en dB très sensible permet d'observer la bonne répétabilité des signaux des interfaces E et C (en jaune et vert sur la figure). Le rapport laisse apparaître un défaut d'énergie (en bleu sur la figure) très visible dans la zone 1 de la figure. Cela signifie que les

signaux étaient plus forts dans cette zone avant l'injection de béton. Ce défaut pourrait être dû à la présence de béton injecté mais est assez difficile à interpréter physiquement.

Les excès d'énergie de la zone 2 de la figure sont plus visible durant la campagne d'été des réflecteurs plus profonds C1, C2, C3 (Figure IV.6). Cela peut être dû à une atténuation moins forte des signaux en cette période de l'année, le sous-sol ayant une moins forte teneur en eau. Le défaut d'énergie de la zone 3 ainsi que l'excès d'énergie de la zone 4 correspondent à des suppressions de zones de passage par l'air réalisées lors du traitement sismique et n'ont donc pas de lien avec le remplissage de béton.

IV.3.2.2.2.Traitement ciblant les interfaces plus profondes

La figure IV.10 représente le rapport des niveaux d'énergie après et avant remplissage effectué avec les sismogrammes ciblant les interfaces C1, C2, C3 (Figure IV.7a et IV.4d). Ce rapport fait apparaître comme pour le rapport précédent les corrélations des interfaces E et C. On n'observe plus le défaut d'énergie présent sur la figure IV.9 caractérisant l'effet du remplissage de béton. La corrélation (en jaune sur la figure) de l'interface C3 est bien visible dans la zone 5. Aucun phénomène lié au remplissage ne peut être observé à partir de cette figure. L'observation directe des niveaux d'énergie est dans ce cas de traitement plus pratique pour visualiser ces événements.

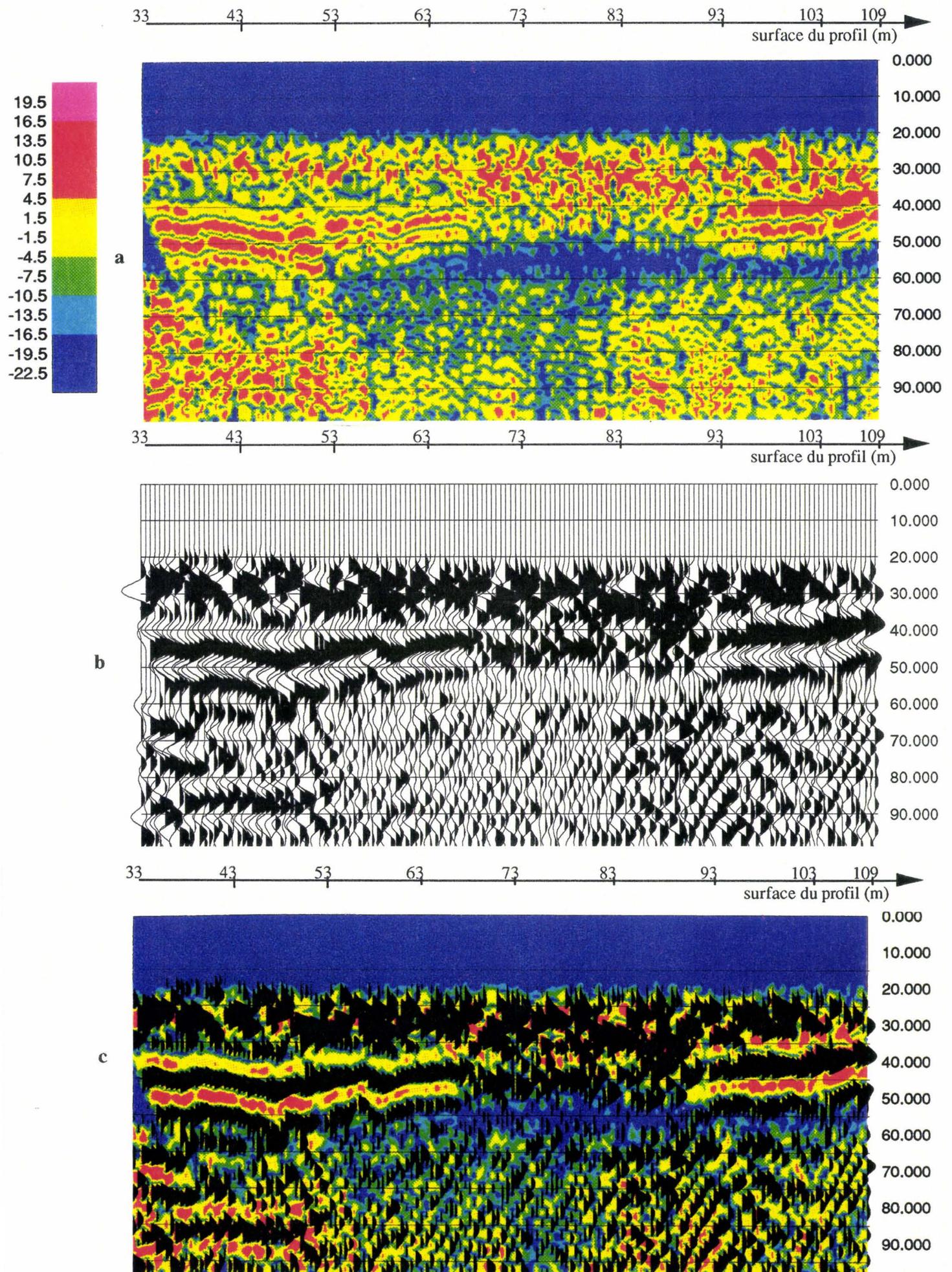


Figure IV.6: profil AS après remplissage par béton a) représentation C , b) représentation NBN, c) représentation C+NBN.

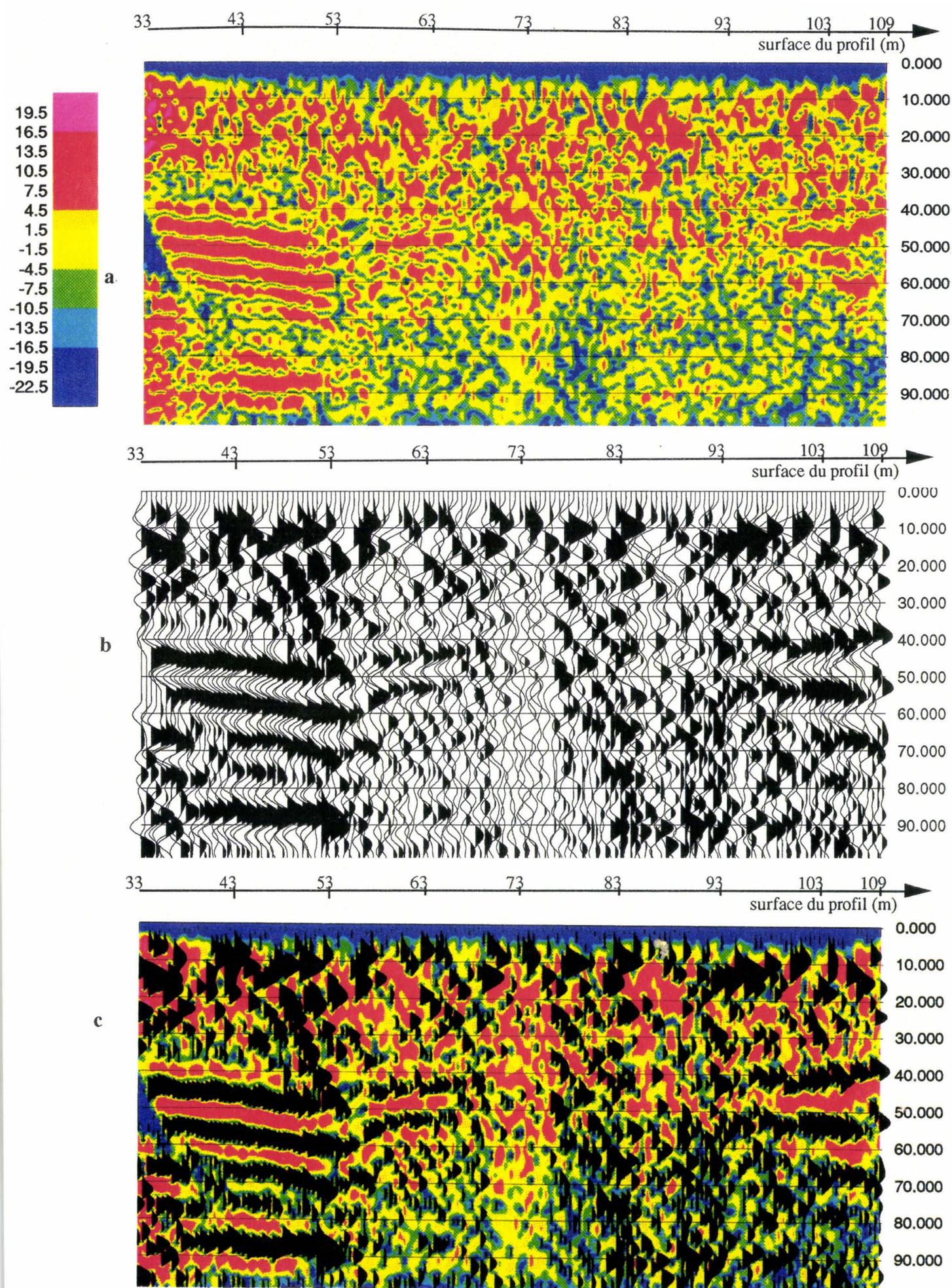


Figure IV.7: profil AS après remplissage par béton avec traitement destiné à faire ressortir les événements plus profonds a) représentation C, b) représentation NBN, c) représentation C+NBN.

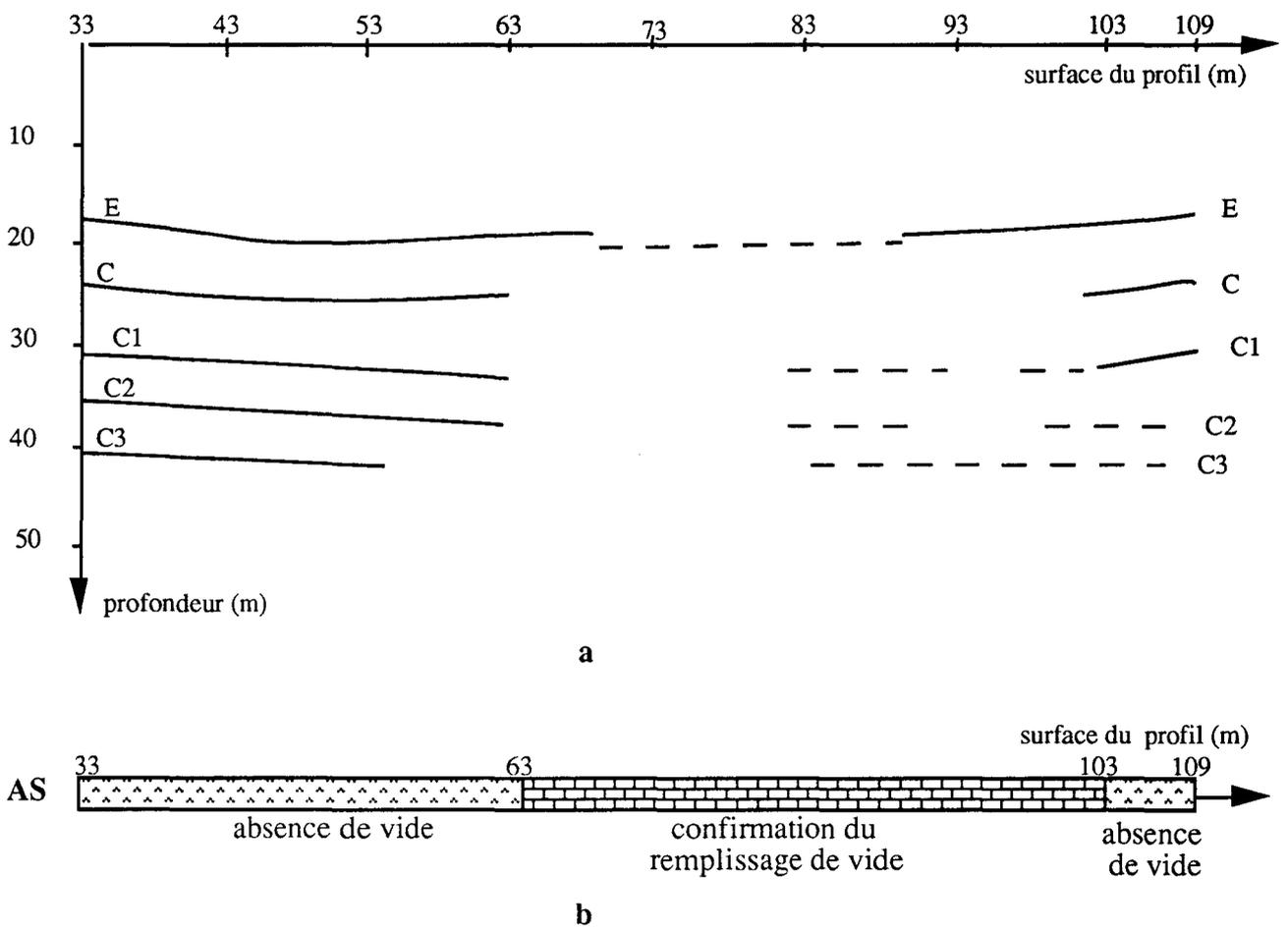


Figure IV.8 : a) Récapitulatif des observations des figures IV.6 et IV.7 du profil AS. Les événements apparus après remplissage sont présentés en pointillés. b) Interprétation.

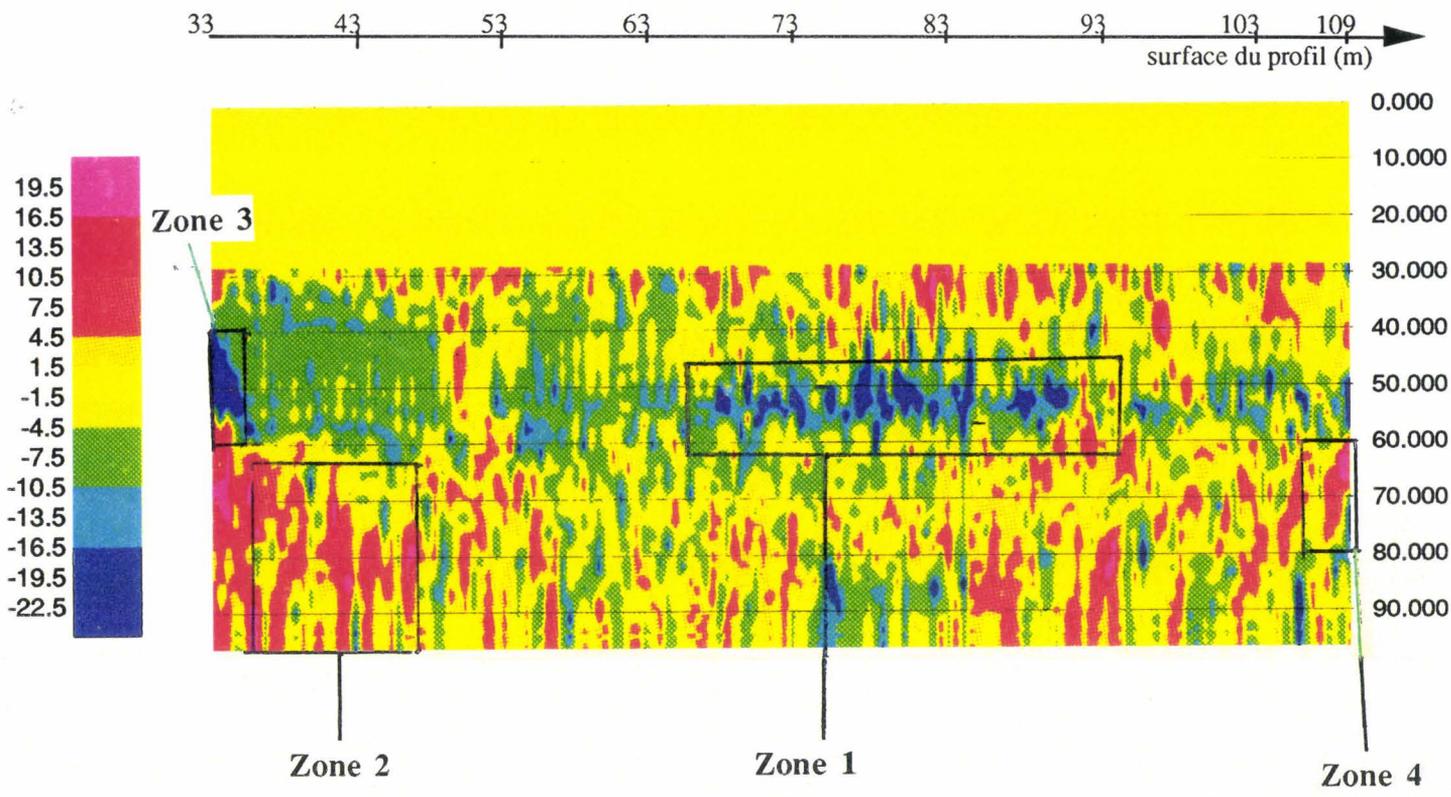


Figure IV.9. Rapport des niveaux d'énergie des figures IV.6a et IV.4a du profil AS avec utilisation d'une fenêtre temporelle de moyennage de l'énergie de 5 ms.

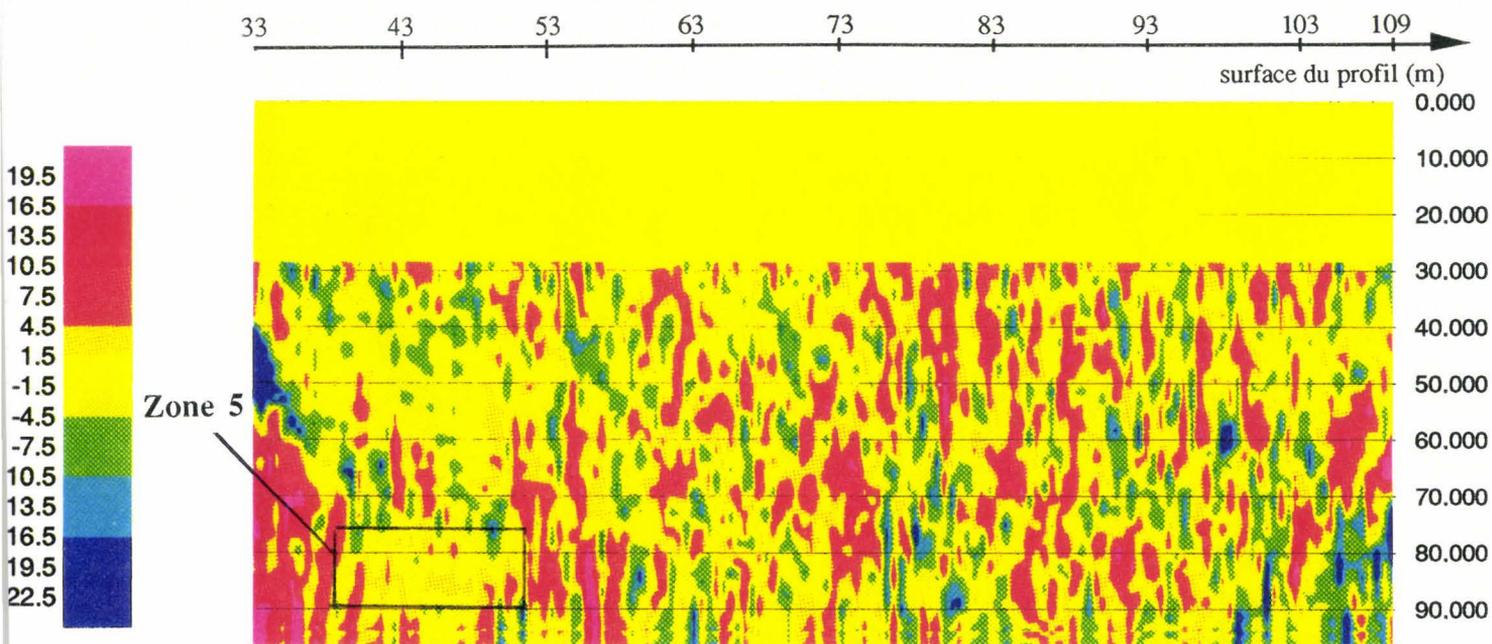


Figure IV.10. Rapport des niveaux d'énergie des figures IV.7a et IV.4d du profil AS avec utilisation d'une fenêtre temporelle de moyennage de l'énergie de 5 ms.

IV.3.3. Application des conclusions du Chapitre III pour la localisation de cavités du profil AS

La disposition des outils sismiques en surface et la longueur d'onde du sondage utilisées dans cette campagne de mesures sont comparables à celles du Chapitre III. Les cavités du profil AS ont été détectées entre autre grâce au masquage de l'interface C1. Ces conditions nécessaires à l'application des conclusions du Chapitre III permettent d'affiner la localisation de ces cavités. En remarquant que la hauteur H entre le fond des cavités et l'interface C1 (Figure IV.2) est comprise entre 0 et 4 mètres, on peut estimer sur sismogramme la distance D entre le début du masquage de C1 et le début horizontal de la galerie. On peut considérer que la hauteur h et la longueur L de la section de la cavité dans le plan du profil sont de l'ordre de 6 mètres en moyenne pour une zone de cavité dégradée (cas du profil AS). Les conclusions du paragraphe III.4.5 permettent de poser un encadrement de D :

$$(IV.1) \quad 6 \leq D \leq 10\text{m}$$

IV.3.3.1. Analyse avant l'injection de béton

On a observé sur la figure IV.4 un masquage de l'interface C1 dans la zone 63 - 103 mètres (Figure IV.11a) ce qui nous a permis d'évaluer des zones de présence de galeries (Figure IV.11b). D'après l'estimation (IV.1), cela signifierait un début de galeries au plus près à 69 mètres sur l'axe AS (63+6), au plus loin à 73 mètres (63+10, figure IV.11c). Les forages effectués sur ce profil confirment notre interprétation des données sismiques puisqu'il n'est trouvé aucun vide entre 60 et 70 mètres, contrairement aux points 73, 80 et 86 mètres (voir figure IV.1).

On a aussi observé sur la figure IV.4 une discontinuité de l'interface E entre les points 69 et 90 mètres. Il est plus difficile ici d'estimer la distance D pour l'interface E du fait de la non connaissance de la taille de la cavité ayant dépassé E. On peut seulement supposer que la hauteur h entre E et le toit de la cavité est supérieure ou égale à 0 mètres :

$$H = 0 \text{ m et } h \geq 0 \text{ m}$$

Cela veut dire que la distance D entre le début du masquage de E et le début de la galerie est supérieure ou égale à 0 mètres :

$$D \geq 0$$

On peut donc s'attendre à une présence de galerie et à un risque d'effondrement dès 69 mètres, et jusqu'à 90 mètres.

IV.3.3.2. Analyse après l'injection de béton

Le faible niveau de l'image de C1 apparue après l'injection de béton ne peut pas nous permettre d'utiliser les conseils du Chapitre III pour analyser la qualité de cette injection. L'interprétation de cette qualité se limite donc à l'analyse de la section IV.3.2.1.

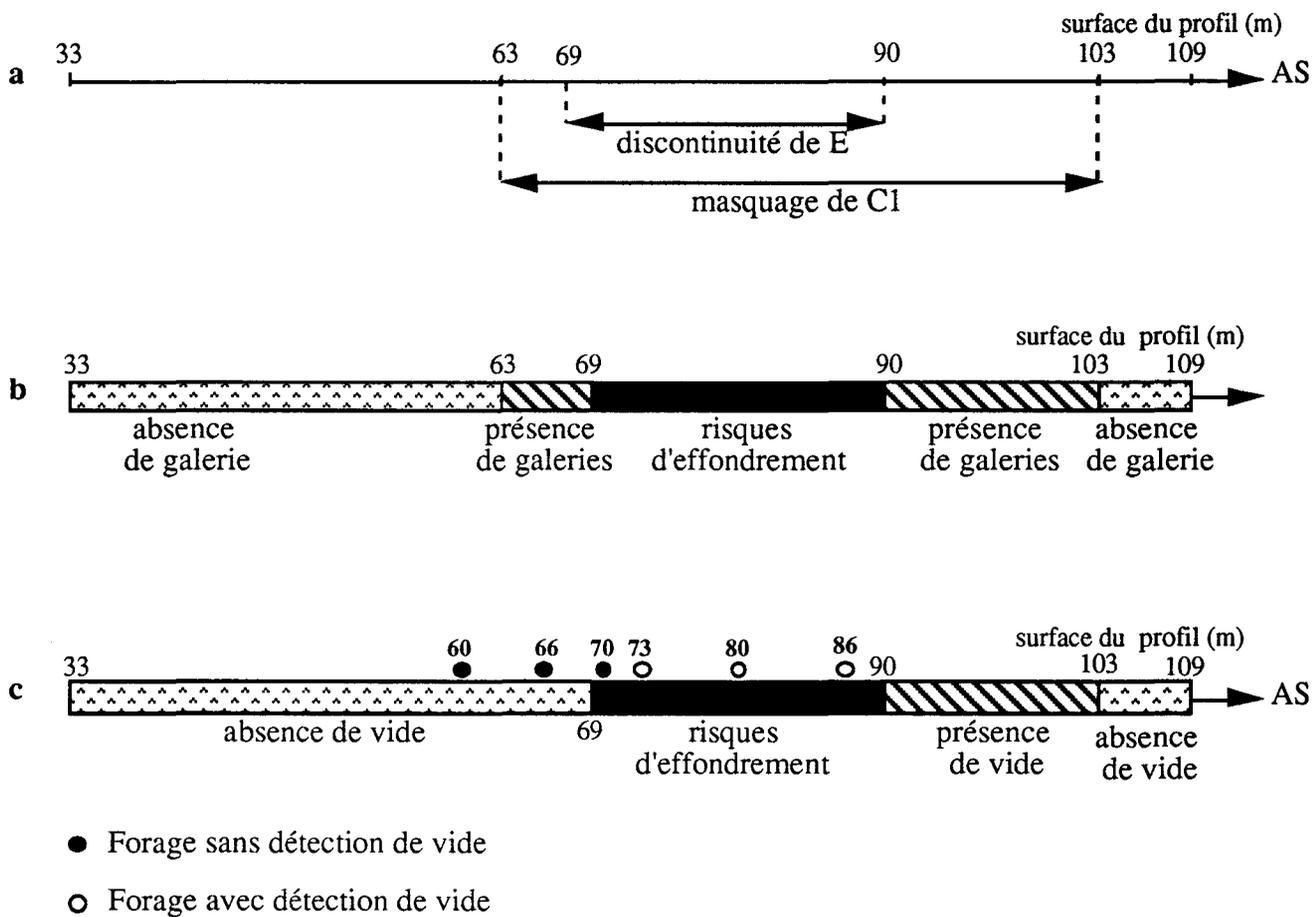


Figure IV.11 :

- a) Représentation des discontinuités de E et C1 observées sur la figure IV.4.
- b) Interprétation avant l'utilisation des conclusions du Chapitre III (Figure IV.4.h).
- c) Corrections apportées après l'utilisation des conclusions du Chapitre III.

IV.3.3.3. Comparaison des erreurs de localisation numérique et de terrain

Si l'on assimile un système d'imagerie sismique à une sonde verticale, on peut estimer qu'elle observe une surface de Fresnel S_F définie dans le Chapitre III. Le rayon de la surface de Fresnel est donné par :

$$R_F = \sqrt{\frac{\lambda \eta_c}{2}}$$

où λ est la longueur d'onde, et η_c la profondeur de la cavité.

Selon la figure IV.12 et en profitant de l'analogie acoustico - optique, on peut considérer que la résolution horizontale δ_h est comparable au rayon R_F .

Pour l'étude de terrain précédente, on peut associer ce raisonnement à la détection de cavités par disparition du réflecteur C (sans effet de masquage). Si l'on utilise comme valeurs moyennes $\eta_c = 22$ m et $\lambda = 10$ m, on a $R_F = 10,48$ m, ce qui permet d'écrire $\delta_h \cong 10$ m. Cette valeur est comparable à l'erreur de localisation donnée pour l'interface C après l'utilisation des conseils du Chapitre III: cette interface invisible à partir de 63 m (comme C1) serait interrompue physiquement 6 à 10 mètres plus loin ($6 < D < 10$ m). Ce résultat confirme que l'hypothèse $S_F \cong R_F$ est réaliste. Elle doit cependant être utilisée avec réserve : remarquons que la fin des cavités au point 103 m a été localisée sans erreur.

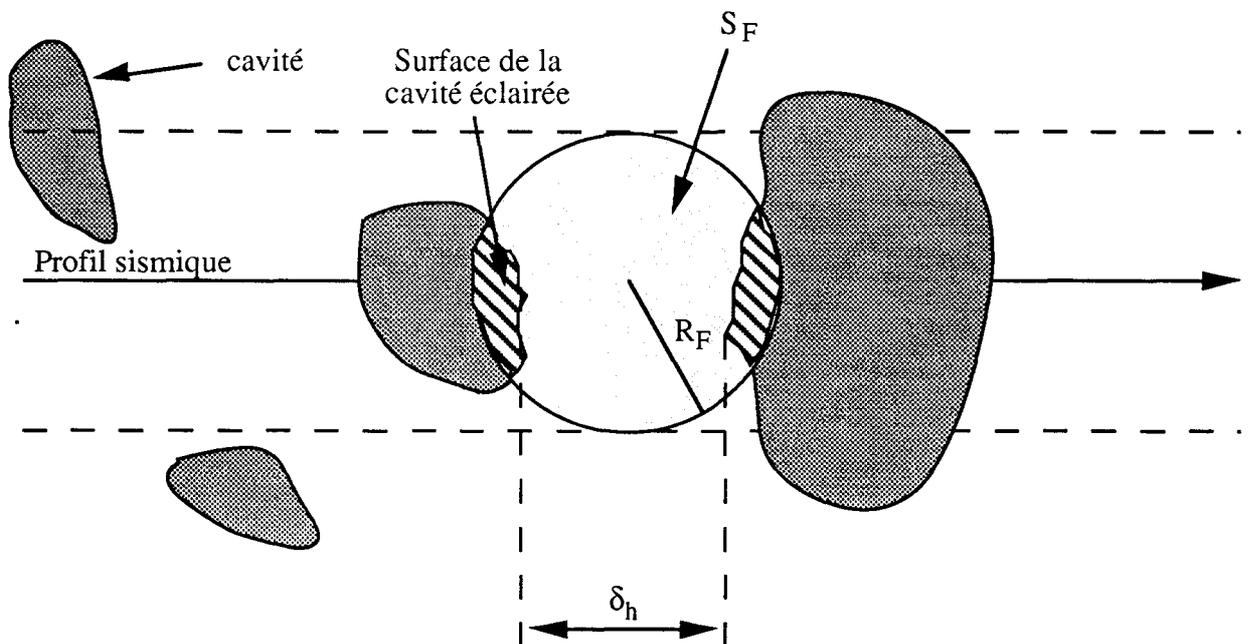


Figure IV.12 : Représentation de la surface de Fresnel S_F dans une coupe horizontale.

IV.3.4.Résultats de l'ensemble des profils réalisés

IV.3.4.1.Carte récapitulative

Les quatre profils AT1,2,3,4 dont l'analyse n'est pas présentée dans ce chapitre sont de qualités intermédiaires au regard de celles des profils AS et AP. Cela est dû en grande partie à la plus faible influence du remblai à ces endroits.

Les évaluations de risques d'effondrements et de présence de vide sont récapitulées sur le plan de la figure IV.13. Le *risque d'effondrement* est associé à l'atteinte de la nappe phréatique E par la cavité, la *présence de vide* au masquage de l'interface C1 et / ou de la perturbation de C, l'*absence de vide* à la continuité des interfaces C1 et C. La *possibilité de présence de vide* est associée au mauvais rapport signal / bruit de nos mesures. La *confirmation de remplissage* est liée à l'apparition de phénomènes nouveaux après l'injection de béton.

IV.3.4.2.Comparaison avec la méthode gravimétrique

En comparaison avec les résultats gravimétriques, l'anomalie gravimétrique F ne correspond pas, selon nos résultats, à une présence de galerie sur 75 % de l'intersection avec notre profil AT3. De même, les zones d'anomalies B et D ne comportent pas de cavité le long de nos profils AT4 et AT2. Par ailleurs, les risques d'effondrements que nous précisons ne sont pas détectés comme anomalie par la méthode gravimétrique. Il serait intéressant de dresser d'autres profils traversant les zones A, B, D et F de la figure IV.13 pour posséder d'autres éléments de discussion.

Cependant, on peut se demander si la méthode gravimétrique est exploitable sur ce site. Son utilisation pourrait être gênée par l'importance des remblais et par le nombre des sépultures. Cela montre qu'il est intéressant d'utiliser plusieurs méthodes en géophysique sur ce site pour utiliser leur complémentarité.

IV.4.DISCUSSION SUR LA PRESENTATION DES SISMOGRAMMES

La détection d'objets de type cavité par la réflexion sismique haute résolution nécessite une nouvelle approche de la représentation des sismogrammes. Ces derniers doivent procurer des renseignements concernant la structure du sous-sol ainsi que des nuances entre les différents signaux.

La présentation des niveaux d'amplitude des traces sismiques sur fond de couleur est peu courante dans la littérature au regard de la large utilisation des présentations classiques en noir et blanc. Dans quelle mesure apporte-t-elle des renseignements supplémentaires à ces présentations classiques et est-elle adaptée à la visualisation des symptômes de présence de cavités ? L'étude sur le terrain dont nous venons d'analyser les résultats permet une discussion à ce sujet.

Nous pouvons récapituler la qualité et l'utilité des informations des sismogrammes sous forme de tableau (Tableau IV.1). La qualité globale du sismogramme, la facilité à tirer des informations et à visualiser les effets des cavités des traces en noir et blanc ou des niveaux d'amplitude en couleur sont notées de 0 à 5.

On remarque que les traces en noir et blanc donnent plus de facilité à analyser globalement des données pour tous les profils. Lorsque les données sont de mauvaise qualité (<3) il est pratiquement impossible de tirer des informations des niveaux d'amplitude en couleur. Cependant, lorsque les données sont de très mauvaise qualité, les utilisations des sismogrammes en noir et blanc peuvent mener à des erreurs d'interprétation (cas du profil AP). La représentation en couleur permet de visualiser plus facilement qu'en noir et blanc les effets de la présence de cavités lorsque la qualité globale du sismogramme est bonne (>3) en donnant moins de renseignements sur le reste des événements. Si la qualité du sismogramme est moyenne (=3), les deux types de présentation permettent une analyse des données avec toutefois une facilité légèrement supérieure pour la représentation en noir et blanc. Les constatations précédentes sont amplifiées lorsque l'on regarde les rapports des niveaux d'amplitude. Le rapport de deux sismogrammes de bonne qualité permet de visualiser facilement l'effet du remplissage d'une cavité alors que le rapport de deux sismogrammes de qualité inférieure rend impossible de le visualiser. Tout en étant significatif de la qualité du sismogramme, le rapport "principaux événements/bruit" permet de remarquer l'effet dégradant des sépultures sur les réflexions d'ondes. Cet effet est moins important sur le profil AS plus éloigné de ces sépultures que les autres .

La présentation de sismogrammes sous forme de niveaux d'amplitude peut procurer des renseignements supplémentaires à l'analyse de sismogrammes noir et blanc composé de traces sismiques . Elle permet de présenter les résultats de manière originale en utilisant une échelle de couleur en dB. A condition de disposer de données de bonne qualité et d'appliquer des traitements adéquats, on peut grâce à ce type de présentation faire ressortir les effets des cavités. Les rapports de ces niveaux d'amplitude peuvent constituer un moyen peu banal de présentation mais nécessitent des données d'encore meilleure qualité. Les niveaux d'amplitude sont utilisables dans un domaine de qualité plus restreint que celui des traces sismiques en noir et blanc classiques.

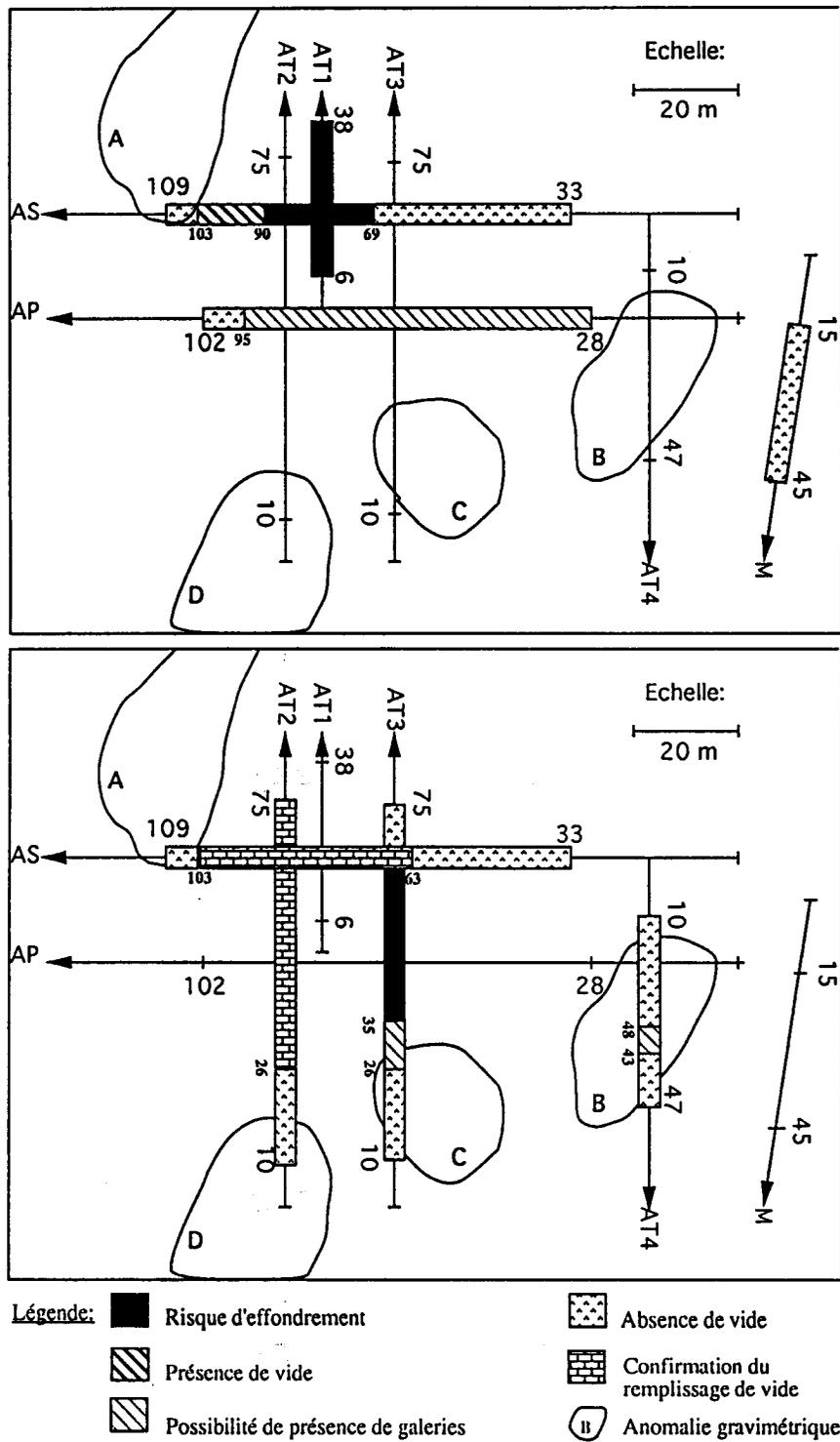


Figure IV.13. Représentation du risque d'effondrement et de la présence de cavité pour les campagnes de mesures a) avant les injections de béton, b) après les injections de béton.

Critères:	Qualité globale du profil (rapport signal/bruit)	Facilité d'analyser les traces en noir et blanc	Facilité d'analyser les traces en couleur	Facilité à visualiser les cavités en noir et blanc	Facilité à visualiser les cavités en couleur
Profils:					
M	3	3	2	4	4
AS hiver	4	4	3	4	5
AT2	1	1	0	2	0
AT1	3	3	3	4	4
AT3	2	2	1	3	1
AP	1	2	0	0	0
AT4	3	3	2	4	3
AS été	4	4	3	4	5
Rapport 1	2		2		5
Rapport 2	1		1		0

Tableau IV.1: Qualités des sismogrammes pour l'interprétation physique du sous sol (notées de 0 à 5).

IV.5.CONCLUSION

Dans ce Chapitre, la technique de réflexion sismique haute résolution a été appliquée en zone urbaine. L'étude a permis de délimiter certaines zones de présence de cavités et de risques d'effondrement.

La détection des cavités s'est faite par observation des perturbations de l'interface placée au dessus des cavités et par masquage du réflecteur plus profond. Cette dernière observation confirme des constatations de terrain antérieures et les prévisions fondées sur les conclusions du Chapitre III. L'application de ces conclusions à l'étude sismique a permis d'affiner la localisation des vides (Moreaux et al, 1995). La réflexion sismique a procuré un apport considérable au regard des données gravimétriques qui n'étaient pas exploitables sur ce site.

La représentation couleur des niveaux d'amplitude sur sismogrammes a été proposée comme aide à la localisation des cavités. Ce type de représentation est conseillé comme complémentaire aux représentations classiques en noir et blanc pour la détection de cavité lorsque les données sont de bonne qualité.

La possibilité de vérification par réflexion sismique du remplissage par béton a été étudiée en comparant des profils avant et après remplissage. Cette expérience a montré qu'il était plutôt difficile de réaliser cette vérification tellement les signaux apparus après remplissage étaient faibles. L'étude a permis de préciser les limites d'investigation de la méthode sismique sur ce type de site, qui sont essentiellement fixées par l'hétérogénéité du sous-sol au voisinage des profils. La répétabilité des mesures obtenues à différentes saisons sur un même profil a été satisfaisante ce qui confirme la fiabilité de la sismique haute résolution.

CONCLUSION GENERALE

Rappel de l'objectif du travail

Ce travail a été réalisé dans le but de développer des outils numériques et d'utiliser ces outils pour améliorer l'interprétation des mesures de terrain provenant de la Réflexion Sismique Haute Résolution.

Les principales difficultés de modélisation résidaient en la maîtrise des phénomènes de dispersion numérique des ondes sismiques hautes fréquences et en la prise en compte de l'amortissement matériel du sol.

Développement d'outils

L'analyse de la dispersion numérique a été menée en observant l'évolution de la vitesse de phase des ondes. Cette analyse procure des conseils sur les choix de la combinaison des matrices de masse et des discrétisations géométrique et temporelle. Elle permet de rendre compte correctement de la vitesse de propagation des ondes et de procurer une meilleure visualisation des événements réfléchis. Une combinaison des matrices de masse consistante et concentrée est conseillée pour un pas de temps normalisé p inférieur à 0,7. Au delà de cette valeur, l'utilisation d'une matrice de masse consistante donne une meilleure précision.

La prise en compte de l'amortissement matériel a été réalisée en reliant les paramètres géophysiques d'amortissement aux paramètres introduits dans la modélisation par éléments finis (amortissement de type Rayleigh). La détermination des coefficients de Rayleigh a été étudiée pour cibler une fréquence donnée. Cette prise en compte apparaît indispensable sur les sismogrammes synthétiques pour une meilleure visualisation des ondes de compression réfléchies, ondes qu'on utilise par la suite pour la détection de cavités.

Les deux considérations précédentes permettent aux données résultant des simulations numériques de s'approcher de celles obtenues sur le terrain. Elles autorisent en outre des simulations de campagnes de mesures utilisant la Réflexion Sismique Haute Résolution telles qu'elles sont pratiquées sur le terrain.

Simulation de localisation de cavités souterraines

Des campagnes de mesures ont été simulées pour observer les effets dus à la présence de cavités dans le sous-sol. Il a été montré que l'effet prépondérant était le masquage de l'interface située immédiatement sous la cavité. Cela confirme les observations de terrain.

Une étude paramétrique sur la profondeur de la cavité a été menée. Elle a permis de mettre en évidence les possibilités d'erreurs de localisation de cette cavité, erreurs causées par l'effet d'ombre que joue la cavité sur l'image du réflecteur plus profond, entraînant des erreurs de parallaxe à travers les couches.

Les études ont montré que des paramètres essentiels dans l'évaluation des erreurs de localisation étaient les dimensions de la cavité et la hauteur entre le fond de la cavité et l'interface masquée. Des conseils ont été prodigués concernant l'interprétation de sismogrammes de terrain où apparaissent des masquages de réflecteurs. Ainsi, certaines recommandations sur la localisation de vides in-situ ont été données suivant le degré de connaissance de la forme, de la taille et de la profondeur de la cavité pour une disposition des outils sismiques et une fréquence dominante de source fixées.

L'étude a également permis de donner un encadrement de la limite de détection (pour les simulations numériques) d'une cavité carrée de côté L en fonction de la longueur d'onde λ . Cette limite se caractérise par l'inégalité $0,1 \lambda < L < 0,3 \lambda$.

Application à une campagne de mesures in-situ

Les conclusions du Chapitre III ont été appliqués à des données de terrain. Cette application a permis de préciser la localisation des cavités sur les profils sismiques sondés et de réaliser un plan de présence des cavités et des risques d'effondrement en surface.

La campagne de mesures a mis en évidence les limites de la réflexion sismique haute résolution en zone urbaine. Elle a également confirmé sa répétabilité, donc sa fiabilité. L'étude a permis de tester la réflexion sismique comme moyen de vérification de remplissage de cavité par injection de béton.

Perspectives

Les résultats encourageants de l'outil numérique présenté dans cette thèse pour la simulation de propagation d'ondes sismiques nous incite à poursuivre ces travaux. C'est dans ce sens que les prochaines études pourraient se porter sur des simulations de la présence de cavité remplie de béton, ce qui pourrait apporter certaines précisions concernant la vérification de la qualité d'une injection de ce béton. Il serait intéressant d'étudier l'influence de matériaux pouvant se trouver dans une cavité (de l'eau par exemple).

De même, on pourrait réaliser des études sur divers types de terrains, de formes de cavités (failles, voûtes), ou d'introduire dans nos simulations du bruit aléatoire (bruit blanc).

On pourrait également simuler l'utilisation de différentes géométries d'acquisition ou se pencher plus précisément sur l'analyse de la résolution en terme d'imagerie en simulant la présence de plusieurs cavités. Des simulations en trois dimensions représenteraient une continuité logique de ces travaux.

ANNEXE 1

RESOLUTION DU PROBLEME DE LA PROPAGATION D'ONDES SISMIQUES PAR LA METHODE DE ELEMENTS FINIS

Introduction

A1.I. PRESENTATION DU PROBLEME

A1.II. FORMULATION DU PROBLEME

A1.III. PROBLEME DISCRETISE

A1.IV. CHOIX DE LA SOURCE POUR LES SIMULATIONS

A1.IV.1. Critères de sélection

A1.IV.2. Type de source retenu

A1.V. CHOIX DES DISCRETISATIONS

A1.V.1. Discrétisation géométrique

A1.V.2. Discrétisation temporelle

Introduction

Dans l'introduction générale, le principe de la technique de réflexion sismique haute résolution a été présenté. L'intérêt de développer des outils numériques a été soulevé pour surmonter les problèmes rencontrés dans l'utilisation de cette méthode.

Dans cette Annexe, on propose de résoudre le problème mécanique direct posé par la propagation d'ondes dans le sol par la méthode des éléments finis. On présente successivement la formulation de ce problème, le conseil d'une fonction source, ainsi que les choix des discrétisations géométrique et temporelle.

A1.I.PRESENTATION DU PROBLEME

Le problème direct consiste à modéliser la propagation d'ondes sismiques dans un domaine semi infini possédant une surface libre, comme c'est le cas sur le terrain. Ce domaine peut éventuellement être composé de plusieurs matériaux. Il est excité sur sa surface par une force ponctuelle représentant la source.

On peut s'affranchir du caractère semi infini du domaine en disposant les frontières de ce dernier assez loin de la source pour ne pas être gêné par les réflexions sur ses bords. L'inconnue du problème est le champ de déplacement, déterminable en tout point du domaine Ω , à tout instant t . On considère que Ω de frontière Γ est soumis aux sollicitations dynamiques (Figure A1.1) :

$$(A1.1) \quad \begin{array}{ll} \text{de forces de surface} & T(x, t) = T_{\text{lim}} \text{ sur } \Gamma_T \\ \text{des déplacements imposés} & U(x, t) = U_{\text{lim}} \text{ sur } \Gamma_U \end{array}$$

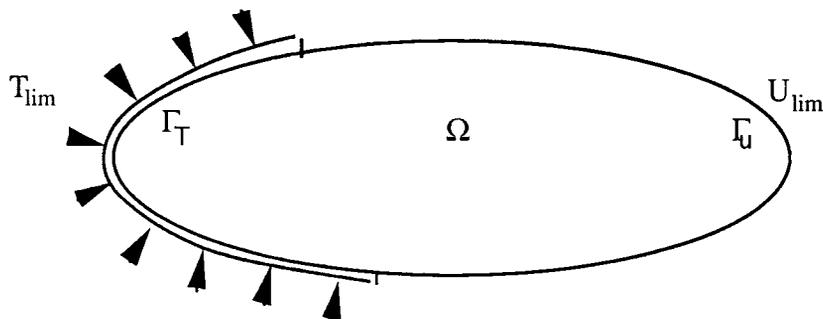


Figure A1.1: Domaine Ω et ses frontières Γ_U et Γ_T .

A1.II.FORMULATION DU PROBLEME

La formulation variationnelle du problème est obtenue par application du principe des travaux virtuels. Pour un champ de déplacements virtuels cinématiquement admissible δu , l'équation d'équilibre peut s'écrire (Zienkiewicz, 77) :

$$(A1.2) \quad \int_{\Gamma_r} \delta u T d\Gamma - \int_{\Omega} \varepsilon(\delta u) \sigma d\Omega - \int_{\Omega} \delta u \cdot \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} d\Omega = 0$$

où σ est le tenseur des contraintes,
 ε le tenseur des déformations,
 ρ la densité,

A1.III.PROBLEME DISCRETISE

On cherche à discrétiser géométriquement le domaine Ω en domaines élémentaires Ω^e . La discrétisation géométrique s'effectue par l'intermédiaire de l'approximation du champ de déplacement sous la forme :

$$(A1.3) \quad u(x, t) = N(x) U^e(t)$$

avec $N(x)$ matrice des fonctions d'interpolation,
 $U^e(t)$ déplacements aux noeuds de Ω^e .

La relation déformations déplacements est posée :

$$(A1.4) \quad \varepsilon(x, t) = L \cdot u(x, t)$$

avec L opérateur différentiel, ou si l'on pose $B(x) = L \cdot N(x)$:

$$(A1.5) \quad \varepsilon(x, t) = B(x) U^e(t)$$

Utilisons une loi de comportement du type :

$$(A1.6) \quad \sigma = C_e \varepsilon$$

avec C_e tenseur d'élasticité,

Les équations (A1.3), (A1.5), et (A1.6) utilisées dans (A1.2) nous procurent :

$$(A1.7) \quad (\partial U^e)^t \left(\int_{\Gamma_T} N^t T d\Gamma - \int_{\Omega} B^t C_e B U^e d\Omega - \int_{\Omega} N^t \rho N \ddot{U}^e d\Omega \right) = 0$$

Après assemblage, on obtient le système d'équations:

$$(A1.8) \quad M \ddot{U} + K U = F$$

où M est la matrice de masse,
 K la matrice de rigidité,
 F le vecteur force,
 U le vecteur déplacement aux noeuds.

Il est possible d'effectuer des combinaisons de matrices de masse consistante M_C et concentrée M_L où M_L est définie comme:

$$M_{L_{ij}} = \begin{cases} \psi M_{C_{ij}} & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

$$\text{avec } \psi = \frac{\sum_{ij} M_{C_{ij}}}{\sum_i M_{C_{ii}}}$$

en introduisant un coefficient de pourcentage α entre les deux matrices. On a alors :

$$M = (1 - \alpha) M_L + \alpha M_C ,$$

On discrétise ensuite l'intervalle de temps d'intérêt en pas de temps Δt pour observer la réponse du système à l'excitation appliquée.

Le schéma implicite de Newmark est retenu pour la résolution du système (A1.8). Ce schéma est basé sur les développements limités suivant:

$$(A1.9) \quad \{\dot{U}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{U}_t\} + \Delta t \left((1 - \gamma) \{\ddot{U}_t\} + \gamma \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} \right)$$

$$(A1.10) \quad \{U_{t+\Delta t}\} = \{U_t\} + \Delta t \{\dot{U}_t\} + \frac{\Delta t^2}{2} \left((1 - 2\beta) \{\ddot{U}_t\} + 2\beta \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} \right)$$

avec β, γ paramètres de Newmark.

On peut transformer alors (A1.8) en l'équation:

$$(A1.11) \quad [\bar{K}] \{U_{t+\Delta t}\} = \{\bar{F}_{t+\Delta t}\}$$

avec

$$[\bar{K}] = [M] + \beta \Delta t^2 [K]$$

et

$$\{\bar{F}_{t+\Delta t}\} = \beta \Delta t^2 \{F_{t+\Delta t}\} + [M] \left(\{U_t\} + \Delta t \{\dot{U}_t\} + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \{\ddot{U}_t\} \right)$$

La résolution de (A1.11) nous procure $\{U_{t+\Delta t}\}$ grâce auquel nous obtenons $\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\}$ à partir de l'équation (A1.10). On obtient ensuite $\{\dot{U}_{t+\Delta t}\}$ grâce à (A1.9) qui nous permet de passer à l'incrément suivant.

Le choix du schéma de Newmark se justifie par son aspect inconditionnellement stable pour les valeurs suivantes des paramètres :

$$2\beta \geq \gamma \geq \frac{1}{2}$$

A1.IV.CHOIX DE LA SOURCE POUR LES SIMULATIONS

A1.IV.1.Critères de sélection

Le choix de la source pour les simulations est déterminé par plusieurs facteurs. La fréquence dominante de la source est liée à la résolution verticale δ_v du système. On considère que cette résolution est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde . On a alors:

$$(A1.12) \quad \delta_v \cong \frac{v}{2f_d}$$

où v est la vitesse de propagation de l'onde considérée,
 f_d la fréquence dominante de la source,

Cette considération nous permet de définir la fréquence dominante minimale de la source. L'allure spectrale de la source simulée doit être à large bande pour disposer d'un large éventail de fréquences exploitables.

Le pas de temps Δt choisi pour décrire la source détermine la fréquence de Nyquist f_N , fréquence maximale de prise en compte. En théorie, on a:

$$(A1.13) \quad f_N = \frac{1}{2} \frac{1}{\Delta t}$$

A1.IV.2.Type de source retenu

Dans ce mémoire, on propose d'utiliser une source de Ricker correspondant aux critères précédents, dont la forme temporelle est (Figure A1.2):

$$(A1.14) \quad f(t) = -2 \frac{(t-t_s)}{k^2} \exp\left(-\frac{(t-t_s)^2}{k^2}\right)$$

avec $k = \frac{1}{\sqrt{2} \pi f_d}$,

t_s temps du point d'inflexion, f_d fréquence dominante de la source.

(A1.14) s'écrit dans le domaine fréquentiel sous la forme:

$$(A1.15) \quad F(f) = 2 \pi i f k \sqrt{\pi} \exp(-(\pi k f)^2)$$

Ce type de fonction peut être utilisé pour simuler numériquement une source de terrain (Eiselt, 1993).

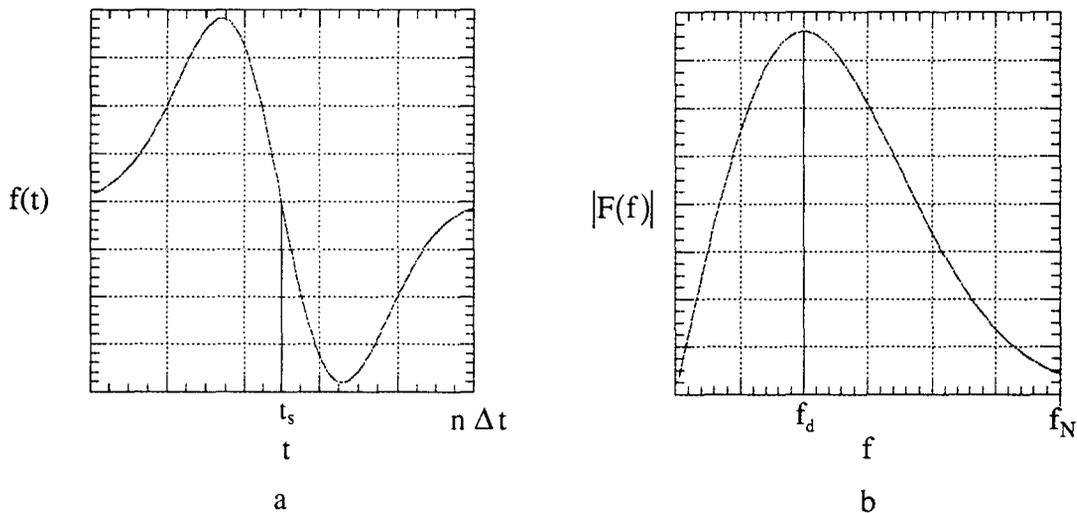


Figure A1.2: Présentation de la source de type Ricker. Présentations a) dans le domaine temporel et b) dans le domaine fréquentiel.

A1.V. CHOIX DE DISCRETISATIONS

A1.V.1. Discrétisation géométrique

La discrétisation géométrique est choisie de manière à procurer une description réaliste de la propagation des différentes ondes d'intérêt. Elle est liée à leur longueur d'onde ainsi qu'aux phénomènes de dispersion numérique. Le type d'élément quadrilatère à quatre noeuds (Q4) est conseillé, ayant déjà fait ses preuves pour des problèmes similaires (Eiselt, 1993).

Le maillage agit comme un filtre sur les ondes. Plus il est fin, moins cet effet de filtre se fait sentir et moins les oscillations non corrélées avec la source se mêlent au signal corrélé. L'utilisation de mailles de grandeur caractéristique $\lambda/5$ dans le sens de la propagation est un maximum (White, 1979) :

$$(A1.16) \quad \Delta x \leq \frac{\lambda}{5}$$

avec Δx longueur d'un élément Q4 dans le sens de la propagation,
 λ longueur de l'onde considérée.

Le choix de f_d dans l'équation (A1.12) détermine λ par $\lambda = v/f$ et influe par conséquent sur la taille maximale des éléments du maillage par l'équation (A1.16).

A1.V.2. Discrétisation temporelle

Le choix du pas de temps Δt est lié au choix de la fréquence dominante de la source (Equation A1.13) ainsi qu'aux phénomènes de dispersion numérique. L'influence de la dispersion est étudiée au Chapitre I. Celle de la fréquence dominante détermine un pas de temps minimal à utiliser pour que la source soit au moins décrite par 9 pas de temps (Eiselt, 1993). Si T est la durée de l'excitation, on a :

$$(A1.17) \quad \Delta t \leq \frac{T}{9}$$

ANNEXE 2

JUSTIFICATION DE L'UTILISATION DE LA SYMETRIE DE REVOLUTION POUR LES SIMULATIONS DE TERRAINS AVEC CAVITE

Les difficultés actuellement de simuler la sismique 3D haute résolution, tant à cause de notre code de calcul que de la capacité de notre machine, nous reporte sur la simulation en 2D. Un calcul utilisant la symétrie de révolution permet de diviser par deux la taille du domaine étudié.

Dans le cas d'une présence de cavité dans le domaine, le fait de travailler en symétrie de révolution implique la prise en compte d'une cavité sous forme de couronne centrée sur l'axe de la symétrie de révolution (Figure A2.1). Dans le cas où le rayon extérieur de la cavité-couronne r tend vers l'infini, l'utilisation de la symétrie de révolution s'apparente à celle des déformations planes.

Dans quelle mesure cette simulation par symétrie de révolution peut-elle se justifier au regard d'une simulation en déformations planes, plus correcte pour la prise en compte de la géométrie de la cavité? C'est ce que nous allons examiner sur un exemple simple présenté dans ce qui suit.

On se propose de réaliser une simulation de sondage sismique sur un terrain mono couche de craie (Figure A2.2). Les paramètres sont choisis de manière à maîtriser la dispersion numérique. L'amortissement matériel n'est pas introduit. Une cavité carrée de $L = h = 3$ mètres de côté est introduite sous la source à 6 mètres de profondeur. Ce placement de cavité représente le cas qui éloigne le plus la considération en déformations planes de celle en symétrie de révolution, le rayon extérieur de la cavité-couronne étant minimum ($r = L$). On compare les résultats obtenus en déformations planes et en symétrie de révolution, présentés sous forme de différence algébrique des sismogrammes sans et avec cavité (Figure A2.3).

Les paraboles centrées sur la position du milieu de la cavité sont dues aux réflexions d'ondes P, S et aux modes convertis PS sur le toit de la cavité. Quantitativement, les énergies sont comparables, bien qu'il faille ne pas oublier qu'un contrôle automatique de gain est ici appliqué, ce qui relativise l'aspect énergétique.

Qualitativement, les arrivées des événements réfléchis sur le toit de la cavité sont identiques, sauf pour l'onde S qui est légèrement différente sur les deux figures (au niveau des récepteurs R4 à R48, vers 20 ms). Cette faible différence entre la symétrie de révolution et les déformations planes se situe après l'arrivée de S_0 . Elle est due à la différence de forme de la cavité, et à son effet sur PR. Par contre, aucune autre différence n'est observée notamment avant l'arrivée de S_0 .

Les différences entre symétrie de révolution et déformations planes sont faibles globalement, et très faibles avant l'arrivée de S_0 . On peut se permettre de travailler en

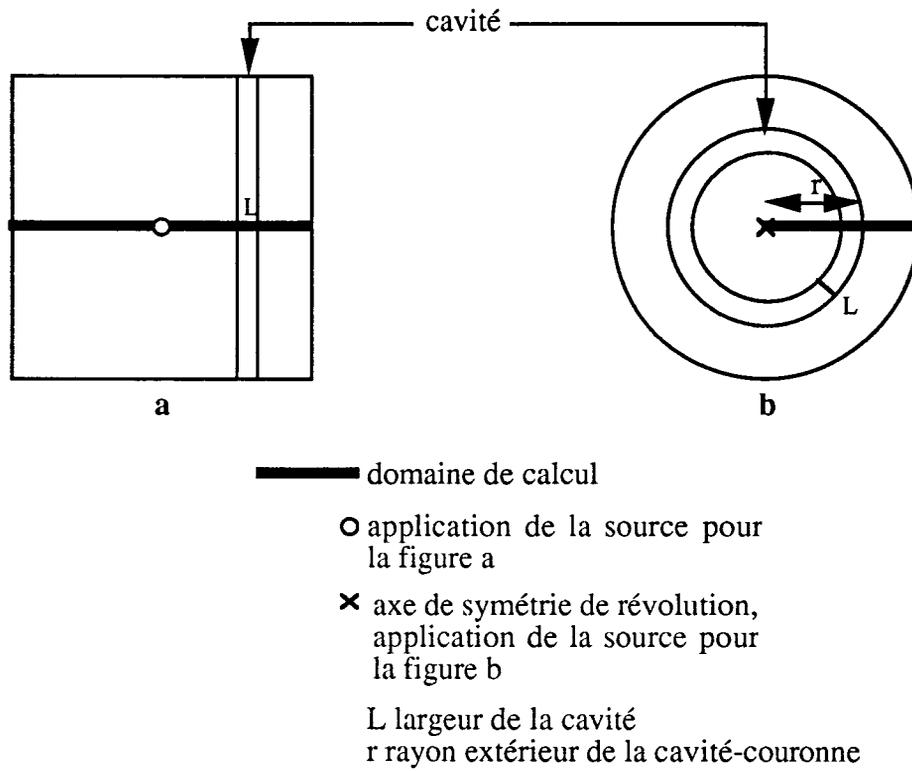


Figure A2.1: Vue du domaine total et du domaine de calcul
 a) en déformations planes,
 b) en symétrie de révolution.

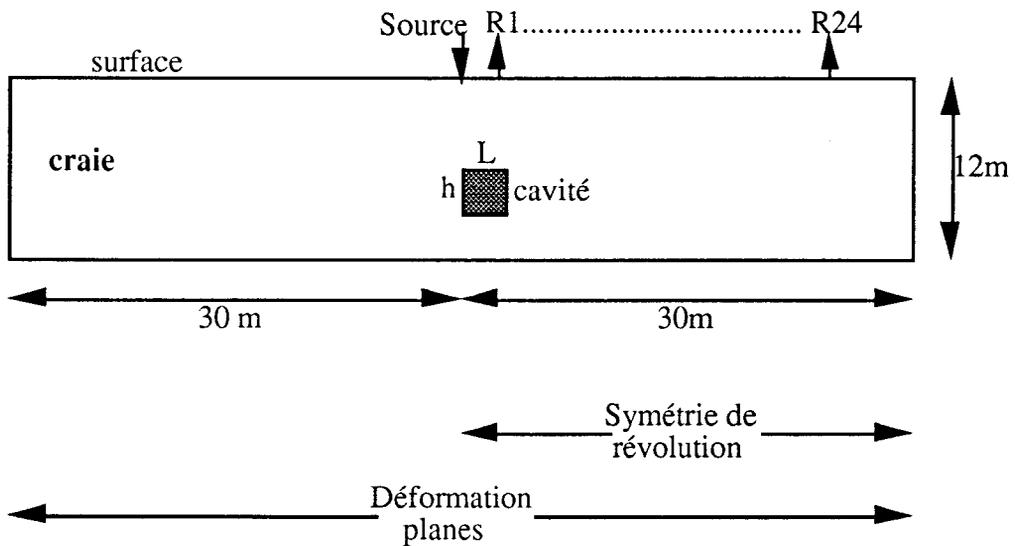
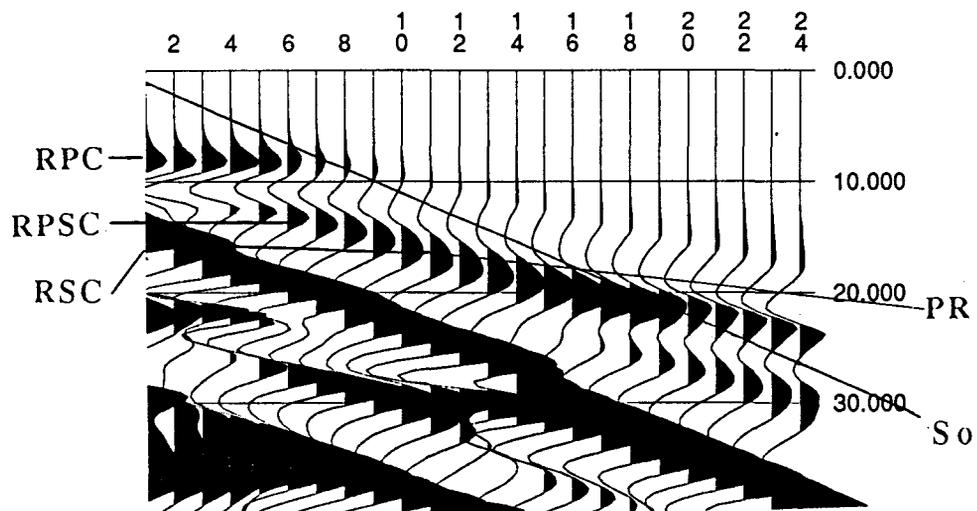
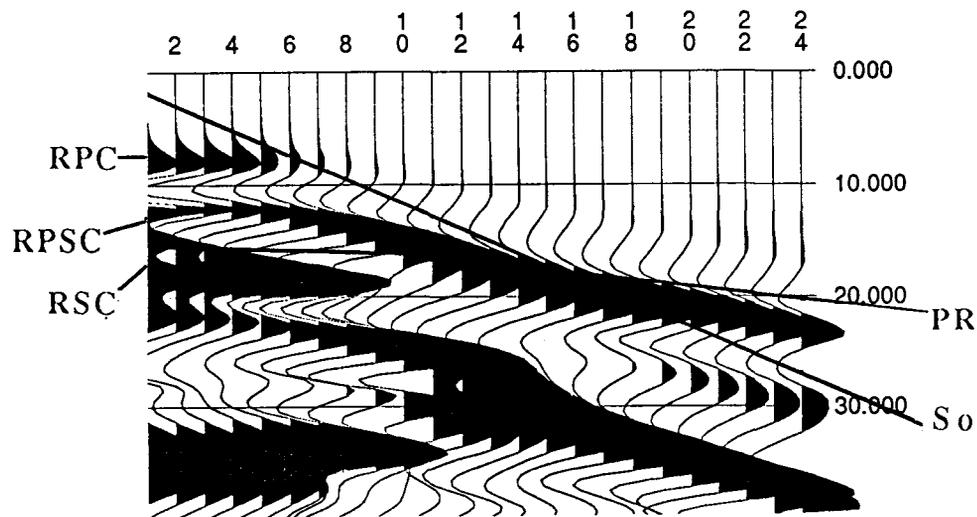


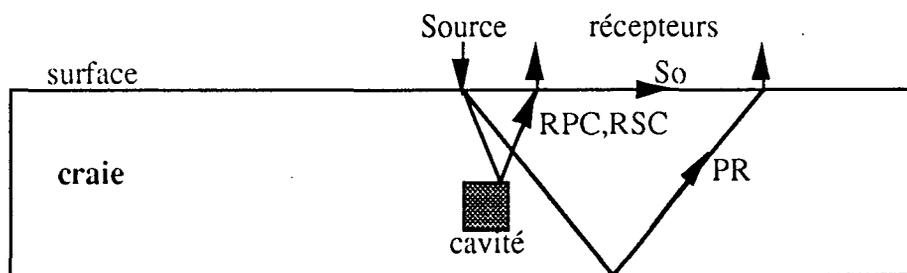
Figure A2.2: Présentation de la géométrie du domaine de l'étude.



a



b



c

Figure A2.3: Présentation de la différence algébrique des sismogrammes sans et avec cavité, réalisés avec mêmes contrôle automatique de gain a) en symétrie de révolution b) en déformations planes. c) notations utilisées: S_o onde de cisaillement directe, PR onde de compression réfléchi sur le fond de la craie, RPC onde de compression réfléchi sur le toit de la cavité, RPSC onde de compression réfléchi convertie en cisaillement sur le toit de la cavité, RSC onde de cisaillement réfléchi sur le toit de la cavité.

symétrie de révolution en toute quiétude pour une fenêtre temporelle antérieure à l'arrivée de S_0 . Permission d'autant plus acceptable si l'on considère que l'étude précédente se plaçait dans le cas extrême $r = L$: les différence déformations planes-symétrie de révolution seront de moins en moins importantes plus la cavité sera loin de la source. Cette fenêtre temporelle acceptable pour travailler en symétrie de révolution correspond à la fenêtre d'intérêt utilisée en réflexion sismique "Optimum Réflexion Window" (Hunter, 84).

ANNEXE 3

PROCESSUS DE MISE EN OEUVRE ET DE TRAITEMENT SISMIQUE

A3.1. PROCESSUS DE MISE EN OEUVRE DE LA REFLEXION SISMIQUE

A3.2. PROCESSUS DE TRAITEMENT SISMIQUE

A3.3. POSSIBILITES DE PRESENTATION DES DONNEES

A3.1. PROCESSUS DE MISE EN OEUVRE DE LA REFLEXION SISMIQUE HAUTE RESOLUTION

Le dispositif utilisé pour effectuer l'enregistrement des données sismiques est représenté sur la figure A3.1. Les récepteurs sont synchronisés avec le déclenchement de la source. Ils sont reliés à un système d'acquisition qui stocke les données.

Le fait de travailler en faibles profondeurs nécessite une résolution verticale de quelques mètres. Cette résolution est comparable à $\lambda/2$ (Widess, 1973), où λ est la longueur d'onde du sondage. Le choix de la source est donc conditionné par le respect de la relation:

$$e_c \geq \frac{\lambda}{2} \quad \text{ou encore, si } \lambda = \frac{v}{f}, \quad f \geq \frac{v}{2e_c}$$

où f est la fréquence,
 v la vitesse de propagation de l'onde,
 e_c l'épaisseur de la couche à détecter.

Cette relation montre que, pour une résolution de quelques mètres et des vitesses de propagation proches de 1000 m/s, il faut travailler avec des fréquences de l'ordre de 100 Hz au minimum. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser une source à impulsion courte pour qu'elle puisse créer un large spectre en fréquences exploitables. Une discussion assez complète sur les différents types de sources a été réalisée par Miller (1994).

Comme récepteurs des données sismiques, on utilise des géophones qui peuvent être des capteurs de vitesse acoustique. Les forces de couplage sol - récepteurs sont proportionnelles à la fréquence. Ces forces sont donc à considérer, spécialement en sismique haute résolution. C'est pourquoi il est nécessaire d'implanter solidement les géophones dans le sol (Tricot et al, 1989).

La source et les géophones sont disposés sur la même ligne en surface, le long du profil sondé. On procède de façon à garder la même distance source - premier récepteur (nearest offset) au cours des différents tirs en avançant la source à chaque tir (Figure A3.2). Cette distance est choisie en fonction du choix de la fenêtre optimale qui consiste à sélectionner les récepteurs où la réflexion ciblée est détectable le plus facilement. En pratique, la distance source - premier récepteur est choisie telle qu'elle soit comparable à la moitié de la profondeur minimum visée, la distance source - dernier récepteur pour qu'elle soit comparable à deux fois la profondeur maximum visée. Toutefois, l'effet absorbant du sous-sol limite la distance source - dernier récepteur. Le choix de la distance récepteur - récepteur

dépend en partie de cette distance. Pour rester cohérent avec la résolution du sondage, la distance récepteur - récepteur est choisie telle qu'elle soit au moins inférieure au rayon de la surface de Fresnel (voir le Chapitre III). On voit que le choix des distances source - dernier récepteur et récepteur - récepteur doit être complémentaire pour proposer une alternative de juste milieu aux différents critères d'utilisation du sondage sismique.

Chaque tir donne un sismogramme brut de terrain qu'il convient de traiter et d'associer aux autres tirs du même profil selon un processus présenté dans la partie suivante.

A3.2. PROCESSUS DE TRAITEMENT SISMIQUE

Les données issues de la sismique haute résolution sont traitées selon un processus présenté dans la figure A3.3 à l'aide d'un logiciel de traitement sismique. Ce traitement représente un processus plutôt simplifié au regard des logiciels de traitement sismique utilisés par les grandes compagnies géophysiques où d'autres étapes interviennent (filtrage 2D, convolution, migration, ...).

Il s'agit dans un premier temps de trier les données (Figure A3.3a) en supprimant les voies où une anomalie est détectée, à cause par exemple d'un mauvais couplage sol récepteur, ou d'un défaut de récepteur. Ensuite, les premières arrivées correspondant à l'onde directe et l'onde réfractée sont supprimées puisque seules les réflexions nous intéressent. On procède également à la suppression du passage de l'onde par l'air. Un filtrage est appliqué pour ne garder que la bande fréquentielle qui nous intéresse. Dans notre cas d'étude haute résolution, seules les fréquences comprises entre 100 et 400 Hz sont généralement conservées pour se procurer une résolution verticale élevée. On choisit ensuite une fenêtre optimale définie dans la section précédente. Un contrôle automatique de gain (C.A.G.) appliquant une correction d'amplitude adaptative sur les signaux est ensuite appliqué pour faire ressortir le sismogramme avec tous les signaux d'amplitudes comparables (Figure A3.3b).

On choisit ensuite de regrouper les signaux selon les points miroirs pour réaliser une couverture multiple (regroupement CDP, Common Depth Point, figure A3.4). Une correction des vitesses moyennes NMO (Normal Move Out) est alors appliquée pour corriger les retards d'arrivées de ces réflexions pour pouvoir présenter une image sismique plus proche de la géométrie réelle (Figure A3.3c). Après correction, le temps d'arrivée des réflexions doit correspondre à leur temps d'aller retour sous la source. Cette correction s'assimile à une focalisation sur les cibles observées.

L'étape suivante consiste à sommer les voies regroupées d'un même CDP (stacking). La sommation permet de mettre en valeur les corrélations des différentes voies pour finalement obtenir une coupe sismique verticale en deux dimensions (Figure A3.3d). Cette sommation s'assimile à une antenne synthétique modélisant un système comparable à une sonde verticale (Figure A3.4). Le sismogramme peut ensuite être filtré (post stack) pour former le signal $S(x,t)$. On peut normaliser $S(x,t)$ en $S_n(x,t)$, ce qui consiste à réaliser la normalisation des signaux par rapport à un signal de référence.

Le sismogramme obtenu est classiquement présenté avec en abscisse l'échelle du profil sismique en surface (en m) et en ordonnée le temps d'aller retour de l'onde entre la surface et les couches détectées. On peut sous ce type de présentation noircir les parties positives des signaux ce qui renforce la visualisation des événements corrélés. La profondeur d des couches est ensuite retrouvée avec la formule :

$$d = 2 V_{nmo}(t_0) t_0$$

où t_0 est le temps d'arrivée du signal (Figure A3.4) et V_{nmo} la vitesse de correction utilisée dans le traitement.

A3.3. POSSIBILITES DE PRESENTATION DES DONNEES

La représentation en noir et blanc des données sismiques traitées est notée NB (Figure A3.3d), et NBN pour les données normalisées (Figure A3.5). L'intérêt de la présentation sans normalisation est de visualiser les réflexions les plus fortes, malheureusement au détriment des autres. La présentation avec normalisation permet au contraire de visualiser des événements supplémentaires. Il ne faut cependant pas oublier que dans ce cas l'aspect énergétique des différentes ondes est faussé. Les présentations avec et sans normalisation sont finalement complémentaires.

Un autre type de représentation développé dans cette thèse est celui des niveaux d'amplitude des signaux (Figure A3.5). Calculés par rapport à un gain de référence, ces niveaux sont représentés suivant une échelle de couleur en dB. Cette façon originale de présenter les résultats permet de visualiser les nuances des différents événements présents sur les sismogrammes en jouant sur la dynamique de représentation en couleur. Cette dynamique ne peut cependant dépasser celle du convertisseur analogique numérique du sismographe. Pour obtenir ce type de présentation, on propose de suivre la démarche suivante. Si $S(x,t)$ est le signal du sismogramme, on calcule son amplitude moyenne A_M sur une fenêtre temporelle Δt par :

$$A_M(x,t) = \frac{1}{\Delta t} \sqrt{\sum_i S^2(x,t_i)}$$

On calcule ensuite la valeur

$$20 \log \left(\frac{A_M}{A_0} \right)$$

où A_0 est une valeur de référence.

On associe à cette valeur une échelle de couleur en dB. Cette représentation est notée C.

On peut également coupler les deux types de représentation couleur et noir et blanc en les superposant (C+NB ou C+NBN).

Afin de comparer deux sismogrammes, il est possible d'effectuer un rapport de leurs niveaux d'énergie. L'algorithme de calcul de ce rapport s'effectue de la manière suivante. Si $A_{M1}(x,t)$ et $A_{M2}(x,t)$ sont les amplitudes moyennes des signaux relevés sur les deux sismogrammes, le rapport $R(x)$ des niveaux d'énergie est calculé comme :

$$R(x,t) = 10 \log \left(\frac{A_{M2}^2(x,t)}{A_{M1}^2(x,t)} \right)$$

Le rapport $R(x)$ est ensuite associé à une échelle de couleur.

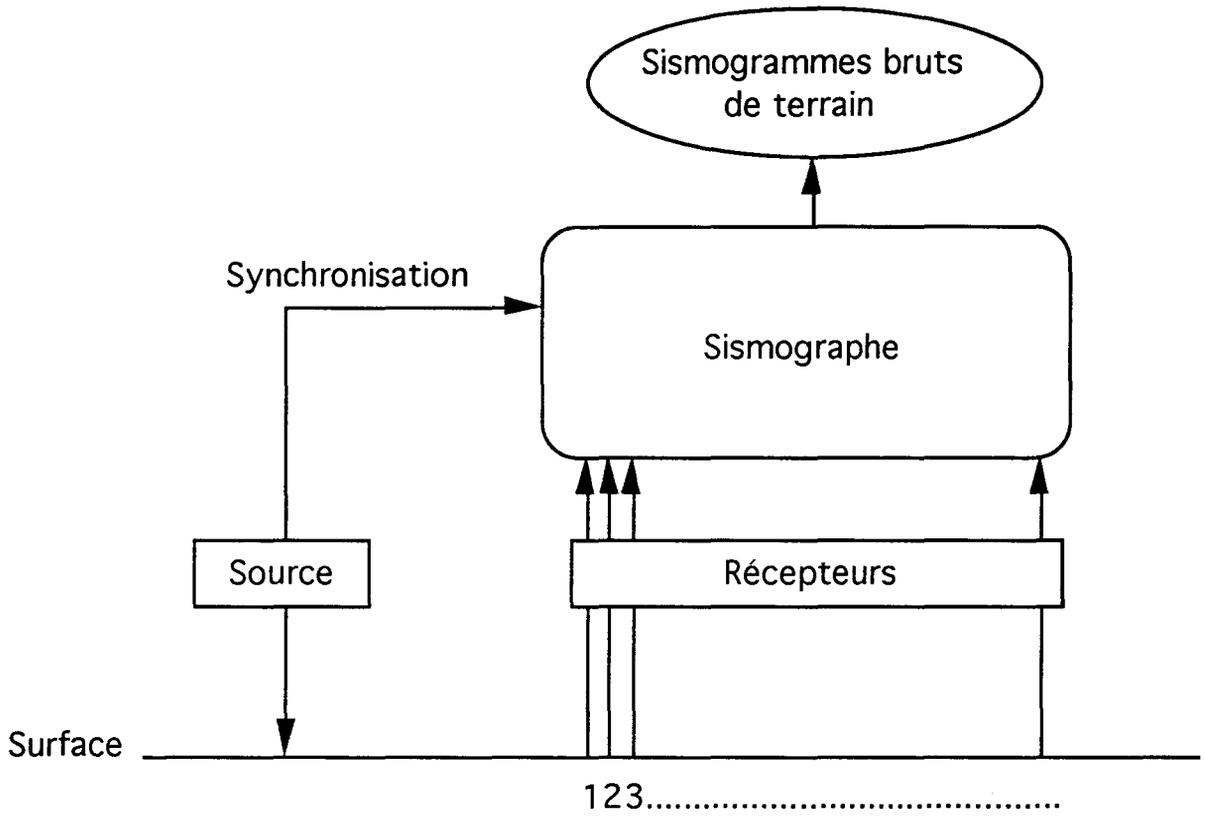


Figure A3.1. Dispositif d'enregistrement des données.

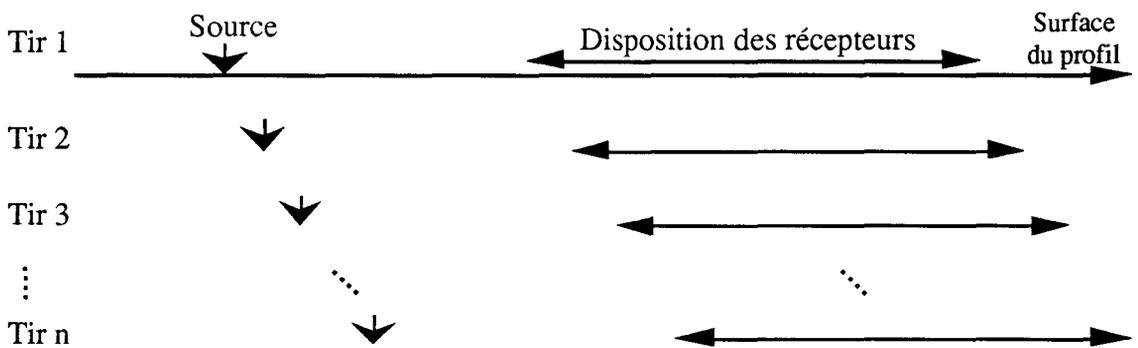


Figure A3.2. Disposition des outils sismiques tir après tir.

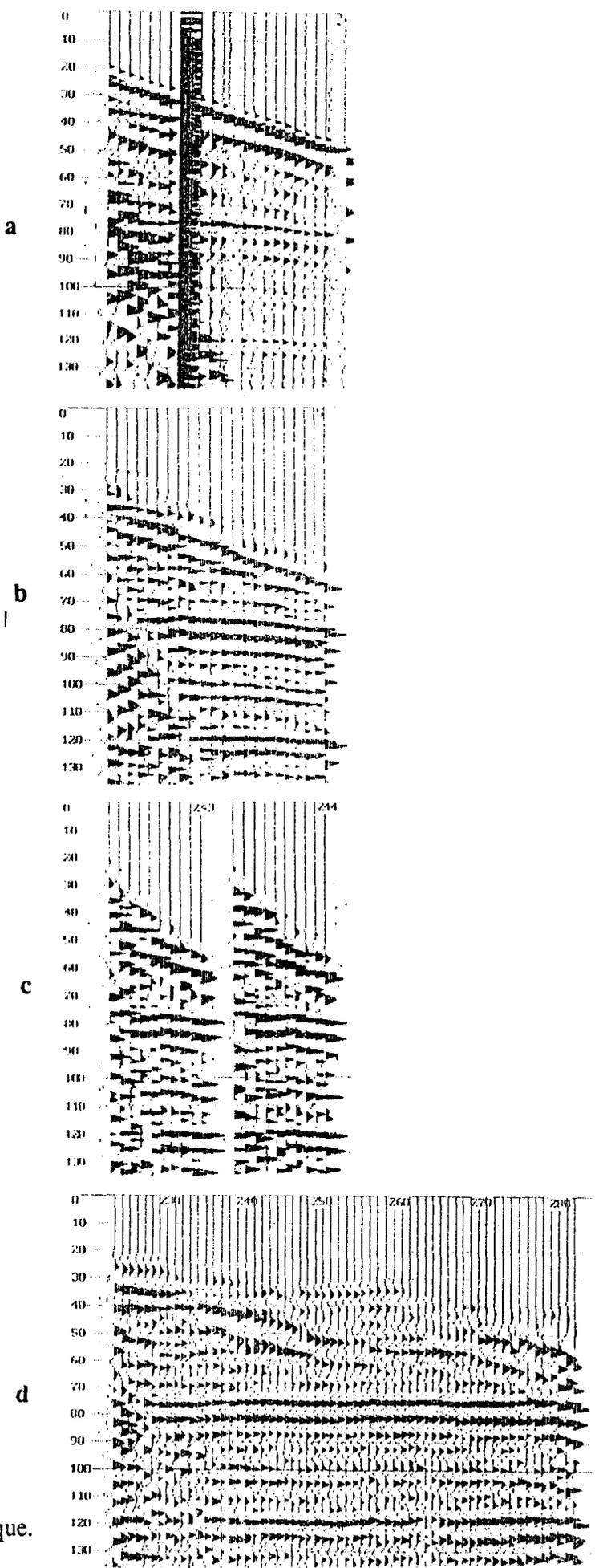
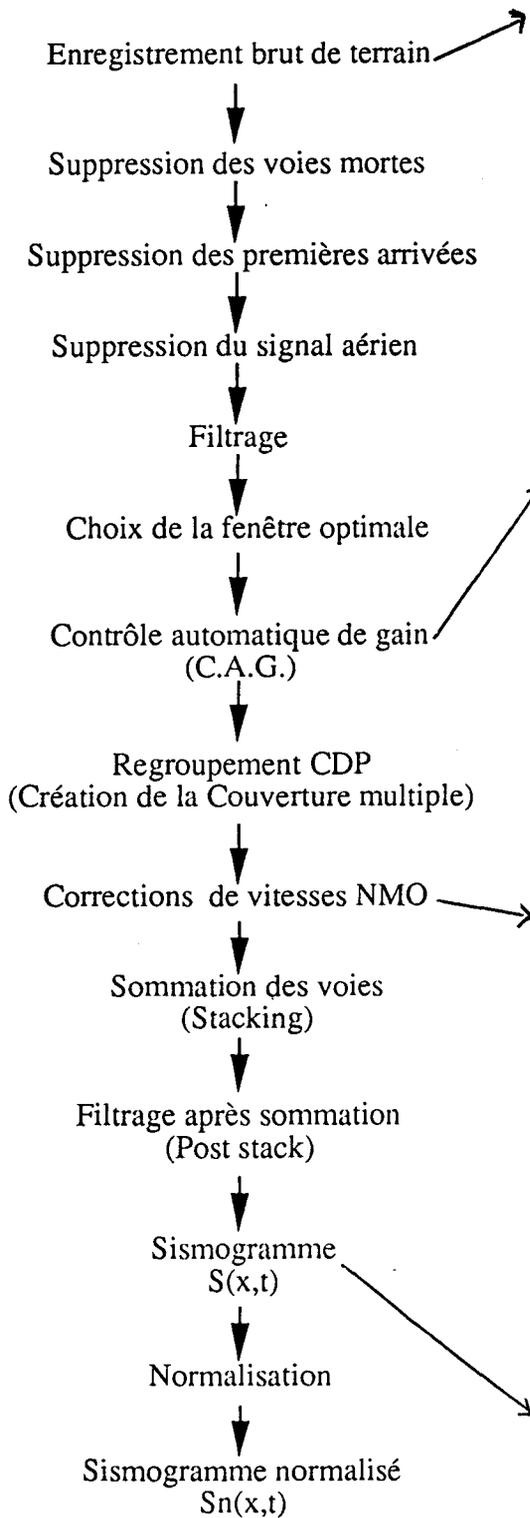


Figure A3.3 : Procédure de traitement sismique.

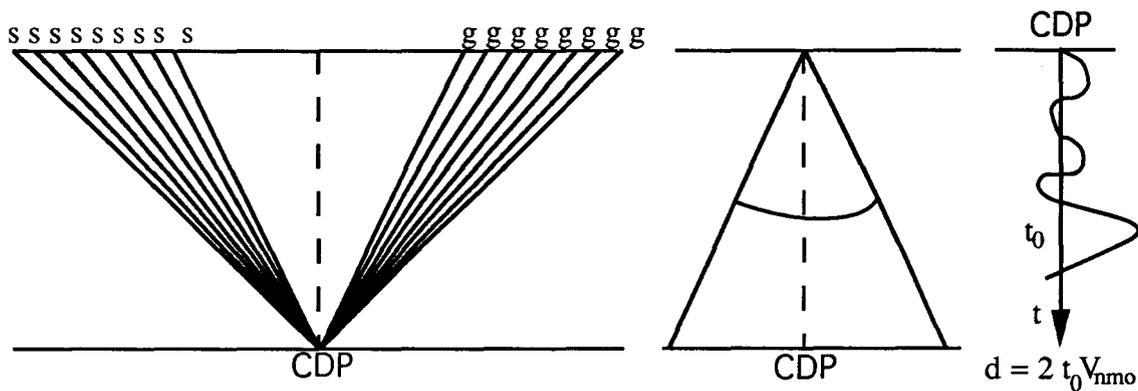


Figure A3.4: Représentation a) des sources et récepteurs d'un même point CDP, b) de l'assimilation du CDP à une vue d'antenne synthétique, c) de la profondeur d obtenue grâce au temps t_0 et à la vitesse V_{nmo} .

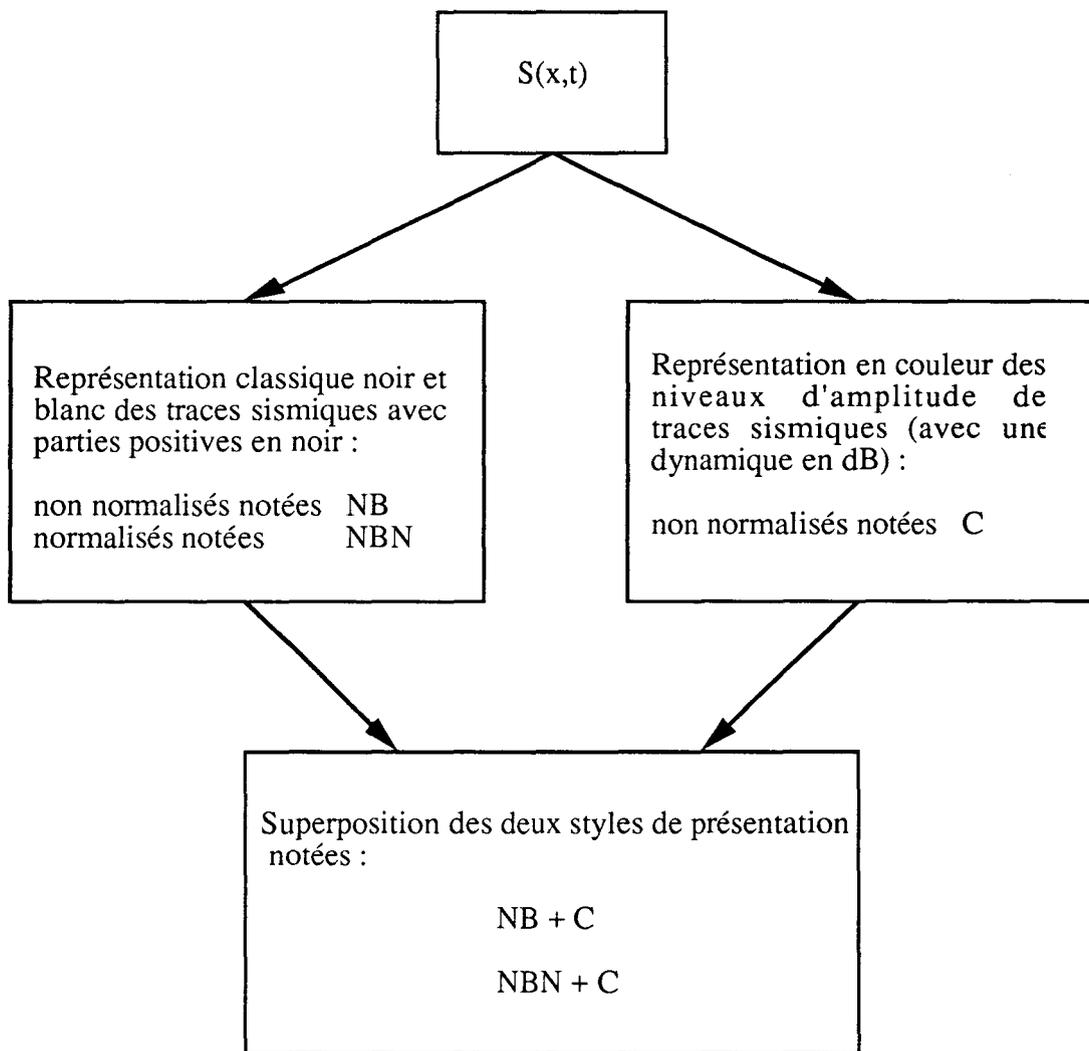


Figure A3.5: Possibilités de présentation des sismogrammes.

BIBLIOGRAPHIE

Aki K., Richards P.G., 1980, "Quantitative seismology - theory and methods", Vol. 1, Freeman W.H. and Co., New York, pp168-183.

Bamberger A., Chavent G., Lailly P., 1980, "Etude de schémas numériques pour les équations de l'élastodynamique linéaire", Rapport de recherche 41, INRIA, BP 105, 78150 Le Chesnay, France.

Bouchon M., 1987, "Diffraction of elastic waves by cracks or cavities using the discrete wave number method", J. Acoustic Soc. AM., Vol. 81, n° 6, pp. 1671-1676.

Branham K.L., Steeples D.W., 1988, "Cavity detection using high resolution seismic reflexion methods", Mining Engineering, pp115-119.

Butler D.K., 1983, "Cavity detection and delineation research : Report 1, microgravimetric and magnetic surveys: Medford cave site, Florida", Report, US Army engineer waterways experiment station, Geotechnical laboratory, Vicksburg, Miss. 39180 USA.

Celep Z., Bazant Z.P., 1983, "Spurious reflections of elastic waves due to gradually changing finite element size", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 19, pp 631-646.

Chan S., Barker R., Owens B., 1996, "Tracing cavern systems in Galway, Ireland, using electrical imaging and radars surveys", Proceedings of the 2nd Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, pp 146-148, Sept 2-4 , Nantes, France.

Dym C.L., 1976, "Attenuation of ground vibration", Journal of Sound and Vibration, April 1976, pp32-35.

Eiselt F., Shahrour I., Tricot J.C., Pernod P. and Delannoy B., 1991, "Validation of a finite element modelization of shallow waves propagation", Proceedings of 19th Int. Symp. on Acoust. Imaging, Bochum (Germany). Edited by H. Ermet & H.P. Harjes, Plenum Press, pp 847-852.

Eiselt F., Shahrour I., 1992, "Application of the finite element method to seismic detection of near underground cavities" Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Bruxelles, Sept. 92, Edition Ch. Hirsch, O.C. Zienkiewicz and E. Onate, Elsevier Science Publishers, pp. 351-358.

Eiselt F., 1993, "Etude de la propagation d'ondes sismiques de hautes fréquences, application à la reconnaissance des cavités du proche sous-sol", Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Ecole Centrale de Lille.

George T., Virieux, J., Madariaga R., 1987, "Seismic wave synthesis by gaussian beam summation : a comparison with finite differences", *Geophysics*, vol. 52, n° 8, pp. 1065-1073.

Hatherly P.J., 1986, "Attenuation on shallow refraction data", *Geophysics*, Vol 51, N°2, pp250-254.

Hughes T.J.R., Liu W.K., 1978, "Implicit - explicit finite elements in transient analysis: stability theory", *Journal of Applied Mechanics*, vol 45, pp 371-378.

Hunter J.A., Pullan S.E., Burns R.A., Gagne R.M., Good R.L., 1984, "Shallow seismic reflexion mapping of the overburden bedrock interface with the engineering seismograph: some simples techniques", *Géophysics*, vol 49, pp 1381-1385.

Knapp R.W. , Steeples D.W., 1986a, "High resolution common depth point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design" , *Geophysics*, Vol 51, pp 283-294.

Knapp R.W. , Steeples D.W., 1986b, "High resolution common depth point seismic reflection profiling: instrumentation" , *Geophysics*, Vol 51, pp 276-282.

Marfurt K.J., 1984, "Accuracy of finite difference and finite elements modeling of the scalar and elastic wave equations", *Geophysics*, vol 49, n° 5, pp. 533-549.

Miller R.D., Pullan S.E., Steeples D.W., Hunter J.A., 1994, "Field comparison of shallow P wave seismic sources near Houston, Texas", *Geophysics*, vol 59, pp 1713-1728.

Modaressi H., 1987, "Modélisation numérique de la propagation d'ondes dans les milieux poreux inélastiques", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.

Moreaux D., Piwakowski B., Shahrour I., 1995, "Détection de cavités dans le proche sous-sol et évaluation du risque d'effondrement en surface par la technique de reflexion sismique", Colloque des Ecoles Centrales, Lyon, France, 10-11 Juin.

Moreaux D., Piwakowski B., Shahrour I., 1996, "Finite element modelling of cavity localization by mean of high resolution seismic reflection", Proceedings of the 2nd Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, pp 142-145, Sept 2-4 , Nantes, France.

Olivier R. Rosselli A., Dumont B., 1996, "Etude méthodologique en microgravimétrie sur des cavités", Proceedings of the 2nd Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, pp 334-335, Sept 2-4 , Nantes, France.

Owen T.E., 1983, "Detection and mapping of tunnels and caves", Developments in Geophysical exploration, Methods-5, edited by A.A. Fitch, Applied Science Publishers, London and New York.

Pernod P., Piwakowski B., Delannoy B., Tricot J.C., 1988, "Detection of shallow underground cavities by seismic methods: physical modelling approach", 17th Int. Symp. on Acoust. Imaging, Sandai, Japan, pp 705-713.

Pernod P., 1989, "Modélisation physique des profils sismiques de subsurface: application à la détection de cavités", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.

Piwakowski B., Pernod P., Delannoy B., Tricot J.C., 1987, "Détection sismique de cavités dans le proche sous-sol", Journées d'Acoustique Franco-Polonaise.

Piwakowski B., 1989, "Contribution à la théorie de la réponse impulsionnelle de diffraction. Exemple d'application : détection sismiques de cavités souterraines", Thèse d'Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes.

Piwakowski B., Tricot J.C., Delannoy B., 1991, "Détection des carrières de craie du Nord par sismique haute résolution", Rapport interne au Laboratoire de Physique des Vibrations et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lille, BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, non publié.

Piwakowski B., Tricot J.C., Delannoy B., 1994a, "Intelligent seismic imaging sensor applied do detection of underground cavities" Proceedings of 1994 IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks", April 25-27, Lille, France, pp 349-352.

Piwakowski B., Tricot J.C., Delannoy B., 1994b, "Underground tunnels detection and location by high resolution seismic reflection", EAEG 56th Meeting and Technical Exhibition, Vienna, Austria, 6-10 June 1994, p IO18.

Piwakowski B., Watelet J.M., Moreaux D., Sbai K., 1996, " High Resolution Seismic Prospection of Old Gypsum Mines - Evaluation of detection possibilities", Proceedings of the 2nd Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, pp 149-152, Sept 2-4 , Nantes, France.

Robertsson J.O.A., Blanch J.O., and Symes W.W., 1994, "Viscoelastic finite difference modeling", *Geophysics*, Vol. 59, pp 1444-1456.

Shahrour I., 1992, "PECPLAS : a finite element program for the resolution of geotechnical problems", Colloque international Géotechnique - Informatique, Edition Presse ENPC, Paris, pp 327-334, Septembre 92.

Shahrour I., Moreaux D., 1995a, "Analyse de la dispersion dans une modélisation numérique de la reconnaissance du sous sol par la sismique haute résolution", Actes du 12ième Congrès Français de Mécanique, Strasbourg, France, pp 29-32.

Shahrour I., Moreaux D., 1995b, "Prise en compte de l'amortissement matériel pour une modélisation de la reconnaissance du sous sol peu profond par réflexion sismique", Rapport scientifique du réseau de laboratoires GEO, Décembre 95, Aussois, France.

Steeple D.W., 1984, "High resolution seismic reflexions at 200 Hz", *Oil and Gas Journal*, December 3, pp 86-92.

Steeple D.W., Miller R.D., 1987, "Direct detection of shallow subsurface voids using high resolution seismic reflexion technics", Proceeding of the Second Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst, édité par Beck and Wilson, dans *Karst Hydrogeology Engineering and Environmental Applications*, A.A.Balkema, Rotterdam, Boston.

Steeple D. , Miller R. , Knapp R.W. , 1989, "Practical aspects of shallow seismic reflexion" , Notes of a short course, University of Kansas , Lawrence , Texas.

Tricot J.C., Delannoy B., Piwakowski B., Pernod P., 1986, "Some problems and experimental resultsof seismic shallow prospecting", 15th Int. Symp. on Acoust. Imaging, Halifax (Canada).

Tricot J.C., Piwakowski B., Pernod P., Delannoy B., 1989, "Geophone ground coupling effects in high resolution seismic surveys", presented at the 6th symp. on Hydroacoustics, Gdansk, Poland.

White W., Valliapan S., Lee I.K., 1979, "Finite element mesh constraints for wave propagation problems", Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Finite Elements Methods, University of New South Wales, Australia.

Widess M. B., 1973, "How thin is a thin bed ?", Geophysics, Vol. 38, n° 6, pp 1176-1180.

Zienkiewicz O.C., 1977, "The finite element method", New York, Mc Graw Hill Book Co, 3rd Ed.

Références non citées:

Ballard R.F., 1983, "Cavity detection and delineation research : Report 5, electromagnetic (radar) techniques applied to cavity detection", Report, US Army engineer waterways experiment station, Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Miss. 39180 USA.

Bouchon M., 1980, "Calculation of complete sismograms for an explosive source in a layered medium", Geophysics, vol 45, n 2, pp 197-203.

Clough R.W., Penzien J., 1980, "Dynamique des structures", Tome 1, Pluralis ED., pp195-212.

Collino F. , 1987, "Analyse numérique de modèles de propagation d'ondes , application à la prospection sismique " , thèse, Paris IX.

Knapp R.W. , Steeples D.W., 1986, "High resolution common depth point seismic reflection profiling: instrumentation" , Geophysics, vol 51, pp 276-282.

Leplat L., 1973, "Les cavités souterraines de la craie dans le Nord de la France", Bull. liaison Laboratoire des P. et Ch., n° 63, 29-55.

Wang M.L., Wang J., 1992 , "Non linear dynamic analysis of reinforced concrete shear wall structures", Soils Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.11, pp255-268.

