

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE LABORATOIRE GERM - ECOLE DES MINES D'ALES

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LILLE I

Discipline : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par Benoît CELSE

Date de soutenance : le 2 juin 1999 Tirage définitif

<u>Titre</u>

RECONNAISSANCE TRIDIMENSIONNELLE EN AVANT DU FRONT DE TAILLE PAR METHODES SISMIQUES

Directeur de thèse : JP. HENRY

JURY

M. Pierre ANDRIEUX
M. Jean-Luc MARI
M. Michel CAMPILLO
M. Philippe COTE
M. Jean-Pierre HENRY
M. Denis JONGMANS
M. Bogdan PIWAKOWSKI
M. Isam SHAHROUR

Professeur, Université Paris VI Ingénieur habilité, IFP Professeur, Université Grenoble I Docteur d'état, LCPC Professeur, Ecole des Mines d'Alès Professeur, Université de Liège Professeur, Université Lille I Professeur, Université Lille I Rapporteur Rapporteur Examinateur Examinateur Examinateur Examinateur Examinateur

Remerciements

Ce travail n'a pu être réalisé sans l'aide de nombreux acteurs.

Les résultats obtenus doivent beaucoup à l'étroite collaboration avec les laboratoires de l'Ecole Centrale de Lille (B. Piwakowski) et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Ph. Côte et O. Abraham).

Je voudrais témoigner ma profonde gratitude à JP. Henry pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et m'avoir permis de mener à bien mes travaux en m'apportant son soutien moral, scientifique et logistique.

Je tiens à remercier particulièrement Ph. Côte pour avoir suivi ce travail depuis son point de départ. Il a su mettre à ma disposition sa gentillesse, sa patience et son talent. Je remercie également O. Abraham pour avoir suivi ce travail très attentivement et pour toutes ses remarques pertinentes.

Je remercie B. Piwakoski et toute son équipe (Christelle, Charles et Nourredine) pour la mise à disposition de son matériel et pour ses nombreuses remarques très constructives qui ont permis d'éviter de nombreux faux pas.

Je remercie B. Vayssade pour avoir accepté d'encadrer ce travail, son sens physique très développé me fut très utile.

Je n'oublierai pas P. Wyniecki qui a initié mon entrée dans le monde de la géophysique et qui m'a prodigué tout au long de ces travaux de nombreux conseils.

Les validations expérimentales indispensables pour un tel projet ont pu être réalisées grâce aux relations amicales qu'entretiennent les membres de l'Ecole des Mines d'Alès avec les différentes mines. C'est par leur biais que j'ai pu m'introduire dans ce monde qui m'était alors inconnu et je les en remercie. Je n'oublierai pas tous les mineurs qui ont su libérer du temps pour étudier la faisabilité de telles expérimentations : MM Auriol (mine du Bourneix), Durand-Smet (mine de Salçygne) et en particulier MM Gandon et Jaussent (Mine SFA) et MM Bains, Gaisser et Mascarino (Mine du Burg). Ils nous ont accueillis avec gentillesse et ont fait leur possible pour que ces expérimentations se déroulent sans problèmes.

L'étape préliminaire au présent projet a été la recherche de fonds et l'achat de matériel informatique. Je remercie P. Wyniecki pour m'avoir prodigué de nombreux conseils et F. Barreda pour m'avoir initié aux méandres de la compatibilité.

La partie bibliographique de ce travail a pu être réalisée grâce à la gentillesse de Mlle Alègre qui a commandé, sans relâche et avec le sourire, des tonnes d'articles de « Geophysics ».

Je remercie M. Campillo (LGIT), F. Glangeaud (CEPHAG) et F. Clément (INRIA) pour leurs nombreuses remarques constructives et sans lesquelles ce travail n'aurait pu aboutir.

Je remercie également tous les membres de l'Ecole des Mines d'Alès qui ont su mettre à ma disposition leur gentillesse, leur sourire et leur expérience et en particulier les thésards du laboratoire GERM pour les nombreux déménagements effectués et les caisses déchargées. Ma condition physique en fut grandement améliorée.

Enfin, je remercie P. Andrieux et J.L. Mari d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail ainsi que M. Campillo, D. Jongmans et I. Shahrour d'avoir bien voulu faire partie de mon jury.

Table des matières

INTRODU	CTION	10
CHAPITRI	E 1 : CHOIX DES OUTILS	13
1.1 Sim	IULATION NUMÉRIOUE	
1.1.1	Le tracé de rayons	
1.1.2	Les différences finies	
1.1.3	Les éléments finis	
1.1.4	Décomposition en nombre d'ondes	
1.1.5	Comparaison entre les méthodes	
1.2 INF	LUENCE D'UNE FAILLE SUR LA PROPAGATION D'ONDES	
1.2.1	Modélisation d'une faille	
1.2.2	Etude de failles de grande puissance	
1.2.3	Etude de failles de faible puissance	
1.2.4	Rénartition d'énergie pour une faille	
1.3 RAI	PPELS DE TRAITEMENT DU SIGNAL	
1.3.1	Caractérisation des ondes	
1.3.2	Ramels des principales méthodes de séparation des ondes	
1.4 MÉ	THODES DE CARACTÉRISATION DU MASSIF	
1.4.1	Problèmes inverses	
142	La sismique : caractérisation du massif	
143	Méthodes classiques	
1.1.0	Methodes d'ontimisation	31
145	Comparaison entre les méthodes	
15 CO	NCI USION	33
CHAPITRI	E 2 : SENSIBILITE DES PARAMETRES	
2.1 VA	RIATION DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION	
2.1.1	Réflecteur simple	
2.1.2	Faille de faible puissance	
2.2 ETU	UDE DIRECTE D'UN CAS NUMERIOUE	
2.2.1	Présentation des outils de simulation	
2.2.2	Etude du cas	
2.2.3	Caractérisation numérique des ondes réfléchies	40
2.3 Dé	TERMINATION DU DISPOSITIF OPTIMAL	
2.3.1	Détermination de la fréquence de source optimale	
2.3.2	Position des sources et des récepteurs	46
2.3.3	Mise au point d'un algorithme d'optimisation	
2.3.4	Application simultanée de tous les critères	
2.4 CO		
CHAPITRI	E 3 : STRATÉGIE DE DÉTECTION DES ONDES RÉFLÉCHIES	53
3.1 ETI	UDE NUMÉRIQUE	
3.1.1	Signaux de référence	
3.1.2	Séparation d'ondes	
3.1.3	Etude des temps d'arrivée	
3.1.4	Conclusion	62
3.2 ETT	UDE EXPÉRIMENTALE : GÉOMÉTRIE DU SITE	
3.2.1	Dispositifs expérimentaux	
3.2.2	Présentation des mesures pour les deux sites	
3.3 SÉF	PARATION D'ONDES : ETUDE SUR LE SITE CALPHA1 (TEST I)	
3.3.1	Etude du signal	
3.3.2	Caractérisation des différentes ondes	
3.3.3	Débruitage du signal	
3.3.4	Séparation des ondes	
	1	

3.3.5	Conclusion	71
3.4 Ext	IRACTION D'ONDES : ETUDE SUR LE SITE CALPHA2 (TEST II)	71
3.4.1	Etude du signal	71
3.4.2	Etude du champ direct	72
3.4.3	Etude du champ réfléchi	73
3.4.4	Vérification	75
3.4.5	Vérification de la présence de la faille	76
3.5 CO	NCLUSION	
	E 4 . TOMOC DA BHIE DÉELEVION	80
CHAFIIN	E 4 : TOMOGRATIME REPLEXION	
4.1 Pri	ÉSENTATION DE LA MÉTHODE	81
4.1.1	Méthode proposée	81
4.1.2	Amortissement et lissage	85
4.1.3	Etude de la convergence	86
4.1.4	Etude de la résolution	86
4.1.5	Contraintes de la méthode	87
4.2 Ett	UDE SUR MODÈLE	87
4.2.1	Validation du code informatique TOMOREF3D	87
4.2.2	Utilisation des rais droits ou courbes	90
4.2.3	Influence de la régularisation et du choix de la taille de maille	93
4.2.4	Influence du modèle initial	95
4.2.5	Influence de l'optimisation	96
4.2.6	Robustesse au bruit	
4.2.7	Influence du nombre de rayons	
4.2.8	Influence des configurations	
4.2.9	Variations du point de réflexion	
4.3 Ett	UDE EXPÉRIMENTALE	
4.3.1	Résultats sur le site Calpha1	
4.3.2	Etude bidimensionnelle sur le site Calpha2	
4.4 Ten	MPS DE CALCUL	
4.5 CO	NCLUSION	111
CHAPITRI	E 5 · FTUDE D'UN CAS INDUSTRIEL	
5.1 Pri	ÉSENTATION DE L'ÉTUDE	
5.1.1	Géologie de la mine	
5.1.2	Présentation du site	
5.2 STR	RATÉGIE D'ÉTUDE	
5.2.1	Position des sources et récepteurs	
5.2.2	Mode opératoire	
5.3 ETU	UDE DES SIGNAUX	
5.3.1	Etude qualitative	
5.3.2	Détection des ondes réfléchies	
5.4 INV	VERSION	
5.4.1	Modèle de vitesse	
5.4.2	Position du réflecteur	
5.5 VA	LIDATION A POSTERIORI	
5.6 CO	NCLUSION	
CONCLUS	5ION	
ANNEXE A	A : ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES	
ANNEXE I	B : VALIDATION DE CALC3D	
ANNEXE (C : TYPE DE SOURCE UTILISEE	
ANNEXE I	D : SOUKCE DOWNDIP ET UPDIP	
ANNEVE	E · ONDES D'INTERFACE	120
AININEAE I	G , ONDES D HNTERFACE	

ANNEXE F : ALGORITHME DU RECUIT SIMULE	139
ANNEXE G : OPTIMISATION SUR CHAQUE CRITERE	140
ANNEXE H : PRESENTATION STRUCTURALE DES SITES CALPHA	
ANNEXE I : DESCRIPTION ACOUSTIQUE DES SITES CALPHA	151
ANNEXE J : POINTÉ EN CALPHA2	153
ANNEXE K : SIMULATION NUMERIQUE	154
ANNEXE L: MESURE DES MODULES ELASTIQUES	155
ANNEXE M : INTERFACE HOMME-MACHINE	
ANNEXE N : UTILISATION D'INFORMATIONS A PRIORI	159
ANNEXE O : PRESENTATION DE LA MINE DU BURG	160
ANNEXE P : POINTS DE REFLEXION OBTENUS	164
BIBLIOGRAPHIE	165

à Séverine

à ma famille

à l'ASM

PRINCIPALES ABBREVIATIONS

ACP	Analyse en Composantes Principales
agc	Automatique Gain Contrôle (correspond au contrôle automatique de gain)
ART	Algebric Reconstruction Technique
AVO	Amplitude Versus Offset (étude des amplitudes en fonction de l'offset)
BPT	Back-Projection
CDP	Common Depth Point (regroupement par profondeur commune)
CQ	Convolutional Quelling
PSV	Profil Sismique Vertical
SIRT	Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
SMF	Spectral Matrix Filtering (matrice spectrale)
TKL	Transformée de Karhunen-Loève
TF	Transformée de Fourier
TFI	Transformée de Fourier inverse
THilb	Transformée de Hilbert
VSP	Vertical Seismic Profiling (correspond au PSV)

PRINCIPALES NOTATIONS

А	Amplitude
dB	Décibel
d	Données, d[j] correspond au temps de propagation du rayon j
E ₀	Fonction source
FK	Double transformée de Fourier en temps et en espace
f _d	Fréquence dominante
G	Relation liant le modèle de vitesse aux données : Gm=d
Hz	Hertz
j	Imaginaire pur (j²=-1)
k	Nombre d'onde
kHz	Kilo Hertz
λ	Longueur d'onde
m	Modèle de vitesse, m[i] correspond à la lenteur dans la cellule i
Р	Onde de compression
PP	Onde de compression correspondant à la réflexion d'une onde de compression incidente
PS	Onde de cisaillement correspondant à la réflexion d'une onde de compression incidente
Q	Facteur de qualité
Qi	Facteur de qualité dans la couche i
ρ	Densité
s	Seconde
S	Onde de cisaillement
T _c (P,Q)	Temps de propagation de P à Q calculé à partir du modèle courant
T _{cara}	Temps caractéristique du problème
$T_m(P,Q)$	Temps de propagation de P à Q mesuré expérimentalement
V	Vitesse
Vi	Vitesse dans la couche i
Vp	Vitesse des ondes P
Vs	Vitesse des ondes S
ω	Pulsation
Z	Impédance acoustique

GLOSSAIRE GEOLOGIQUE ET MINIER

Boudinage	Tronçonnage par étirement d'une couche rigide entre deux couches plastiques avec
	formation de boudins : prismes allongés selon la contrainte moyenne.
Brèche	Toute roche formée pour 50% au moins d'éléments anguleux de roches de dimension
	supérieure à 2 mm.
Encaissant	Terme général désignant les terrains dans lesquels s'est mis en place un massif intrusif ou un
	filon.
Faciès	Catégorie dans laquelle on peut ranger une roche et qui est déterminée par un ou plusieurs
	caractères lithologiques ou paléontologiques.
Faille	Cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées. En pratique, ce terme
	désigne le plus souvent des accidents verticaux ou à pendage fort et n'impliquant pas de
	recouvrement important (cf. figure 1).
Faille normale	Faille pour laquelle le rejet horizontal transversal correspond à une distension (cf. figure 1).
Faille inverse	Faille pour laquelle le rejet horizontal transversal correspond à un raccourcissement (cf.
	figure 1).
Gîte	Gisement. Terme réservé le plus souvent à des masses minérales comportant un ou plusieurs
	métaux susceptibles d'une exploitation.
Mur	Terme de mineur désignant la surface inférieure d'une formation, ou bien les terrains situés
	immédiatement sous elle.
Nodule	Masse globuleuse centimétrique à décimétrique se différenciant par sa composition et/ou sa
	structure du reste de la roche qui la contient.
Patine	Altération superficielle des roches, dont la teinte est souvent très différente de celle de la
	cassure fraîche.
Puissance	Epaisseur d'une couche ou d'une série de couches mesurée perpendiculairement à la
	stratification.
Rejet	Ampleur du déplacement (cf. figure 1).
Remplissage	Matériaux contenu dans une faille.
Rubannement	Aspect de la tranche d'une roche composée d'alternances de lits de couleurs différentes.
Toit	Terme de mineur désignant la surface supérieure d'une formation, ou bien les terrains le
	surmontant immédiatement.



- - 4 : Décrochement

Introduction

Le besoin de développer les reconnaissances à l'avancement dans la construction des ouvrages souterrains se fait particulièrement, mais non exclusivement, sentir pour le creusement dans les terrains difficiles pour lesquels de nouvelles techniques mécanisées sont mises en œuvre (tunneliers à front pressurisé, présoutènement...). Si les reconnaissances avant creusement sont indispensables, elles ne peuvent être aussi complètes et précises qu'une étude à très haute résolution effectuée à l'avancement. Celle-ci permet d'améliorer la conduite du chantier, en localisant à l'avance les hétérogénéités géologiques, et en adaptant les outils de creusement et les caractéristiques du soutènement à la nature et aux propriétés réelles du terrain rencontré. Les reconnaissances à l'avancement contribuent ainsi à diminuer les risques liés aux travaux souterrains, en évitant les accidents de travail (Saini et al., 1989) et les incidents de chantier qui introduisent des interruptions coûteuses (Tunnels et Ouvrages Souterrains, 1992).

L'objectif du présent mémoire est de fournir un nouvel outil de reconnaissance à l'avancement. Ces méthodes sont définies comme « l'ensemble des méthodes mises en œuvre en totalité ou en partie depuis le tunnel, pendant la durée du chantier, pour atteindre l'un des objectifs suivants » (Plan Génie Civil, 1997) :

- localiser avec précision les hétérogénéités géologiques ou anthropiques, de dimension métrique à l'avant du front de taille,
- déterminer avec précision les paramètres géotechniques du terrain, utiles à la définition de la stabilité du front de taille et à l'adaptation en temps réel des moyens mis en œuvre pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

Ces méthodes doivent respecter le cahier des charges suivant (Inazaki, 1995) :

- fiabilité des résultats : elles doivent permettre de répondre aux questions ou doutes que peut avoir tout maître d'œuvre sur la nature des terrains et leur comportement durant la construction et tout maître d'ouvrage sur le comportement à long terme et donc sur la sécurité de l'ouvrage en service,
- rapidité : leur exécution ne doit pas entraver le déroulement du chantier et ne nécessiter ni moyens lourds ni arrêts de chantier,
- robustesse : elles doivent tenir compte des contraintes d'utilisation en milieu perturbé (vibrations, température...) et agressif (poussière, venues d'eau...).

En un mot, elles doivent pallier à l'inadaptation ou à la lourdeur des moyens classiques de géophysique de surface à grande échelle employés classiquement au stade des études d'avant-projet.

L'obtention d'une bonne image du sous-sol est liée au type de propriétés des roches rencontrées. Les démarches suivantes sont utilisées (la liste n'est pas exhaustive) :

- La gravimétrie consiste à mesurer les variations relatives de la composante verticale de l'attraction de la pesanteur (Tunnels et Ouvrages Souterrains, 1992). S'il existe une anomalie de masse à proximité du point de mesure, elle présentera un défaut ou un excédent par rapport au point voisin. Les dimensions de l'hétérogénéité doivent cependant être relativement importantes pour que l'anomalie gravimétrique soit décelable.
- 2. Le cylindre électrique nécessite un unique forage pouvant être effectué à l'avant d'un tunnelier. La sonde de mesure est constituée d'électrodes qui jouent alternativement le rôle d'électrodes d'injection de courant et de mesure de potentiel. En milieu rocheux, réputé homogène, toute zone conductrice est suspectée car susceptible, le plus souvent, de poser un problème à l'excavation : les zones faillées, argilisées, fissurées karstiques se traduisent toutes par une baisse notable de résistivité (Corbetta et al., 1994).
- 3. Le radar (Leparoux, 1997 ; Corin, 1996) utilise les propriétés diélectriques des roches ; une impulsion électromagnétique est émise par une antenne et se propage dans les matériaux. Dès qu'elle rencontre un changement dans les propriétés diélectriques du milieu, une partie de cette onde est réfléchie et l'autre partie est transmise. Ces variations dans les propriétés diélectriques correspondent en particulier à des anomalies du sous-sol. Par exemple, un vide ou l'interface entre deux matériaux provoque la réflexion d'une partie de l'énergie vers le récepteur. Après étalonnage, le temps écoulé entre l'émission et la réception de l'écho radar permet de calculer la distance entre le récepteur et la cible.
- 4. La sismique utilise les propriétés acoustiques de la roche ; une onde mécanique est générée par une source de type explosif. Des variations de milieu (fractures, failles...) se traduisent par des variations

de vitesse ou des réflexions. L'étude des temps d'arrivée et/ou des amplitudes des ondes permet de caractériser le massif. Cette méthode nécessite un forage perpendiculaire au front de taille et utilise les techniques issues de l'industrie pétrolière pour détecter d'éventuelles hétérogénéités (Sattel et al., 1992 ; Hasegawa et al., 1993).

La gravimétrie est efficace mais nécessite un contraste de densité important. En outre, des excédents et des défauts de densité peuvent s'éliminer mutuellement. Enfin, depuis un forage, cette approche ne permet pas d'obtenir une représentation tridimensionnelle du sous-sol et ne peut donc être utilisée.

Le champ d'investigation du cylindre électrique est un cylindre de diamètre de l'ordre de 10 m centré le long du forage. Cette méthode est très rapide, simple d'utilisation, et s'est avérée efficace pour détecter des anomalies conductrices. Cependant, les résultats obtenus sont axisymétriques, et une localisation angulaire ne peut être effectuée qu'avec utilisation de plusieurs forages ce qui semble trop contraignant.

Le choix de la méthode sismique ou du radar dépend du pouvoir de résolution désiré. Le radar est utilisé sur des échelles très petites (quelques mètres) dans des milieux résistifs, les méthodes sismiques sont plutôt utilisées sur des échelles décamétriques (Nord et al., 1989). En effet, si le radar a un pouvoir de résolution décimétrique, l'onde électromagnétique est fortement atténuée par des milieux conducteurs et son utilisation est à proscrire dans de telles géologies (Pierson et al., 1995). L'objectif étant de fournir une méthode rapide et pouvant s'adapter dans tous les milieux, la méthode sismique nous a semblé préférable. En outre, l'utilisation de sources hautes fréquences (de l'ordre du kilo Hertz) permet d'obtenir une résolution métrique.

La méthode choisie est semblable à celle proposée par Sattel et al. (1992). Des sources sont positionnées sur le front de taille et le parement, une flûte d'hydrophones est insérée dans un forage creusé en avant du front de taille (figure 2).



Figure 2 : Dispositif proposé

Les objectifs de cette thèse sont la caractérisation du massif en avant du front de taille et la détection puis la localisation d'hétérogénéités planes par morceaux, i.e. les failles. Nous étudierons pour cela les ondes de compression directes (P) et réfléchies (PP).

Ce projet a été découpé en trois thèmes de recherche (Celse (b), 1999) :

- 1. Etude de l'influence d'une faille sur les ondes sismiques. L'objectif est double : d'une part, déterminer quelles seront les failles les plus difficilement détectables et d'autre part, estimer les caractéristiques du dispositif optimal.
- 2. Détermination d'une stratégie optimale de détection. Les ondes réfléchies seront en effet de faible amplitude et leur détection sera délicate car elles seront noyées dans le bruit ambiant.
- 3. Caractérisation du massif. A partir des temps d'arrivée des différentes ondes détectées, un algorithme d'inversion permettra la détermination de la structure tridimensionnelle du massif.

Le présent mémoire a ainsi été décomposé en plusieurs chapitres correspondant à chacun des thèmes.

La première partie correspond à l'étude bibliographique sur le sujet. Après une présentation des différents algorithmes de simulation d'ondes, les travaux effectués dans chacun des thèmes du projet seront explicités. Ils permettront de préciser la démarche de recherche choisie et justifieront l'utilisation d'un forage.

La seconde partie a pour objet l'étude de l'influence d'une fine couche sur les ondes sismiques. Une étude de sensibilité des attributs sismiques sera effectuée à l'aide de simulations numériques. Elle permettra à la fois de déterminer les caractéristiques des failles les plus difficilement détectables (puissance et nature de la faille par rapport à l'encaissant) et de dresser les caractéristiques optimales du dispositif (position et fréquence des sources, orientation du forage...). Une méthode de détermination automatique du dispositif sera alors proposée.

La troisième partie est l'application des techniques issues de l'industrie pétrolière pour la caractérisation des ondes sur des signaux numériques et expérimentaux. Elle permettra de comparer les méthodes de séparation d'ondes les plus utilisées dans l'industrie pétrolière. L'objectif est d'élaborer une stratégie pour la détection de failles.

La quatrième partie présente une méthode d'inversion. L'objectif est de caractériser finement le massif à partir d'un dispositif expérimental optimal (déterminé à l'aide des études présentées au chapitre 2) et de la détection des ondes réfléchies (réalisée grâce aux méthodes présentées au chapitre 3). Cet algorithme sera décrit en détail à partir des différents travaux théoriques puis testé sur des exemples numériques et expérimentaux qui montreront son efficacité et ses limites.

La cinquième partie présentera la mise en œuvre de la méthode sur un cas concret avec un objectif industriel. Elle permettra de confirmer les résultats développés dans les parties précédentes.

Chapitre 1: Choix des outils

Objectifs

L'objectif de ce premier chapitre est de réaliser une étude bibliographique sur les différents travaux effectués dans le cadre de la reconnaissance à l'avancement. Ceci nous permettra de choisir les outils à utiliser et de proposer une stratégie de recherche pour mener à bien ce projet.

Démarche choisie

Une étude préliminaire (décrite en introduction) a montré que, compte-tenu du cahier des charges imposé, l'utilisation des ondes sismiques semblait optimale. Dans cette partie, nous allons nous inspirer des travaux effectués en sismique pétrolière pour élaborer le principe des méthodes permettant de remplir les objectifs cités en introduction.

Résultats

Nous avons montré que l'ambiguïté vitesse-profondeur imposait l'utilisation d'un forage en avant du front de taille. La stratégie de recherche proposée est alors la suivante :

- 1. Etude des variations du coefficient de réflexion pour des failles de faible et de grande puissance. Ceci permettra de déterminer la nature des failles les plus difficilement détectables.
- 2. Détermination des caractéristiques des ondes réfléchies sur les failles. Ceci sera réalisé en utilisant des simulations réalisées avec un logiciel de décomposition en nombre d'ondes (Axitra).
- 3. Etude des méthodes de séparation d'ondes pour détecter d'éventuelles ondes réfléchies. Les méthodes bidimensionnelles devraient être les plus efficaces.
- 4. Transformation des informations apportées par la détection des différentes ondes (i.e. temps d'arrivée) en informations structurales utiles au conducteur de travaux (module élastique, localisation des différentes interfaces). Ceci sera effectué grâce à la tomographie réflexion.

L'objectif de la géophysique a longtemps été la détection de minerais ou d'hydrocarbures (Henry, 1994). Les profondeurs investiguées étaient kilométriques et les méthodes utilisaient des hypothèses en accord avec les dispositifs choisis (milieu tabulaire, faible angle d'incidence...). A l'inverse, pour les reconnaissances à l'avancement en ouvrages souterrains, les longueurs d'investigation sont plus faibles (décamétriques) et les géométries très complexes. L'objectif du présent chapitre est de recenser les différents travaux pouvant être appliqués dans ce domaine. Il est composé de quatre parties :

- 1. Présentation des différents algorithmes de propagation d'ondes. Notre projet nécessite en effet l'utilisation de simulations numériques qui peuvent être entachées d'artefacts, aussi il est essentiel de les déterminer au préalable.
- 2. Présentation des différents travaux théoriques étudiant le comportement des ondes au voisinage d'une faille, c'est à dire une couche de faible puissance présentant un contraste d'impédance acoustique avec l'encaissant.
- 3. Présentation et comparaison des algorithmes utilisés dans l'industrie pétrolière permettant la séparation des ondes.
- 4. Présentation et comparaison des différentes méthodes de caractérisation du massif en insistant sur les problèmes classiques liés à une inversion (convergence, stabilité...).

1.1 SIMULATION NUMERIQUE

Les méthodes classiques de simulation de la propagation des ondes sont issues d'une description élastique (ou viscoélastique). Le tracé de rayons utilise une approximation haute fréquence. Les différences finies et éléments finis cherchent à résoudre l'équation posée soit par approximation de chacun des termes (différences finies) soit par une méthode d'optimisation (éléments finis). La décomposition en nombre d'ondes utilise le principe d'Huygens.

1.1.1 Le tracé de rayons

L'utilisation de la théorie de Fourier montre que le champ d'onde peut s'écrire sous la forme (Aki et al., 1980) :

$$E(x, \omega, T) = e^{i\omega T} \sum_{n} A_{n}(x) e^{-in\omega T}$$
(1.1)

- avec : E champ d'ondes,
 - T fonction temps de trajet,
 - ω pulsation,
 - x paramètre d'espace,
 - A amplitude.

Dans le cadre du tracé de rayons, une approximation haute fréquence de la série précédente est utilisée :

$$E(x,t)=E_0(t-T)f(x)$$
 (1.2)

La fonction temps de trajet T est régie par l'équation Eikonal :

$$(\nabla T)^2 = \frac{1}{V^2} = n^2$$
(1.3)

avec : V vitesse de propagation dans le milieu, n lenteur du milieu. Le front d'onde est la surface pour laquelle T est constant. Un rai est une trajectoire orthogonale au front d'onde. Le vecteur lenteur parallèle au rai est alors défini par :

$$S = \nabla T$$
 (1.4)

et les équations du rai par :

$$S = n^{2} \frac{dx}{dT} \text{ et } n \frac{d\left[n^{2} \frac{dx}{dT}\right]}{dT} = \nabla n$$
(1.5)

L'équation aux dérivées partielles est ainsi transformée en équations différentielles ordinaires du premier ordre. Elles sont résolues par des algorithmes classiques de type Runge-Kutta (Plessix, 1996).

Les approximations précédentes sont justifiées si (Plessix, 1996) :

- 2πfT_{cara}>>1 avec T_{cara} le temps caractéristique du problème (pour notre projet, il correspond au temps de trajet dans la faille) et f la fréquence. En pratique, il suffit que ce coefficient soit supérieur à 3 (Bleinstein, 1986). Cette condition peut également s'écrire : 2πr/λ>>1, avec λ : longueur d'onde et r : distance caractéristique du problème (i.e. puissance de la faille).
- 2. Les variations de lenteur sont faibles.
- 3. Les amplitudes ne sont pas dépendantes de la fréquence (pas de dispersion viscoélastique).

1.1.2 Les différences finies

La méthode des différences finies approche les opérations de dérivation par des opérateurs aux différences. Par exemple, l'équation des ondes acoustiques en dimension 1 est :

$$\frac{1}{VZ}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = E_0(t)$$
(1.6)

avec : V vitesse des ondes de compression,

Z impédance acoustique,

 $E_0(t)$ fonction source,

p pression acoustique.

Les dérivées secondes sont approchées par un développement en série de Taylor à l'ordre 2, et la relation suivante est obtenue :

$$p_{i}^{n+1} = \frac{1}{VZ} \frac{\Delta t^{2}}{\Delta x^{2}} \left(p_{i+1}^{n} + p_{i-1}^{n} - 2p_{i}^{n} \right) - \left(p_{i}^{n-1} - 2p_{i}^{n} \right)$$
(1.7)

avec : $p^{n_{i}}$ pression acoustique au temps $n\Delta t$ et à la position $i\Delta x$.

Les dimensions spatiales et temporelles sont discrétisées et la connaissance des valeurs initiales permet de déterminer la valeur de la solution en tout point $i\Delta x$ et au temps $n\Delta t$.

Cette méthode s'adapte aux géométries du problème par le jeu des pas d'échantillonnages spatiaux et temporels. Elle est ainsi bien adaptée aux problèmes de propagation en milieux hétérogènes (Virieux, 1984).

1.1.3 Les éléments finis

Au contraire des différences finies, la méthode des éléments finis résout le problème par une suite d'approximations de la solution recherchée et non pas par la résolution d'équations. L'écriture des équations constitutives sous forme d'une formulation variationnelle permet de se ramener à un problème d'optimisation.

Pour la propagation des ondes et pour un champ de déplacements virtuels cinématiquement admissibles ∂u , la formulation variationnelle est (Zienkiewicz, 1977) :

$$\int_{\Gamma_{T}} \partial u T d\Gamma - \int_{\Omega} \varepsilon(u) \sigma d\Omega - \int_{\Omega} \partial u \rho \frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} d\Omega = 0$$
(1.8)

- avec : σ tenseur des contraintes,
 - ε tenseur des déformations,
 - ρ densité,
 - Ω domaine d'étude,
 - Γ_{T} frontière de Ω sur laquelle sont imposées les forces de surface T(x,t).

Le domaine Ω est discrétisé en domaines élémentaires et le problème est résolu dans un espace donné. En utilisant une description élastique pour la propagation d'ondes, et après assemblage, le système d'équations suivant est obtenu (Moreaux, 1997) :

$$M\ddot{U} + KU = F \tag{1.9}$$

avec : M matrice de masse, K matrice de rigidité,

F vecteur force,

U vecteur déplacement aux nœuds.

L'objectif est ensuite de déterminer le vecteur déplacement U.

1.1.4 Décomposition en nombre d'ondes

La méthode utilise le principe d'Huygens : « le champ d'onde enregistré en un point P est la somme du champ direct et de tous les champs diffractés par chacun des points du réflecteur ». Ces points sont alors considérés comme des sources virtuelles (figure 1.1).

Le champ d'ondes enregistré en P est alors égal à :

$$V(P) = V_0(P) + \int_{S} \sigma(Q)G(P,Q)dS$$
 (1.10)

avec : Q un point de la surface S,

- S surface correspondant au réflecteur,
- V₀ champ direct émis par la source et enregistré en P,
- σ fonction correspondant à l'énergie diffractée en Q,
- G fonction de Green (fonction modélisant le champ d'onde émis en Q et observé en P).

La méthode suppose une périodicité spatiale L dans la direction x et utilise une représentation discrète pour la fonction de Green (Kenett et al., 1979 ; Bouchon, 1981) :

$$G(P,Q) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(k_{m}, \omega, z_{P} - z_{Q}) e^{-ik_{m}(x_{P} - x_{Q})}$$
(1.11)

avec: x axe horizontal,

- z axe vertical,
- ω pulsation,
- k_m m^{kième} composante de l'onde et $k_m=2\pi m/L$.

Le programme utilisé ici (Axitra) suppose une représentation tabulaire des différents réflecteurs, le terme $g(k_m, \omega, z_p-z_0)$ dans l'équation (1.11) inclut alors les réflexions sur les diverses couches sous la forme d'une

matrice de réflectivité (Kenett et al., 1979 ; Muller, 1984). Ce programme a été développé au sein du LGIT (Laboratoire de Géophysique et de Tectonophysique Interne de Grenoble) par O.Coutant.



Figure 1.1 : Présentation du principe d'Huygens

1.1.5 Comparaison entre les méthodes

Le tracé de rayons ne permet pas de prendre en compte la dispersion viscoélastique (cf. paragraphe 2.3). En outre, dans le cadre des reconnaissances à l'avancement, les longueurs d'ondes utilisées sont de l'ordre de grandeur de la longueur caractéristique (i.e. la puissance (épaisseur) de la faille). Une telle modélisation ne pouvait donc pas être employée, car des simulations seront utilisées pour déterminer le comportement des réflexions sur chacune des deux interfaces de la faille (cf. paragraphe 2.2).

Les différences finies et éléments finis sont très utilisés car ils permettent de simuler avec précision les différentes ondes en présence. Cependant, l'étude portera sur des signaux de haute fréquence (de l'ordre du kilo Hertz) ce qui implique un maillage très fin. Semblat (1998) préconise en effet de choisir un pas de maille de l'ordre du dixième de la longueur d'onde ce qui implique une taille de maille de l'ordre de 10 cm sur des longueurs pluri-décamétriques. Ceci induit des tailles de matrices qui ne sont pas encore compatibles avec la technologie actuelle des ordinateurs. En outre, le choix des conditions aux frontières est un problème délicat à résoudre. Enfin, ces méthodes introduisent des instabilités numériques et sont délicates à manipuler (Semblat, 1999).

La méthode de décomposition en nombre d'ondes est moins sensible aux problèmes de fréquence de sources que les autres méthodes. Elle permet de modéliser la dispersion visco-élastique et de tenir compte des multiples et des conversions d'ondes. Elle a donc été choisie.

1.2 INFLUENCE D'UNE FAILLE SUR LA PROPAGATION D'ONDES

Pour étudier l'influence d'une faille sur la propagation d'ondes, nous allons d'abord la modéliser puis nous présenterons les différents travaux théoriques connexes au sujet.

1.2.1 Modélisation d'une faille

Un des principaux objectifs de ce projet étant la détection et la localisation de failles, des simulations numériques sont indispensables pour étudier le comportement d'une onde dans un massif avec faille (problème direct). Dans cette modélisation, l'hétérogénéité est représentée de la façon suivante : une fine couche comprise entre deux milieux homogènes et dont la nature élastique est différente de celle de l'encaissant (figure 1.2).

On peut distinguer deux types de failles :

- le milieu 3 est différent du milieu 1,
- le milieu 3 est égal au milieu 1.



Figure 1.2 : Modèle choisi

1.2.2 Etude de failles de grande puissance

Si la puissance de la faille est très grande (par rapport à la longueur d'onde), il n'y a pas d'interférences entre les ondes réfléchies sur les premières et secondes interfaces. On ne tient alors compte que de la première réflexion.

Lorsqu'il y a présence d'une seule interface, les rapports d'amplitudes entre les différentes ondes (coefficient de réflexion) sous incidence normale sont (pour une onde P) :

$$R = \frac{A_r}{A_i} = \frac{V_r \rho_r - V_i \rho_i}{V_r \rho_r + V_i \rho_i}$$
(1.12)

avec : Ar amplitude de l'onde réfléchie,

- A_i amplitude de l'onde incidente,
- Vr vitesse dans le milieu réfléchissant,
- V_i vitesse dans le milieu incident,
- ρ_r densité dans le milieu réfléchissant,
- ρ_i densité dans le milieu incident.

Lors d'une incidence oblique, les coefficients de réflexion et de transmission sont donnés par les équations de Zoeppritz (1919) (figure 1.3).

$$\begin{aligned} -A_0 + A_1)\cos(\theta_1) - B_1\sin(\delta_1) &= -A_2\cos(\theta_2) - B_2\sin(\delta_2) \\ A_0 + A_1)\sin(\theta_1) + B_1\cos(\delta_1) &= A_2\sin(\theta_2) - B_2\cos(\delta_2) \\ A_0 + A_1)Z_1\cos(2\delta_1) - B_1W_1\sin(2\delta_1) &= A_2Z_2\cos(2\delta_2) + B_2W_2\sin(2\delta_2) \\ -A_0 + A_1)(\beta_1/\alpha_1)W_1\sin(2\theta_1) + B_1W_1\cos(2\delta_1) = -A_2(\beta_2/\alpha_2)W_2\sin(2\theta_2) + B_2W_2\cos(2\delta_2) \end{aligned}$$

- avec : ρ_i densité dans le milieu i,
 - $\lambda_i \qquad \text{ longueur d'onde dans le milieu i,} \qquad$
 - α_i vitesse des ondes P dans le milieu i,
 - β_i vitesse des ondes S dans le milieu i,
 - θ_1 angle d'incidence des ondes P,
 - θ_2 angle de réfraction des ondes de compression,
 - δ₁ angle de conversion des ondes de compression en ondes réfléchies de cisaillement,
 - δ_2 angle de conversion des ondes de compression en ondes réfractées de cisaillement,
 - A₀ amplitude des ondes de compression incidentes,
 - A1 amplitude des ondes réfléchies de compression,
 - B1 amplitude des ondes réfléchies de cisaillement,
 - A2 amplitude des ondes réfractées de compression,
 - B2 amplitude des ondes réfractées de cisaillement,
 - Z_i impédance acoustique des ondes de compression dans la couche i ($Z_i=\rho_i\alpha_i$),
 - W_i impédance acoustique des ondes de cisaillement dans la couche i ($W_i=\rho_i\beta_i$).



Figure 1.3 : Equations de Zoeppritz

L'étude de l'évolution de l'amplitude en fonction du déport : AVO (Amplitude Versus Offset) permet d'accéder indirectement au coefficient de Poisson et d'obtenir des informations quantitatives sur les paramètres pétrophysiques des milieux traversés.

De nombreuses recherches sont effectuées en ce sens (on citera par exemple : Widmaier et al., 1996) car cette analyse permet d'estimer la nature des milieux réfléchissants. Cette équation est néanmoins difficilement exploitable et de nombreux auteurs ont alors proposé une version simplifiée des équations de Zoeppritz. Shuey (1985) propose ainsi l'approximation suivante valable pour des angles d'incidence inférieurs à 30°:

$$R(\theta) = A + B\theta^2$$

avec : θ angle d'incidence de compression,

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right),$$

$$B = AP,$$

$$P = \left[Q - \frac{2(1+Q)(1-2\sigma)}{1-\sigma} \right] + \frac{\Delta \sigma}{R_0 (1-\sigma)^2},$$

$$Q = \frac{1}{1 + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta \alpha / \alpha}}.$$

Si les variations de densité sont négligeables et si le coefficient de Poisson reste constant et égal à 0.25, alors Q=1, P=-5/3, et la variation d'amplitude en fonction de l'angle d'incidence est de la forme : $(1-2.66*\theta^2)$ (figure 1.4). Un angle d'incidence inférieur à 20° permet donc de garantir des réflexions suffisamment énergétiques pour pouvoir être détectées.



Figure 1.4 : Variation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence

1.2.3 Etude de failles de faible puissance

Très peu d'études sismiques ont été effectuées pour déterminer la réponse d'une fine couche dans un milieu homogène, c'est à dire lorsqu'il y a interférences entre les ondes réfléchies sur les interfaces. La définition d'une fine couche se pose tout d'abord. On admet généralement (Lavergne, 1987) que lorsque la puissance d'une couche est supérieure au quart de la longueur d'onde, il n'y a pas d'interférences entre les ondes réfléchies sur la première et la seconde interface. On n'utilise alors que la première réflexion.

Lorsque la puissance de la faille est inférieure à $(\lambda/4)$, Widess (1973) a montré que les deux ondes réfléchies interfèrent et que l'amplitude maximale de l'onde réfléchie est donnée par :

$$R=4\pi b/\lambda \tag{1.14}$$

avec : b épaisseur de la faille,

- λ longueur d'onde incidente,
 - R quotient entre l'amplitude de l'onde réfléchie et l'amplitude de l'onde transmise.

Ce phénomène d'interférence entre les deux ondes qui induit une onde de plus forte amplitude est appelé l'effet Tuning.

1.2.4 Répartition d'énergie pour une faille

En utilisant une description acoustique, Koefoed et al. (1980) ont défini le coefficient de réflexion et de transmission pour une fine couche :

$$A_{r} = \left[\frac{r_{1} + r_{2}e^{-2j\omega\tau}}{1 + r_{1}r_{2}e^{-2j\omega\tau}}\right]A_{i} \quad \text{et} \quad A_{t} = \left[\frac{(1 + r_{1})(1 + r_{2})e^{-2j\omega\tau}}{1 + r_{1}r_{2}}r_{2}\right]A_{i}$$
(1.15)

avec : τ temps de trajet dans la faille,

A_r amplitude de l'onde réfléchie,

At amplitude de l'onde transmise,

A_i amplitude de l'onde incidente,

- j imaginaire pur (j²=-1),
- r_i coefficient de réflexion sous incidence normale sur la i^{ème} interface (cf. équation 1.12).

Cette description permet donc de prendre en compte l'interférence entre les deux ondes réfléchies et montre la relation entre le coefficient de réflexion global et la fréquence dominante du champ incident.

Après avoir défini le comportement théorique des différentes ondes réfléchies sur la faille, les algorithmes de traitement du signal vont être présentés. Ils permettent de séparer ces ondes du bruit ambiant.

1.3 RAPPELS DE TRAITEMENT DU SIGNAL

Les signaux sismiques sont composés d'ondes (dispersives ou non) et de bruit. Les techniques de traitement du signal sont utilisées d'une part pour éliminer le bruit incohérent et d'autre part pour séparer les différentes ondes présentes. Pour déterminer l'attribut sismique le plus sensible aux failles, les techniques de caractérisation des ondes vont être présentées. En outre, pour localiser les variations de cet attribut, les méthodes de séparation d'ondes seront également décrites puis comparées.

1.3.1 Caractérisation des ondes

a) Espace de Fourier

Transformée de Fourier

La transformée de Fourier est une comparaison de la fonction h(t) avec respectivement $cos(2\pi ft)$ et $jsin(2\pi ft)$. Ces comparaisons s'effectuent en calculant le produit de ces fonctions trigonométriques avec h(t). Quand, à une fréquence donnée, h(t) « ressemble » à un cosinus ou à un sinus, les produits de h(t) par ces fonctions trigonométriques ont une amplitude conséquente, l'effet est intégré dans le temps par le symbole intégral. Une bonne ressemblance à une fréquence apportera une contribution importante. On appelle « spectre d'un signal s » le module de la transformée de Fourier de s.

Mathématiquement, les transformées de Fourier directe et inverse (Papoulis, 1962) sont :

$$TF[h(t)] = H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-2j\pi ft}dt$$

$$TFI[H(f)] = h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{2j\pi ft}df$$
(1.16)

avec : h(t) signal temporel à étudier,

H(f) transformée de Fourier du signal.

La même transformée peut être appliquée en espace, c'est à dire que la variable d'intégration n'est plus le temps mais la variable d'espace, et l'échantillonnage correspond à la position des récepteurs. L'espace FK correspond à une double transformée de Fourier en temps et en espace.

Représentation Temps-Fréquence

Les signaux sismiques sont des signaux non stationnaires : la fréquence varie avec le temps. La transformée de Fourier classique ne donnant qu'une moyenne de ces variations sur une large fenêtre temporelle, des représentations temps-fréquence sont utilisées.

Si le signal est supposé stationnaire sur une courte fenêtre, la transformée de Fourier permet de déterminer la répartition fréquentielle dans cette fenêtre. Celle-ci est ensuite décalée et la représentation tempsfréquence du signal est obtenue.

Mathématiquement, la transformée de Fourier glissante, appelée également transformée de Gabor (Gabor, 1946), est définie par :

$$STFT(\tau,\omega) = \int s(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t}dt$$
(1.17)

avec : s signal temporel,

- w fonction fenêtre,
- ω pulsation,
- τ temps.

Le choix de la fenêtre est très important (Claerbout, 1976) :

- Si la fenêtre a une durée temporelle trop longue, un filtre passe-bande très étroit est alors obtenu : les variations de fréquence sont visualisées mais la résolution temporelle est très faible.
- Si la fenêtre temporelle est trop courte, les variations très rapides de fréquence sont invisibles.

Dans ce projet, les fenêtres choisies sont des Gaussiennes, ce qui semble optimal (Chakraborty et al., 1995).

b) Phase instantanée d'une onde

Dans l'espace temporel, la transformée de Hilbert est définie par :

THilb(t) =
$$\frac{1}{\pi} \operatorname{vp}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathbf{x}(s)}{t-s} ds\right\}$$
 (1.18)

avec : THilb transformée de Hilbert,

vp valeur principale,

x signal temporel étudié.

La phase instantanée d'un signal s est alors (Ville, 1948) :

avec : artan fonction arc tangente.

La transformé de Hilbert d'une fonction s correspond à la même fonction s mais déphasée de 90°.

1.3.2 Rappels des principales méthodes de séparation des ondes

Quand plusieurs ondes interfèrent ou quand le rapport signal sur bruit est insuffisant, l'interprétation et le suivi d'une arrivée sismique sont délicats, l'estimation des attributs liés à une onde est quasi impossible. Il convient donc d'améliorer le rapport signal sur bruit et de séparer les diverses ondes.

a) Amélioration du rapport signal sur bruit

Diverses méthodes sont employées.

Moyenne glissante

C'est une méthode couramment utilisée notamment en sismique de surface : m traces issues de capteurs adjacents sont additionnées avec des coefficients pondérateurs. Le rapport signal sur bruit est ainsi amélioré d'un rapport \sqrt{m} (Forster et al., 1971). Cette méthode est très efficace si les ondes désirées ont été alignées au préalable.

Filtre passe bande

Le filtre fréquentiel passe bande permet de supprimer le bruit dans la gamme de fréquence sélectionnée. Il permet également de séparer deux types d'ondes de bandes de fréquence disjointes. Les ondes de surface sont, par exemple, généralement plus basse fréquence que les ondes de volume (cf. annexe E).

b) Séparation d'ondes

L'extraction des ondes faiblement énergétiques repose sur la méthode suivante :

- 1. Fenêtrage temporel pour minimiser le nombre d'ondes présentes dans la fenêtre temporelle d'étude.
- 2. Filtrage fréquentiel passe-bande pour éliminer une partie du bruit incohérent.
- 3. Alignement de l'onde la plus énergétique.
- 4. Filtrage bidimensionnel pour mettre en exergue la partie cohérente du signal sur l'ensemble des traces.
- 5. Soustraction du signal initial et du signal obtenu en 4.

Le filtrage bidimensionnel effectue un changement de repère qui permet de concentrer les informations relatives à l'onde en un espace le plus réduit possible. Ce changement de repère peut s'effectuer dans divers espaces (FK, espace propre de la matrice de corrélation...).

Filtre Médian

La valeur médiane de N échantillons est définie comme la valeur de l'échantillon de rang (N/2+1) après classement par ordre croissant de l'ensemble des échantillons. Par exemple, pour la suite 3, 5, 1, 9, 2 ; les échantillons classés par ordre croissant sont : 1, 2, 3, 5, 9 et la valeur médiane est : 3.

Un filtre médian d'ordre impair (N+1 échantillons) consiste à remplacer chaque échantillon i par la valeur médiane des i-N/2 à i+N/2 échantillons. Les échantillons de début et de fin ne sont pas modifiés. Ce filtre est très utile pour supprimer des pics isolés. En sismique, il repose sur le principe suivant : un certain type d'ondes est aligné et un filtre médian en espace est appliqué. L'onde mise à plat sera donc renforcée. La soustraction avec le signal initial renforce ensuite les ondes de faible amplitude. Ce filtre peut s'avérer très efficace et est facile d'emploi (Al Fares et al., 1987 ; Ducan et al., 1995).

Filtre FK

La théorie de Fourier (Aki et al., 1980) montre que la transformée FK d'une onde plane stationnaire est une droite d'équation :

k = -F/V (1.20)

avec :	k	nombre d'ondes,
	F	fréquence dominante,
	V	vitesse apparente des ondes.

Les ondes dont les vitesses apparentes sont de signe opposé peuvent ainsi être facilement séparées. Néanmoins, cette méthode suppose implicitement une vitesse apparente des ondes de signe constant sur toutes les traces. Elle ne peut donc pas mettre en évidence d'éventuelles hétérogénéités très marquées.

De nombreux auteurs dont Hardage (1985) déconseillent cette méthode pour estimer les ondes réfléchies à partir d'un PSV (Profil Sismique Vertical) lorsque celles-ci démarrent brusquement d'une trace à l'autre. Elle sera néanmoins très utile lorsque le forage ne rencontrera pas la faille.

Analyse en composantes principales

Le point de départ de l'ACP (Analyse en Composantes Principales) est un ensemble d'individus caractérisé par un nombre élevé de variables quantitatives. La méthode permet de réduire leur nombre en calculant de nouvelles variables appelées composantes principales, décorrélées deux à deux. Les premières composantes sont porteuses des informations communes à l'ensemble des individus (Mari et al., 1998 et annexe A).

On peut effectuer une analyse en composantes principales sur les signaux temporels et sur leur transformée de Fourier.

1. Etude temporelle : transformée de Karhunen-Loève

Dans cette ACP, les variables sont les temps, les individus sont les traces sismiques.

Soit r(t,x) la section sismique, la matrice de covariance est définie par :

$$M = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} r_k r_k^{t}$$
(1.21)

avec : N nombre de traces,

 r_k vecteur colonne dont la i^{ème} composante correspond à la valeur i Δt de la trace k,

M matrice de covariance.

Les éléments de cette matrice sont liés à la valeur des intercorrélations entre traces. Les éléments de ligne j et de colonne k sont la moyenne des autocorrélations de toutes les traces au retard (k-j). Les éléments d'une même diagonale sont donc tous égaux.

La projection de la trace sur les vecteurs propres correspondant aux valeurs propres les plus élevées permet de ne conserver que l'information commune. Cet algorithme est intéressant mais impose de travailler sous incidence normale (Glangeaud et al., 1993). C'est à dire d'effectuer une correction dynamique de manière à ce que les temps d'arrivée de l'onde soient identiques sur l'ensemble des traces. La transformée compense en effet aisément les variations d'amplitude mais pas les variations de phase, ce qui rend en pratique son utilisation délicate lorsque les ondes sont mal alignées.

2. Etude spectrale

Une telle analyse peut également être effectuée en fréquence. Pour améliorer les temps de calcul, les individus correspondent aux fréquences, les variables aux transformées de Fourier des traces. La taille de la matrice est alors égale au nombre de traces et la décomposition spectrale est plus rapide. Cette méthode est efficace si le contenu fréquentiel des ondes est quasi-constant sur l'ensemble des traces. Ceci correspond à des ondes non dispersives ce qui est le cas des ondes volumiques.

Matrice spectrale

A la trace sismique $h_n(t)$ (vecteur colonne) correspond dans l'espace des fréquences la trace $H_n(f)$. En notation vectorielle, la section sismique composée de toutes les traces $h_n(t)$ s'écrit h(t) et dans le domaine des fréquences : H(f).

A une fréquence donnée, le produit H(f)H*(f) est une matrice de rang 1. Après application d'un opérateur de moyenne (Moy), cette matrice est de rang supérieur à 1, elle est dénommée matrice spectrale (Mari et al., 1998) :

$$M(f)=Moy(H(f)H^{*}(f))$$
 (1.22)

avec : f fréquence,

- H(f) vecteur, H_i(f) correspond à la valeur de la transformée de Fourier de la trace i à la fréquence f,
 - * symbole conjugué.

M est une matrice carrée de dimension N (nombre de traces). Elle est composée de tous les autospectres et interspectres possibles entre les diverses traces ; à ce titre, elle contient toutes les informations relatives aux interactions entre traces.

La décomposition en éléments propres de cette matrice et la projection des traces sur l'espace propre correspondant à la valeur propre la plus élevée permet d'améliorer le rapport signal sur bruit.

L'opérateur de moyenne « Moy » est très important car il permet de décorréler les ondes entre elles. Plusieurs types peuvent être utilisés (Glangeaud et al., 1993) :

- 1. La moyenne en fréquence est une moyenne pondérée des fonctions de corrélations.
- 2. La moyenne en distance est une moyenne sur l'ensemble des traces.
- 3. La moyenne d'épreuves est appliquée sur plusieurs tirs effectués avec le même dispositif d'acquisition.

La moyenne en fréquence nécessite un pré-alignement des ondes, elle introduit un « biais » sur les autres ondes à incidence non nulle. La moyenne en distance lisse les fluctuations d'amplitude d'une trace à l'autre (Mari et al. (a), 1994). La moyenne d'épreuves, qui est la plus intéressante, nécessite une redondance d'informations qui n'est pas compatible avec les fortes contraintes temporelles de la reconnaissance à l'avancement.

Dans le cadre de ce projet, les informations recherchées sont les temps d'arrivée, nous avons donc choisi de n'utiliser que la moyenne en distance.

Comparaison entre les méthodes

Pour l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes de séparation, Essebar (1992) tire les conclusions suivantes :

- Pour améliorer le rapport signal sur bruit, la transformée de Karhunen-Loève est utilisée car elle demande un coût de calcul moindre et donne des résultats comparables à ceux obtenus par la matrice spectrale.
- Dans le cas où les deux ondes sont spatialement très éloignées, le filtrage FK ou la matrice spectrale permettent de les séparer. Si les deux ondes ont des bandes disjointes en fréquence, un filtre passebande permet de les séparer.
- Le filtrage FK ne permet pas la séparation de deux ondes très proches. Par contre, il permet de séparer les ondes descendantes et montantes. Il est donc adapté aux traitements de PSV.

Par ailleurs, selon Mari et al. (1997), les méthodes de transformée de Karhunen-Loève et filtre FK doivent être utilisées après alignement de l'onde dominante. Cette opération n'est pas indispensable pour le filtre FK si les ondes considérées sont planes. La matrice spectrale peut être utilisée sans alignement préalable mais son efficacité est alors réduite.

1.4 METHODES DE CARACTERISATION DU MASSIF

Les différentes ondes ayant été caractérisées, le point suivant consiste à traduire l'information apportée par les signaux en une information structurale permettant une description géotechnique du massif. Le problème à résoudre est donc un problème inverse et nous présenterons tout d'abord le formalisme associé.

L'objectif de cette recherche est la détermination de la répartition des vitesses et de la position des réflecteurs. Ces deux grandeurs sont physiquement différentes, et nous présenterons ensuite les différents travaux théoriques montrant le pouvoir de résolution que l'on peut attendre ainsi que les difficultés liées à la résolution d'un problème dépendant de deux inconnues de nature différente.

Nous présenterons puis comparerons enfin les différentes méthodes issues de l'industrie pétrolière. Les méthodes d'inversion se décomposent en deux étapes (Plessix, 1996) : la détermination du champ de vitesse (propagateur) et la localisation des différents réflecteurs (réflectivité). Deux classes de méthodes sont utilisées :

- 1. Après détermination du modèle de vitesse, une opération géométrique transforme les temps d'arrivée en profondeur des réflecteurs. Cette opération suppose un faible angle d'incidence des ondes réfléchies et une répartition tabulaire du milieu. Elle est parfaitement adaptée aux milieux sédimentaires.
- 2. Pour des géométries plus complexes (dôme de sel...), on a recours à des méthodes de minimisation de fonctionnelles. Cette optimisation permet de déterminer simultanément la répartition des vitesses et la position géométrique des réflecteurs.

1.4.1 Problèmes inverses

Une des manières de définir le problème inverse est de définir tout d'abord le problème direct.

Le problème direct consiste à prédire des résultats de mesure sur la base d'hypothèses de comportement théorique (i.e. après modélisation). Soit M l'ensemble des paramètres décrivant les modélisations d'états du milieu réel et D l'ensemble des observables réelles ou calculées (figure 1.5), l'application *Simul* (des paramètres vers les observables) constitue le problème direct, elle peut être composée d'un ensemble de théories plus ou moins complexes, mathématiquement formalisables. Il s'agit d'une simulation de la réalité. Dans ce même contexte, le problème inverse peut être défini comme l'application (*Simul*)⁻¹ reliant les observables aux paramètres. Le fait que le problème direct soit formalisé et résolu avec une certaine précision constitue la première condition nécessaire, mais non suffisante, à l'existence du problème inverse. Dans le cas général, l'application *Simul* n'est pas une bijection et la résolution du problème inverse est plus délicate que la résolution du problème direct.

Quelque soit la méthode envisagée, l'inverseur sera confronté à plusieurs problèmes (Sabatier, 1971 ; Côte, 1988) :

- 1. Existence de la solution : la modélisation indispensable de la réalité est forcément simplificatrice. Le fait qu'aucune solution au sens où nous l'avions défini (modèle) ne corresponde aux données est donc une éventualité (l'application *simul* n'est pas forcément une surjection).
- 2. Unicité de la solution : de nombreux problèmes inverses en géophysique cherchent à reconstituer un paramètre scalaire (vitesse, Q, densité...) à partir d'un nombre fini de mesures imprécises. Le problème est donc profondément sous-déterminé et une infinité de solutions sont alors envisageables (l'application *simul* n'est pas forcément une injection). Des informations supplémentaires sont alors nécessaires de manière à réduire, autant que possible, l'éventail des solutions possibles. Le physicien devra alors admettre que ces classes de solution sont les résultats du problème inverse et qu'une manière élégante de le résoudre consiste à décrire ces classes le plus précisément possible.
- 3. Construction de la solution : cette partie recouvre l'ensemble des algorithmes qui vont faire correspondre des données à des solutions.
- Stabilité de la solution : il conviendra de vérifier que pour de petites variations des données (i.e. bruit), on n'obtient que de faibles variations de la solution (Hadamart, 1902 ; Tikhonov et al., 1976).



Figure 1.5 : Présentation du problème inverse

1.4.2 La sismique : caractérisation du massif

a) Détermination des propriétés mécaniques

Les ondes sismiques correspondent à des ondes mécaniques. L'obtention des vitesses de compression (V_P) et de cisaillement (V_S) permet d'obtenir les paramètres mécaniques classiques :

$$E = \rho V_{S}^{2} \frac{3V_{P}^{2} - 4V_{S}^{2}}{V_{P}^{2} - V_{S}^{2}} \quad \text{et} \quad \nu = \frac{2 - \gamma^{2}}{2 - 2\gamma^{2}}$$
(1.23)

avec : E module d'Young,

- v coefficient de Poisson,
- V_P vitesse des ondes de compression,
- V_s vitesse des ondes de cisaillement,
- γ rapport entre les vitesses des ondes de compression et des ondes de cisaillement,
- ρ densité.

L'estimation des différents paramètres des ondes sismiques permet donc de décrire le massif avec des paramètres plus « parlant » au géotechnicien.

b) Pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution correspond à la possibilité de séparer deux objets très proches. Deux types de pouvoir de résolution sont définis.

Pouvoir de résolution vertical

Le pouvoir de résolution vertical correspond à la possibilité de séparer en profondeur deux horizons, c'est à dire l'épaisseur minimale d'une couche dont on peut distinguer séparément le toit (limite supérieure) et le mur (limite inférieure). Selon Lavergne (1987), il est de l'ordre du quart de la longueur d'onde dans le cas d'un bruit faible, mais peut atteindre la moitié.

Pouvoir de résolution horizontal

Le disque de réflexion de centre S et passant par A et B est appelé : "première zone de Fresnel" (figure 1.6). Deux points de réflexion se trouvant dans cette zone sont considérés comme inséparables.



Figure 1.6 : Zone de Fresnel

Sherrif et al. (1995) ont montré que la largeur de la zone de Fresnel (OA) est :

$$Z_{\rm f} = \sqrt{\left(\frac{Z\lambda}{2}\right)} \tag{1.24}$$

avec λ longueur d'onde,

Z distance de la source à l'objet,

Z_f largeur de la zone de Fresnel.

A titre d'illustration, quelques exemples de Zone de Fresnel sont présentés (avec Z=20 m et V=2500 m/s).

Fréquence (Hz)	500	1000	1500	2000
$Z_{f}(m)$	7	5	4	3.5
λ (m)	5	2.5	1.7	1.25

Tableau 1.1 : Largeur de la zone de Fresnel (m)

En conclusion, la résolution augmente si la fréquence augmente.

1.4.3 Méthodes classiques

L'objectif du présent paragraphe est de dresser un état de l'art des méthodes permettant la caractérisation du massif. Les algorithmes classiquement utilisés en industrie pétrolière se décomposent en deux étapes distinctes :

- détermination du champ de vitesse,
- détermination du modèle structural.

Nous allons tout d'abord préciser les problèmes liés à la recherche simultanée du modèle de vitesse et de la position des réflecteurs.

Une comparaison entre ces méthodes sera ensuite effectuée montrant que la tomographie réflexion semble la plus adaptée pour résoudre le problème posé.

a) Ambiguïté Vitesse Profondeur

Pour la sismique réflexion, deux inconnues majeures doivent être déterminées : le champ de vitesse et la position spatiale des réflecteurs. Ces deux quantités ne peuvent être déterminées séparément. En effet, considérons un réflecteur horizontal situé à une profondeur Z et un dispositif en surface (source S (0;0), récepteur R (X;0)) (figure 1.7).

Le temps de trajet de l'onde réfléchie est alors de :

$$T = \frac{\sqrt{(2Z)^2 + X^2}}{V\sqrt{2}}$$
(1.25)

avec : T temps de propagation,

Z profondeur du réflecteur,

X offset (distance entre la source et le récepteur),

V vitesse.

Si une seule onde est considérée, il est impossible de déterminer à la fois la profondeur Z et la vitesse V, il s'agit de **l'ambiguïté Vitesse-Profondeur**.



Figure 1.7 : Réflexion pour une couche horizontale

Plus précisément, Lines (1993) a montré que pour un offset nul la variation du temps de trajet T en fonction de Z et V est :

$$\frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V} + \frac{4ZdZ}{V^2T^2}$$
(1.26)

avec : dV variation de vitesse, dZ variation de profondeur.

Lorsque l'offset est nul (X=0), il n'y a pas de changement de temps de trajet T pour des couples (Profondeur Z, Modèle de vitesse V) différents. En sismique réflexion, le dispositif expérimental doit donc avoir un offset important et comporter de nombreux récepteurs.

Pour un offset non nul, deux modèles sont indiscernables si la différence des temps de parcours est inférieure à l'erreur de pointé. Si l'offset est faible par rapport à la profondeur du réflecteur, il y a ambiguïté lorsque (Lines, 1993) :

$$\left| \sqrt{T_0^2 + \frac{X^2}{V^2}} - \sqrt{T_0^2 + \frac{X^2}{(V + dV)^2}} \right| < T_e$$
(1.27)

Choix des outils

Un développement limité en X/(VT₀) puis en dV/V permet alors d'obtenir la relation suivante :

$$\frac{X^2}{V^2 T_0} \frac{|dV|}{V} < T_e$$
(1.28)

avec : T_0 temps de trajet sous incidence normale, $T_0=2Z/V=2(Z+dZ)/(V+dV)$,

- T_e erreur de pointé,
 - dV variation de vitesse,
 - X offset.

A titre d'illustration, si l'on considère une variation de vitesse dV=500 m/s, une vitesse V=3000 m/s, une erreur de pointé T_e =0.001 s et un temps de réflexion de T=0.02 s, l'offset minimal est de 32 m. Dans le cadre de travaux souterrains, les contraintes géométriques (diamètre du tunnel) imposent un offset très faible. Le champ de vitesse doit donc être déterminé par une méthode auxiliaire ce qui nécessite l'utilisation d'un forage.

b) Analyse de vitesse

Modèle de vitesse

L'utilisation d'un PSV permet de déterminer la loi T=f(Z) (T : temps de propagation, Z : profondeur). On peut alors déterminer la vitesse d'intervalle V_i par (Mari et al., 1998) :

$$V_{i}(T) = \frac{\Delta Z(T)}{\Delta t(T)}$$
(1.29)

Cette méthode suppose un modèle tabulaire et sans variations latérales de vitesse ; elle reste néanmoins très utilisée notamment pour « caler » la sismique de surface.

Tomographie transmission

La tomographie est une technique permettant de déterminer la structure du sous-sol entre deux réseaux d'émetteurs et de récepteurs. Soit G la relation entre le modèle discret de vitesse m et les temps de propagation t, G peut d'écrire de manière générale :

avec :	G	matrice, G _{ij} correspond à la longueur du rayon i dans la cellule j,
	m	modèle de vitesse, m _j correspond à la lenteur de la cellule j,
	t	temps de propagation, t _i correspond au temps de propagation mesuré du rayon i.

Le calcul de t connaissant G et m constitue le problème direct (cf. 1.4.1). La résolution du problème inverse consiste à déterminer le modèle de manière à ce que les temps d'arrivée obtenus avec le modèle choisi correspondent aux temps de propagation mesurés expérimentalement. Il s'agit d'une méthode d'inversion itérant sur la vitesse du sous-sol de manière à minimiser la norme L_2 entre les temps de parcours des ondes directes mesurées expérimentalement et les temps déterminés à l'aide de simulations numériques (Tarantola et al., 1982 ; Inazaki et al., 1988).

La fonction d'écart est définie par :

$$J(V) = \sum_{i:rayon} (T_m(i) - T_c(i))^2$$
(1.31)

avec : J fonction à minimiser,

- T_m temps de propagation mesurés expérimentalement,
- T_c temps de propagation calculés à partir du modèle de vitesse courant,
- V modèle de vitesse.

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour minimiser cette fonctionnelle :

- 1. Utiliser une approche géométrique itérative. Cette méthode nécessite peu de stockage mémoire.
- 2. Utiliser une méthode de gradient classique. Cette méthode permet alors d'introduire un formalisme rigoureux mais impose le stockage du gradient qui est, pour une inversion tridimensionnelle, une matrice de taille : N³, avec N : nombre de mailles.

Ces deux méthodes sont néanmoins équivalentes, car Ivanson (1983) a montré que lorsque les méthodes géométriques itératives convergent, le résultat obtenu est équivalent à une minimisation par méthodes de gradient. Il existe deux classes de méthodes géométriques :

- 1. Les méthodes non itératives (BPT).
- 2. Les méthodes géométriques itératives (SIRT, ART).

La BPT (Back-Projection) (Oldendorf, 1961, Kuhl et al., 1963) rétropropage directement les observables (i.e. les temps d'arrivée). La reconstruction se fait bloc par bloc. Pour chaque bloc, la vitesse correspond à la vitesse moyenne de tous les rais le traversant. Cette méthode est peu sensible au bruit, mais procure une solution très lissée.

Pour l'ART (Algebric Reconstruction Technique) (Gordon et al., 1970), on calcule pour chaque couple émetteur-récepteur i, le temps d'arrivée : t_{ic} . Chaque rai est alors affecté d'un résidu qui est la différence entre les temps de propagation calculés : t_{ic} et mesurés expérimentalement t_{im} . La reconstruction s'effectue alors rai par rai en minimisant chacun des résidus. L'inconvénient majeur de cette méthode est que le résultat final dépend fortement de l'ordre d'examen des rais (Gautier, 1991).

Pour la SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) (Gilbert, 1972), on calcule également des résidus pour chaque rai à partir d'un modèle initial. Cependant, les rais sont simultanément rétropropagés comme dans la BPT. La correction affectée à chaque bloc tient compte de l'ensemble des rais qui le traversent. Cette méthode est donc moins sensible au bruit que l'ART.

Pour minimiser les temps de calculs, on suppose a priori connue la forme des rayons (Côte, 1988). Deux approches peuvent être utilisées :

- 1. Utiliser des rayons droits (approximation de rang 1) qui suppose un milieu macroscopiquement homogène.
- 2. Utiliser des rayons en arcs de cercle (approximation de rang 2) qui suppose un milieu à gradient homogène.

D'autres formes de rayons ont été proposées (Bourge 1990) mais Gautier (1991) a montré que l'utilisation de rayons en arcs de cercle permettait d'obtenir des images avec une précision suffisante.

Les méthodes tomographiques appartiennent à la classe des problèmes inverses ; leur efficacité est fonction de la quantité et de la qualité des informations apportées. Pratiquement, pour des inversions géométriques, trois paramètres permettent de quantifier a posteriori cette information :

- 1. Le nombre de rayons par cellules : plus le nombre de rayons est élevé plus l'information apportée est grande.
- 2. L'ouverture angulaire des rayons : des rayons parallèles ou presque parallèles apportent la même information.
- 3. La longueur des rayons : la valeur de la surface de Fresnel est proportionnelle au trajet de l'onde (équation 1.24).

Une analyse a posteriori doit donc être effectuée pour estimer la résolution obtenue et détecter tout artefact.

c) Migration

L'objectif du présent paragraphe est de présenter les méthodes permettant de déterminer la position spatiale des réflecteurs connaissant la vitesse.

Méthode Géométrique

Harwijanto et al. (1987) ont proposé une méthode de migration non itérative basée sur des considérations géométriques. Le temps de propagation est exprimé de la manière suivante :

$$T_{\rm m} = \frac{1}{V}\sqrt{(x-x_{\rm s})^2 + z^2} + \frac{1}{V}\sqrt{x^2 + (z-z_{\rm d})^2}$$
(1.32)

avec : V vitesse du milieu,

(x_s,0) coordonnées de la source,

(0,z_d) coordonnées du récepteur,

(x,z) coordonnées du point de réflexion,

T_m temps de propagation mesuré.

Cette équation à deux inconnues est résolue en considérant un milieu tabulaire et en ne considérant que les réflecteurs traversant le forage, dans ce cas z est connu.

Migration par tracé de rayons (VSP-CDP)

La détermination de la position géométrique des réflecteurs est souvent déterminée par un algorithme de tracé de rayons en supposant un modèle de vitesse (Dillon et al., 1984). Le modèle le plus courant est une succession d'interfaces horizontales. Des structures plus complexes peuvent également être utilisées (Cassel et al., 1984). Cette méthode ne permet donc pas de déterminer précisément la position géométrique des réflecteurs.

Migration de Kirchhoff

Cette méthode suppose la vitesse moyenne du milieu connue. La zone d'intérêt est maillée et les temps de trajet de chaque rayon réfléchi sur un nœud sont calculés. Les amplitudes calculées sont ensuite sommées le long des pseudo-ellipses considérées (surface reliant tous les points de réflexion possibles). Les interférences constructives permettent alors de déterminer les points de réflexion exacts (Payne et al., 1994).

1.4.4 Méthodes d'optimisation

a) Tomographie réflexion

La tomographie réflexion est semblable à la tomographie transmission mais inclut les ondes réfléchies. Trois approches différentes permettent de résoudre ce problème (Williamson, 1990) :

- supposer connue la position géométrique du réflecteur et inverser seulement le modèle de vitesse,
- paramétrer la position du réflecteur et du modèle de vitesse et inverser simultanément ces deux paramètres,
- itérer successivement sur la position du réflecteur et sur le modèle de vitesse.

La première approche a permis d'évaluer le potentiel de cette méthode (Neumann, 1981) mais les hypothèses requises sont trop contraignantes. La seconde (Stork et al., 1991) semble plus intéressante. Cependant, l'ambiguïté vitesse-profondeur impose la connaissance a priori d'informations sur la position des réflecteurs. La troisième approche proposée par Bording et al. (1987) exige des temps de calcul longs dans le cas de variations latérales de vitesse importantes (Mao et al., 1997). Elle semble cependant la plus efficace. L'utilisation des ondes directes permet en outre d'estimer correctement le modèle de vitesse et donc de s'affranchir de l'ambiguïté vitesse-profondeur.

b) Inversion de signal complet

La tomographie ne permet pas toujours d'obtenir des résultats satisfaisants. Des inversions du signal complet ont alors été proposées (Pratt et al., 1991 ; Plessix, 1996). Ces techniques utilisent toute l'information utile et notamment la forme des différentes ondes : la fonction objectif n'est plus la norme L_2 des différences des temps de trajets mais celle des signaux complets.

Les algorithmes utilisés sont cependant très gourmands en temps de calcul (Zhou et al., 1993). La fonction objectif est en effet fortement non convexe du fait des variations de phase (Symes, 1991). Le problème est alors résolu à l'aide de méthodes stochastiques (Stoffa et al., 1996 ; Koren et al., 1991) ou par changement de variables (Clément, 1994). En outre, les données doivent être d'excellente qualité de manière à ce que le bruit (cohérent ou non) ne masque pas les arrivées secondaires.

1.4.5 Comparaison entre les méthodes

Selon Stork et al. (1991), les méthodes de migration s'accommodent en général très mal des variations latérales de vitesse. Elles ne peuvent donc pas tenir compte de phénomènes géologiques variés telles les variations de lithologie, les poches de gaz, les cavités...

En outre, pour les reconnaissances à l'avancement, les contraintes géométriques sont très fortes (seul le front de taille et un forage auxiliaire sont accessibles pour déployer le dispositif d'acquisition). La courbure de l'hyperbole de diffraction ne sera pas très importante et la méthode de Kirchhoff sera délicate à utiliser (Mari et al. (b), 1994). De plus, l'objectif (cf. cahier des charges précisé en introduction) étant de localiser avec précision les hétérogénéités géologiques ou anthropiques de dimension métrique, le modèle de vitesse doit être déterminé avec la plus grande précision possible, et les méthodes classiques utilisées en industrie pétrolière (qui utilise un modèle de vitesse par couches) ne possèdent pas un pouvoir de résolution suffisant. Ceci implique l'utilisation d'une méthode de type tomographie ou d'inversion de signal complet.

L'utilisation conjointe des ondes directes et réfléchies présente plusieurs avantages majeurs :

- Le champ d'investigation de la tomographie transmission est un cône centré sur le front de taille et dont le forage est une génératrice. Il est beaucoup plus réduit que celui de la tomographie réflexion.
- L'image reconstruite dans le cadre de la tomographie transmission est fortement dépendante de la direction des angles d'arrivée des rayons. Les variations d'ouverture d'angle et/ou la présence d'anisotropie peuvent produire des images présentant de fortes distorsions. Les images fournies par la tomographie réflexion étant moins dépendantes de l'ouverture angulaire, la résolution doit être améliorée (Mari et al., 1998).
- Les résultats fournis ne sont pas seulement le modèle de vitesse mais également la position des réflecteurs.

Les inversions de signal complet, si elles sont ambitieuses ne permettent pas de déterminer une représentation tridimensionnelle du massif en temps réel (Pratt et al., 1991). De plus, Rühl et al. (1996) ont montré sur des exemples pratiques que la tomographie transmission permettait de fournir des résultats dont la qualité est comparable à ceux obtenus par la tomographie diffraction (qui est une méthode d'inversion de signal complet). En outre, la fonction objectif étant fortement non convexe, la qualité des résultats fournis dépend fortement du modèle initial.

Nous avons donc choisi d'utiliser une méthode de tomographie réflexion. Cependant, contrairement aux méthodes actuelles (Bording et al., 1987 ; Dyer et al., 1988) le champ de vitesse ne peut être subdivisé en interface pseudo-horizontales car l'hypothèse de milieu sédimentaire n'est plus valable. La zone d'investigation sera donc maillée et le modèle de vitesse sera composé de l'ensemble des vitesses prises dans chacune des mailles.

Cette recherche étant destiné à fournir une représentation tridimensionnelle du sous-sol, il nous est apparu intéressant d'utiliser une méthode géométrique similaire à celle proposée par Côte (1988). En effet, cette méthode ne nécessite pas de stockage mémoire du gradient de la fonction objectif (cf. équation 1.31). La zone d'investigation étant généralement un cube de côté 50 m, cette matrice est de taille 50⁶ et le stockage mémoire ne peut être effectué avec les ordinateurs actuels sinon pour des calculateurs parallèles (à titre d'exemple, les programmes d'inversion bidimensionnelle de Plessix (1996) utilisent au minimum 400 Mo de mémoire vive).

1.5 CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de déterminer la méthode à utiliser pour les simulations. La décomposition en nombre d'ondes a été choisie car elle présente le moins d'artefact compte-tenu des particularités du problème (sources haute fréquence...).

Une présentation des différentes méthodes de caractérisation des signaux et de séparation des ondes a été effectuée afin de présenter les attributs sismiques qui vont être étudiés (amplitude, phase instantanée, fréquence dominante...) et de les extraire des signaux enregistrés.

Une comparaison entre les différentes méthodes d'inversion a été proposée et a mis en évidence la tomographie réflexion qui semble particulièrement adaptée au problème car elle permet de localiser les perturbations rapides de vitesse (i.e. les réflexions) dues aux variations de lithologie et les perturbations lentes de vitesse dues aux variations de l'état du massif (zones fracturées, cavités...). Les méthodes classiques utilisées en industrie pétrolière seraient particulièrement efficaces si l'objectif était la simple localisation des réflecteurs (failles...). Cependant, le cahier des charges (précisé en introduction) impose également la localisation d'hétérogénéités de dimension métrique (i.e. des zones fracturées). Il fallait donc utiliser une méthode permettant de localiser les variations lentes de vitesse, d'où le choix de la tomographie réflexion en temps de trajet qui permet de réaliser un bon compromis entre la résolution obtenue et le temps de calcul nécessaire.

L'implantation informatique de cette méthode sera similaire à l'approche géométrique proposée par Côte (1988) qui nécessite peu de stockage mémoire. Le logiciel développé pourra donc être utilisé sur PC même pour des inversions tridimensionnelles.

Chapitre 2 : Sensibilité des paramètres

Objectifs

Pour faciliter la détection des ondes réfléchies, il nous a semblé indispensable de les caractériser au préalable. L'objectif de ce chapitre est de déterminer quelles seront les failles les plus difficilement détectables, d'étudier l'influence des failles sur les attributs sismiques les plus classiques (amplitude, fréquence) puis de proposer un dispositif optimal.

Démarche de recherche

La démarche de recherche a été découpée en trois étapes :

- 1. Etude des caractéristiques des failles les plus facilement détectables par application des formules de Zoeppritz (équation 1.13) et Koefood et al. (équation 1.15).
- 2. Etude des paramètres acoustiques (amplitude, fréquence, phase instantanée) sur des simulations numériques effectuées dans une configuration réaliste.
- 3. Détermination d'un dispositif permettant de détecter plus aisément les ondes réfléchies et d'élargir le champ d'investigation.

Résultats

Nous montrerons qu'un faible angle d'incidence est garant d'une réflexion suffisamment énergétique et de l'absence de création d'ondes de cisaillement parasites.

Nous montrerons ensuite que les attributs sismiques « amplitude, fréquence et phase instantanée » ne permettront pas de séparer les ondes directes des ondes réfléchies. Par contre, le signe de la vitesse apparente de ces deux ondes est opposé. L'utilisation d'un filtre FK devrait donc permettre de les séparer.

Nous montrerons enfin que le dispositif optimal doit être un compromis entre plusieurs critères :

- 1. Maximisation de l'énergie réfléchie.
- 2. Maximisation du champ d'investigation.
- 3. Séparation des fenêtres temporelles d'arrivée des ondes PP et des ondes d'interface.

Nous avons alors développé un algorithme d'optimisation pour déterminer automatiquement le positionnement optimal des sources et du forage.

L'objectif du présent projet est la reconnaissance en avant du front de taille. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes volontairement limités à la caractérisation du massif (cartographie des vitesses) et à la localisation d'hétérogénéités pour lesquelles il n'y a pas de phénomènes de diffraction mais de réflexion. C'est à dire des objets dont la longueur caractéristique est grande par rapport à la longueur d'onde. Ce peut être des failles, des filons...

Avant de détecter puis localiser de telles hétérogénéités, une étude directe nous semble indispensable. Elle a trois objectifs distincts :

- 1. Déterminer les caractéristiques des failles les plus facilement détectables.
- 2. Déterminer l'attribut sismique le plus sensible aux ondes réfléchies.
- 3. Mettre au point un algorithme permettant de déterminer automatiquement les caractéristiques du dispositif optimal.

Pour mener à bien le premier objectif, une première étude du coefficient de réflexion pour des failles de faible et grande puissance sera effectuée. Nous étudierons l'influence du remplissage par rapport à l'encaissant, l'influence de la puissance de l'hétérogénéité et l'influence de l'angle d'incidence.

Le second objectif sera résolu grâce à des simulations numériques sur une configuration réaliste. Elles permettront d'étudier l'évolution des attributs sismiques classiques (amplitude, fréquence, phase instantanée...) pour les ondes directes et réfléchies. Ceci nous permettra de tirer les premiers enseignements quant à l'élaboration d'une méthode de détection des ondes réfléchies.

Le troisième objectif sera rempli grâce à des simulations numériques qui permettront de dresser les caractéristiques du dispositif optimal. Nous étudierons l'influence de la nature de la source (fréquence dominante) et de la géométrie d'acquisition sur la qualité des mesures. Un algorithme d'optimisation permettant de déterminer automatiquement le meilleur dispositif sera alors proposé.

2.1 VARIATION DU COEFFICIENT DE REFLEXION

Deux études seront effectuées en fonction de la puissance (épaisseur) de la faille. Si cette valeur est grande, on ne tiendra compte que de la première réflexion, sinon les interférences entre les deux interfaces devront être prises en compte.

2.1.1 Réflecteur simple

Dans le cas d'une faille de grande puissance, il n'y a pas d'interférences entre les ondes réfléchies sur les premières et secondes interfaces. Nous avons donc choisi de ne tenir compte que de la première réflexion. Le coefficient de réflexion (i.e. rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie par l'onde incidente) est alors donné par les équations de Zoeppritz. Nous avons mis au point un logiciel, nommé Zoep, permettant de résoudre le système linéaire correspondant (équation 1.13) par une décomposition LU (Van Loan, 1991).

a) Variation du coefficient de réflexion

La figure 2.1. présente les variations du coefficient de réflexion en fonction des variations de l'angle d'incidence. La vitesse des ondes de compression est de 3000 m/s dans le milieu incident et 2000 m/s dans le milieu réfléchissant. Le coefficient de Poisson est pris égal à 0.25. Pour avoir un ordre de grandeur de la densité, nous utilisons la formule approximative de Gardner et al. (1974) :

$$=0.31 \times V^{0.25}$$
 (2.1)

avec :ρdensité,Vvitesse des ondes de compression (m/s).

ρ

La figure 2.1 montre que l'augmentation de l'angle d'incidence entraîne :

- 1. L'augmentation de l'énergie de compression réfléchie.
- 2. L'augmentation de l'énergie de cisaillement réfléchie.

Cette dernière onde parasitera les signaux enregistrés.

Par ailleurs, la figure 2.2 présente la même étude mais avec une configuration opposée : la vitesse des ondes est de 2000 m/s dans le milieu incident et de 3000 m/s dans le milieu réfléchissant. Elle montre que l'ouverture de l'angle d'incidence entraîne :

- 1. Une diminution de l'amplitude des ondes de compression réfléchies (PP).
- 2. Une augmentation de l'amplitude des ondes de cisaillement réfléchies (PS).

Dans la configuration choisie, pour maximiser l'énergie réfléchie des ondes de compression et pour minimiser les ondes de cisaillement parasites, il est donc nécessaire d'assurer un faible angle d'incidence sur le réflecteur.



b) Caractéristiques des failles détectables

Supposons qu'une faille est facilement détectable si :

- 1. Le coefficient de réflexion des ondes de compression (PP) est supérieur à 0.2.
- 2. Le coefficient de réflexion des ondes de cisaillement (PS) est inférieur à 0.2.

Ces deux critères ont été choisis pour que la génération d'ondes PS ne parasite pas les signaux. L'onde réfléchie PP sera ainsi plus facilement détectable.

La figure 2.3 présente, pour une vitesse V₁=2000 m/s, les valeurs de R₁₂ (R₁₂=(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1)) et de l'angle d'incidence pour lesquels la faille est détectable avec les critères précédents. Nous avons choisi d'utiliser R₁₂ pour donner une représentation adimensionnelle. Chacun des points de la figure 2.3 représente donc une configuration pour laquelle la faille devrait pouvoir être détectée.

La figure 2.3 montre que (pour une vitesse dans le milieu incident de V_1 =2000 m/s) les configurations les plus favorables pour la détection des ondes réfléchies sont (de manière générale) :

- 1. Un milieu incident de plus forte impédance acoustique que le milieu réfléchissant (R_{12} est globalement négatif sauf pour des angles d'incidence très faibles).
- 2. Un faible angle d'incidence.


Figure 2.3 : Configurations pouvant être détectées (V1=2000 m/s)

2.1.2 Faille de faible puissance

Une faille est dite de faible puissance lorsque les réflexions sur les premières et secondes interfaces interfèrent entre elles. Les configurations pour lesquelles la faille sera détectable seront déterminées par la formule de Koefood et al. (1980) (équation 1.15). La fréquence choisie est 1 kHz.

En considérant encore qu'un coefficient de réflexion supérieur à 0.2 est suffisamment élevé pour que la faille soit détectable. L'ensemble des failles pouvant être détectées peut ainsi être estimé. Pour minimiser le nombre de variables, la formule (2.1) reliant vitesse et densité a été utilisée.

Un exemple de faille « détectable » est donné par la figure 2.4. Cette figure présente les valeurs du coefficient de réflexion sous incidence normale (i.e. $R_{12}=(Z_2-Z_1)/(Z_2+Z_1)$) en fonction de l'épaisseur de la faille pour une vitesse dans le milieu 1 égale à celle du milieu 3 et valant 2000 m/s.

Les points de la figure 2.4 donne les caractéristiques des failles détectables. Elles peuvent être détectées si R_{12} appartient à l'ensemble : [-0.8;-0.2] U [0.2;0.4], c'est à dire si V_2 appartient à l'ensemble : [222;1333] U [3000;6000].

Avec les hypothèses retenues (longueur d'onde de 2 m), les ondes réfléchies sont, de manière générale, plus facilement détectables si la puissance de la faille est suffisamment importante (supérieure à 40 cm) et si l'impédance acoustique du remplissage est faible par rapport à l'encaissant (pour des failles de très faible puissance : 0.2 m).



Figure 2.4 : Configurations pouvant être détectées (V1=V3=2000 m/s)

De même, pour étudier les failles avec déplacement, les surfaces admissibles ont été étudiées en fonction du rapport V₁/V₃ (la fréquence des ondes est toujours égale à 1 kHz). La figure 2.5 présente les résultats obtenus pour une vitesse V₁=2000 m/s. De manière générale, la faille peut être détectée plus aisément si R₁₂<0, c'est à dire, si le remplissage est de faible impédance acoustique par rapport à l'encaissant. Plus précisément, la faille est détectable pour un rapport R₁₂=(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) appartenant à l'intervalle [-0.8;0.4], ce qui signifie (si on considère ρ_1 = ρ_2) que V₂ appartient à l'ensemble [222;1333] U [3000;4666].

La figure 2.6 présente les résultats obtenus pour une vitesse V_1 =3000 m/s. La faille peut donc être détectée si R_{12} appartient à l'ensemble [-0.8;0.2] indiquant que les zones de faible impédance acoustique seront plus facilement détectables.



Figure 2.5 : Surface admissible (V_{P1} = 2000 m/s)



De manière globale, cette étude permet de tirer trois enseignements :

- 1. un faible angle d'incidence est préférable,
- 2. en règle générale, les zones de faible impédance acoustique par rapport à l'encaissant seront plus facilement détectables,
- 3. des failles de faible puissance (décimétrique) devraient pouvoir être détectées.

2.2 ETUDE DIRECTE D'UN CAS NUMERIQUE

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les signaux issus d'une simulation. Ceci permettra de déterminer les problèmes à résoudre pour la détection des ondes réfléchies.

2.2.1 Présentation des outils de simulation

Les simulations utilisées au cours du présent mémoire ont été effectuées à partir du logiciel « Axitra » (cf. 1.4) lorsque la nature de l'onde (amplitude, phase...) était recherchée et à l'aide d'un programme de tracé de rayons Calc3D, que nous avons mis au point, lorsque seule l'information « temps de propagation » était recherchée.

Axitra est un logiciel développé au sein du LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonique). Il utilise une décomposition discrète en nombre d'ondes (cf. 1.1).

Calc3D est un logiciel de tracé de rayons développé par Celse (1996) mais incorpore les ondes réfléchies et les ondes d'interface. Il s'agit d'un programme tridimensionnel. Le principe de la méthode est basé sur le principe de Fermat (Fermat, 1881) : « le trajet de l'onde correspond au chemin le plus rapide ».

De manière générale, la configuration est la suivante (figure 2.7) : le point A correspond à la source, le point D au récepteur. Les plans P_2 et P_3 sont des plans d'interface. L'objectif est de minimiser le temps de propagation de A à D en faisant varier les points B et C (intersection du rai et des plans P_2 et P_3).

En transmission, la fonction objectif est donc :

$$J(A,B,C,D) = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_3}$$

Si le point D est compris entre les plans P_2 et P_3 , le temps de trajet en réflexion peut être calculé en minimisant :

$$J(A,B,C,D) = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_2}$$

Stockli (1984) a montré que lors d'interfaces planes, la fonction objectif était convexe. Calc3D utilise la méthode du gradient pour cette minimisation. Cette méthode est très rapide. Elle permet de calculer les temps de propagation des ondes P et PP en temps réel (le temps de calcul pour 500 rais est de l'ordre de la seconde sur un PC 486). En outre, une vérification a posteriori est effectuée en vérifiant la loi de Snell-Descartes pour chaque point de réflexion obtenu. Une validation du logiciel est proposée en annexe B.

La limite principale de ce logiciel est l'impossibilité de calculer les temps de propagation des ondes réfléchies si le récepteur (point D) n'appartient pas à la bande définie par les plans P₂ et P₃ (zone hachurée, figure 2.7).

Par ailleurs, connaissant la vitesse des ondes de surface et des ondes de Stoneley, Calc3D calcule les temps de propagation des ondes de tube par la formule suivante :

$$T(A, D) = \frac{AG}{V_{surf}} + \frac{GD}{V_{ston}}$$



Figure 2.7 : Dispositif général pour les tracés de rayons

2.2.2 Etude du cas

Les paramètres utilisés lors des simulations sont les suivants : la faille est de puissance : 1 m, de pendage 90° et localisée à 20 m du front de taille (figure 2.8). Les paramètres acoustiques sont :

- $V_{P1}=3000 \text{ m/s}, V_{S1}=1700 \text{ m/s}, \rho_1=2, Q_1=80,$
- $V_{P2}=2500 \text{ m/s}, V_{S2}=1500 \text{ m/s}, \rho_2=2, Q_2=50,$
- $V_{P3}=4000 \text{ m/s}, V_{S3}=2300 \text{ m/s}, \rho_3=2.2, Q_3=100.$

Ces paramètres ont été choisis car ils correspondent à une configuration réaliste. Les vitesses de cisaillement ont été estimées à partir de l'approximation classique : V_p=1.73V_s correspondant à un coefficient de Poisson de 0.25 (Sherrif et al., 1995).

Sous incidence normale, le coefficient de réflexion sur la première interface est : R_{12} =-0.15, sur la seconde : R_{23} =0.42. Le coefficient de réflexion global sur la seconde interface est : R_{13} =0.4.

L'ondelette source utilisée est un Ricker (cf. annexe C) de fréquence dominante variant entre 500 Hz et 2 kHz. Le forage, placé dans le plan (x,y), est de pendage 10° (figure 2.8). Vingt récepteurs ont été utilisés et sont disposés régulièrement à partir de (9;1.59) (trace 1). La source étant placée sur le front de taille en (0;10). Les signaux correspondent à la projection de l'accélération perpendiculairement au réflecteur.

Pour ne pas fausser l'analyse des ondes réfléchies, le milieu est faiblement atténuant : les valeurs de Q sont assez élevées (nous rappelons que l'atténuation est inversement proportionnelle au facteur de qualité Q).

Les fréquences d'échantillonnage sont : Δf =50 kHz et Δd =0.1 m.



Figure 2.8 : Dispositif choisi

2.2.3 Caractérisation numérique des ondes réfléchies

Dans cette partie, les signaux pour le modèle présenté en 2.2.2 vont être étudiés selon plusieurs descriptions : temporelle, fréquentielle...

a) Etude qualitative

La figure 2.9 présente les accélérations obtenues pour une fréquence de source de 1 kHz (l'ordonnée correspond au numéro de chaque récepteur, le premier étant situé en (9;1.59). La simulation est effectuée à l'aide d'Axitra.

Les deux ondes de compression (P, temps=0.002 s, trace 1 et PP, temps=0.007 s, trace 1) sont parfaitement visibles. L'onde réfléchie est néanmoins de très faible amplitude mais les ondes ont des vitesses apparentes de signe opposé ce qui facilitera l'utilisation de filtres FK.

La figure 2.10 effectue un « zoom » sur l'onde réfléchie. La fenêtre temporelle choisie est [0.006;0.012]. La première onde (temps=0.009 s, trace 1) est de plus faible amplitude que la seconde (temps=0.0095 s, trace 1) ce qui est conforme au calcul des coefficients de réflexion.



Figure 2.9 : Signal total sur l'ensemble des récepteurs



Figure 2.10 : Zoom sur les ondes réfléchies

b) Etude des phases instantanées

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, la transformée de Hilbert permet de déterminer les phases instantanées des ondes transmises et réfléchies. La figure 2.11 présente les phases instantanées des ondes. La fréquence dominante de source a été choisie égale à 5 kHz pour éviter les interférences entre les deux ondes réfléchies. Cette figure montre clairement que les deux ondes réfléchies ont des phases instantanées opposées ce qui est conforme à la théorie (point A pour la première réflexion, point B pour la seconde, figure 2.11).

Par ailleurs, pour montrer l'influence de la fréquence dominante de la source, la figure 2.12 présente également les phases instantanées obtenues pour une fréquence dominante de source de 2 kHz. Le décrochement représentant l'interférence entre les deux ondes au temps 0.009 s est alors visible (point A, figure 2.12).

Cet exemple montre que, si la fréquence dominante de la source est trop faible, les deux ondes interfèrent entre elles et ne peuvent être étudiées séparément. Le paramètre phase instantanée ne peut donc être utilisé de façon aisé car dans la pratique les fréquences dominantes de sources sont inférieures à 5 kHz.



Figure 2.11 : Phase instantanée (f_d=5 kHz)



c) Etude spectrale

Le spectre des signaux est obtenu par la transformée de Fourier (cf. 1.3.1). La figure 2.13 présente le spectre des ondes directes (la fréquence dominante de source est 3 kHz). La figure 2.14 celui des ondes réfléchies.

Pour cette configuration, le spectre des accélérations des ondes directes est centré autour de la fréquence dominante : f_d =2.8 kHz (figure 2.13, point A). La figure 2.14 montre que le spectre des ondes réfléchies présente deux pics qui pourrait correspondre aux deux réflexions sur les interfaces. Le calcul des coefficients de réflexion sous incidence normale (R_{12} =-0.15 et R_{13} =0.4) montre que l'onde réfléchie sur l'interface R_{1-2} est de faible amplitude. Le pic le plus faible pourrait donc correspondre à l'onde réfléchie sur l'interface R_{1-2} , il est centré autour de la fréquence f_d =3250 Hz (point B, figure 2.14). Le pic principal semble correspondre aux ondes réfléchies sur la deuxième interface et est centré autour de la fréquence f_d =2200 Hz (point C, figure 2.14). Les deux ondes interfèrent entre elles ce qui induit les variations de fréquence. Il est intéressant de remarquer que les fréquences dominantes du champ réfléchi sont dans la gamme de fréquence des ondes directes. Un simple filtre fréquentiel ne permettra donc pas de séparer les ondes directes des ondes réfléchies.



Figure 2.13 : Spectre des ondes directes



Figure 2.14 : Spectre des ondes réfléchies

d) Etude en nombre d'onde

Le spectre FK est obtenu par transformée de Fourier en temps et en espace (cf. 1.3.1). La figure 2.15 représente le spectre FK du signal présenté en figure 2.9. Il est d'autant plus efficace que le nombre de traces est élevé.

Seule l'onde de plus forte énergie, i.e. l'onde directe, est visible. Elle est positionnée dans le demi-plan k>0 conformément à la théorie car elle est de vitesse apparente positive. L'onde réfléchie reste invisible car elle est de très faible amplitude et que le nombre de traces est faible.



Figure 2.15 : Spectre FK du signal de référence

e) Etude par transformée de Gabor

La transformée de Gabor correspond à une analyse temps-fréquence du signal étudié (cf. 1.3.1). La figure suivante 2.16 présente la transformée de Gabor appliquée au signal de référence présenté en figure 2.9.

L'information apportée par cette présentation est très riche. On détermine clairement sur la figure :

- Le temps d'arrivée des ondes directes : t=0.003 s. Elles sont de fréquence dominante : 2800 Hz (point A, figure 2.16).
- Le temps d'arrivée des ondes réfléchies sur la première interface : t=0.011 s. Elles sont de fréquence dominante : 3200 Hz (point C, figure 2.16).
- Le temps d'arrivée des ondes réfléchies sur la deuxième interface t=0.012 s. Elles sont de fréquence dominante : 2100 Hz (point B, figure 2.16).
- Les interférences entre les deux ondes réfléchies (temps=0.0105 s).

Ceci confirme l'étude spectrale effectuée précédemment.



Figure 2.16 : Transformée de Gabor du signal

f) Etude de l'effet Tuning

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier les propriétés spectrales des ondes réfléchies par effet Tuning (cf. 1.2.3). Les figures 2.17 (respectivement 2.18) présentent les spectres des ondes directes (respectivement réfléchies). Pour étudier précisément les interférences entre les deux ondes réfléchies, une source de faible fréquence dominante (f_d =500 Hz) a été choisie.

Pour cette configuration, la fréquence dominante des ondes réfléchies est semblable à celle des ondes directes. Un simple fréquentiel ne permettra donc pas de séparer les ondes réfléchies des ondes directes.





Figure 2.17 : Spectre des ondes directes

Figure 2.18 : Spectre des ondes réfléchies

g) Conclusion

Les résultats précédents permettent de déterminer le comportement théorique d'une faille de grande puissance. Sur la configuration choisie, il y a interférences entre les deux réflexions sur chacune des interfaces ce qui induit des variations de fréquence du champ réfléchi.

Si la fréquence de la source est suffisamment faible, on assiste à l'effet Tuning (cf. 1.2.3). Nous avons montré sur une configuration précise, que celui-ci ne semblait pas modifier le contenu fréquentiel des ondes.

Dans les deux cas de figure étudiés, un simple filtre fréquentiel ne permettra donc pas de séparer le champ réfléchi du champ direct.

Les amplitudes étant fonction des contrastes d'impédances acoustiques, aucun enseignement général n'a pu être tiré.

En pratique, l'atténuation visco-élastique étant proportionnelle à la fréquence des ondes, nous utiliserons des sources dont la fréquence dominante est de l'ordre du kHz. Les deux ondes réfléchies interféreront donc entre elles et les méthodes classiques (utilisant la phase, la fréquence) semblent insuffisantes pour séparer les ondes directes des ondes réfléchies. Les ondes sont de fréquence dominante semblable mais de vitesse apparente de signe opposé. Un filtre FK ou l'utilisation de la matrice spectrale permettrait donc de séparer ces deux ondes.

2.3 DETERMINATION DU DISPOSITIF OPTIMAL

Dans le cadre de la reconnaissance à l'avancement, les contraintes temporelles sont très lourdes. Les résultats fournis doivent cependant être très précis. Une étude du dispositif nous a donc semblé indispensable.

Plusieurs objectifs ont été recherchés :

- 1. Avoir la précision la plus fine possible.
- 2. Avoir le champ d'investigation le plus large possible.

Ces deux objectifs sont fonction de la nature du signal émis (fréquence...) et de la géométrie du dispositif d'acquisition. Nous allons étudier chacun de ces paramètres. Un algorithme d'optimisation sera ensuite proposé pour réaliser un compromis entre chacun de ces critères.

2.3.1 Détermination de la fréquence de source optimale

a) Résolution

Le pouvoir de résolution dépend fortement de la fréquence dominante de la source utilisée (cf. 1.4.1 b)). En considérant un facteur d'atténuation de 20 et un système d'acquisition avec une dynamique de 84 dB, Denham (1981) a proposé la formule empirique suivante en fonction du temps de parcours aller-retour (temps de réflexion sur une interface) :

$$f_{\rm max} = 150/\Delta t \tag{2.2}$$

avec : Δt temps de trajet aller-retour (exprimé en seconde), f_{max} fréquence maximale des ondes émises (exprimée en Hz).

Pour le dispositif présenté par la figure 2.8, la fréquence maximale émise doit donc être inférieure à 13000 Hz.

Pour déterminer précisément la fréquence dominante optimale, trois simulations correspondant aux valeurs : f_d =2000 Hz, f_d =1000 Hz et f_d =500 Hz vont être présentées (figures 2.19, 2.20, 2.21). Les paramètres des matériaux étant identiques à ceux du site de référence (cf. 2.2 a)).

Rappelons les résultats du paragraphe précédent : une fréquence élevée garantira l'absence d'effet Tuning ce qui permettra d'estimer la puissance de la faille. Par contre, les ondes émises seront plus atténuées. Conformément aux résultats précédents, la figure 2.19 montre qu'une fréquence dominante de l'ordre de 2 kHz doit être utilisée pour déterminer précisément la puissance de la faille. La figure 2.21 montre qu'avec la configuration choisie, une fréquence dominante de 500 Hz permet d'augmenter l'amplitude de l'onde réfléchie et donc de faciliter sa détection. Par contre, la puissance de la faille ne peut pas être estimée. Une fréquence dominante de 1000 Hz permet de réaliser un compromis (figure 2.20).

De manière plus quantitative, le rapport entre l'amplitude de l'accélération des ondes transmises et réfléchies (calculé à partir des simulations) est présenté dans le tableau 2.1.



Figure 2.19 : f_d=2 kHz

Figure 2.20 : fd=1 kHz

Figure 2.21 : f_d=500 Hz

f	A_{1-2}/A_i	A2-3/Ai
2 kHz	0,12	0,16
1 kHz	0,145	0,145
500 Hz	0,28	?

Tableau 2.1 : Différence d'énergie

avec :

A_i amplitude de l'onde incidente,

A₁₋₂ amplitude de l'onde réfléchie sur la première interface,

A2-3 amplitude de l'onde réfléchie sur la seconde interface.

En conclusion, si l'objectif de l'étude est la détection de l'hétérogénéité sans volonté d'estimer sa puissance, une fréquence dominante de l'ordre de 500 Hz devra être choisie. Par contre, si la campagne géophysique est menée dans le but d'estimer une puissance de faille (ou de filon dans l'industrie minière), une fréquence dominante de l'ordre de 2 kHz devra être choisie.

b) Influence du facteur de qualité

Pour étudier précisément les ondes réfléchies, les simulations précédentes correspondaient à un massif peu fracturé. L'atténuation était alors faible et une fréquence dominante de source de l'ordre de 2 kHz permettait d'avoir une excellente résolution.

Dans ce paragraphe, nous simulerons un massif fracturé en prenant les paramètres suivants dans chacune des trois couches (le dispositif d'acquisition restant constant) :

- V_{P1}=1700 m/s, Q₁=60,
- V_{P2}=1000 m/s, Q₂=40,
- V_{P3}=1700 m/s, Q₃=60.

Les vitesses des ondes de compression ont été volontairement diminuées pour obtenir un modèle plus réaliste. Sherriff et al. (1995) propose en effet l'approximation suivante : $Q=3.28 \ 10^{-2}V$ (V : vitesse des ondes de compression exprimée en m/s).

Cette simulation, qui correspond à des réalités de terrain, est très défavorable, l'amortissement est en effet important. Les résultats de simulation obtenus avec des sources de fréquence dominante respectivement $f_d=2$ kHz et $f_d=1$ kHz (source positionnée sur le front de taille) sont présentés sur les figures 2.22 et 2.23.

La figure 2.23 montre que pour une fréquence dominante de $f_d=2$ kHz, la réflexion est très faible (invisible à cause du bruit numérique), alors qu'elle est visible pour une fréquence dominante de $f_d=1$ kHz (figure 2.22).

On peut donc conclure que pour des milieux fracturés, une fréquence dominante de source comprise entre 500 et 1000 Hz devra être choisie pour réaliser un bon compromis entre l'atténuation et la résolution désirée.



Figure 2.22 : Milieu fracturé fd=1 kHz



Figure 2.23 : Milieu fracturé fd=2 kHz

Position des sources et des récepteurs 2.3.2

a) Sources

Le dispositif cihoisi est semblable à celui présenté figure 2.8 mais deux classes de position sont possibles pour la source :

- sur le front de taille, ٠
- dans le forage.

Le premier choix semble le plus simple à mettre en œuvre car la disposition sera aisée. Le second choix, plus délicat à mettre en œuvre, permet de minimiser la longueur du trajet de l'onde, elle est ainsi peu atténuée et l'amplitude de l'onde réfléchie est plus élevée. Cette seconde configuration engendre cependant des ondes de tube qui brouilleront les signaux enregistrés.

La figure 2.24 présente les résultats obtenus avec une source en fond de forage (la fréquence dominante considérée est 1 kHz). La configuration choisie est semblable à la précédente. Pour faciliter la comparaison des signaux, la figure 2.25 correspond à la figure 2.22 précédente. De manière plus quantitative, le tableau 2.2 présente l'amplitude de l'onde directe et de l'onde réfléchie enregistrées sur le récepteur 20 avec une source placée en fond de forage et sur le front de taille (les sources sont identiques).

Pour cette configuration, l'amplitude de l'onde réfléchie est ainsi amplifiée et sa détection facilitée. Bien que l'insertion de sources en fond de forage soit techniquement délicate, il serait intéressant de placer des sources à la fois sur le front de taille et en fond de forage.



Figure 2.25 : Source sur le front de taille

	Source sur le front de taille	Source en fond de forage
Amplitude de l'onde directe P	2.9	9.5
Amplitude de l'onde réfléchie PP	0.3	1.5
Rapport entre les deux amplitudes	0.1	0.16

Tableau 2.2 : Amplitude des ondes directes et réfléchies

b) Influence de la direction de forage

L'orientation du forage et la position des sources doivent être choisis en fonction de plusieurs paramètres :

- élargissement du champ d'investigation,
- maximisation de l'énergie réfléchie sur la faille,
- séparation des fenêtres temporelles d'arrivée des ondes réfléchies et des ondes parasites (ondes de tube, ondes de surface...).

Une présentation des différentes ondes d'interface est présentée en annexe E.

Le premier objectif est réalisé en se plaçant dans un dispositif de type cross-hole, c'est à dire avec un forage parallèle au réflecteur. Hartse et al. (1990) ont étudié l'influence de la position de l'émetteur dans le cas où le forage est perpendiculaire au réflecteur, leurs conclusions sont les suivantes (cf. annexe D) :

- placer la source up-dip (vers la direction de plongement du réflecteur) élargit la zone d'investigation et permet ainsi d'obtenir des rayons non parallèles,
- placer la source down-dip (dans le sens opposé) réduit considérablement la couverture angulaire.

Le second objectif est résolu en minimisant l'angle d'incidence, les efforts tangentiels et la conversion en ondes PS (engendrant une perte d'énergie des ondes de compression) seront ainsi minimisés. Ceci est réalisé en minimisant l'offset, c'est à dire en orientant le forage perpendiculairement au réflecteur et en plaçant les sources le plus près possible de la gueule du forage.

Le troisième paramètre est important. En effet, les ondes d'interface se propagent selon une seule direction, elles sont donc très énergétiques et peu atténuées (annexe E). La différence d'amplitude entre de telles ondes et les ondes réfléchies est grande et il semble illusoire d'espérer les séparer (notamment à cause des fortes contraintes temporelles). Cette approche diffère des méthodes classiquement utilisées dans l'industrie pétrolière. Cependant, des travaux récents ont montré que l'élimination brutale du cône de bruit permettait d'améliorer sensiblement le rapport signal sur bruit (Baker et al., 1998).

La stratégie utilisée dans ce projet repose donc sur l'idée que les ondes réfléchies ne peuvent être correctement détectées que dans deux situations distinctes :

- 1. Les réflexions arrivent avant les ondes de tube, et l'objectif est de séparer les ondes directes et réfléchies. Dans ce cas, la fenêtre temporelle d'interférence entre les ondes de tube et les ondes réfléchies doit être la plus réduite possible. La vitesse apparente des ondes réfléchies doit donc être la plus faible possible et le forage doit être orienté perpendiculairement au réflecteur.
- 2. Les réflexions arrivent après les ondes d'interface et il faut extraire une telle onde faiblement énergétique du bruit ambiant. Dans ce cas, le forage doit être orienté parallèlement au réflecteur de manière à ce que les ondes réfléchies arrivent le plus tard possible.

Lors des reconnaissances à l'avancement, l'information a priori pour l'expérimentation (n) peut avoir deux origines différentes :

- 1. Information apportée par les géologues.
- 2. Information apportée par l'expérimentation (n-1). Le dispositif sera alors choisi de manière à maximiser la probabilité de détection et de localisation de l'hétérogénéité.

Si aucune information a priori n'est disponible, le forage sera choisi perpendiculairement au front de taille et les sources seront régulièrement espacées.

2.3.3 Mise au point d'un algorithme d'optimisation

Pour réaliser un compromis entre les critères précédents, nous avons développé un logiciel, nommé Optimis, utilisant des méthodes stochastiques et recherchant le meilleur compromis possible.

a) Théorie

Pour modéliser le problème, nous avons choisi de définir une fonction objectif correspondant à une combinaison linéaire des trois critères définis précédemment. Les études expérimentales effectuées dans ce projet (cf. chapitres 3 et 5) ont permis d'estimer la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes parasites à 0.005 s. Un écart entre les temps d'arrivée des ondes volumiques et des ondes parasites inférieur à 0.005 s est donc éliminatoire. Cette durée correspond à la longueur du train d'ondes des ondes d'interface et dépend de la nature du massif.

Les critères précédents sont formalisés de la manière suivante :

- C₁: angle d'incidence moyen sur la faille. Si l'angle est inférieur à 20°, le critère est nul. Les simulations précédentes ont en effet montré qu'un angle d'incidence inférieur à 20° était suffisant pour détecter l'onde réfléchie.
- C₂: nombre de cellules parcourues par moins de 10 rayons. Ce critère permet d'élargir le champ d'investigation et donc la répartition angulaire.
- C₃ : nombre de rayons pour lesquels la différence des temps d'arrivée des ondes réfléchies et des ondes de tube est inférieure à 0.005 s (si les ondes d'interface précèdent les ondes réfléchies).

La forme mathématique de chacun des critères est la suivante :

$$C_{1} = \sum_{i=1}^{\text{nbrayons}} ((R_{i}S_{i}, R_{i}Q_{i}) - 20)^{+}$$

$$C_{2} = \sum_{i=1}^{\text{nbreelules}} H[(10 - \text{Nbrayon}(i))^{+}]$$

$$C_{3} = \sum_{i=1}^{\text{nbrayons}} H[(0.005 - |\text{TpsRef}(i) - \text{TpsSurf}(i)|)^{+}] \times H[\text{TpsRef}(i) - \text{TpsSurf}(i)]$$

:	R _i	point de réflexion i,
	Si	source i,
	Qi	récepteur i,
	Nbrayon(i)	nombre de rayons traversant la cellule i,
	TpsRef(i)	temps de propagation de l'onde réfléchie du rayon correspondant au i ^{ième} couple source-récepteur,
	TpsSurf(i)	temps de propagation de l'onde de surface correspondant au i ^{ième} couple source- récepteur,
	Н	fonction de Heaviside (H(x)=1 si x>0, 0 sinon),
	()+	fonction telle que $(x)^{+}=x$ si $x>0$, 0 sinon.

La fonction objectif que nous avons choisie est alors de la forme :

$$J(\alpha, \beta, S_1...S_n) = \alpha_1 C_1 / C_{01} + \alpha_2 C_2 / C_{02} + \alpha_3 C_3 / C_{03}$$
(2.3)

avec :	α	orientation	du	forag	ze

avec

ć

- β pendage du forage,
- S_i position de la i^{ième} source,
- C_{0i} valeur du critère i à la première itération (permet de rendre adimensionnel le critère),
- C_i valeur du critère i,
- α_i coefficient pondérateur du critère C_i.

Cette fonction est non convexe et non différentiable, nous avons donc choisi d'utiliser l'algorithme du recuitsimulé pour la minimiser (cf. annexe F et Huang et al., 1997).

2.3.4 Application simultanée de tous les critères

Pour valider le logiciel développé, une première étude avec deux sources sera tout d'abord présentée. Une étude plus complète à deux puis trois dimensions sera ensuite effectuée pour montrer l'intérêt du logiciel dans des cas pratiques (des optimisations en ne tenant compte que d'un seul critère sont présentées en annexe G).

a) Etude bidimensionnelle pour deux sources (plan (x,y))

La configuration choisie (figure 2.26) est un forage de longueur 15 mètres. Trente hydrophones y sont insérés avec un pas d'espacement régulier de 50 cm. Le réflecteur vertical est situé à une distance de 25 m du front de taille, le tunnel est de diamètre 8 m (compris entre les plans y=26 et y=34) (figure 2.26). L'objectif du test

est de déterminer la position optimale des sources et du forage. Pour faciliter l'optimisation, le forage est exécuté à partir du centre du tunnel, initialement, il est choisi horizontal.

La figure 2.27 présente le champ d'investigation initial. Il est centré autour du forage et on peut observer des zones sur illuminées (i.e. elles sont parcourues par un grand nombre de rayons) tandis que d'autres sont sous illuminées. La figure 2.28 présente le champ d'investigation après optimisation. Il est beaucoup plus étendu qu'initialement (figure 2.27), la répartition des rais est beaucoup plus homogène. De plus, le positionnement des sources près du forage permet de minimiser l'angle d'incidence.



Figure 2.26 : Configuration retenue (coupe transversale)



Figure 2.27 : Résultat avant optimisation

Figure 2.28 : Résultat après optimisation

b) Etude bidimensionnelle pour un dispositif complet (plan (x,y))

Le dispositif initial est semblable à celui décrit au paragraphe précédent mais vingt sources réparties régulièrement sur le front de taille ont été choisies. Le champ d'investigation initialement obtenu est une nouvelle fois centré autour du forage. De plus, les zones proches du front de taille et du réflecteur sont sur illuminées tandis que les zones intermédiaires sont sous illuminées (figure 2.29).

Après optimisation, le forage est alors oblique et descendant (de pendage voisin de 20°); le champ d'investigation est ainsi considérablement amélioré et la répartition des rais est beaucoup plus homogène. Il n'y a pratiquement plus de zones non traversées par des rais et l'ouverture angulaire est améliorée (figure 2.30). Le déplacement des sources est par contre très faible. Dans la suite du projet, nous n'itérerons donc que sur l'orientation du forage.

Il est important de noter que la méthode du « recuit-simulé » permet d'obtenir une solution unique qui est « meilleure » que la solution initiale au sens où la valeur obtenue de la fonction objectif (définie par l'équation 2.5) est inférieure à la valeur initiale. La valeur obtenue n'est cependant pas forcément optimale (i.e. ce n'est pas forcément le minimum global de J). Ainsi, sur l'exemple présenté, la position symétrique du forage (par rapport à l'axe x=30) permettrait d'obtenir une solution équivalente.



Figure 2.29 : Champ d'investigation initial



Figure 2.30 : Champ d'investigation après optimisation

c) Etude tridimensionnelle

La configuration initiale est un tunnel parallèle à l'axe x, dont la génératrice est définie par la droite y=z=20. Quarante sources sont réparties le long du front de taille de manière régulière. Le forage initial est de longueur 15 m et est porté par la génératrice du tunnel. La faille est un plan d'équation : x+y+z=60. La figure 2.31 présente une vue parallèle à la génératrice du tunnel, la figure 2.33 perpendiculaire à la génératrice du tunnel.

La figure 2.32 présente le dispositif après optimisation selon une vue parallèle à la génératrice. La figure 2.34 présente le dispositif selon une vue perpendiculaire à la génératrice. Le forage est alors oblique et parallèle au réflecteur. Ceci « retarde » l'arrivée des ondes réfléchies, les fenêtres temporelles des ondes d'interface et des ondes réfléchies sont disjointes.

Les figures 2.35 à 2.38 présente les rais obtenus. Les figures 2.35 et 2.36 présentent le champ d'investigation initial, les figures 2.37 et 2.38, le champ d'investigation final. Celui-ci est considérablement élargi (d'un facteur 3) grâce à l'orientation du forage qui est parallèle au réflecteur (figure 2.32). En outre, l'angle d'incidence sur la faille est suffisamment faible pour que celle-ci soit détectable.



Figure 2.31 : Dispositif initial (vue de dessus)



Figure 2.32 : Dispositif final (vue de dessus)



Figure 2.33 : Dispositif initial (vue perpendiculaire au tunnel)



Figure 2.35 : Champ initial (coupe transversale)



Figure 2.37 : Champ final (coupe transversale)



Figure 2.34 : Dispositif final (vue perpendiculaire au tunnel)



Figure 2.36 : Champ initial (vue de dessus)



Figure 2.38 : Champ final (vue de dessus)

2.4 CONCLUSION

L'objet de ce paragraphe était d'étudier les variations de plusieurs paramètres. L'objectif était triple :

- 1. déterminer les failles les plus difficilement détectables,
- 2. déterminer les caractéristiques des ondes réfléchies,
- 3. déterminer le dispositif optimal.

La première étude a permis de mettre en évidence trois enseignements majeurs :

- 1. Les failles de faible impédance acoustique par rapport à l'encaissant seront, de manière générale, plus facilement détectables.
- 2. L'angle d'incidence des ondes de compression doit être inférieur à 20° de manière à maximiser la réflexion et à minimiser la création d'ondes de cisaillement qui engendreraient des signaux parasites.
- 3. Dans ces cas favorables, des failles de très faible puissance (décimétriques) pourront être détectées.

L'étude de cas effectuée à l'aide de simulations numériques a permis de montrer :

- 1. Les attributs sismiques classiques : phase instantanée, fréquence dominante... sont semblables pour les ondes directes et réfléchies, ils ne pourront donc être utilisés pour séparer ces deux ondes.
- 2. L'attribut sismique le plus sensible aux ondes réfléchies est la vitesse apparente car elle est de signe opposé à celle des ondes directes. Les méthodes à utiliser pour améliorer le rapport signal sur bruit doivent donc être bidimensionnelles pour prendre en compte cet attribut.

L'étude du dispositif a permis de dresser ses caractéristiques optimales :

- La fréquence dominante de source doit être comprise entre 500 et 1000 Hz afin de réaliser un compromis entre l'atténuation et le pouvoir de résolution.
- Si les moyens technologiques le permettent, les sources doivent être placées à la fois sur le front de taille et en fond de forage.
- La position des sources et des récepteurs doit être déterminée par un compromis entre plusieurs critères : maximisation du champ d'investigation, minimisation de l'angle d'incidence, séparation des fenêtres temporelles des ondes réfléchies et des ondes parasites.

Pour mener à bien ce dernier point, nous avons formalisé le problème en proposant une fonction à minimiser. Cette fonctionnelle étant non convexe et non différentiable, nous avons utilisé l'algorithme du recuit-simulé pour la minimiser. Les résultats se sont avérés concluants sur des exemples numériques bi et tridimensionnels. Cette opération n'est pas à négliger car :

- 1. Elle conditionne l'efficacité des techniques de traitement du signal : l'onde sera plus facilement détectable.
- 2. Elle conditionne les résultats de la tomographie : elle permet d'augmenter la résolution angulaire et donc d'améliorer le pouvoir de résolution (cf. 1.4.2). Elle permet également de rendre homogène la répartition des rais, ce qui est crucial car la résolution du problème inverse avec des zones sur et sous illuminées est très délicate à résoudre (le problème est alors mal conditionné) (Chang, 1996 ; Nemeth et al., 1997).

Lorsque aucune information a priori n'est disponible, nous proposons d'utiliser un dispositif classique : un forage perpendiculaire au front de taille et des sources régulièrement espacées.

Chapitre 3 : Stratégie de détection des ondes réfléchies

Objectifs

La stratégie utilisée dans ce projet repose sur l'idée que les ondes réfléchies ne pourront être détectées que dans deux cas de figures :

- 1. L'onde réfléchie précède l'onde d'interface.
- 2. L'onde d'interface précède l'onde réfléchie et la différence entre les temps d'arrivée des deux ondes est supérieure à 5 ms.

Dans le premier cas, les techniques de traitement du signal seront utilisées pour séparer les deux ondes de compression P et PP interférant. Dans le second, l'objectif sera d'extraire une onde faiblement énergétique d'un signal très bruité correspondant à la « queue » de l'onde réfléchie.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une stratégie pour détecter les ondes réfléchies dans les deux cas de figure précédents et de vérifier que ces filtres n'introduisent pas de retards artificiels sur les temps d'arrivée.

Démarche choisie

La démarche consiste en une application des techniques de traitement du signal sur des signaux numériques et réels. L'étude sur les signaux numériques permettra de les appliquer dans les deux cas de figure. Un bruit blanc (avec un rapport signal sur bruit de -3 dB) sera ajouté pour tester ces méthodes dans un milieu bruité. De plus, l'étude sur signaux numériques permettra de vérifier que les méthodes n'introduisent pas de retards artificiels (les temps d'arrivée sont en effet parfaitement connus). L'étude sur les signaux expérimentaux permettra également d'appliquer les méthodes choisies dans les deux cas de figures précédents mais le rapport signal sur bruit sera alors réel et coloré.

Résultats

Les méthodes utilisant les propriétés spectrales des ondes (filtre FK, analyse en composantes principales en fréquence et matrice spectrale) se sont avérées les plus efficaces sur les signaux numériques et expérimentaux. Nous avons montré que l'erreur moyenne sur les temps d'arrivée était de l'ordre de 5% et nous proposons alors la stratégie d'étude suivante :

- 1. Détermination de la fenêtre temporelle d'étude pour réduire le nombre d'ondes.
- 2. Filtre passe-haut suivi d'une moyenne glissante en espace pour mettre en exergue l'onde réfléchie.
- 3. Filtre bidimensionnel (FK, SMF, ACP) pour détecter l'onde réfléchie sur le signal.

Les reconnaissances à l'avancement sont effectuées dans un chantier de génie-civil, c'est à dire dans un environnement très bruité. Le classement suivant présente les différentes origines du bruit selon leur intensité, l'ordre est croissant et la liste non exhaustive :

- 1. Le bruit électronique (bruit blanc).
- 2. Les réflexions et/ou diffractions multiples.
- 3. Les engins de chantier (le bruit est alors de basse fréquence, de l'ordre du Hertz).
- 4. Les ondes d'interface parasites.

Pour ce projet, nous avons estimé qu'un filtre fréquentiel passe-bande permettrait d'éliminer le bruit blanc et le bruit dû aux engins de chantier, et que les réflexions multiples seraient faiblement énergétiques. Par contre, même si les ondes de tube peuvent parfois être éliminées par des filtres fréquentiels (Hardage, 1985) ou des dispositifs expérimentaux (Mari et al., 1989), nous avons considéré que les ondes d'interface seraient très énergétiques. Il nous a donc semblé illusoire d'espérer séparer les ondes réfléchies des ondes de tube, notamment à cause des fortes contraintes temporelles.

Nous avons donc considéré qu'un fenêtrage temporel devait être effectué (Henry, 1994). La stratégie utilisée dans ce projet repose sur l'idée que les ondes réfléchies ne pourront être détectées que dans deux cas de figures :

- 1. L'onde réfléchie précède l'onde d'interface.
- 2. L'onde d'interface précède l'onde réfléchie et la différence entre les temps d'arrivée des deux ondes est supérieure à 5 ms.

Le géophysicien est donc amené à résoudre deux problèmes distincts :

- 1. L'onde réfléchie précède l'onde d'interface et l'objectif est de séparer les ondes P et PP interférant (cas I).
- 2. L'onde d'interface précède l'onde réfléchie d'au moins 0.005 s et l'objectif est d'extraire une onde (i.e. un signal cohérent sur l'ensemble des traces) d'un milieu très bruité (cas II).

Il doit alors faire appel aux techniques de traitement du signal pour résoudre chacune des ces deux problématiques. Il doit également veiller à ce que ces méthodes ne faussent pas l'information recherchée, c'est à dire qu'elles n'introduisent pas de retards artificiels sur les temps d'arrivée.

L'objectif du présent chapitre est de tester les techniques de traitement du signal, issues de l'industrie pétrolière, pour résoudre chacun des deux problèmes précédents. Il a été découpé en plusieurs parties :

- 1. Application des techniques de traitement de signal sur des signaux numériques correspondant à chacun des deux cas de figures présentés précédemment.
- 2. Vérification que ces algorithmes n'introduisent pas de retards artificiels.
- 3. Application de ces méthodes sur des signaux réels correspondant à chacun des problèmes précédents.

Dans ce projet, les techniques de traitement du signal ont été utilisées à l'aide du logiciel cwp/SU développé à la Colorado School of Mines (Stockwell, 1997). Les méthodes de transformée de Karhunen-Loève, analyse en composantes principales en fréquence et matrice spectrale n'étant pas incluses dans ce logiciel, nous les avons implémentées.

3.1 ETUDE NUMERIQUE

Pour étudier l'efficacité des méthodes de détection présentées au chapitre 1, elles seront appliquées sur deux types de test correspondant à chacun des problèmes précédents.

3.1.1 Signaux de référence

a) Présentation des signaux

Le dispositif utilisé pour cette étude est celui présenté sur la figure 2.8, mais un unique réflecteur a été considéré (la faille est donc de puissance nulle). Les paramètres sont alors :

- $V_{P1}=3000 \text{ m/s}, V_{S1}=1700 \text{ m/s}, \rho_1=2., Q_1=80,$
- $V_{P3}=2500 \text{ m/s}, V_{S3}=1500 \text{ m/s}, \rho_3=2., Q_3=50.$

La source utilisée est un Ricker dont la fréquence dominante est 1 kHz (cf. annexe C).

La figure 3.1 présente alors le signal obtenu. Il correspond au signal de référence permettant de tester les techniques de traitement du signal pour séparer les deux ondes de compression P et PP (test I). Cette étude vise donc à simuler des ondes réfléchies précédant les ondes d'interface. L'onde directe est de forte amplitude (temps=0.002 s sur la trace 1, figure 3.1), sa vitesse apparente est de signe opposé à celle de l'onde réfléchie (temps=0.009 s sur la trace 1, figure 3.1).

Par ailleurs, une onde S est également visible (temps=0.0065 s, trace 2, figure 3.1), elle est amplifiée grâce à l'utilisation d'un contrôle automatique de gain (agc) (temps=0.0065 s, trace 2, figure 3.2). Elle sera considérée comme un parasite lors de la séparation d'ondes. Elle n'est visible que sur les premières traces car les signaux correspondent à l'accélération des particules dans une direction perpendiculaire à la faille (cf. 2.2 et annexe C).

Pour tester les algorithmes permettant l'extraction d'une onde d'un signal bruité **(test II)**, nous avons ajouté un bruit blanc au signal de référence. Le rapport signal sur bruit que nous avons imposé est de –3 dB. Cette valeur peut sembler trop élevée par rapport à la réalité mais elle permet de montrer l'efficacité des méthodes proposées. La figure 3.3 présente alors le signal obtenu. L'ajout de bruit masque complètement l'onde réfléchie.





Figure 3.2 : Signal de référence avec agc



b) Débruitage des signaux

Pour minimiser le nombre d'ondes dans la fenêtre d'étude, un fenêtrage à partir du temps 0.006 s a été choisi (fenêtre A, figure 3.1). Il est suivi d'un filtre fréquentiel passe-bande (le filtre vaut 0 pour f_c =400 et f_c =2000 et 1 pour f=500 et f=1900 Hz). Pour éliminer une partie du bruit aléatoire (figure 3.4). L'onde réfléchie étant de grande vitesse apparente, une moyenne glissante en espace est alors appliquée (de coefficients pondérateurs mix=.4,1,.4) améliorant le rapport signal sur bruit (figure 3.5).



Figure 3.4 : Application d'un filtre passe-bande ([500;2000])



0.01

Temps (s)

0.006

No T

3.1.2 Séparation d'ondes

Dans ce paragraphe, les techniques de traitement du signal présentées au chapitre 1 seront appliquées :

- 1. Sur le signal présenté figure 3.1, l'objectif est la séparation des ondes de compression P et PP (test I).
- 2. Sur le signal présenté figure 3.5, l'objectif est l'extraction d'une onde dans un signal bruité (test II).

Pour le test I, nous avons considéré que les seuls bruits possibles seraient le bruit électronique et le bruit dû aux travaux de chantiers. Un simple filtre fréquentiel passe-bande permettrait de les éliminer aisément. Le test a donc porté sur des signaux « purs ».

a) Filtre médian

Le filtre médian permet de séparer des ondes, par contre il ne peut extraire une onde du bruit ambiant. Seul le premier test sera donc effectué. La figure 3.6 présente alors le résultat obtenu après alignement et application du filtre médian. L'onde réfléchie est ainsi visible (temps=0.008 s, trace 16) et ce filtre semble efficace.

Sur les premières traces, l'onde réfléchie est de très faible amplitude ; ceci est dû à la normalisation des amplitudes effectuée trace à trace.



Figure 3.6 : Utilisation du filtre médian

b) Filtre FK

Les figures 3.7 et 3.8 présentent les résultats obtenus pour le test I. Les signaux correspondent à l'application du filtre FK sur le signal présenté figure 3.1 (il s'agit d'un filtre « rectangulaire », la fréquence étant comprise entre 500 et 1900, les nombres d'onde entre -0.02 et 0 pour l'onde réfléchie et entre 0 et 0.02 pour l'onde directe). L'onde directe est ainsi parfaitement localisée (figure 3.7, temps=0.001 s, trace 1). L'onde réfléchie est également renforcée et pourrait être extraite d'un bruit faiblement énergétique (figure 3.8, temps=0.008 s, trace 1). Cependant, sa vitesse apparente semble trop importante notamment sur les premières traces. Ceci provient de l'existence de l'onde S parasite. En outre, le champ réfléchi est mal estimé du fait de la présence d'énergie du champ direct dans le demi-plan k<0. Une variation de phase peut ainsi être observée (les ondelettes des traces 1 et 16 sont différentes sur la figure 3.8, ce qui n'est pas le cas sur la figure 3.1). Les deux ondes ont en effet des vitesses apparentes très élevées et semblables (en valeur absolue) et leur séparation par application du filtre FK est délicate.

La figure 3.9 présente le résultat du test II correspondant à l'extraction de l'onde réfléchie dans le signal bruité. Une moyenne glissante (de coefficient pondérateur : mix=.4,1,.4) a été utilisée pour renforcer le champ d'ondes cohérent, un filtre FK permet alors de mettre en évidence l'onde réfléchie qui devient parfaitement visible (temps=0.0085 s, trace 1).



Figure 3.7 : Champ direct obtenu par FK Figure 3.8 : Champ réfléchi obtenu par FK Figure 3.9 : Utilisation du filtre FK (test II)

d) Transformée de Karhunen-Loève

La figure 3.10 présente le signal obtenu après application de la transformée de Karhunen-Loève (TKL) sur le signal de référence (les valeurs propres (rapportées à 1) sont : 1;0.009;0.0087...).

Après alignement préalable, les ondes directes sont renforcées dans l'espace signal et sont parfaitement visibles (temps=0.001 s, trace 1). La figure 3.11 présente ensuite la soustraction du signal initial par le signal obtenu afin de renforcer les ondes réfléchies. Elles deviennent ainsi parfaitement visibles (temps=0.0075 s, trace 16). Cependant, la vitesse apparente sur les premières traces est trop élevée (temps=0.007 s, trace 1). La projection de l'espace bruit sur le premier vecteur propre ne permet pas d'améliorer la qualité des signaux.

La figure 3.12 présente le résultat du test II. Le signal a été obtenu après fenêtrage, moyenne glissante et utilisation de la transformée. L'onde réfléchie peut être détectée (temps=0.008 s, trace 1) ; ce sismogramme semble moins lisible que le précédent (figure 3.9).



Figure 3.10 : TKL (espace signal) Figure 3.11 : TKL (espace bruit) Figure 3.12 : Extraction d'ondes par TKL (test II)

e) Analyse en composantes principales en fréquence (ACP)

Les figures 3.13 et 3.14 présentent le résultat du test I. Les signaux ont été obtenus après alignement et projection sur l'espace propre (figure 3.13) et l'espace bruit (figure 3.14). Les ondes réfléchies sont parfaitement discernables (temps=0.008 s, trace 16, figure 3.14), l'utilisation de l'alignement permet de les renforcer considérablement.

L'onde S « parasite » néanmoins les signaux obtenus. L'analyse est donc de nouveau appliquée aux signaux issus de l'espace bruit (figure 3.15). L'onde réfléchie devient alors parfaitement visible et sa vitesse apparente semble correcte (temps=0.008 s, trace 1) : elle n'est plus « parasitée » par l'onde S. Par contre, le mauvais alignement de l'onde réfléchie entraîne des variations de phase mais pas des variations de temps d'arrivée.

La figure 3.16 présente le résultat du test II. L'onde réfléchie devient parfaitement visible (temps=0.008 s, trace 1).



Figure 3.13 : ACP (espace signal)

Figure 3.14 : ACP (espace bruit)

Figure 3.15 : Projection de l'espace bruit



Figure 3.16 : Extraction de l'onde réfléchie par ACP en fréquence (test II)

f) Matrice spectrale

Les figures 3.17 et 3.18 présentent les résultats du test I. Les signaux ont été obtenus après projection du signal présenté figure 3.1 sur l'espace propre (figure 3.17) et l'espace bruit (figure 3.18). L'onde réfléchie est ainsi parfaitement visible (temps=0.008 s, trace 1). Le parasite dû à l'onde S est parfaitement visible sur les premières traces (temps=0.0075 s sur la trace 1). La projection de l'espace bruit sur l'espace signal ne permet pas d'améliorer le signal.

La figure 3.19 présente les résultats pour le test II. Une moyenne glissante en espace, de coefficient pondérateur mix=.4,1,.4, a été utilisée. Les résultats sur le second test sont médiocres : l'onde réfléchie n'est pas clairement visible. La méthode proposée n'est efficace que si l'onde recherchée est dominante ce qui confirme les travaux de Glangeaud et al., (1993).



Figure 3.17 : SMF (espace signal)

Figure 3.18 : SMF (espace bruit)

Figure 3.19 : Résultat du test II par SMF

3.1.3 Etude des temps d'arrivée

Il est important de vérifier que les filtres utilisés n'introduisent pas de retards artificiels sur les temps d'arrivée. En effet, cette information sera utilisée lors de l'inversion et elle conditionne la qualité des résultats futurs. Nous proposons donc d'effectuer un pointé manuel, après application des filtres précédents, sur plusieurs signaux :

- 1. Les signaux présentés figure 3.1 après fenêtrage en 0.006 s pour éliminer l'onde S et application de filtres. Il s'agira des temps de référence.
- 2. Les signaux correspondant aux résultats du test I.
- 3. Les signaux correspondant aux résultats du test II.

a) Etude d'une onde seule

Dans ce paragraphe, un fenêtrage a été utilisé pour éliminer les ondes directes P et S de la fenêtre de travail. Les filtres sont donc appliqués sur l'onde réfléchie du signal de référence sans traitement préalable. La figure 3.20 présente les temps d'arrivée obtenus après un pointé manuel. Les temps d'arrivée sont très proches des temps d'arrivée exacts et les écarts sont attribués à des erreurs lors du pointé. Les méthodes utilisées n'introduisent donc pas d'artefacts sur les temps d'arrivée obtenus.



Figure 3.20 : Temps d'arrivée obtenus

b) Résultats du test I

Lors de la séparation d'ondes, une onde S parasitait les signaux et seule l'analyse en composantes principales en fréquence avait permis de l'éliminer. La figure 3.21 présente alors les résultats obtenus. Les temps d'arrivée déterminés par l'analyse en composantes principales en fréquence sont corrects, les autres présentent des artefacts notamment sur les premières traces à cause de ce parasite.



Figure 3.21 : Temps d'arrivée obtenus par pointé manuel (test I)

c) Résultat du test II

La figure 3.22 présente les temps d'arrivée obtenus après pointé sur les résultats du test II. Les méthodes issues de l'analyse en composantes principales en fréquence (ACP) et filtre FK semblent donc les plus efficaces pour extraire une onde dans un milieu très bruité sans ajout de retards artificiels.



Figure 3.22 : Temps d'arrivée obtenus par pointé manuel (test II)

d) Ecarts sur les temps d'arrivée

L'objectif du présent projet est de caractériser le massif en avant du front de taille. Nous avons choisi d'utiliser comme information les temps d'arrivée des ondes sismiques de compression P et PP. Il est donc important de déterminer l'erreur sur ces temps.

L'erreur sur les temps des ondes directes est généralement inférieure à 2% (Gautier, 1991). Pour estimer précisément l'erreur sur les temps d'arrivée des ondes réfléchies PP, nous avons effectué deux études :

- 1. Une étude de reproductibilité du pointé.
- 2. Une comparaison entre les pointés effectués et les temps exacts.

L'erreur de reproductibilité a été mesurée en effectuant trois pointés différents sur le même signal et en déterminant la valeur : 100(Ecart Type/Valeur Moyenne). La valeur moyenne sur ces trois pointés est ensuite comparée aux temps exacts et permet de quantifier l'erreur globale.

La première colonne du tableau 3.1 présente l'écart entre les temps obtenus et les temps exacts pour le test I. La seconde colonne présente l'erreur sur les temps d'arrivée (avec une fréquence dominante de 1kHz). L'analyse en composantes principales en fréquence (ACP) permet d'obtenir la meilleure précision (inférieure à 3%) et une très faible dispersion sur les pointés (0.08%). Les autres méthodes permettent d'obtenir des résultats de qualité égale : l'erreur moyenne est de l'ordre de 5% avec une reproductibilité de 0.1%. La transformée de Karuhnen-Loève présente une erreur de reproductibilité qui reste cependant importante (1.87%).

Le tableau 3.2 présente les résultats pour le test II, la méthode FK permet d'obtenir la meilleure précision sur les temps d'arrivée (l'erreur moyenne est de 5.54%) avec une assez faible dispersion (0.7%). La matrice spectrale (SMF) donne des résultats aberrants (erreur de 17%) et ne doit pas être utilisée pour ce type de configuration.

Méthode choisie	Ecart moyen temps exacts (%)	Erreur moy de reproductibilité (%)
FK	5,15	0,11
SMF	6,46	0,17
TKL	4,5	1,87
ACP	2,53	0,08

Tableau 3.1 : Résultats pour le test I

Méthode choisie	Ecarts moyen temps exacts (%)	Erreur moy de reproductibilité (%)
FK	5,54	0,7
SMF	16,96	0,15
TKL	6,96	0,8
ACP	6,69	0,1

3.1.4 Conclusion

Lors des deux types de tests effectués, les méthodes utilisant les propriétés spectrales des ondes se sont avérées les plus efficaces.

Le choix d'une méthode dépend de l'objectif désiré :

- Si l'objectif est la séparation de deux ondes temporellement très proches, l'analyse en composantes principales en fréquence semble la plus adaptée.
- Si l'objectif est l'extraction d'une onde dans un milieu très bruité, l'utilisation d'une moyenne glissante suivie d'un filtre FK ou d'une analyse en composantes principales en fréquence sont les plus efficaces.

Par ailleurs, ces méthodes sont d'autant plus efficaces que le nombre d'ondes dans la fenêtre de travail est faible ; un fenêtrage temporel a donc été utilisé.

Enfin, les filtres choisis n'introduisent pas de retard artificiel (si ce n'est la moyenne glissante). Pour des signaux purs, les temps de propagation obtenus sont très proches des temps de propagation exacts. Pour des signaux bruités, l'erreur moyenne est de l'ordre de 5%. Bien évidemment des ondes parasites introduisent des artefacts et il convient de les éliminer. Une vérification a posteriori devra donc être effectuée en déterminant les temps d'arrivée des ondes S et en vérifiant qu'ils ne sont pas compris dans la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes PP. Les méthodes tomographiques qui utilisent comme information les temps d'arrivée des ondes et réfléchies peuvent donc être employées car l'information apportée est correcte.

3.2 ETUDE EXPERIMENTALE : GEOMETRIE DU SITE

La partie précédente a permis de tester l'efficacité des méthodes de séparation d'ondes. Elles vont être appliquées sur des signaux réels enregistrés dans une expérimentation en mine de calcaire asphaltique.

Le site Calpha est situé dans la mine SFA (Société Française des Asphaltes) localisée à Saint Jean de Maruejols (Gard). Le site est situé à une profondeur de 150 m à proximité d'une faille séparant deux milieux d'impédances acoustiques différentes (figure 3.23 et annexe H) :

- un calcaire asphaltique : $V_p=3400 \text{ m/s}, \rho=2.1,$
- un calcaire commun : $V_p=4000 \text{ m/s}, p=2.4.$



Figure 3.23 : Présentation du site Calpha (Coupe verticale)

Deux sites expérimentaux ont été retenus :

- Calpha1 : situé à proximité immédiate de la faille (une dizaine de mètres), les ondes réfléchies devraient précéder les ondes d'interface et l'objectif sera la séparation d'ondes P, S et PP interférant. Ceci correspond donc au test I précédent.
- Calpha2 : situé à plus grande distance (une quarantaine de mètres), l'objectif sera alors l'extraction de l'onde réfléchie PP d'un signal très bruité correspondant à la « queue » de l'onde d'interface. Ceci correspond donc au test II précédent.

Les descriptions des sites sont données en annexe H.

3.2.1 Dispositifs expérimentaux

Dans ces expérimentations, les contraintes techniques ne nous ont pas permis d'utiliser un dispositif semblable à celui présenté en introduction (figure 2) : le forage n'est pas concentrique à l'équivalent du tunnel. Ils permettent cependant de réaliser une étude de faisabilité de la méthode proposée.

a) Site CALPHA 1

Le site Calpha1 est situé à proximité immédiate de la faille de Rebésou (d'orientation N 20° et de pendage 83° W) (figure 3.24).

Les deux galeries ont un diamètre moyen de 4 m. Les sources sont placées le long de la galerie principale (équivalent du front de taille) avec un pas d'espacement moyen de 1 m. La source la plus éloignée (S_{16}) est située à 12 m de l'intersection des deux galeries, la plus proche (S_{2bis}) à 1 m. La galerie auxiliaire (équivalent du forage) permet d'accéder à la faille. Les 14 accéléromètres sont placés le long de cette galerie avec un pas d'espacement de 20 cm. L'accéléromètre le plus proche (a_{14} , trace 15) est situé à 30 cm de la faille, le plus éloigné (a_1 , trace 2) est à 3 m.



Figure 3.24 : Présentation du site Calpha1 (Coupe plane)

b) Site CALPHA 2

Le site Calpha2 est situé à une quarantaine de mètres de la faille principale. Il est composé de deux galeries orthogonales dont l'une est dirigée vers la faille (figure 3.25). La seconde galerie a été instrumentée de sources et simule le forage dans le dispositif général proposé. Le front de taille correspond alors à la galerie auxiliaire.

Ce site est marqué par la présence de nombreuses fractures en pied droit de galerie, notamment les fractures F_{24} (N 35°, 75° W), F_{25} (N 30°, 70° W) et F_{28} (N-S, 80° W) qui sont marquées par des suintements d'hydrocarbures (figure 3.25) ; au voisinage de ces fractures, les roches sont donc saturées en fluide et les vitesses des ondes devraient être rapides. Par ailleurs, les fractures F_{32} et F_{33} ont également été repérées. Ce sont des fractures importantes avec des rejets décimétriques sans suintement d'hydrocarbures (cf. annexe H). Il peut donc s'agir de zones de faibles vitesses. La galerie principale est d'une longueur de 30 m et de

diamètre moyen de 4 m. Les sources sont positionnées le long de cette galerie avec un pas moyen de 1 m près de l'intersection des deux galeries, il s'agrandit par la suite. La source la plus éloignée (S₈₀) est située à 46 m de l'intersection des deux galeries, la plus proche (S₈) à 8 m. La galerie auxiliaire est perpendiculaire à la galerie principale et de diamètre moyen de 4 m. Sept accéléromètres (notés a*) ont été positionnés le long de la galerie auxiliaire avec un pas d'espacement de 1.7 m. L'accéléromètre le plus proche (a₁₇) est positionné à 5.5 m de l'intersection des deux galeries, le plus éloigné se situe à 13 m (a₂₃).

Sur ce site, seuls sept accéléromètres ont pu être utilisés, un regroupement par source commune ne pouvait donc être envisagé. En outre, l'espacement entre les sources étant assez faible (variant entre 0.5 m sur la partie haute et 5 m sur la partie basse), un regroupement par accéléromètre a été choisi. Les sources utilisées lors du regroupement par accéléromètre commun sont les sources 13 à 8, il s'agit de 22 sources disposées de manière plus ou moins régulière suivant les accidents géologiques (figure 3.25, droite).

Par ailleurs, 18 hydrophones ont été introduits le long d'un forage de longueur 6 m. Un regroupement par source commune a également été effectué. Cependant, le forage n'a pas pu être rempli d'eau et le couplage fut mauvais. Les signaux enregistrés sont donc inexploitables.



Figure 3.25 : Positionnement des sources (Coupe plane) Les symboles « a* » représentent l'accéléromètre correspondant à la voie *. Les nombres correspondent aux différents points de tir.

3.2.2 Présentation des mesures pour les deux sites

a) Schéma général

Le signal est émis à l'aide d'une massette (cf. annexe O, photographie 8), la fréquence dominante est de l'ordre de 500 Hz pour les ondes de surface et 1 kHz pour les ondes volumiques directes. La fenêtre spectrale globale est comprise entre 200 Hz et 3000 Hz.

Les distances parcourues sur le site Calpha2 étant grandes, lors de l'acquisition les signaux ont été plusieurs fois sommés (5 fois) pour éliminer le bruit incohérent. Les enregistrements ont été effectués avec un sismographe de type « Strata-View » de marque Geometrics. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 30 kHz.

Les signaux enregistrés sur les accéléromètres présentent globalement un bon rapport signal sur bruit. Un bruit parasite de fréquence 50 Hz a été néanmoins observé sur le site Calpha2. Il a été atténué par un filtre passe haut de fréquence de coupure 200 Hz et un filtre en créneau centré sur la fréquence 50 Hz.

b) Etude du bruit

Pour déterminer le rapport signal sur bruit maximal, une comparaison a été effectuée entre les signaux enregistrés par les capteurs proches du point de tir et les signaux correspondant au bruit électronique. Le rapport signal sur bruit maximal a été estimé à 50 dB. Il est excellent et le bruit électronique ne devrait pas être gênant ; en outre, le couplage semble suffisamment bon pour espérer détecter des ondes faiblement énergétiques.

c) Erreur sur les distances

Les distances ont été mesurées à l'aide d'un décamètre et d'un niveau de maçon. Nous estimons que l'erreur globale sur une distance de 20 m est de 50 cm. L'erreur sur les distances est donc de l'ordre de 3%.

3.3 SEPARATION D'ONDES : ETUDE SUR LE SITE CALPHA1 (TEST I)

Le sismogramme émis par la source 8 présente un bon rapport signal sur bruit, il sera donc étudié en détail.

3.3.1 Etude du signal

Le signal initial est d'abord présenté (figure 3.26). Pour visionner toutes les ondes présentes, un contrôle automatique de gain est appliqué (figure 3.27). Les premières arrivées sont parfaitement visibles (temps=0.002 s sur la trace 2), elles sont suivies d'ondes de plus forte amplitude qui correspondraient à des ondes de surface (temps=0.003 s sur la trace 2). Le reste du signal correspond à des ondes d'origine diverses et de basse fréquence (figure 3.27, temps=0.006 s et temps=0.01 s, trace 8). Aucune onde réfléchie ne semble visible même après application d'un contrôle automatique de gain.



Figure 3.26 : Signal initial émis en S₈



Figure 3.27 : Signal émis en S₈ avec agc

3.3.2 Caractérisation des différentes ondes

Les figures 3.28 et 3.29 présentent les spectres FX des ondes les plus rapides (dont le temps d'arrivée est inférieur à 0.003 s) et des ondes de surface. La fréquence dominante des ondes directes est de l'ordre de 800 Hz (point A, figure 3.28), la fréquence dominante des ondes de surface est de l'ordre de 500 Hz (point B, figure 3.29). Ces figures montrent que les ondes de surface sont de basse fréquence et un filtre passe-haut devrait permettre des les atténuer. De plus, sur les premières traces, un second pic haute fréquence est visible (point C, traces 1 à 3, figure 3.28). Il pourrait montrer l'interférence entre les ondes P et S.

Il est cependant important de noter que pour les ondes les plus rapides (figure 3.28), la fenêtre temporelle d'étude est de 0.003 s, ce qui semble très faible par rapport à la fréquence des ondes. Les conclusions précédentes sont donc discutables.

Détection des ondes réfléchies





Figure 3.28 : Spectre des premières ondes

Figure 3.29 : Spectre des ondes de surface

Pour vérifier la cohérence des ondes de surface repérées sur la figure 3.27, les temps d'arrivée sont comparés aux résultats obtenus à l'aide du logiciel Calc3D (figure 3.30). La corrélation est bonne, l'onde est donc bien l'onde d'interface recherchée.

Une analyse temps-fréquence de la trace 7 du signal émis en S_8 est ensuite présentée à la figure 3.31. Cette représentation est très riche et permet de tirer deux enseignements majeurs :

- les premières arrivée sont de haute fréquence (supérieur au kilo Hertz) et arrivent au temps 0.002 s (point A, figure 3.31),
- les secondes arrivée sont de basse fréquence (500-600 Hz) et arrivent au temps 0.006 s, il pourrait s'agir d'ondes de Rayleigh (point B, figure 3.31).

Un filtre passe-haut devrait donc permettre d'atténuer les ondes d'interface.

Par ailleurs, la résolution temporelle sur cette image est assez faible : de l'énergie est visible au temps t=0.







Figure 3.31 : Représentation temps-fréquence de la trace 7 du signal émis en 8

3.3.3 Débruitage du signal

Pour s'affranchir des ondes de surface caractérisées précédemment, un fenêtrage sur la première partie du signal suivi d'un filtre passe-haut de fréquence de coupure $f_c=500$ Hz sont appliqués (figure 3.32). Cette figure montre que les premières arrivées sont très nettes sur les premiers accéléromètres (temps=0.0013 s sur la trace 2) mais « brouillées » sur les derniers. Ceci est certainement dû aux interférences entre les ondes P et PP.



Figure 3.32 : Filtre passe-haut sur le signal émis en S₈ (bande [500;2000])

3.3.4 Séparation des ondes

Ce site correspond au test I : l'objectif est la séparation d'ondes P et PP interférant. Nous allons tester les méthodes de séparation d'ondes présentées au paragraphe 1.3 sur les signaux enregistrés.

a) Filtre FK

Après fenêtrage et filtre passe-haut (f_c =400 Hz), le spectre FK du signal est représenté sur la figure 3.33. L'onde directe est visible (plan k>0, point A), une onde réfléchie (plan k<0, point B) de haute fréquence (f=1400 Hz) semble également visible. Sa vitesse apparente est très faible (k=-0.025).



Figure 3.33 : Spectre FK du début du signal en 8

L'application du filtre FK permet d'extraire les champs directs et réfléchis (filtre rectangulaire : f=500..2000 Hz; k=0..0.03 et k=-0.03..0) du signal émis en S₈ (figures 3.34 et 3.35). Deux ondes directes sont visibles (figure 3.34, temps=0.0012 s et temps=0.0018 s). La première possède une vitesse apparente positive et est haute fréquence. Il s'agirait d'une onde P. La seconde est de plus faible vitesse apparente, ce serait une S. L'onde réfléchie PP semble également visible (temps=0.0015 s, trace 15) (figure 3.35).



b) Analyse en Composantes Principales en fréquence

L'analyse en composantes principales (ACP) en fréquence est appliquée sur le signal présenté figure 3.32. Les figures 3.36 et 3.37 présentent respectivement la projection sur l'espace signal (projection sur le premier vecteur propre) et sur l'espace bruit : les deux ondes directes P et S sont visibles sur la figure 3.36 (temps=0.001 s, trace 1 ; temps=0.002 s, trace 1). L'onde réfléchie reste invisible dans l'espace bruit (figure 3.37).

Sur cette configuration, l'analyse en composantes principales en fréquence ne permet donc pas de séparer des ondes de même fréquence et de même amplitude interférant entre elles.





Figure 3.36 : Analyse en composantes principales (espace signal)

Figure 3.37 : Analyse en composantes principales (espace bruit)

c) Filtre médian

Pour conforter les conclusions précédentes et tester les différentes méthodes de séparation d'ondes, la figure 3.38 présente les résultats obtenus avec un filtre médian : le signal est beaucoup moins net, l'onde réfléchie reste invisible.



Figure 3.38 : Signal obtenu après filtre médian en 8

d) Transformée de Karunhnen-Loève

Après avoir aligné les ondes directes, la transformée de Karhunen-Loève est appliquée au signal de référence (figure 3.39). La figure 3.40 présente le résultat de la projection dans l'espace bruit. Le signal obtenu est assez net ; les ondes P et S visualisées semblent correctes (temps=0.001 s, trace 2 ; temps=0.002 s, trace 15). Les ondes réfléchies restent cependant une nouvelle fois invisibles, sauf sur les dernières traces (trace 14 à 16, temps=0.001 s) (figure 3.40).



Figure 3.39 : Transformée de Karhunen-Loève (espace signal)



Figure 3.40 : Transformée de Karhunen-Loève (espace bruit)

e) Matrice spectrale

Après avoir aligné les ondes directes, la matrice spectrale est appliquée au signal de référence. La figure 3.41 présente le résultat de la projection sur le premier espace propre. La figure 3.42 présente le résultat de la projection sur l'espace bruit. Les ondes directes P et S deviennent parfaitement visibles (temps=0.001 s, trace 1 ; temps=0.002 s, trace 15) (figure 3.41). L'onde réfléchie semble invisible dans l'espace bruit. Une onde réfléchie est cependant visible dans l'espace signal (traces 14 à 16, temps=0.0015 s, figure 3.41).



f) Vérification des ondes

Pour vérifier la cohérence des différentes ondes repérées précédemment, les temps d'arrivée sont comparés aux résultats obtenus avec Calc3D (la vitesse moyenne utilisée est de 3400 m/s) (figure 3.43).

Les temps calculés et observés sont en bon accord pour les différentes ondes. Par ailleurs, il est intéressant de noter que les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes réfléchies et des ondes de surface sont bien distinctes (figure 3.43).



Figure 3.43 : Comparaison entre temps d'arrivée réels et simulés en 8

g) Fréquence des ondes réfléchies

Les figures 3.44 et 3.45 présentent le spectre des différentes ondes volumiques : la fréquence dominante des ondes directes est comprise entre 800 et 1200 Hz (figure 3.44), la fréquence dominante des ondes réfléchies est de l'ordre de 1400 Hz (figure 3.45). Les ondes réfléchies sont donc de plus haute fréquence que les ondes directes. Ceci semble aberrant pour un simple réflecteur. Cependant, les différentes ondes interfèrent ce qui induit des variations de fréquence. De plus, la transformée de Fourier a été appliquée sur une très courte fenêtre temporelle (par rapport à la fréquence des ondes) et les résultats énoncés portent à discussion. Une étude de sensibilité de paramètres doit donc être effectuée pour valider ce constat qui serait de grande importance si l'information recherchée n'était pas les temps d'arrivée mais la fréquence dominante des ondes.

Cette étude permet cependant de justifier l'utilisation a posteriori de filtres passe-haut pour atténuer les ondes d'interface.



Figure 3.44 : Spectre des ondes directes

Figure 3.45 : Spectre des ondes réfléchies

3.3.5 Conclusion

Sur le site Calpha1, les ondes P, S et PP sont temporellement très proches, d'amplitude et de fréquence semblables, les ondes interfèrent et leur séparation est très délicate. De plus, la phase des ondes P varie d'une trace à l'autre. Seul le filtre FK a permis de détecter les diverses ondes car son efficacité est peu dépendante des variations de phase.

Les résultats obtenus avec les autres sources sont semblables : les ondes de compression P et PP sont détectées. Le chapitre 4 montre ensuite comment les temps d'arrivée obtenus ont permis d'estimer la position de la faille (cf. 4.3.1 a)).

3.4 EXTRACTION D'ONDES : ETUDE SUR LE SITE CALPHA2 (TEST II)

Dans le site Calpha2, la faille est située à une distance de l'ordre de 40 m du dispositif. Des simulations ont montré que les ondes réfléchies devraient « arriver » après les ondes de surface et l'objectif est l'extraction d'une onde, dans un signal composé de bruit peu cohérent, mais très énergétique. **Cette étude correspond donc au test II précédent.**

L'accéléromètre 20 présentant le meilleur rapport signal sur bruit, il sera étudié en détail.

3.4.1 Etude du signal

Le signal initial est tout d'abord présenté avec et sans contrôle automatique de gain (figure 3.46 et 3.47). Les ondes directes sont alors très nettes (temps=0.004 s, trace 1), elles sont suivies d'ondes de surface plus énergétiques et de basse fréquence (temps=0.008 s, trace 1). Aucune onde réfléchie ne semble visible même après contrôle automatique de gain. Le reste du signal est composé d'ondes de surface de basse fréquence (temps=0.015 s, trace 8) et de signaux de plus haute fréquence (temps=0.0015 s, trace 15) (figure 3.47).



Figure 3.46 : Signal initial enregistré en 20



Figure 3.47 : Signal en 20 avec agc

3.4.2 Etude du champ direct

Les temps d'arrivée des ondes directes permettent, à l'aide de la tomographie, d'estimer précisément le modèle de vitesse et donc d'améliorer le rendement lors de la foration. Il est néanmoins important de les localiser avec précision sur le signal.

Pour améliorer le rapport signal sur bruit et détecter les ondes P et S, nous avons choisi d'appliquer directement les filtres précédents. Par ailleurs, pour ne pas favoriser les ondes de compression au détriment des ondes de cisaillement, nous avons choisi de ne pas appliquer d'alignement préalable.

a) Filtre FK

On applique les mêmes traitements que précédemment : un filtre passe-haut de fréquence de coupure $f_c=500$ Hz est suivi d'une moyenne glissante (.3,1,. 3) puis d'un filtre FK (filtre rectangulaire f=500..2000 Hz ; k=0..0.02). Les résultats sont donnés par la figure 3.48. Les deux ondes directes P (temps=0.003 s, trace 1) et S (temps=0.0055 s, trace 1) sont ici visibles.



Figure 3.48 : Champ direct en 20

b) Utilisation des transformées

La figure 3.49 présente la projection sur le premier espace propre de la matrice spectrale. Les deux ondes directes P et S sont également visibles.

La figure 3.50 présente le signal obtenu après application de la transformée de Karhunen-Loève et projection sur les deux premiers vecteurs propres. Les résultats sont médiocres. Ceci confirme les travaux de
Glangeaud et al. (1993) indiquant que cette méthode ne peut être utilisée que lorsque la vitesse apparente est suffisamment élevée.

La figure 3.51 présente les résultats obtenus après application de l'analyse en composantes principales en fréquence. Les résultats sont également médiocres, les ondes directes sont à peine visibles. Cette méthode ne peut donc être appliquée que pour des ondes de vitesse apparente très élevée.



Figure 3.49 : SMF (espace signal)









3.4.3 Etude du champ réfléchi

Le rapport signal sur bruit étant plus faible que sur le site Calpha1, l'extraction des ondes réfléchies va s'effectuer en deux temps :

- 1. Amélioration du rapport signal sur bruit par utilisation de méthodes classiques (filtre passe-bande, moyenne glissante).
- 2. Séparation des différentes ondes par utilisation d'algorithmes bidimensionnels.

L'onde réfléchie étant invisible sur le signal initial, aucun alignement n'a pu être effectué.

a) Débruitage des signaux

Un fenêtrage temporel est effectué pour s'affranchir des ondes de surface (figure 3.52), il est suivi d'un filtre passe-haut de fréquence de coupure $f_c=500$ Hz (figure 3.53). L'utilisation d'une moyenne glissante (de coefficients pondérateurs : mix=.2,.6,1,.6,.2) permet de renforcer les événements cohérents (figure 3.54). Une onde réfléchie semble apparaître notamment sur les traces 10 à 18 (temps=0.017 s, figure 3.54).



Figure 3.52 : Fenêtrage du signal en 20

Figure 3.53 : Filtre passe haut en 20 (f_c=500 Hz)

Figure 3.54 : Moyenne glissante en 20 (Mix=.2,.6,1,..6,.2)

b) Séparation d'ondes

Les traitements utilisés lors du paragraphe 2 vont de nouveau être appliqués.

Filtre FK

Un filtre passe-haut ($f_c=500$ Hz), suivi d'une moyenne glissante (mix=.3,1,.3-figure 3.55, mix=.5,.1,.5-figure 3.56) puis d'un filtre FK (filtre rectangulaire f=500..2000 Hz ; k=-0.02..0). sont appliqués. Une onde réfléchie est alors visible (temps=0.016 s sur la trace 22, figure 3.56).





Figure 3.55 : Champ réfléchi en 20 (mix=.3,1,.3)

Figure 3.56 : Champ réfléchi en 20 (mix=.5,1,.5)

Analyse en composantes principales en fréquence

Pour confirmer les résultats précédents, les signaux obtenus avec un filtre FK (figure 3.57) et l'ACP en fréquence (figure 3.58) (précédée d'une moyenne glissante de coefficients : .5,1,.5) sont comparés après normalisation trace à trace.

Les temps d'arrivée de l'onde réfléchie extraite à l'aide de l'analyse en composantes principales en fréquence (temps=0.014 s, trace 10) sont inférieurs aux temps obtenus avec le filtre FK (temps=0.016 s, trace 10). Ceci est inhérent au filtre qui suppose implicitement une vitesse apparente de signe constant sur l'ensemble des traces. La détection de l'onde réfléchie est donc médiocre sur les premières traces (traces 1 à 6, figure 3.57).



Figure 3.57 : Filtre FK en 20 (après normalisation)



Figure 3.58 : ACP (espace signal, après normalisation)

Matrice spectrale et Transformée de Karhunen-Loève

Bien que les exemples numériques aient montré l'inefficacité de la matrice spectrale pour cette configuration, elle a été testée après fenêtrage, filtre passe-haut (f_c =500 Hz), ajout d'une moyenne glissante (mix=.2,.6,1,.6,.2) et projection sur le premier vecteur propre. La figure 3.59 montre que l'onde réfléchie visualisée précédemment avec la moyenne glissante (figure 3.56) est de nouveau visible mais son extension s'arrête pour un nombre limité de traces (traces 8 à 18, figure 3.59).

De même la transformée de Karhunen-Loève a été testée après fenêtrage, filtre passe haut ($f_c=500$ Hz), ajout d'une moyenne glissante (mix=.2,.6,1,.6,.2) et projection sur les deux premiers vecteurs propres (figure 3.60). L'onde réfléchie visualisée précédemment est de nouveau visible sur quelques traces (traces 8 à 18, figure 3.60).



Figure 3.59 : SMF (espace signal (après moyenne glissante)

Figure 3.60 : TKL (espace signal) (après moyenne glissante)

3.4.4 Vérification

Un pointé a été réalisé (cf. annexe J) et une comparaison est effectuée entre les temps d'arrivée simulés et les temps réels (la vitesse moyenne utilisée est de 3400 m/s) (figure 3.61). La corrélation est relativement bonne. L'utilisation de la moyenne glissante suivie d'un filtre FK ou d'une ACP en fréquence permet donc la détection de la faille.

Il est par ailleurs intéressant de noter que le dispositif choisi a bien été optimal dans le sens où les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes d'interface et des ondes réfléchies sont disjointes.



Figure 3.61 : Comparaison entre temps d'arrivée théoriques et réels

3.4.5 Vérification de la présence de la faille

Pour valider la détection de la faille, les mêmes traitements ont été appliqués sur les signaux enregistrés par les autres accéléromètres. Cette étude est indispensable, toute hétérogénéité doit être visible sur l'ensemble des regroupements, ceci permet de quantifier l'incertitude sur l'existence du réflecteur. Nous présenterons les signaux enregistrés par les accéléromètres 17 et 22 (cf. figure 3.25).

a) Etude du signal enregistré en 17

Les figures suivantes présentent le signal enregistré (figure 3.62) et la détection de l'onde réfléchie après ajout d'un filtre passe haut ($f_c=500$ Hz), moyenne glissante (mix=.2,.5,1,.5,.2) et filtre FK (filtre rectangulaire f=500..2000 ; k=-0.02..0) (figure 3.63). Les ondes réfléchies peuvent alors être distinguées (temps=0.018 s, trace 22 ; temps=0.022 s, trace 1 pour l'onde PP).

L'ACP en fréquence est également utilisée pour confirmer la détection de l'onde réfléchie (elle est précédée d'un filtre passe haut $f_c=500$ Hz et d'une moyenne glissante (mix=.3,1,.3) (figure 3.64). L'onde réfléchie est de nouveau visible.

Une vérification est effectuée en comparant les temps d'arrivée obtenus numériquement, avec les temps de propagation mesurés in situ. Les corrélations entre les temps obtenus sont bonnes (figure 3.65).



Figure 3.65 : Comparaison entre temps d'arrivée théoriques et réels

b) Etude du signal enregistré en 22

La figure 3.66 présente le signal obtenu pour l'accéléromètre 22, un filtre FK (filtre rectangulaire f=500..2000 k=-0.02..0) est de nouveau utilisé (il est précédé d'un filtre passe haut f_c =500 Hz et d'une moyenne glissante (mix=.2,.5,1,.5,.2)). L'onde réfléchie est parfaitement visible (temps=0.017 s, trace 22, figure 3.67).

L'analyse en composantes principales en fréquence est également testée. Cependant, lors de ce regroupement par accéléromètre commun, l'onde de surface arrive plus tard que pour les autres regroupements. Dans la fenêtre d'étude, deux ondes sont donc présentes : l'onde de surface et l'onde réfléchie. Le premier espace propre correspond à l'onde d'interface plus énergétique. La figure 3.68 présente donc la projection sur le deuxième espace propre.

Une vérification des temps d'arrivée est enfin proposée à l'aide de simulations effectuées avec le logiciel Calc3D (figure 3.69). Les deux méthodes permettent encore d'obtenir des temps de propagation très proches des temps simulés avec une vitesse moyenne de 3400 m/s.

Par ailleurs, le signe de la vitesse apparente de l'onde PP n'étant pas constant, les temps de propagation obtenus avec les méthodes FK et ACP en fréquence sont différents.





Figure 3.69 : Comparaison entre temps d'arrivée

3.5 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de tester les différentes méthodes de séparation d'ondes sur des exemples numériques et réels. La première partie a montré que les algorithmes utilisant les propriétés spectrales (FK, ACP en fréquence, SMF) semblent les plus efficaces. En outre, ils n'introduisent pas d'artefacts sur les temps d'arrivée et l'information apportée (i.e. les temps d'arrivée) peut être utilisée dans un algorithme d'inversion. Nous avons montré, sur une configuration précise, que l'erreur moyenne obtenue était de l'ordre de 5%. La seconde partie a permis d'étudier des signaux réels et a mis en évidence l'influence d'ondes d'interface très énergétiques. La stratégie appliquée dans ce projet est d'optimiser sur la position des sources et des récepteurs de manière à se retrouver dans l'une des deux configurations suivantes :

- 1. L'onde réfléchie précède l'onde d'interface et l'objectif est la séparation d'ondes P, S et PP interférant.
- 2. L'onde d'interface précède l'onde réfléchie et l'objectif est l'extraction d'une onde dans un signal très bruité.

Le premier site, nommé Calpha1, correspondait à la première configuration. Un fenêtrage temporel a été utilisé de manière à s'affranchir de l'onde d'interface. L'objectif était alors la séparation d'ondes P, S et PP de fréquence dominante semblable. Leur vitesse apparente étant de signe opposé et distinct, un filtre FK a permis de les séparer. Ceci a été confirmé par des simulations effectuées avec un logiciel de tracé de rayons : Calc3D. Les autres filtres bidimensionnels (médian, TKL, SMF) ont permis de localiser précisément les ondes dominantes (P et S) mais pas les ondes réfléchies. En effet, ces filtres recherchent une cohérence des amplitudes temporelles (médian et TKL) ou spectrales (SMF) sur l'ensemble des traces. Ils ne prennent donc pas en compte l'attribut sismique le plus sensible : le signe de la vitesse apparente.

Le second site correspond à la seconde configuration : l'onde réfléchie était noyée dans un signal très bruité. Un fenêtrage temporel a alors permis de s'affranchir en partie de l'onde d'interface. Il a été suivi d'un filtre passe-haut et d'une moyenne glissante pour améliorer le rapport signal sur bruit. Les filtres FK et ACP en fréquence ont alors permis de détecter l'onde réfléchie. Les temps d'arrivée obtenus avec ces deux méthodes diffèrent car le signe de la vitesse apparente de l'onde n'est pas constant et le filtre FK ne peut pas prendre en compte de telles variations. Les méthodes TKL et SMF se sont par contre avérées peu efficaces car l'onde recherchée n'était pas dominante. Les mêmes traitements ont été appliqués sur d'autres regroupements et ont permis de détecter l'hétérogénéité avec la même lisibilité.

Sur site, l'ensemble des filtres bidimensionnels spectraux doit être testé; le filtre FK qui semble le plus efficace présente en effet parfois des artefacts lorsque la vitesse apparente de l'onde n'est pas de signe constant.

Les simulations numériques ont montré que la présence de signaux parasites (cohérents ou non) perturbe les traitements et ajoute des artefacts. En particulier, les longueurs utilisées dans les dispositifs sont très faibles, les ondes S pourraient donc interférer avec les ondes réfléchies PP. Une vérification a posteriori devra donc être systématiquement effectuée (la relation classique $V_p=1.73^*V_s$ pourra par exemple être utilisée).

L'optimisation du dispositif présentée au chapitre 2 a été testée avec succès : dans les deux configurations retenues, les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes d'interface et des ondes réfléchies sont bien disjointes.

L'onde réfléchie est, dans tous les cas, détectée en fonction de sa vitesse apparente qui est de signe opposé à celle des ondes directes. Les dispositifs expérimentaux choisis doivent tenir compte de ce critère qui permettra de s'assurer que l'onde détectée n'est pas un artefact du filtre. Les regroupements doivent donc être choisis de manière à ce que les ondes directes et réfléchies aient des vitesses apparentes de signe opposé :

- Si l'objectif est la reconnaissance d'une hétérogénéité en avant du front de taille un regroupement par source commune (placée sur le front de taille) doit être utilisé (figure 3.70).
- Si l'objectif est la détection du toit ou du mur d'une couche, un regroupement par récepteur commun doit être employé (figure 3.71).



Le paragraphe suivant présente la méthode d'inversion retenue. Elle utilise l'information apportée par la détection d'ondes (temps d'arrivée des ondes P et PP) pour caractériser le massif en utilisant la tomographie réflexion.

Chapitre 4 : Tomographie réflexion

Objectifs du chapitre

Le chapitre précédent a montré comment détecter d'éventuelles hétérogénéités sur les signaux enregistrés. Ce chapitre montre comment transformer l'information apportée par les algorithmes de traitement du signal (i.e. les temps d'arrivée des ondes de compression P et PP) en information structurale, c'est à dire estimer le modèle de vitesse dont on pourra déduire les propriétés mécaniques du massif et la localisation d'éventuelles hétérogénéités (faille...).

Démarche utilisée

Nous avons choisi d'utiliser la tomographie réflexion. Après avoir décrit précisément la méthode élaborée, une étude de sensibilité de paramètres sera proposée à partir de simulations effectuées avec le logiciel Calc3D. Plusieurs paramètres ont été testés : le nombre de sources, l'optimisation du dispositif, la sensibilité au bruit...

Une étude expérimentale réalisée sur les sites Calpha sera ensuite proposée.

Résultats obtenus

Le champ de vitesse ainsi que la position du réflecteur sont toujours déterminés avec une précision acceptable. L'optimisation du dispositif présentée au chapitre 2 a pu être testée avec succès, un nombre de sources de l'ordre de 30 permet d'avoir des résultats tout à fait acceptables et la méthode s'est avérée robuste au bruit.

Par ailleurs, une étude sur les signaux détectés sur le site Calpha2 a pu être effectuée montrant l'efficacité de cette méthode et l'influence de l'amortissement et du lissage.

Les chapitres précédents ont permis d'élaborer une méthode pour détecter des hétérogénéités majeures engendrant des réflexions. L'objectif de la présente partie est de transformer l'information apportée par les temps d'arrivée en information structurale : détermination de la carte des vitesses (dont on pourra estimer les modules par l'équation 1.23), détermination de la position géométrique des réflecteurs. Pour limiter les temps de calculs et car les longueurs investiguées sont faibles, nous avons supposé qu'il y avait un unique réflecteur. Dans le cas contraire, le Géophysicien devra n'utiliser que les réflexions provenant d'une seule hétérogénéité (i.e. il devra s'assurer que la dérivée de la vitesse apparente est continue). Les variations de vitesse (obtenues par tomographie) permettront alors de caractériser précisément le massif.

La méthode choisie dans ce projet est semblable aux travaux de Dyer et al. (1988) avec deux améliorations notables (Celse et al. (d), 1999) :

- 1. Le massif n'est plus décomposé en une succession de couches pseudo-horizontales (seulement valable dans des milieux sédimentaires) mais il est maillé finement (le pas de maille est métrique). Ceci permet de caractériser des modèles de vitesse hétérogènes.
- 2. La reconstruction est tridimensionnelle. Les images bidimensionnelles, si elles permettent de tirer quelques enseignements sont peu utilisables pour le conducteur de travaux.

Ce chapitre est décomposé en plusieurs parties :

- 1. La première décrit précisément l'algorithme utilisé dans le logiciel (nommé TomoRef3D). Nous présenterons les méthodes choisies pour initialiser les points de réflexion et le modèle de vitesse. Nous montrerons ensuite les procédures d'incrémentation puis le test d'arrêt. Des analyses de la résolution, de la convergence et des limites de la méthode seront ensuite proposées.
- 2. La seconde présente des tests numériques bi et tridimensionnels. Pour valider le code informatique développé, des configurations homogènes seront tout d'abord testées. Des configurations hétérogènes seront ensuite étudiées. Nous avons choisi des modèles tri-couche car ils permettent de simuler un modèle de vitesse hétérogène et un réflecteur. En outre, avec ces géométries, Calc3D peut être utilisé pour déterminer rapidement les temps d'arrivée (la longueur caractéristique est alors la puissance d'une couche et l'approximation haute fréquence peut être utilisée (cf. 1.1.1)). Pour montrer l'efficacité de la méthode, le contraste de vitesse entre la première et la seconde couche a volontairement été choisi élevé (R₁₂=0.167). Nous testerons l'efficacité du logiciel en fonction de la géométrie d'acquisition, de la sensibilité au bruit...
- 3. La troisième présentera les résultats de l'analyse des signaux enregistrés sur les sites CALPHA et présentés au chapitre 3.

Les images tomographiques proviennent d'une Interface Homme Machine que nous avons développée sous Visual Basic 5 (cf. annexe M).

4.1 PRESENTATION DE LA METHODE

L'objectif de la tomographie est la minimisation de la distance L₂ entre les temps de propagation calculés à partir du modèle de vitesse et mesurés expérimentalement (cf. 1.4.2 b)).

4.1.1 Méthode proposée

La détermination du champ de vitesse et du réflecteur est effectuée avec un algorithme de type Gauss Siedel de la forme :

$$r_{k+1} = \arg[\min[J(\pi_{k}, r]]$$
(4.1)
$$\pi_{k+1} = \arg[\min[J(\pi, r_{k+1})]]$$

avec : π_k modèle de vitesse à l'itération k,

r_k modèle pour le réflecteur à l'itération k.

La méthode est basée sur le principe suivant : « On itère sur les points de réflexion de manière à déterminer les points optimaux qui deviennent ensuite des sources virtuelles et une tomographie transmission est alors effectuée avec les rayons directs et réfléchis ».

a) Algorithme choisi

Les différentes étapes de l'algorithme proposé sont les suivantes :

- 0) La zone d'étude est maillée.
- 1) Pour déterminer la position des points de réflexions initiaux, un regroupement par récepteur commun est utilisé. La position est calculée en déterminant le symétrique Q' de chaque récepteur Q par rapport au réflecteur (inconnu) (figure 4.1). Q' est l'argument du minimum de :

$$J(Q', V) = \sum_{\text{S:source}} (Q'S_i^2 - (V \times T_m(S_i, Q))^2)^2$$
(4.2)

avec :	Si	source i,
	V	vitesse (le milieu est supposé homogène),
	Q′	symétrique du récepteur par rapport au réflecteur (inconnu),
	Q	récepteur,
	$T_m(S,Q)$	temps de propagation mesuré de l'onde réfléchie de S à Q.

La vitesse V_{initiale} est évaluée à partir de la vitesse moyenne des ondes directes. Pour prendre en compte d'éventuelles hétérogénéités, une variation de la vitesse moyenne de 10% est alors permise.

Les points de réflexion R sont ensuite définis par l'intersection entre la droite (Q'S) et le plan π normal et médian à (Q'Q).



Figure 4.1 : Configuration pour l'initialisation

2) Un modèle initial de vitesse est élaboré. Pour les cellules parcourues par un rayon, la méthode BPT (Oldendorf 1961 et 1.4.2) est utilisée. Pour les autres voxels, le milieu est supposé homogène de vitesse :

$$V = \frac{\sum_{i:rayon} l_i V_{moy}}{\sum_{i:rayon} l_i}$$
(4.3)

avec :

V vitesse, l_i longueur du r

longueur du rayon i,

V_{moy} vitesse moyenne sur l'ensemble des rayons.

Il est important de noter que la méthode BPT doit être utilisée pour les ondes réfléchies, sinon le modèle initial est trop « lisse » et l'algorithme ne converge pas vers la bonne solution (au sens donné en 1.4.1). La tomographie utilise en effet l'approximation de Born et la perturbation du champ de vitesse initial reste assez faible (Lambaré, 1991).

- 3) Les points de réflexion sont considérés comme des sources virtuelles et la méthode Rai-3D (Celse, 1996) permet de déterminer le modèle de vitesse courant à l'aide d'une inversion tomographique tridimensionnelle semblable à une SIRT (Gilbert 1972 et 1.4.2). Les rais utilisés sont des arcs de cercle. Le rai choisi correspond au trajet le plus rapide. Il est important de remarquer que le rayon du cercle peut être infini, le rai correspond alors à une droite.
- 4) Une migration avec le modèle de vitesse courant est ensuite effectuée pour déterminer les points de réflexion optimaux. Le déplacement d n est calculé en minimisant la fonction :

$$H(d) = \sum_{i:rai \text{ reçu en } Q} (T_c(S_i; R_i + d\bar{n}; Q) - T_m(S_i; R_i; Q))^2$$
(4.4)

avec :	Ri	point de réflexion i,
	Q	récepteur,
	Si	source i,
	$T_c(P,R,Q)$	temps de propagation calculé de l'onde émise par la source P réfléchie en R et enregistrée en Q,
	$T_m(P,R,Q)$	temps de propagation mesuré de l'onde émise par la source P réfléchie en R et enregistrée en Q,
	ñ	normale au réflecteur,
	d	scalaire indiquant le déplacement d \vec{n} à effectuer.

La connaissance de d_{opt} permet de calculer les nouveaux points de réflexion. L'utilisation de tous les récepteurs permet de s'affranchir de l'ambiguïté vitesse-profondeur.

Cette approximation d'un réflecteur quasi-plan n'est valable que si les sources sont proches les unes des autres, ce qui est le cas car elles sont placées le long du front de taille qui est de diamètre inférieur à 10 m. Des hétérogénéités planes par morceaux pourront alors être localisées précisément.

5) La normale au réflecteur est mise à jour en effectuant une régression linéaire sur chacun des points de réflexion. Si la condition de convergence n'est pas remplie, on boucle sur le point ③.

La procédure est arrêtée lorsque :

$$\sum_{i:rayon} \left(\frac{T_{m}(i) - T_{c}(i)}{T_{m}(i)} \right)^{2} < \varepsilon$$
(4.5)

avec :

T_m(i) temps de propagation du rayon i mesuré expérimentalement,

T_c(i) temps de propagation du rayon i calculé à partir du modèle de vitesse courant,

ε paramètre d'arrêt de la boucle.

Le choix de ε est important : si ε est trop élevé, la solution finale est éloignée de la solution (au sens de 1.4.1), dans le cas contraire, le nombre d'itérations est trop élevé ce qui introduit des hautes fréquences dans le champ de vitesse (Venard et al., 1997).

De manière empirique, ε a été fixé à 0.001 mais peut être modifié après divers essais.

b) Initialisation des points de réflexion

La fonction objectif J (définie par l'équation 4.2) ne correspond pas à une migration de Kirchhoff (cf. 1.4.2) car, selon Mari et al. (b) (1994), l'offset est trop faible pour déterminer correctement l'hyperbole de diffraction. Nous avons donc choisi de travailler sur le symétrique de chaque récepteur par une méthode tridimensionnelle.

(4.6)

La fonction objectif correspond, dans le cas homogène, à une intersection de sphères de centre Si et de rayon :

$$V^{T}_{m}(S_{i},Q)$$

avec : V vitesse du milieu,

S_i source i,

Q récepteur,

T_m temps de propagation mesuré de S à Q_i.

Cette fonction n'est a priori pas convexe. La figure 4.2 présente la fonction objectif à minimiser pour un dispositif expérimental semblable à celui décrit en 4.2.3. Les axes x et y correspondent à la position du symétrique, l'axe z correspond à la valeur de la fonction objectif. Cette fonction pourrait sembler lisse, cependant lorsque les données supérieures à 2 sont tronquées, la surface obtenue (figure 4.3) est fortement non convexe et les algorithmes classiques de type gradient divergent. Cette non-convexité peut être physiquement expliquée par le contraste très marqué de vitesse lors de la simulation numérique proposée. Cependant, dans le cas réel, la convexité de la fonction J et donc la convergence des algorithmes d'optimisation classique ne peut en aucun cas être garantie.

La minimisation est donc effectuée à l'aide d'un algorithme combinatoire utilisant l'heuristique suivante : « le symétrique appartient à la couronne (centré sur l'isobarycentre des sources) dont le rayon intérieur est : TpsRefMin*0.9*V_{moy} (TpsRefMin : minimum des temps de réflexion, V_{moy} : vitesse moyenne) et le rayon supérieur : TpsRefMax*1.1*V_{moy} (TpsRefMax : maximum des temps de réflexion) ». La zone d'investigation est de nouveau maillée finement (le pas de maille est de l'ordre de 20 cm, ce maillage est différent de celui utilisé pour la vitesse). Toutes les position possibles de symétrique sont testées (chaque nœud du maillage) et le symétrique Q' correspond au nœud N pour lequel J(N,V) est minimal (J est définie par la formule 4.2).

Pour minimiser les temps de calculs, les récepteurs étant proches les uns des autres, les symétriques sont recherchés dans un voisinage du symétrique correspondant au récepteur précédent (sauf pour le premier). Le voisinage est défini par un cube de côté 10 m. Le temps de calcul est ainsi amélioré bien que cette étape reste de loin la plus coûteuse, notamment en trois dimensions.

Par ailleurs, la valeur de la fonction objectif permet de donner une appréciation concernant la qualité des points de réflexion obtenus. Lorsque cette valeur est trop éloignée de la moyenne, la confiance attribuée aux rais obtenus lors de l'inversion sera faible.



Figure 4.2 : Fonction objectif en fonction des positions de Q'



Figure 4.3 : Fonction objectif après troncation

c) Inversion 2D et 3D

Le programme Rai3D développé par Celse (1996) est un programme d'inversion tomographique tridimensionnel semblable à celui développé par Gautier (1991). Il correspond à une SIRT (Dynes et al., 1979) dont la forme des rais est un arc de cercle. Le présent programme a donc été naturellement écrit en trois dimensions. Cependant, de nombreux dispositifs expérimentaux sont plans et une procédure spécifique a dû être développée.

La différence entre les deux programmes (2D et 3D) réside dans l'initialisation des points de réflexion (recherche du symétrique dans un espace à deux ou trois dimensions) et dans le calcul de la régression linéaire.

Pour la recherche à deux dimensions, par exemple dans le plan (x,y), on suppose que la projection du symétrique sur l'axe z correspond à la projection du récepteur sur ce même axe.

Le calcul de la régression linéaire est effectué selon deux méthodes :

- pour le programme 2D, il s'agit d'une régression linéaire classique utilisant une minimisation aux moindres carrés car le réflecteur est une droite et la fonction objectif est scalaire,
- pour le programme 3D, la fonction objectif n'est plus scalaire et cette méthode ne peut être utilisée. Le réflecteur correspond alors au plan médian à tous les points de réflexion. Il est défini par l'isobarycentre et par la normale au plan :

$$\vec{n} = \sum_{R_i} \overrightarrow{BaryR_i} \wedge \overrightarrow{BaryR_{i+1}}$$
(4.7)

avec : Bary isobarycentre des points de réflexions,

- R_i point de réflexion i,
- \vec{n} normale au réflecteur.

Excepté ces deux différences, les deux programmes sont tridimensionnels, c'est à dire que les rais utilisés parcourent tout l'espace même pour un dispositif plan.

4.1.2 Amortissement et lissage

A cause des fortes contraintes géométriques, des erreurs lors du pointé des temps d'arrivée et des répartitions de rais non homogènes, le problème inverse est généralement mal posé (Tarantola, 1986 ; Chang, 1996), ce qui signifie que l'information disponible n'est pas suffisante pour déterminer certains paramètres (ils sont dans le noyau du problème direct, cf. 1.4.1). De plus, l'inversion tomographique est un problème non linéaire car les rais ne suivent pas forcément des droites.

Pour renforcer la stabilité et améliorer la convergence un amortissement est utilisé. De même, pour obtenir des solutions physiquement acceptables une régularisation est effectuée (Celse et al. (a), 1999) (les solutions choisies doivent avoir certaines caractéristiques physiques propres : un modèle de vitesse doit par exemple être continu par morceaux, on restreint ainsi l'espace des modèles défini en 1.4.1).

Deux types d'amortissements ont été utilisés :

- les valeurs des vitesses d'une itération sur l'autre sont lissées : une nouvelle valeur de vitesse n'est acceptée que si la variation avec la valeur précédente est inférieure à 10%,
- les points de réflexion ne sont acceptés que si les variations d'une itération sur l'autre sont inférieures à 20%.

L'amortissement ne doit pas être négligé car il assure la convergence de l'algorithme (Maurer et al., 1997).

Par ailleurs, plusieurs types de régularisation sont utilisées :

- filtrage moyen : un élément de référence est défini : dans notre cas il s'agit d'un cube dont le côté est égal au triple de la valeur d'une maille. La valeur de la vitesse dans le voxel situé au centre de l'élément de référence est remplacée par la moyenne pondérée des valeurs de vitesse de chacune des cellules appartenant à cet élément. Le modèle de vitesse est alors supposé continu et « lisse ».
- filtre médian : le principe est le même que précédemment, on ne calcule cependant plus la moyenne mais la médiane (Gersztenkorn et al., 1987). Le modèle de vitesse est supposé continu par morceaux.
- « Convolutional Quelling » (CQ), cette méthode proposée par Meyerholtz et al. (1989) effectue un lissage des longueurs des rayons dans chacune des cellules. Ceci correspond à un lissage des lignes de la matrice G définie par l'équation 1.30.

Cette dernière méthode est à rapprocher de la zone d'influence définie par Côte (1988) permettant de prendre en compte la finitude de la fréquence des ondes. Par ailleurs, ce filtre peut être utilisé conjointement avec le filtre moyen ou le filtre médian.

Selon Philipps et al. (1991), le filtre CQ est le plus efficace. Le filtre « moyen » donne de bons résultats dans le cas de milieux quasi-homogènes mais est peu efficace pour des configurations à fort contrastes. Il tend en effet à lisser l'image finale. Le filtre médian est intéressant car il respecte les forts contrastes, mais élimine des pics isolés visibles dans les images tomographiques notamment lors de faibles couvertures spatiales dans une région particulière de l'espace.

4.1.3 Etude de la convergence

Ivansson (1983) a montré que lorsque les méthodes géométriques convergeaient, elles étaient équivalentes à une minimisation aux moindres carrés par méthodes de gradient. Par ailleurs, le manuel de la Qualité en Géophysique (BRGM et al., 1992) préconise une erreur maximale de 3% sur les temps de parcours et les distances pour obtenir un résultat acceptable. La fiabilité de la méthode ne peut donc être assurée que si les points de réflexion lors de la migration initiale sont proches des points de réflexion exacts, d'où l'importance de cette étape.

4.1.4 Etude de la résolution

La résolution obtenue est limitée d'une part, par des considération physiques sur la forme de l'onde et d'autre part, par des considérations numériques sur le type d'algorithme choisi.

En ce qui concerne la forme de l'onde, sur un exemple numérique et dans le cas d'un milieu macroscopiquement homogène (i.e. l'approximation « rais droits » est valable), Williamson et al. (1993) utilisent la Transformée de Radon des ondes directes pour quantifier la résolution maximale obtenue. Elle peut être estimée par

$$\sqrt{\frac{\lambda R}{4\pi}}$$

(4.8)

avec : R longueur des rayons,

 λ longueur d'onde minimale.

Par ailleurs, en utilisant la transformée de Radon et sans tenir compte de la fréquence des ondes, Rector et al. (1994) ont estimé la résolution maximale par la formule suivante :

$$\frac{W}{58.8 * \tan(\Delta \varphi)} \tag{4.9}$$

avec : W distance interpuits,

Δφ variation angulaire maximale (i.e. maximum des angles entre les rais pris deux à deux).

La résolution obtenue est donc fonction de l'ouverture angulaire dans chaque voxel. A titre d'illustration, la figure 4.4 présente les résolutions obtenues (calculées à partir de la formule 4.9) pour différentes longueurs de rais (15 m et 40 m). L'utilisation des ondes réfléchies permettra donc d'améliorer la résolution angulaire mais leur longueur est deux à trois fois supérieure aux ondes directes. La résolution globale ne sera donc pas améliorée au contraire du champ d'investigation. Ceci montre néanmoins l'importance de l'optimisation du dispositif présentée au chapitre 2. Elle permettra d'améliorer la résolution angulaire et donc la qualité des images tomographiques.

Par ailleurs, selon Gautier (1991) les erreurs de positionnement des récepteurs entraînent une mauvaise estimation de la vitesse dans un voisinage de ces points. Le champ de vitesse sera donc mal estimé au

voisinage du réflecteur et plus proche sera le forage du réflecteur, plus faibles seront les erreurs sur les points de réflexion, et meilleure sera alors l'image tomographique obtenue.



Figure 4.4 : Evolution de la résolution en fonction de l'ouverture angulaire

4.1.5 Contraintes de la méthode

Les contraintes géométriques imposent une faible ouverture angulaire (i.e. l'offset est limité par la taille du front de taille, il est donc inférieur à 10 m). La résolution obtenue sera donc assez faible. En outre, la convergence de l'algorithme ne peut être garantie car elle dépend de la précision des points de réflexion obtenus lors de l'étape d'initialisation (cf. 4.1.1 b)). Cette étape est fonction de la représentativité de la vitesse moyenne (calculée par les ondes directes) par rapport au champ de vitesse global. Lors de l'étape d'initialisation, nous proposons d'analyser a posteriori la valeur de la fonction à minimiser (définie par l'équation 4.2). La qualité de chaque point de réflexion obtenu pourra ainsi être estimée. Une note sera alors donnée à chaque rai pour minimiser l'influence des rais incertains. Nous classons donc l'ensemble des rais en deux ensembles disjoints (le logarithme est utilisé pour minimiser l'influence d'une valeur aberrante) :

- 1. Les points de réflexion de confiance égale à 1 correspondant aux symétriques pour lesquels $\log[J(Q',V)]$ est inférieure à la valeur moyenne de $\log[J]$ (J est définie par l'équation 4.2).
- 2. Les points de réflexion de confiance égale à 0.1 correspondant aux symétriques pour lesquels log[J(Q',V)] est supérieure à la valeur moyenne de log[J] (J est définie par l'équation 4.2).

Par ailleurs, cette méthode ne permet de localiser qu'un seul réflecteur. Cette hypothèse qui peut sembler trop contraignante dans le cadre de la sismique pétrolière, semble tout à fait acceptable à l'échelle géotechnique où les distances investiguées sont décamétriques.

4.2 ETUDE SUR MODELE

Pour montrer l'efficacité de la méthode proposée et déterminer les paramètres optimaux, des tests bi et tridimensionnels vont être présentés. Ces inversions seront effectuées sans ajout d'informations a priori. Les temps d'arrivée seront calculés à partir du logiciel Calc3D, ils correspondent donc aux temps vrais. Nous considérons donc que la longueur d'onde utilisée est suffisamment faible par rapport à la taille des hétérogénéités (cf. 1.1.1).

En outre, pour montrer que les ondes réfléchies seront bien détectables dans les dispositifs utilisés, l'annexe K présente une simulation effectuée avec Axitra pour une géométrie classique : l'onde réfléchie est alors parfaitement visible.

4.2.1 Validation du code informatique TOMOREF3D

Les rayons utilisés lors de l'inversion sont des arcs de cercle, ce qui fait l'hypothèse implicite d'un milieu à gradient homogène. Pour valider le code informatique implémenté, des simulations numériques sur des configurations homogènes (i.e. à gradient constant égal à 0) vont être proposées.

a) Etude 2D : Réflecteur vertical

Pour valider la méthode, nous proposons un modèle homogène avec un seul réflecteur. Celui-ci est vertical et placé à une distance de 15 mètres de l'origine. Dix récepteurs sont positionnés le long du forage parallèle à l'axe x avec un pas d'espacement régulier de 1 m entre les points x=1 et x=11. Dix émetteurs sont placés sur le front de taille entre les points y=1 et y=11 avec un pas d'espacement de 1 m (figure 4.5). Le milieu est homogène de vitesse : 3500 m/s.

La figure 4.6 présente le modèle de vitesse obtenu par tomographie transmission (en haut) et réflexion (en bas). La figure 4.7 présente les points de réflexion obtenus. Le champ de vitesse ainsi que la position du réflecteur sont déterminés avec une bonne précision. La vitesse obtenue est de l'ordre de 3500 m/s pour les tomographies par transmission et réflexion (l'écart est inférieur à 20 m/s) (figure 4.6). Les points de réflexion sont très proches de la position exacte (figure 4.7) (l'écart aux points de réflexion théoriques est inférieur à 1%).

Une analyse a posteriori est effectuée en présentant les rayons utilisés lors de l'inversion (figure 4.9). A titre de comparaison, les rayons utilisés lors de la simulation sont également présentés (figure 4.8) : les rayons utilisés lors de l'inversion sont semblables aux rais vrais.

Grâce à l'utilisation des ondes réfléchies, cette méthode permet donc, comme prévu, d'améliorer l'ouverture angulaire notamment dans la zone définie par les plans x=10 et x=15 (figure 4.9, point A).



Figure 4.5 : Dispositif expérimental



Figure 4.6 : Modèles de vitesse obtenus



Figure 4.8 : Rayons utilisés lors de la simulation



Figure 4.7 : Position de la faille obtenue



Figure 4.9 : Rayons utilisés lors de l'inversion

b) Etude 2D : Réflecteur horizontal

Pour calculer la stabilité d'un tunnel, il est important de déterminer les limites de la couche creusée. Le test suivant permet de déterminer le mur (limite inférieure) d'une couche homogène de vitesse 3500 m/s.

Le réflecteur est placé en y=30 (le forage étant parallèle à l'axe x et d'équation y=20). Trente récepteurs sont placés le long du forage entre les points x=0.5 et x=15 avec un pas d'espacement de 50 cm. Seize sources sont placées le long du front de taille entre les points y=16 et y=24 avec un pas d'espacement de 50 cm (figure 4.10).

La figure 4.11 présente le champ de vitesse, la figure 4.12 les points de réflexion obtenus. Les résultats sont une nouvelle fois excellents : le modèle de vitesse obtenu est homogène et de vitesse de l'ordre de 3500 m/s (l'écart au modèle théorique est inférieur à 20 m/s). Les points de réflexion obtenus (figure 4.12) sont très proches de la position théorique (l'écart aux points de réflexion théoriques est inférieur à 1%). La méthode est donc parfaitement adaptée aux milieux faiblement hétérogènes.

Une analyse a posteriori est proposée en comparant les rais utilisés lors de la simulation et lors de l'inversion. Les rayons exacts (figure 4.13) et obtenus (figure 4.14) sont comparables. L'ouverture angulaire est une nouvelle fois améliorée grâce à l'utilisation des ondes réfléchies (zone comprise entre les plans y=20 et y=30, figure 4.14, point A).



Figure 4.10 : Modèle proposé



Figure 4.11 : Modèle de vitesse obtenu



Figure 4.13 : Rayons utilisés lors de la simulation



Figure 4.12 : Points de réflexion obtenus



Figure 4.14 : Rayons utilisés lors de l'inversion

c) Etude 3D : réflecteur vertical

La configuration retenue est la suivante : un réflecteur vertical est situé à 20 m du front de taille (figure 4.15). Vingt huit récepteurs sont répartis le long du forage (de longueur 15 m et coaxial au tunnel) avec un pas d'espacement constant de 0.5 m (figure 4.17). Trente six émetteurs sont répartis « en croix » le long du front de taille de diamètre 10 m (figure 4.16). Le pas d'espacement entre chaque récepteur est : 0.5 m. La gueule du forage est placée au point (0;10;10) (figure 4.17).

La figure 4.18 présente le champ de vitesse obtenu. Il s'agit de coupes 2D correspondant à des plans perpendiculaires à l'axe z. Le champ de vitesse obtenu est homogène et la vitesse est de l'ordre de 3500 m/s (l'écart à la configuration théorique est inférieur à 20 m/s). La figure 4.19 présente les points de réflexion obtenus : ils sont situé sur le réflecteur (l'écart aux points de réflexion théoriques est inférieur à 1%).





d) Conclusion

Les études sur modèles homogènes permettent de valider le code informatique TomoRef3D implémenté.

4.2.2 Utilisation des rais droits ou courbes

En règle général, pour les dispositifs utilisés, le modèle de vitesse obtenu est quasi-insensible au choix de l'utilisation de rais droits ou courbes. Par contre, l'utilisation de rais circulaires double le temps de calcul. L'objectif de ce paragraphe est de présenter des configurations pour lesquelles l'utilisation de rais courbes devrait permettre d'améliorer quelque peu la qualité des images obtenues. Cette partie a pour but de décider si les rayons utilisés doivent être de forme circulaire ou si l'approximation « rais droits » est suffisante.

Figure 4.19 : Points de réflexions obtenus

a) Couche horizontale

Cette configuration est banale, notamment dans les milieux sédimentaires, mais très délicate à traiter avec les traitements classiques utilisés en VSP car l'hypothèse classique de milieu perpendiculaire au forage est totalement erronée.

Pour ce test, le forage est horizontal, de longueur 15 m, situé le long de la droite y=15, et à l'intersection entre deux couches horizontales dont l'une est de vitesse 2500 m/s et l'autre 3500 m/s (figure 4.20). Un réflecteur est positionné en y=30. Le tunnel est de diamètre 8 m. La vitesse est de 2500 m/s sur le toit et de 3500 m/s sur le mur. Huit sources sont réparties le long du front de taille (le long de l'axe y) avec un pas d'espacement constant de 1 m, trente récepteurs sont placés le long du forage avec un pas d'espacement constant de 50 cm (figure 4.20).

Le modèle étant très hétérogène, les rais en arcs de cercle devraient permettre d'améliorer le résultat.

La figure 4.21 présente les modèles de vitesse obtenus pour :

- 1. la tomographie transmission (en haut),
- 2. la tomographie réflexion avec utilisation exclusive de rais droits (au milieu),
- 3. la tomographie réflexion avec utilisation de rais droits et en arcs de cercles (en bas).

Dans les zones parcourues par les ondes directes (i.e. au voisinage du forage), les résultats obtenus avec les trois méthodes sont comparables. Par contre, les rayons circulaires permettent d'améliorer légèrement la qualité de l'image (le temps de calcul est cependant doublé). La figure 4.22 présente les points de réflexion obtenus (avec les rais droits ou en arcs de cercle), les résultats sont semblables pour les deux méthodes.

La différence entre les deux résultats n'est donc pas significative, si ce n'est au voisinage du réflecteur (point A, figure 4.21).



Figure 4.20 : Dispositif proposé



Figure 4.21 : Modèles de vitesse obtenus

Figure 4.22 : Points de réflexion obtenus

b) Réflecteur traversant le forage

Il s'agit du cas classique bien connu dans le domaine pétrolier. La configuration retenue est la suivante : une couche verticale est située en x=10. Elle est perpendiculaire au forage horizontal de longueur 15 m. Le tunnel est de diamètre 8 m (figure 4.23). Huit sources sont réparties le long du front de taille (le long de l'axe y) avec un pas d'espacement constant de 1 m, trente récepteurs sont placés le long du forage avec un pas

d'espacement constant de 50 cm. La vitesse est de 3500 m/s près du front de taille et 2500 m/s dans la partie x>10.

Ce modèle devrait favoriser l'utilisation de rais circulaires notamment pour les ondes directes.

La figure 4.24 présente les modèles de vitesse obtenus pour :

- 1. la tomographie transmission (en haut),
- 2. la tomographie réflexion avec utilisation exclusive de rais droits (au milieu),
- 3. la tomographie réflexion avec utilisation de rais droits et en arcs de cercles (en bas).

Pour les trois méthodes, les champs d'investigation sont de tailles comparables. L'utilisation des ondes réfléchies permet d'améliorer la qualité du modèle de vitesse obtenu dans la partie x>10. Par contre, l'utilisation de rais de forme circulaire ne permet pas d'améliorer la qualité de l'image finale.

La figure 4.25 présente les points de réflexions obtenus après inversion avec des rais droits et en arcs de cercle. Les points sont très proches les uns des autres et l'utilisation de rais en arcs de cercle ne semble pas justifiée pour ce modèle.

L'annexe N présente la même configuration mais en imposant comme modèle initial de vitesse le modèle obtenu par tomographie transmission. La qualité de l'image obtenue par tomographie réflexion avec rayons courbes est alors améliorée.



Figure 4.23 : Modèle proposé



Figure 4.24 : Modèles de vitesse obtenus

Figure 4.25 : Points de réflexion obtenus

c) Conclusion

En conclusion, pour les géométries utilisées, l'utilisation de rais circulaires (qui double les temps de calculs) ne semble pas justifiée. En effet, même dans des cas favorables à l'utilisation de rais courbes, la qualité des images fournies est semblable à celles obtenues en utilisant exclusivement des rais droits. Les conclusions sont donc identiques à celles proposées par Celse (1996) pour la tomographie transmission.

4.2.3 Influence de la régularisation et du choix de la taille de maille

L'objectif de ce paragraphe est de présenter l'influence du choix de la régularisation (i.e. choix de l'espace modèle M, cf. 1.4.1) et de la taille de mailles sur la qualité du résultat obtenu.

Le modèle théorique choisi est tri-couche (figure 4.26) :

- une couche verticale rapide (V=3500 m/s) comprise entre les plans x=-∞ et x=4,
- une couche verticale lente (V=2500 m/s).

Le réflecteur est vertical et placé en x=15. Vingt récepteurs sont répartis le long du forage d'équation (y=10) entre les points (2;10) et (11.5;10) par pas de 50 cm. Les 10 sources sont placées le long du front de taille entre les points (1;12) et (1;21) par pas de 50 cm (figure 4.26).

La figure 4.27 présente les rayons utilisés lors des simulations numériques. La variation angulaire due à l'interface située en x=4 est parfaitement visible (point A (4;16)). L'ouverture angulaire est grande pour les zones situées près du front de taille et près du réflecteur.





Figure 4.26 : Dispositif expérimental

Figure 4.27 : Rayons utilisés lors de la simulation

Deux études ont été effectuées :

- la première avec des mailles très fines (de taille 0.5*0.5 m),
- la seconde avec un maillage plus grossier (de taille 1*1 m).

La figure 4.28 présente les modèles de vitesse obtenus avec un maillage fin pour plusieurs types de régularisation (celles-ci sont appliquées à chaque itération). Le nombre d'itérations effectuées est de l'ordre de 15 (l'arrêt effectif est déclenché par le test présenté par l'équation 4.5). Le filtre médian permet d'obtenir le résultat de meilleur qualité (l'écart sur les vitesses est de 137 m/s, l'écart sur les points de réflexion est de 1.14%). Ceci est cohérent, car dans le cadre des simulations tri-couche, le modèle de vitesse est continu par morceaux et la fréquence des ondes est infinie. Le filtre médian est donc le plus adapté. Ceci est confirmé par l'étude quantitative des écarts à la configuration théorique (tableau 4.1).

L'analyse des résultats obtenus avec une taille de maille plus importante (taille 1*1 m) (figure 4.29) permet de tirer des conclusion semblables aux précédentes : le filtre médian est le plus adapté pour un modèle de vitesse tri-couche et une fréquence des ondes infinie. Par ailleurs, les résultats obtenus avec une taille de maille de 1*1 m (tableau 4.2) sont de moins bonne qualité qu'avec une taille de maille plus faible (tableau 4.1). Ceci montre que la taille des cellules doit être choisie par un compromis entre la taille des hétérogénéités (i.e. des variations brutales de vitesse), et la quantité d'informations apportées. Nous utilisons en effet des rais droits ce qui suppose implicitement des variations lentes de vitesse. Dans le cas présent, le nombre de rayons est important et la quantité d'informations apportées pour des mailles de taille de 0.5*0.5 m est suffisante. L'utilisation d'un maillage fin permet de « répartir » la variation brutale de vitesse sur plusieurs cellules mais sur une distance faible. Une taille de maille de 50 cm permet donc d'obtenir le meilleur résultat.

La colonne 4 des tableaux 4.1 et 4.2 présentent les résidus normalisés (formule 4.5), la colonne 5 les résidus obtenus (cf. 1.4.2). L'absence de régularisation permet d'obtenir les résidus les plus faibles mais l'écart au modèle théorique est le plus important. Conformément à des travaux antérieurs (Olayinka et al., 1998), la valeur moyenne des résidus ne peut donc pas être utilisée pour quantifier le résultat obtenu par l'inversion.

Par ailleurs, la qualité des images tomographiques est fonction de la qualité et de la quantité d'informations apportées. Pour les images obtenues sans filtre, l'information apportée est exacte seulement dans les zones où le nombre de rayons est élevé et où la répartition angulaire est grande comme le montre les figures 4.30 (nombre de rayons) et 4.31 (répartition angulaire). La comparaison de ces figures avec les modèles de vitesse présentés sur les figures 4.28 (point A) et 4.29 (point A) montre bien que **le modèle de vitesse obtenu est exact dans les zones où la qualité et la quantité d'informations sont suffisamment importantes.**

Cette étude tendrait à montrer que le filtre CQ ne doit pas être utilisé, cependant les simulations utilisent un tracé de rayons, c'est à dire une approximation haute fréquence. La zone de Fresnel est donc nulle et l'utilisation d'un tel filtre ne se justifie plus. En outre, l'utilisation d'un filtre CQ ne permet pas d'obtenir un modèle de vitesse correspondant aux simulations effectuées (i.e. avec une telle discontinuité de vitesse). Or physiquement, les ondes sont de fréquence finie et les discontinuités moins abruptes. Cette information doit être utilisée lors de l'inversion. Dans le cadre de ce rapport, les images ont donc été obtenues avec l'utilisation conjointe d'un filtre CQ et d'un filtre médian.



Figure 4.28 : Vitesses obtenues pour des mailles de 0.5*0.5 m

Figure 4.29 : Vitesses obtenues pour des mailles de 1*1 m

Types de filtre	Ecart Vit (m/s)	Ecart Pts ref(%)	Rés normalisés	Résidus
CQ+Moyen	193	2.09	6.4*10-4	1.9*10-6
CQ + Médian	143	2.04	4.5*10-4	1.7*10-6
Moyen	152	2.45	6.3*10-4	1.8*10-6
Médian	137	1.14	4.1*10-4	1.6*10-6
Sans filtre	191	1.01	2.3*10-4	9.5*10-7

Tableau 4.1 : Ecarts au modèle théorique pour des mailles de taille 0.5*0.5 m

Types de filtre	Ecarts Vit (m/s)	Ecarts Pts ref (%)	Rés normalisés	Résidus
CQ+Moyen	190	2.5	1.3*10 ⁻³	3.66*10-6
CQ+Médian	180	1	1.2*10 ⁻³	3.31*10-6
Moyen	210	2.5	1.4*10-3	3.9*10-6
Médian	180	0.8	1.0*10-3	3.1*10-6
Sans filtre	230	2	3.1*10-4	1.4*10-6

Tableau 4.2 : Ecarts au modèle théorique pour des mailles de taille 1*1 m



Figure 4.30 : Nombre de rayons (taille de maille : 0.5*0.5 m)



Figure 4.31 : Répartition angulaire (taille de maille : 0.5*0.5 m)

4.2.4 Influence du modèle initial

La convergence de la méthode ne peut être assurée que si les points de réflexion obtenus initialement sont dans un voisinage des points de réflexion exacts. L'initialisation a donc une importance capitale. Sa qualité dépend de la précision obtenue sur le symétrique de chaque récepteur et donc de la taille de maille utilisée pour sa recherche. L'objectif de ce paragraphe est de présenter les résultats obtenus pour différentes tailles de maille (lors de la recherche du symétrique). Le modèle initial de vitesse sera également présenté.

Le modèle théorique est le suivant (figure 4.32) :

- une couche verticale comprise entre les plans $x=-\infty$ et x=6, de vitesse 3500 m/s,
- une deuxième couche verticale comprise entre les plans x=6 et x=30, de vitesse 2500 m/s.

Trente sept récepteurs sont répartis le long de l'axe y=20 entre les points (2;20) et (15;20) avec un pas d'espacement de 50 cm. Seize émetteurs sont placés le long de l'axe x=1 entre les points (1;16) et (1;24) avec un pas d'espacement de 50 cm (figure 4.32). Le réflecteur est situé le long de la droite x=30. Les contraintes géométriques sont celles imposées par un tunnel de 8 mètres de diamètre.

La figure 4.33 présente les rayons utilisés lors des simulations. Le forage étant coaxial au tunnel et le réflecteur perpendiculaire au tunnel, l'ouverture angulaire est extrêmement faible.



 0
 10
 20
 30

 Tunnel
 réfle:teur

 20
 Forage

 24
 réfle:teur

Figure 4.32 : Dispositif expérimental

Figure 4.33 : Rayons utilisés lors des simulations

La figure 4.34 présente le modèle initial de vitesse obtenu par une BPT (Oldendorf, 1962). Il a été obtenu avec un maillage de pas 20 cm pour la recherche du symétrique (cf. 4.1.1.b)). Le modèle de vitesse obtenu est très lisse et le contraste de vitesse est difficilement perceptible.

La figure 4.35 présente le modèle de vitesse obtenu après 20 itérations de TomoRef3D. Il a été obtenu avec un maillage de pas 4 m pour la recherche du symétrique (cf. 4.1.1 b)). Le contraste de vitesse est visible pour les zones parcourues par les ondes directes. Par contre, au-delà du forage le modèle de vitesse est erroné.

La figure 4.36 présente le modèle de vitesse obtenu après 20 itérations de TomoRef3D et le modèle initial présenté en figure 4.34 (i.e. avec une taille de maille de 20 cm pour la recherche du symétrique). Le contraste de vitesse est parfaitement visible.

L'écart entre le modèle de vitesse obtenu et le modèle vrai est de 230 m/s pour une taille de maille de 0.2 m (figure 4.36) et 500 m/s pour une taille de maille de 4 m (figure 4.35). Le champ de vitesse obtenu avec des points initiaux éloignés des points exacts est donc différent du champ de vitesse théorique, les contrastes de vitesse restent néanmoins parfaitement visibles dans la partie parcourue par les ondes directes.

La figure 4.37 présente également les points de réflexion obtenus initialement et après 20 itérations. Les points de réflexion obtenus après itérations sont assez proches des points de réflexion exacts même lorsque l'initialisation est médiocre.

En conclusion, si la tomographie réflexion est utilisée dans le seul but de localiser le réflecteur, la tolérance pour le calcul du symétrique peut être assez large (de quelques mètres), en contre partie le modèle de vitesse obtenu ne sera correct que dans les zones parcourues par les ondes directes. Par contre, si la tomographie est utilisée pour déterminer précisément le réflecteur et le champ de vitesse, la tolérance sur le calcul du symétrique doit être très faible. Les temps de calculs seront alors beaucoup plus longs.





Figure 4.34 : Modèle initial (taille de maille=20 cm)







Figure 4.36 : Modèle de vitesse après 20 itérations (taille de maille=20 cm)



Légende utilisée

Figure 4.37 : Points de réflexion obtenus en fonction de la taille de maille : D

4.2.5 Influence de l'optimisation

L'objet du présent paragraphe est de présenter les résultats avant et après optimisation sur l'orientation du forage.

a) Etude 2D

Le modèle théorique est le suivant (figure 4.38) :

- une couche verticale comprise entre les plans $x=-\infty$ et x=4, de vitesse 3500 m/s,
- une deuxième couche verticale comprise entre les plans x=4 et x=35, de vitesse 2500 m/s.

Trente sept récepteurs sont répartis le long de l'axe y=20 entre les points (0.4;20) et (15;20) avec un pas d'espacement de 40 cm. Seize émetteurs sont placés le long de l'axe x=1 entre les points (1;16) et (1;24) avec un pas d'espacement de 50 cm (figure 4.39). Le réflecteur est situé le long de la droite x=35. Les contraintes géométriques sont celles imposées par un tunnel de 8 mètres de diamètre.

Les figures 4.39 et 4.40 présentent les dispositifs avant et après utilisation de l'optimisation. Le forage est alors oblique : les temps d'arrivée des ondes réfléchies sont bien supérieurs aux temps d'arrivée des ondes de surface. Les fenêtres temporelles d'arrivée deviennent disjointes (cf. 1.3.3). Ceci est possible car le réflecteur est suffisamment éloigné du front de taille.

La figure 4.41 présente le modèle de vitesse obtenu sans optimisation (en haut) et après optimisation (en bas). L'utilisation de l'optimisation permet d'améliorer la qualité de l'image finale : l'écart moyen à la configuration théorique est de 293 m/s pour la configuration initiale et de 263 m/s après optimisation.

Les figures 4.42 et 4.43 présentent le champ d'investigation avant (figure 4.42) et après (figure 4.43) optimisation. Le champ d'investigation et l'ouverture angulaire sont alors considérablement améliorés. De plus, l'optimisation ne détériore pas la qualité des points de réflexion obtenus qui restent assez proches des points de réflexion exacts (figure 4.44).



Figure 4.38 : Dispositif choisi

Figure 4.39 : Dispositif avant optimisation Figure 4.40 : Dispositif après optimisation







Figure 4.42 : Champ initial







Figure 4.44 : Points de réflexion obtenus

b) Etude 3D

Le dispositif choisi est semblable à celui présenté au paragraphe 1.6.5 mais le modèle de vitesse est hétérogène : une couche verticale (d'équation x=4) limite une zone rapide (V=3500 m/s, x>4) et une zone lente (V=2500 m/s, x<4). Les figures 4.45 et 4.46 présentent le dispositif utilisé avant et après optimisation en vue de dessus (plan (x,y)) (cf. figures 2.33 et 2.34 pour les vues transversales). Le forage est oblique de manière à retarder l'arrivée des ondes réfléchies et augmenter le champ d'investigation et l'ouverture angulaire.

La figure 4.47 présente le modèle de vitesse obtenu avant et après optimisation. Les images correspondent à des coupes par des plans perpendiculaires à l'axe x. Le champ d'investigation est considérablement élargi, en outre l'amélioration de l'ouverture angulaire permet d'améliorer sensiblement la qualité d'information apportée, le modèle de vitesse obtenu est alors beaucoup plus proche du modèle exact. De manière plus quantitative, l'écart moyen par rapport au modèle théorique est de 370 m/s pour le modèle avant optimisation et de 325 m/s après optimisation. Le champ d'investigation est agrandit d'un facteur 3.



Figure 4.45 : Position initiale du dispositif



Figure 4.46 : Position finale du dispositif





Figure 4.47 : Influence de l'optimisation sur les modèles de vitesse obtenus (à gauche sans optimisation, à droite avec optimisation)

4.2.6 Robustesse au bruit

Le dispositif final devant être utilisé dans un environnement hostile, il apparaît indispensable de déterminer l'influence du bruit sur les résultats fournis. Ce bruit va se manifester par des erreurs lors du pointé des temps d'arrivée des ondes directes et réfléchies. On estime généralement (Gautier, 1991) que l'erreur maximale sur les temps d'arrivée des ondes directes est de l'ordre de 2%. Le pointé des ondes réfléchies semble plus délicat. Sur une configuration précise, l'étude effectuée au paragraphe 3.1.3 c) a montré que l'erreur moyenne était de l'ordre de 5%. Nous considérons que pour certaines configurations le bruit peut induire des écarts sur les temps d'arrivée de l'ordre de 10%.

Le bruit est supposé blanc, trois puissances de bruit ont été rajoutées :

- ajout d'un bruit maximal de 3%,
- ajout d'un bruit maximal de 5% ,
- ajout d'un bruit maximal de 10%.

La configuration choisie est semblable au 4.2.3.

La figure 4.48 présente les champs de vitesse obtenus avec différents niveaux de bruit. Les contrastes de vitesse restent toujours discernables même en cas de bruit important. Une dégradation du résultat est néanmoins visible pour un bruit égal à 10%. Celle-ci est confirmée par l'analyse quantitative présentée dans le tableau 4.3. Les résultats fournis restent néanmoins de bonne qualité et un bruit de 5% semble acceptable (l'écart au modèle de vitesse est alors de 224 m/s et l'écart moyen entre les points de réflexion obtenus et les points exacts est de 8%). En outre, la précision sur la position des points de réflexion est assez insensible au bruit. La méthode proposée peut donc être utilisée dans un environnement hostile.

Une analyse des rayons est présentée figure 4.49 (rais vrais) et 4.50 (rais obtenus avec un bruit de 5%). La géométrie des rayons est comparable, les erreurs sur les temps d'arrivée introduisent néanmoins des variations sur la position des points de réflexion.



Figure 4.48 : Modèles de vitesse obtenus

Bruit	3%	5%	10%
Ecart des points	6.54%	7.95%	11.12%
Ecart de vitesse	183 m/s	224 m/s	271 m/s

Tableau 4.3 : Ecarts au modèle théorique pour différents niveaux de bruit



Figure 4.49 : Rais utilisés lors des simulations



Figure 4.50 : Rais utilisés avec un bruit de 5%

4.2.7 Influence du nombre de rayons

a) Etude 2D

La qualité des résultats obtenus dépend de la qualité et de la quantité d'informations apportées et donc du nombre de rayons. Si le nombre de récepteurs utilisés ne semble pas poser de problèmes (il doit simplement être inférieur au nombre maximal de voies, i.e. en général 48). Le nombre de sources est par contre proportionnel au temps de mesure et donc au temps d'arrêt des travaux.

Au cours de ce premier test, trente récepteurs sont placés le long de l'axe y=20 entre les points x=0.5 et x=15 avec un pas d'espacement de 0.5 m. Le nombre d'émetteurs est variable : 2, 4, 8, 16. Les sources sont disposées entre les points (0;16) et (0;24), le pas d'espacement est régulier (8/nombre de sources), mais la source correspondant à l'intersection entre le forage et le front de taille n'a pas été utilisée (la répartition angulaire est alors trop faible). Le milieu choisi est tri-couche (figure 4.51) :

- une première couche rapide (V=3500 m/s) verticale est placée entre les plans x=-∞ et x=4,
- une seconde couche lente (V=2500 m/s) est placée entre les plans x=4 et x=30.

Un réflecteur oblique d'équation x=40-y est également présent.

Les résultats obtenus sont présentés en figure 4.52 (la droite x=4 a été tracée). Pour deux sources, le modèle de vitesse obtenu est très éloigné du modèle exact : la répartition obtenue est beaucoup trop lisse (figure 4.52 en haut et tableau 4.4). Pour 4, 8 et 16 sources, les modèles de vitesse sont corrects : les deux couches sont parfaitement visibles (figure 4.52 et tableau 4.4). Par contre, la variation du nombre de sources, ne permet pas de noter de différence significative entre les points de réflexion (figure 4.53 et tableau 4.4).

L'information primordiale n'est donc pas le nombre de rayons mais l'ouverture angulaire de rayons. En effet, 4 sources présentent un résultat de qualité semblable à 16 sources. Pour illustrer ce propos, les rais utilisés lors de l'inversion sont présentés sur les figures 4.54 à 4.57. Un nombre de rayons de l'ordre de 8*30=240 permet donc d'obtenir une image avec une bonne résolution. Le critère primordial n'est donc pas le nombre de rayons (qui doit néanmoins être suffisamment élevé) mais l'ouverture angulaire, d'où l'importance de la vérification a posteriori en présentant la géométrie des rayons utilisés.



Figure 4.51 : Modèle proposé

Nombre de rais	Ecart Vit réflexion (m/s)
60	466
120	167
240	176
480	170



Figure 4.52 : Modèles de vitesse obtenus



Figure 4.54 : Rayons utilisés avec 16 sources



Figure 4.56 : Rayons utilisés avec 4 sources

Figure 4.53 : Points de réflexion obtenus



Figure 4.55 : Rayons utilisés avec 8 sources



Figure 4.57 : Rayons utilisés avec 2 sources

b) Etude 3D

Le modèle choisi consiste en trois couches verticales. Une première couche située en x=4 délimite un milieu de vitesse V=3500 m/s (x<4) d'un milieu lent V=2500 m/s (x>4). Le réflecteur est vertical et situé en x=20 (figure 4.58). Vingt huit récepteurs sont répartis le long du forage (de longueur 15 m et coaxial au tunnel) avec un pas d'espacement constant et égal à 0.5 m.

Trois dispositifs de sources ont été choisis :

- 1. Un dispositif avec 20 sources réparties sur le front de taille (figure 4.59).
- 2. Un dispositif avec 30 sources réparties sur le front de taille (figure 4.60).
- 3. Un dispositif avec 60 sources réparties sur le front de taille (figure 4.61).

La figure 4.62 présente alors le modèle de vitesse obtenu (les images correspondent à des coupes selon des plans perpendiculaires à l'axe Z). La taille de maille est 1*1 m, et le tunnel est à gauche. L'image obtenue avec 20 sources est de mauvaise qualité : le contraste de vitesse est à peine visible et même dans les zones proches du front de taille on ne peut pas déterminer de manière quantitative la valeur des vitesses. Les images obtenues avec 30 et 60 sources sont comparables : le contraste de vitesse est parfaitement visible et l'on peut estimer de manière quantitative la vitesses des ondes et donc en déduire la valeur des propriétés mécaniques.

Pour cette configuration, un nombre de sources de l'ordre de 30 semble donc suffisant pour obtenir une image avec une bonne précision.



Figure 4.58 : Modèle choisi



Figure 4.59 : Dispositif avec 20 sources



Figure 4.61 : Dispositif avec 60 sources



Figure 4.62 : Modèles de vitesse obtenus (à gauche : 20 sources, au milieu : 30 sources, à droite : 60 sources)

4.2.8 Influence des configurations

Pour étudier l'influence de la géométrie des couches sur le modèle, divers tests vont être présentés.

a) Milieu tri-couche

La configuration choisie est semblable à la configuration présentée au paragraphe 4.2.7 a), seize émetteurs sont utilisés. La figure 4.63 présente également les rayons utilisés lors de la simulation (étude directe). Les champs de vitesse obtenus par tomographie transmission et réflexion sont présentés sur la figure 4.65 (la taille de maille utilisée est de 0.5*0.5 m). Les points de réflexion obtenus sont donnés par la figure 4.65.

La qualité des deux images fournies est comparable : les deux couches sont parfaitement visibles. L'écart moyen à la configuration théorique est de 144 m/s pour la tomographie réflexion (figure 4.64 en bas) et 168 m/s pour la tomographie transmission (figure 4.64 en haut). Le réflecteur est localisé avec une bonne précision (figure 4.65) (l'écart entre les points de réflexion théoriques et les points obtenus est de l'ordre de 5%).

Une analyse a posteriori est ensuite effectuée en présentant la forme et la répartition angulaire des rais obtenus (figure 4.66, pour améliorer la lisibilité, nous n'avons tracé qu'un rai sur 4). L'ouverture angulaire et le nombre de rayons sont une nouvelle fois considérablement améliorés grâce à l'utilisation de rayons réfléchis.

Une vision plus quantitative est donnée par la figure 4.67 qui présente une cartographie de l'ouverture angulaire dans chaque voxel pour la tomographie réflexion (figure 4.67 en bas) et la tomographie transmission (figure 4.67 en haut). L'utilisation des ondes réfléchies permet d'améliorer considérablement l'ouverture angulaire notamment pour les zones proches du réflecteur (10<x<15). C'est à dire dans une zone inaccessible par la tomographie transmission.

Il est par ailleurs intéressant de remarquer sur la figure 4.66 que les rais correspondant au dernier récepteur ne sont pas corrects (point A, figure 4.66). Ce récepteur n'a pas été considéré car, au cours de l'étape d'initialisation, la valeur obtenue pour la fonction objectif était trop élevée (cf. 4.1.5).



Figure 4.63 : Rayons utilisés lors de la simulation



Figure 4.66 : Rayons utilisés lors de l'inversion (1 rai sur 2)



b) Couche perpendiculaire aux rais

L'objet de ce paragraphe est de traiter une couche oblique qui est perpendiculaire à un nombre important de rais. Il s'agit donc d'un cas défavorable semblable à la détection de couches verticales dans un cross-hole.

Le dispositif expérimental est semblable à celui présenté au paragraphe 4.2.4. La figure 4.68 présente la géométrie : une première couche rapide (de vitesse V=3500 m/s) est limitée par les plans x=- ∞ et x+y=-26. Une seconde couche lente (V=2500 m/s) est limitée par les plans x+y=-26 et x+y=-40. Un réflecteur est défini par l'équation x+y=-40 (figure 4.68).

La figure 4.69 présente les rais utilisés lors de la simulation directe. L'utilisation des ondes réfléchies permet d'améliorer sensiblement l'ouverture angulaire.

La figure 4.70 présente le modèle de vitesse obtenu (la position théorique de l'interface entre les deux couches a été tracée) par tomographie transmission (en haut) et tomographie réflexion (en bas). La séparation entre les couches lentes et rapides est parfaitement visible. La qualité de l'image obtenue par les tomographies transmission et réflexion sont comparables, cependant l'utilisation des ondes réfléchies permet d'agrandir sensiblement le champ d'investigation. Les points de réflexion sont obtenus avec une assez bonne précision (figure 4.71).

La figure 4.72 présente les rayons utilisés lors de l'inversion, la figure 4.73 la répartition angulaire obtenue. Il est intéressant de comparer cette figure avec le modèle de vitesse obtenu (figure 4.70). Dans les zones où les rayons sont presque parallèles (point A, figure 4.72), le modèle de vitesse obtenu est éloigné du modèle exact (point A, figure 4.70). Ceci confirme bien l'importance de l'ouverture angulaire.





Figure 4.68 : Modèle proposé



Figure 4.70 : Modèles de vitesses obtenus





Figure 4.71 : Points de réflexion obtenus



Figure 4.72 : Rayons utilisés lors de l'inversion



c) Couche perpendiculaire au réflecteur

Le dispositif proposé est semblable au précédent mais la première couche est de pendage opposé (figure 4.74).



Figure 4.74 : Modèle proposé

La figure 4.75 présente le modèle de vitesse obtenu (la position théorique de l'interface a été tracée) par tomographie transmission (en haut) et tomographie réflexion (en bas). La qualité des deux images est semblable : les contrastes de vitesse sont parfaitement visibles. La tomographie transmission permet néanmoins de déterminer plus précisément l'interface entre les deux couches. Par contre, le champ d'investigation de la tomographie réflexion est beaucoup plus étendu et la position des points de réflexion est bien déterminée.

Une analyse a posteriori est effectuée en présentant la répartition angulaire (figure 4.77) et les rais utilisés lors de l'inversion (pour améliorer la lisibilité, seul un rai sur quatre a été tracé) (figure 4.78).



Figure 4.77 : Répartition angulaire

Au-dessous de 10°

Figure 4.78 : Rayons utilisés lors de l'inversion

d) Etude 3D

Le modèle choisi est tri-couche : la couche rapide (V=3500 m/s) est comprise entre les plans x=- ∞ et x=4, la couche lente (V=2500 m/s) entre les plans x=4 et x=20. Le réflecteur est oblique et d'équation x+2y=40 (figure 4.79). Le dispositif d'acquisition est semblable à celui présenté en 4.2.1.c.

La figure 4.80 présente les points de réflexion obtenus après inversion par tomographie réflexion : le réflecteur est bien localisé (l'écart moyen entre les points de réflexion obtenus et les points de réflexion exacts est de l'ordre de 8%).

La figure 4.80 présente les résultats obtenus en les comparant à une tomographie transmission (le tunnel n'a pas été tracé mais est toujours situé à gauche de l'image tomographique, les images représentent des coupes selon un plan parallèle au plan (x,y)). La tomographie transmission présente des résultats de meilleure qualité que la tomographie réflexion, le champ d'investigation est cependant beaucoup plus faible. Les deux méthodes d'inversion doivent donc être complémentaires.





Figure 4.79 : Dispositif expérimental





Figure 4.81 : Comparaison tomographie réflexion (à gauche) et transmission (à droite)

4.2.9 Variations du point de réflexion

Dans le cadre de tomographies de puits à puits, de nombreux auteurs tiennent compte des erreurs possibles sur la direction du forage en faisant varier la position des sources. Maurer et al. (1997) préconisent d'utiliser un damping important pour ne pas diverger.

L'objectif du présent paragraphe est de présenter les résultats obtenus pour différentes valeurs du paramètre d'amortissement sur les points de réflexion ou, ce qui est équivalent, pour différentes valeurs de déplacement maximal pour les points de réflexion. La configuration choisie est semblable à celle présentée en 4.2.3.

Le tableau 4.5 présente les résultats obtenus. Les écarts sont donc négligeables et dans cette configuration, les limites de variation à apporter aux points de réflexion ont peu d'influence sur le résultat final.

Dépl max (m)	Ecart Vitesse (m/s)	Ecart PtRef (%)
1	180	1.0
2	180	1.0
3	180	1.0
4	180	1.0

I WATCHW IN	Tableau 4.5 :	Variations	des résultats	en fonction	de ∆R
-------------	---------------	------------	---------------	-------------	-------

4.3 ETUDE EXPERIMENTALE

Pour valider les simulations précédentes, une étude expérimentale a été effectuée sur les sites CALPHA dont la description est donnée dans le chapitre 3 et en annexe H (Celse et al. (b), 1998).

4.3.1 Résultats sur le site Calpha1

a) Position de la faille

Le nombre de rayons étant trop faible, aucune tomographie n'a été effectuée sur ce site. Le calcul des points de réflexion a néanmoins été possible par la procédure d'initialisation (cf. 4.1.1 b)). La figure 4.82 présente les points de réflexion obtenus. La précision est bonne.



Figure 4.82 : Position obtenue de la faille

b) Détermination des modules

En règle général, la valeur des modules dynamiques est plus élevée que la valeur des modules statiques (Cuxac, 1994). Il nous a cependant semblé intéressant de calculer les modules dynamiques et de les comparer aux modules statiques. Les modules acoustiques ont été calculés à partir de la mesure des vitesses V_P et V_s par la formule 1.23 et sont présentés sur les figures 4.83 et 4.84. Le module d'Young dynamique est donc de
l'ordre de 22 GPa et le coefficient de Poisson de l'ordre de 0.26. Ces valeurs sont conformes aux mesures acoustiques effectuées sur échantillon ($E_{moy}=20$ GPa, annexe I).

Pour comparer ces résultats aux modules statiques, des essais de compression uniaxiaux ont été effectués (annexe L). Le module d'Young obtenu est alors de 9 GPa, le coefficient de Poisson de 0.26. La corrélation entre les deux modules est donc mauvaise.



Figure 4.83 : Calcul du module d'Young



Figure 4.84 : Calcul du coefficient de Poisson

4.3.2 Etude bidimensionnelle sur le site Calpha2

Le site Calpha2 est un site où la faille est plus éloignée de l'équivalent du front de taille (i.e. la galerie auxiliaire). Le nombre de rayons utilisables est beaucoup plus important dans cette expérimentation (154 rayons). La figure 4.85 présente les points de réflexion obtenus après utilisation de la tomographie réflexion. La précision est bonne. Ceci est dû en grande partie à l'homogénéité du terrain : le milieu étant quasihomogène, la migration est facilitée et l'algorithme converge.

Les figures 4.86 et 4.87 présentent les modèles de vitesse obtenus par tomographie transmission et réflexion. Un filtre médian et un filtre CQ ont été utilisés conjointement, la taille de maille est de 1*1 m (les deux images sont représentées à la même échelle). La qualité des deux images tomographiques est comparable. La vitesse moyenne est de l'ordre de 3600 m/s ce qui est légèrement supérieur aux mesures effectuées sur échantillons, la vitesse moyenne était alors de 3400 m/s (cf. annexe I). Ceci peut être expliqué par l'absence d'enregistrement du signal de synchronisation. Aucun décalage statique n'a donc pu être effectué.

Le champ d'investigation de l'image obtenue par tomographie réflexion est trois fois plus important que celui de la tomographie transmission. En outre, des zones de faibles vitesses correspondant aux faille F_{32} et F_{33} et des zones de fortes vitesses correspondant aux failles F_{24} , F_{25} et F_{28} sont visibles (elles sont décrites en annexe H). Ceci permet de valider a posteriori le choix de la tomographie, car les méthodes classiques utilisées en industrie pétrolière ne permettent pas de localiser de telles zones fracturées.

Pour montrer l'importance du lissage et de l'amortissement, la même étude tomographique a été effectuée mais sans utilisation de lissage (figure 4.88). L'image obtenue est beaucoup plus « chahutée » et ne correspond pas à une réalité physique. L'expérimentation a en effet été effectuée dans une mine dont le gisement est exploité depuis 1920 et est réputé très homogène. Seul le percement des galeries est donc originaire de décompression du massif et de mouvement de fractures.

Une analyse a posteriori est effectuée en présentant les rayons utilisés lors de la simulation (figure 4.91). Les fractures repérées pourraient donc être validées car l'ouverture angulaire ainsi que le nombre de rayons sont suffisamment importants. Par ailleurs, au voisinage de la fracture F_{24} , une zone de forte vitesse est plus étendue sur la figure 4.86 que sur la figure 4.87. Dans cette zone, l'ouverture angulaire des rayons transmis est très faible (cf. figure 4.91) et elle correspond donc à un artefact de la méthode tomographique.

La figure 4.89 présente l'ouverture angulaire maximale des rayons utilisés lors de l'inversion. Près de la fracture F_{32} , l'ouverture angulaire est de l'ordre de 30°, en utilisant la formule 4.8, on peut donc estimer le pouvoir de résolution à 1 m. Cette formule correspond cependant à la résolution maximale. Nous préférons alors utiliser la formule 4.9 indiquant un pouvoir de résolution de 2.4 m. Les fractures F_{32} et F_{33} correspondent donc à une unique zone lente de vitesse ce qui est confirmé par la figure 4.87.

Il est intéressant de comparer le champ d'investigation obtenu avec les résultats issus de l'optimisation (figure 4.92). Dans ce cas, la galerie principale a été considérée comme un forage et une optimisation sur son orientation a été effectuée. La galerie est alors oblique afin de minimiser l'angle d'incidence. Les deux dispositifs sont néanmoins proches et le dispositif proposé est bien optimal dans le sens où l'angle d'incidence sur la faille est faible et la résolution angulaire est considérable.

La connaissance des vitesses des ondes de compression permet d'estimer les modules d'élasticité dynamiques. La figure 4.90 présente les modules obtenus (avec un coefficient de Poisson de 0.25 et une densité de 2.1). Cette cartographie est semblable à celle obtenue pour la vitesse.



Figure 4.85 : Points de réflexion obtenus



Figure 4.86 : Tomographie transmission



Figure 4.89 : Variation angulaire des rayons



Figure 4.87 : Tomographie réflexion avec régularisation



Figure 4.88 : Tomographie réflexion sans régularisation



Figure 4.90 : Module élastique de Young obtenu



Figure 4.91 : Tracé de rayons en Calpha2

Figure 4.92 : Géométrie optimale

4.4 TEMPS DE CALCUL

L'objectif de cette recherche est de fournir « en temps réel » une représentation tridimensionnelle du soussol. Les temps de calcul doivent donc être les plus courts possibles.

Les tests ont été effectués sur une station de travail SUN Solaris Ultra 1 avec un processeur cadencé à 140 MHz et 64 Mo de mémoire vive. Des essais ont montré qu'ils pouvaient également être effectués sur des PC Pentium 166 avec 32 Mo de mémoire vive.

Les temps de calculs sont quasi-indépendants du maillage choisi mais dépendent principalement du nombre de rais et de la tolérance admise pour le calcul du symétrique de chaque source lors de l'étape d'initialisation (cf. 4.1.1 b)). Sur un PC Pentium 166, pour 500 rais et pour une tolérance de l'ordre de 20 cm, les temps de calculs sont de l'ordre de 30 mn pour un programme 2D et de 1 h pour un programme 3D. Sur une station de travail Sun Solaris Ultra 1, les temps sont de 10 mn pour une inversion 2D et 30 mn pour une inversion 3D.

4.5 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de présenter la méthode choisie pour caractériser le massif. Une première partie a décrit précisément l'algorithme en insistant sur l'étape d'initialisation, la convergence et les limites de la méthode. Nous avons également présenté l'amortissement retenu (il limite les instabilités numériques) et les types de régularisation choisie (elle permet de faire varier les solutions dans un espace physiquement admissible).

Une seconde partie a alors montré des tests synthétiques bi et tridimensionnels. Plusieurs enseignements ont pu être tirés :

- 1. Avec les géométries utilisées et pour des modèles tri-couche, l'utilisation de rayons en arcs de cercle n'apporte pas une amélioration significative de l'image obtenue. Le temps de calcul est de plus doublé.
- 2. Le type de régularisation doit être choisi en fonction du problème posé : de manière générale le modèle de vitesse est continu par morceaux et la fréquence est finie, un filtre médian couplé avec un filtre CQ doivent donc être utilisés.
- 3. La taille de maille doit être choisie en fonction du pouvoir de résolution théorique (valeur de la surface de Fresnel) et de la quantité d'informations apportées. Les simulations utilisant un tracé de

rayons (c'est à dire une approximation haute fréquence), les meilleurs résultats sont obtenus avec une taille de maille de 50 cm.

- 4. La méthode retenue est peu sensible au bruit. Une erreur maximale de 5% sur les temps d'arrivée ne modifie pas significativement la qualité des résultats obtenus.
- 5. La méthode d'optimisation présentée au chapitre 2 a été testée avec succès, les résultats obtenus sont alors sensiblement améliorés.
- 6. Un espacement de 1 m entre chaque source permet d'obtenir des images avec des qualités suffisantes. Il semble inutile d'utiliser un pas d'espacement plus fin pour améliorer la précision des images tomographiques. En revanche, si l'on désire localiser le toit ou le mur d'une couche horizontale, un regroupement par récepteur commun doit être choisi (cf. 3.5) et le pas d'espacement doit être réduit pour éviter tout problème de repliement.
- 7. La méthode proposée est relativement indépendante de l'orientation et du pendage des interfaces et des réflecteurs.

Une étude expérimentale a alors été proposée sur le site CALPHA présenté au chapitre 3. Les contraintes techniques n'ont pas permis d'utiliser un dispositif semblable à celui proposé initialement (figure 2). Cependant, les résultats obtenus sont convaincants ce qui permet de conclure à la faisabilité de la méthode. Les modules élastiques E et v ont pu être estimés grâce à l'étude des ondes directes P et S. Ils sont semblables aux mesures effectuées sur échantillons. Une étude tomographique a également été réalisée sur le site Calpha2 et s'est montrée très concluante : une faille majeure et des fractures mineures ont pu être détectées et localisées avec précision.

Sur ce site, nous avons également pu étudier l'influence de la régularisation, les modèles de vitesse obtenus sans régularisation ne correspondent pas à une réalité physique.

Le problème posé étant mal conditionné, une analyse a posteriori doit impérativement être effectuée : nous proposons d'analyser a posteriori les rayons utilisés lors de l'inversion pour estimer la qualité et la quantité d'informations apportées et donc de « juger » la qualité des résultats obtenus par inversion. De manière générale, nous considérons que pour une cellule un nombre de rayons supérieur à 20 et une ouverture angulaire supérieure à 30° sont garants de résultats acceptables (Celse et al. (a), 1998).

Chapitre 5 : Etude d'un cas industriel

Objectifs

Pour valider l'ensemble de la méthode proposée dans les chapitres 2, 3 et 4, et pour montrer une extension possible, nous l'avons appliquée sur un exemple à finalité industriel.

La mine choisie est la mine du Burg, dans laquelle des sondages (généralement destructifs) sont utilisés pour détecter et estimer un filon de fluorine. Cependant, sur le site choisi, les foreurs étaient en perte d'eau et aucune étude sur cuttings n'a pu être effectuée. Les mineurs n'avaient donc aucune information sur le filon. L'objectif de la présente expérimentation était de déterminer l'existence puis d'estimer la puissance du minerai.

Démarche utilisée

La démarche choisie est semblable à celle décrite dans les chapitres 2, 3 et 4 :

- 1. Analyse des signaux.
- 2. Détermination de la fenêtre temporelle d'étude.
- 3. Utilisation des méthodes de traitement du signal pour détecter d'éventuelles ondes réfléchies.
- 4. Détermination de la position du filon et description du massif par tomographie réflexion.

Résultats

L'analyse des signaux a permis de déterminer la fenêtre temporelle d'étude. Les temps d'arrivée des ondes PP et de surface étant proches, nous avons choisi de n'utiliser que les premiers accéléromètres pour détecter l'éventuelle onde réfléchie. L'utilisation d'un filtre passe-haut suivi d'une moyenne glissante et d'un filtre FK ont permis de localiser l'onde réfléchie sur le signal. Une tomographie tridimensionnelle a alors été utilisée pour localiser le filon de fluorine et pour mettre en évidence une zone très fracturée qui avait nécessité un boisage pour assurer la stabilité de la galerie. Après nos résultats, les mineurs ont décidé d'exploiter la partie correspondant au filon et les résultats obtenus (extension, puissance) ont été confirmés a posteriori. Pour valider les développements effectués au cous de ce travail de recherche, nous avons choisi de l'appliquer à un exemple à finalité industrielle (Celse et al. (c), 1999).

5.1 PRESENTATION DE L'ETUDE

La société SOGEREM exploite la mine du Burg (située sur la commune de Paulinet, Tarn) pour extraire de la fluorine (fluorure de calcium CaF₂) dont les principaux utilisateurs sont la métallurgie et la chimie. Cette mine est exploitée par tranches montantes remblayées en méthode traditionnelle. La production est au maximum de 50000 tonnes par an.

A l'heure actuelle, les recherches de filon sont effectuées par des sondages (le plus souvent destructifs). L'objectif de la présente expérimentation était de déterminer la position spatiale d'un filon dont on connaissait une trace dans une galerie.

5.1.1 Géologie de la mine

La mine du Burg est constituée d'un encaissant schisteux. Une description plus précise du site est donnée en annexe O.

Le fluorure de Calcium (de formule chimique CaF2) est le constituant de la fluorine, minéral relativement abondant dans la croûte terrestre. Lorsque la fluorine est extraite, on parle de SPATH FLUOR. Ses caractéristiques physiques sont :

- Densité : 3.2,
- Vitesse des ondes P : 1500-2000 m/s.

Les caractéristiques physiques du schiste sont :

- Densité : 2.5,
- Vitesse des ondes P : 3000-4000 m/s.

Le coefficient de réflexion (cf. 1.2.2) sous incidence normale est donc de 0.5 ce qui semble suffisant pour espérer détecter les réflexions.

5.1.2 Présentation du site

Le site est constitué de deux galeries perpendiculaires. La galerie principale est quasi-horizontale de diamètre d'environ 4 m et parallèle à l'axe y (figures 5.1 et 5.2). La galerie auxiliaire est parallèle à l'axe X mais légèrement descendante (de pendage d'environ 10°) (figures 5.1 et 5.2). L'objectif de l'expérimentation est de repérer spatialement le filon et de déterminer sa puissance. La trace de celui-ci était visible (figure 5.1). Il est presque parallèle à l'axe x à une distance d'environ 10 m de l'intersection des deux galeries (figures 5.1 et 5.2). L'objectif de l'expérimentation est 5.2). Initialement, un forage descendant devait être utilisé (figure 5.1); cependant, la présence de nombreuses fractures ouvertes n'a pas permis de le remplir d'eau. Quatre séries de 10 accéléromètres ont donc été positionnés dans la galerie auxiliaire (parallèle à l'axe x, figures 5.1 et 5.2). Les accéléromètres sont répartis sur une distance de 10 m dans le demi-plan x>0, les sources sur 20 m dans le demi-plan y>0 (l'axe z est orienté vers le centre de la terre).

Le dispositif choisi n'est pas favorable à la détection du banc de fluorine (figures 5.1 et 5.2). En effet, il aurait été préférable de disposer des sources dans le demi-plan y<0. Ce choix correspond au projet initial incluant l'insertion d'hydrophones dans le forage.

Le site est marqué par de nombreuses fractures, on citera notamment (cf. description plus précise en annexe O) :

- F₁ : fracture ouverte,
- F2 : fracture sub-verticale fermée sur le parement de la galerie principale mais ouverte au toit,

• F₃ : fracture sub-verticale fermée sur le parement de la galerie principale (x>0) mais ouverte sur le parement opposé (x<0).

On notera la présence de pièces métalliques aux abords de la fracture F_1 (annexe O) : elles permettent d'assurer la stabilité de la galerie et indiquent donc une zone fragile. De plus, des traces de fluorine sont visibles à son voisinage (annexe O). La zone située près de la fracture F_1 doit donc être de faible vitesse.



Figure 5.1 : Représentation schématique du site



Figure 5.2 : Représentation du site (vue de dessus)

5.2 STRATEGIE D'ETUDE

5.2.1 Position des sources et récepteurs

La source utilisée est une masse de 2 kg (cf. annexe O).

Le but de l'expérience étant de réaliser une tomographie tridimensionnelle. Les sources ont été placées le long de la galerie auxiliaire avec un pas d'espacement de 1 m (figure 5.3). Vingt sources (numérotées de 1 à

20) ont été positionnées le long de l'axe y. La source 1 est la plus proche de l'intersection des deux galeries (figures 5.3 et 5.4). Pour maximiser l'offset vertical, quatre lignes verticales de sources (espacées de 50 cm) ont été utilisées en y=5, y=10, y=15 et y=20 m (figure 5.3). Les sources correspondant aux verticales des sources 5, 10, 15 et 20 sont notées (51, 52, 53, 54) (101, 102, 103, 104, 105) (151, 152, 153, 154) (201,202, 203, 204) (figure 5.4).

Quatre séries de 10 accéléromètres, notés 1 à 40, ont été collés sur la galerie auxiliaire (figure 5.3). Pour améliorer l'offset vertical, ils ont été positionnés le plus près possible du mur de la galerie (environ 30 cm) (figure 5.6). L'accéléromètre 1 est le plus proche de l'intersection des deux galeries (figures 5.1, 5.2 et 5.3), l'accéléromètre 40 est le plus éloigné. Nous avons choisi un pas d'échantillonnage très fin (25 cm) car les filtres FK nécessitent un nombre de traces assez élevé et les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes de surface et des ondes réfléchies sont très proches. Il sera donc nécessaire de n'utiliser qu'un nombre réduit de traces pour lesquelles les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes PP et des ondes d'interface sont éloignées.



Figure 5.3 : Position des sources et récepteurs (vue de dessus)

Figure 5.4 : Position de sources et récepteurs (vue de face)



Figure 5.5 : Position des sources sur chaque verticale



Figure 5.6 : Collage des accéléromètres sur la paroi

5.2.2 Mode opératoire

Pour améliorer le rapport signal sur bruit, les signaux enregistrés correspondent à un stack 1 et un stack 5 (i.e., ils ont été sommés 5 fois). Les signaux ont été enregistrés sans ajout de filtres.

Pour déterminer avec précision l'origine des temps, le signal de synchronisation a été enregistré.

Les distances ont été mesurées avec un décamètre et un niveau de maçon, nous estimons que l'erreur moyenne sur les distances est semblable à l'expérimentation précédente (i.e. de l'ordre de 3%).

5.3 ETUDE DES SIGNAUX

Le signal émis en 103, qui présente le meilleur rapport signal sur bruit, sera étudié en détail ci après. La figure 5.7 présente le signal initial après normalisation des amplitudes. Le rapport signal sur bruit est globalement médiocre. Les ondes directes sont bien visibles (temps=0.003 s, trace 1) elles sont suivies d'ondes de surface beaucoup plus énergétiques (temps=0.006 s, trace 1). Aucune onde réfléchie ne semble visible sur le reste du signal. Il est par ailleurs intéressant de noter la différence des fréquences dominantes des ondes directes sur les premiers (trace 1 à 21) et sur les derniers capteurs (trace 22 à 40). Ceci est mis en évidence grâce à l'analyse temps-fréquence effectuée sur les traces 15 (figure 5.8) et 30 (figure 5.9) du signal présenté sur la figure 5.6. Pour les ondes directes, la fréquence dominante est de 1300 Hz pour l'accéléromètre 15 (temps=0.003 s, figure 5.8) et de 700 Hz pour l'accéléromètre 30 (temps=0.005 s, figure 5.9). De plus, une onde réfléchie semble visible sur la figure 5.8 (temps=0.012 s).



Figure 5.7 : Signal émis en 103



Figure 5.8 : Analyse temps fréquence de la trace 15

Figure 5.9 : Analyse temps fréquence de la trace 30

5.3.1 Etude qualitative

L'analyse des signaux montre que la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes de surface sur les vingt premières traces est [0.006;0.01]. Ces signaux seront étudiés en détail car il présente un bon rapport signal sur bruit et des simulations (avec une estimation plane du filon) ont montré que les temps d'arrivée des ondes réfléchies étaient de l'ordre de 0.01 s. Un fenêtrage est donc effectué entre 0.01 s et 0.02 s sur les 20 premières traces (figure 5.10). Un filtre passe-haut (de fréquence de coupure $f_c=700$ Hz) est ensuite appliqué pour diminuer le bruit (figure 5.11). Deux ondes réfléchies semblent alors discernables :

- La première est visible sur les traces 13 à 20 au temps : 0.012 s.
- La seconde est visible sur les traces 10 à 13 au temps : 0.014 s.



Figure 5.10 : Etude du signal sur les 20 premières traces



Figure 5.11 : Application d'un filtre passe-haut (f_=700 Hz) sur les traces 1 à 20

5.3.2 Détection des ondes réfléchies

Pour mettre en évidence les ondes réfléchies repérées précédemment, une moyenne glissante en espace (de coefficients mix=.2,.5,1,.5,.2) suivie d'un filtre FK sont appliqués sur le signal présenté figure 5.11. La figure

5.12 présente les résultats obtenus : une onde réfléchie est alors parfaitement visible (temps=0.0115 s, trace 20). Une seconde est également visible (temps=0.014 s, trace 10). Cette dernière pourrait correspondre à la réflexion sur la seconde interface du filon car elle est de vitesse apparente semblable à la première. La vitesse des ondes de compression dans la fluorine étant de 2000 m/s, la puissance du filon peut être estimée à $2.5*10^{-3*}2000/2=2,5 \text{ m}$.

Le signe de la vitesse apparente des ondes réfléchies étant de signe constant, il ne nous a pas paru nécessaire de tester les autres méthodes (cf. 3.4.3 b)).

Pour vérifier les conclusions précédentes, des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel de simulation de propagation d'ondes Calc3D. La figure 5.13 permet de comparer les résultats obtenus avec les résultats numériques (après décalage statique dû à la synchronisation). Les temps obtenus numériquement sont très proches des temps mesurés expérimentalement. Cette simulation a cependant été effectuée avec une estimation plane de la veine ce qui n'est pas forcément le cas du filon de fluorine.



Figure 5.12 : Utilisation du filtre FK en 103



Figure 5.13 : Comparaison entre temps d'arrivée obtenus et simulés

5.4 INVERSION

La détermination des temps d'arrivée des ondes directes et réfléchies permet de déterminer le modèle de vitesse du massif et la position du réflecteur. L'inversion a été réalisée sans informations a priori.

5.4.1 Modèle de vitesse

La figure 5.14 présente le modèle de vitesse obtenu par tomographie réflexion (à gauche) et transmission (à droite). Il s'agit de coupes par des plans perpendiculaires à l'axe z (il correspond à la verticale mais est orienté vers le bas). La ligne principale de sources est située en z=-1.5, les accéléromètres sont compris entre les plans z=0.5 et z=2. Le modèle de vitesse est relativement homogène avec des vitesses comprises entre 3400 et 3500 m/s. Une zone rapide est visible pour la zone y>10. Le long de cette zone la galerie était recouverte d'argile et l'on ne pouvait pas présager une telle dureté.

Une zone lente correspondant à la fracture majeure F_1 peut être visible le long de la droite x=8 sur la tomographie réflexion. Par contre, aucune zone lente n'est visible près des fractures F_2 et F_3 , elles ne sont pas détectées. Ces deux fractures ne semblent donc pas avoir d'extension importante.

Une analyse a posteriori est effectuée en présentant l'ouverture angulaire (figure 5.15) et les rayons utilisés lors de l'inversion (figures 5.16, 5.17, 5.18, par souci de lisibilité, nous n'avons présenté qu'un rai sur 6). L'ouverture angulaire est globalement médiocre et le pouvoir de résolution est assez faible. Cependant dans

le voisinage de la fracture F₁, l'ouverture angulaire semble suffisamment élevée pour confirmer la détection de la fracture : elle ne correspond pas à un artefact de la tomographie (figure 5.15).

La zone lente est située à une distance d'environ 5 m de l'intersection des deux galeries. Or l'étude des signaux enregistrés (figure 5.7) montre une diminution sensible de la fréquence dominante des ondes directes à partir de la trace 22, c'est à dire à 5.5 m de l'intersection des deux galeries (le pas d'espacement entre accéléromètres est de 25 cm). Ceci confirme la présence d'une zone fracturée.

Au voisinage de la fracture F_2 , l'ouverture angulaire est importante et les vitesses rapides : ceci permet d'affirmer que cette fracture est de faible extension. Par contre, au voisinage de la fracture F_3 , l'ouverture angulaire est faible et la tomographie ne peut donner aucune indication fiable concernant l'extension de cette hétérogénéité.

Il est par ailleurs important de noter que tous les points de réflexion sont situés sous la galerie auxiliaire. L'utilisation de rayons droits implique que ces rais traversent la galerie ce qui ne peut être le cas en réalité. Cette approximation semble néanmoins valable car les accéléromètres ont été positionnés au mur de la galerie auxiliaire (figure 5.6), l'intersection entre les rais et la galerie est donc faible : ceci est confirmé par la figure 5.18 qui présente un zoom sur les rayons utilisés lors de l'inversion. Le maillage a également été tracé. Remarquons que la zone lente est également visible par la tomographie transmission (figure 5.14) : elle ne peut donc être attribuée à la galerie bien que celle-ci contribue à l'élargir.



Figure 5.14 : Modèles de vitesse obtenus (coupes selon l'axe vertical Z) à gauche : tomographie réflexion, à droite : tomographie transmission



Figure 5.15 : Répartition angulaire (coupes selon l'axe vertical Z)



Figure 5.16 : Rayons utilisés lors de l'inversion (plan (x,y))



Figure 5.17 : Rayons utilisés lors de l'inversion (plan (x,z))



Figure 5.18 : Rayons utilisés lors de l'inversion (plan (y,z))



Figure 5.19 : Tracé dans le plan (y,z) du maillage et des rais utilisés lors de l'inversion

5.4.2 Position du réflecteur

La tomographie réflexion permet de déterminer la position des points de réflexion. La figure 5.20 représente l'ensemble des points de réflexions obtenus. De manière générale, ils sont situés sous la galerie auxiliaire ce qui est logique car celle-ci a eu un effet de masquage. Les points correspondent bien à une extension possible du filon déjà repéré (figure 5.20). Leur position est donc « géologiquement admissible ». La figure 5.21 (respectivement 5.22) présente la position des points obtenus après projection sur la plan (x,y) (respectivement (x,z)). Ces points de réflexion ont été scindés en deux classes indiquant la confiance que nous leur attribuons (cf. 4.1.5). Les coordonnées exactes de ces points sont présentées en annexe P.

Pour localiser précisément le filon, les figures 5.23, 5.24 et 5.25 présentent la position des points de réflexion pour lesquels la confiance attribuée est égale à 1 (cf. 4.1.5). Le tableau 5.1 présente alors la confiance exacte à attribuer à chaque point (les valeurs obtenues lors de l'étape d'initialisation ont été rapportées à 1, c'est à dire que les confiances sont égales à J_{min}/J, avec J_{min} : valeur minimale obtenue pour J).



Figure 5.20 : Position des ponts de réflexions obtenus



Figure 5.21 : Points de réflexion obtenus (plan (x,y))



Figure 5.22 : Points de réflexion obtenus (plan (x,z))

No source	Valeur de J	Confiance (rapportée à 1)	
3	0.237	.77	
5	0.28	.63	
7	0.268	.68	
9	0.184	.99	
10	0.268	.68	
12	0.42	.43	
102	0.389	.47	
103	0.26	.7	

Tableau 5.1 : Confiance attribuée à chaque source



Figure 5.23 : Points obtenus pour chaque source (plan (x,y))



Figure 5.24 : Points obtenus pour chaque source (plan (x,z))

5.5 VALIDATION A POSTERIORI

Après avoir obtenu nos conclusions concernant l'expérimentation géophysique, les mineurs ont décidé d'exploiter ce filon. Le minerai extrait n'est pas de très bonne qualité mais de puissance oscillant entre 2 et 3 m ce qui est conforme aux estimations effectuées (cf. 5.3.2).

La figure 5.25 représente les points de réflexions obtenus et la position du filon obtenu par les mineurs (elle correspond à la nouvelle galerie creusée). Les figures 5.26 et 5.27 sont semblables aux figures 5.23 et 5.24 mais la position exacte du filon a été rajoutée. Les points obtenus sont situés à l'aplomb du filon soit en dessous (5 < x < 15), soit au dessus (x > 20). Les écarts visibles sur l'axe z (figure 5.27) ne mettent pas en défaut la méthode car le filon a une continuité verticale et est sub-vertical.

De plus, les travaux d'exploitation ont montré que, près de la zone définie par les points (20;0) et (20;-5), le filon est de très mauvaise qualité et se pince. Aucun point de réflexion n'a été obtenu dans cette zone. Par contre, la puissance du SPATH augmente dans le demi-plan y>0, ce qui est confirmé par l'apparition de nouveaux points de réflexion dans ce demi-plan.

Ceci permet de valider définitivement la méthode choisie car lors de l'expérimentation et du dépouillement, nous n'avions aucune indication sur la position et la puissance du filon.



Figure 5.25 : Comparaison entre points de réflexions obtenus et position du filon







Figure 5.27 : Points exacts et points obtenus (plan (x,z))

5.6 CONCLUSION

L'objectif premier de l'expérimentation était la détection et la localisation d'un filon de fluorine. Le projet initial utilisait un forage d'une longueur de 30 m et une flûte d'hydrophones devait être insérée à l'intérieur. Malheureusement, le forage n'était pas étanche à cause de nombreuses fractures et les hydrophones ne pouvaient être utilisés. Nous avons alors choisi de positionner les 40 accéléromètres dans une galerie auxiliaire perpendiculaire à la galerie principale (où étaient positionnés les sources) et orientée vers le filon.

L'étude des signaux et diverses simulations numériques ont montré que les temps d'arrivée des ondes réfléchies étaient proches des temps d'arrivée des ondes de surface. Nous avons alors choisi de n'utiliser que les 20 premiers accéléromètres pour étudier les ondes réfléchies. En effet, ceux-ci étaient les plus proches des sources, les temps d'arrivée des ondes de surface étaient alors inférieurs aux temps d'arrivée des ondes réfléchies et les fenêtres temporelles d'arrivée étaient ainsi disjointes.

Un traitement approprié (moyenne glissante, filtre FK) a permis de détecter les réflexions sur le filon. Une tomographie tridimensionnelle a été utilisée pour localiser précisément cette hétérogénéité. En outre, une fracture majeure (F₁), correspondant à une zone de faible vitesse a pu être mise en évidence grâce au modèle de vitesse obtenu.

Après avoir consulté nos résultats, les mineurs ont décidé d'exploiter cette partie de la mine. Les points obtenus sont alors proches de la position exacte du filon.

La méthode développée au cours de cette recherche semble donc à même de résoudre des problèmes géotechniques (reconnaissance à l'avant du front de taille) et minier (détection et localisation de filon). Cependant, les zones d'études étant proches des zones faillées, l'étanchéité du forage ne peut en aucun cas être toujours garantie. Le forage est néanmoins indispensable car il permet de s'affranchir de l'ambiguïté vitesse-profondeur (cf. 1.4.1). Des recherches doivent donc être menées sur les aspects techniques de manière à utiliser un couplage non plus hydraulique mais mécanique ou pneumatique (Abraham et al., 1998) tout en gardant la rapidité d'exécution due aux hydrophones.

Conclusion

Ces travaux ont été réalisés dans le but de proposer une nouvelle méthode de reconnaissance à l'avancement. Les ondes sismiques ont été choisies car elles permettent d'obtenir des images avec des bonnes résolutions et présentent moins d'aléas que le radar. Un dispositif classique a alors été proposé : des hydrophones sont insérés dans un forage perpendiculaire au tunnel et des sources sont placées sur le front de taille.

La démarche de recherche a été décomposée en trois étapes distinctes :

- 1. Etude des différents paramètres pour d'une part déterminer quelles seraient les failles les plus difficilement détectables et d'autre part déterminer les caractéristiques du dispositif optimal.
- 2. Test des différents algorithmes de débruitage et de séparation d'ondes sur des signaux sismiques numériques et réels correspondant au problème posé.
- 3. Elaboration d'une méthode d'inversion permettant de caractériser le massif à partir des informations fournies par les ondes.

La première étape a consisté en une étude de paramètres à partir de la théorie de la réflexion (Zoeppritz, 1919) et des simulations effectuées à l'aide du logiciel Axitra (développé par O.Coutant). Nous avons montré que les failles de faible impédance acoustique par rapport à l'encaissant seraient plus facilement détectables. En outre, les fréquences de source doivent être de l'ordre du kilo Hertz pour réaliser un compromis entre l'atténuation et la résolution. Un algorithme d'optimisation a également été écrit pour déterminer automatiquement la position des sources et l'orientation du forage en fonction de plusieurs critères : élargissement du champ d'investigation, maximisation de l'énergie réfléchie, séparation des fenêtres temporelles d'arrivée des différentes ondes.

La seconde étape a testé les différents algorithmes classiquement utilisés dans l'industrie pétrolière pour, d'une part améliorer le rapport signal sur bruit, et d'autre part séparer les différentes ondes présentes dans les enregistrements. Dans le cadre de ce projet, nous avons considéré que les ondes réfléchies seraient faiblement énergétiques et il semble illusoire d'espérer les séparer des ondes d'interface. Une étude numérique et expérimentale a alors été menée dans deux configurations distinctes :

- 1. Une faille proche du front de taille, l'objectif était alors de séparer les ondes réfléchies (PP) des ondes directes P et S. Ces différents signaux étant très proches temporellement et interférant, la méthode FK s'est avérée la plus efficace car les ondes avaient des vitesses apparentes distinctes.
- 2. Une faille éloignée du front de taille, l'objectif était alors d'extraire un signal « noyé » dans le bruit ambiant. Encore une fois les propriétés spectrales ont été mises à profit pour extraire la partie cohérente (c'est à dire l'onde) des signaux et les méthodes FK et analyse en composantes principales en fréquence se sont avérées les plus efficaces.

Au cours de ces expérimentations, nous avons vérifié que les filtres n'introduisaient pas de retards artificiels sur les temps d'arrivée des différentes ondes. L'information apportée était donc exacte et pouvait être utilisée dans un algorithme d'inversion : la tomographie réflexion.

Cette méthode a été choisie car elle est moins dépendante de l'ouverture angulaire que la tomographie transmission et fournit à la fois une cartographie des vitesses des ondes dans le massif et la position précise des réflecteurs. Une étude de sensibilité de paramètres a été présentée dans le chapitre 4 mettant en évidence les avantages de cette méthode par rapport à la tomographie transmission mais également ses limites notamment lorsque le milieu est très hétérogène. Les longueurs investiguées étant faibles, pour minimiser les temps de calcul, nous avons supposé que les ondes réfléchies provenaient d'un même réflecteur. Les autres hétérogénéités de vitesse pourraient alors être détectées par tomographie. La méthode proposée est tridimensionnelle et les temps de calcul demandés restent suffisamment faibles pour espérer l'utiliser lors de reconnaissances souterraines à l'avancement.

La méthode globale a ensuite été testée dans une mine de fluorine : l'objectif était de déterminer l'existence d'un filon de fluorine puis d'estimer sa position et sa puissance. Le dispositif choisi était classique. Cependant la présence de fractures ouvertes n'a pas permis de remplir le forage, nous avons donc utilisé une galerie auxiliaire comme un forage fictif (des accéléromètres ont été collés). L'étude des signaux enregistrés a permis de détecter, localiser et estimer la puissance du filon avec une bonne précision. Ceci a été confirmé par les mineurs qui ont ensuite exploité le filon détecté.

Dans les trois expérimentations effectuées, les hydrophones n'ont pu être utilisés pour des raisons de couplage (le forage n'était pas étanche). Les signaux ont alors été enregistrés à l'aide d'accéléromètres positionnés dans des galeries auxiliaires représentant des forages fictifs. L'un des objectifs de la méthode étant la détection de failles, le milieu avoisinant sera fracturé et l'étanchéité du forage ne pourra jamais être garantie. Des outils technologiques doivent donc être développés pour assurer un bon couplage. Des études semblables à celle proposée par Abraham et al. (1998) assurant un couplage pneumatique ou mécanique doivent donc être poursuivies, tout en assurant la souplesse et la rapidité d'utilisation des hydrophones.

Pour résoudre le problème posé, la stratégie à utiliser pour le géophysicien pourrait alors être la suivante (figure 3) :

- 1. Après étude du site (présomption de failles avec son orientation et son pendage) : détermination du dispositif optimal grâce au logiciel **Optimis** et calcul des fenêtres temporelles grâce au logiciel **Calc3D**.
- 2. Prise de mesures.
- 3. Etude des ondes directes P et réalisation d'une tomographie transmission (grâce au logiciel **TomoRef3D**) pour donner les premières indications au conducteur de travaux.
- 4. Si présomption d'une faille proche : étude des signaux « avant » l'arrivée des ondes de tube (utilisation des méthodes FK, ACP, SMF).
- 5. Si détection d'ondes réfléchies : utilisation de la tomographie réflexion pour élargir le champ d'investigation (utilisation du logiciel **TomoRef3D**).
- 6. Etude des signaux « après » les ondes de tube pour localiser d'éventuelles réflexions sur des hétérogénéités insoupçonnées. On commencera par étudier les signaux enregistrés par les récepteurs situés le plus près du front de taille (la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes d'interface sera alors éloignée de la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes réfléchies) (utilisation des méthodes FK, ACP, SMF).
- 7. Si détection d'ondes réfléchies : utilisation de la tomographie réflexion pour élargir le champ d'investigation (utilisation du logiciel **TomoRef3D**).

Bien évidemment ce projet n'est pas terminé et plusieurs pistes méritent d'être explorées. Sans être exhaustif, plusieurs études peuvent être menées :

- 1. Déconvolution : l'ondelette utilisée n'est pas de fréquence infinie ce qui introduit des erreurs sur les temps d'arrivée, une déconvolution de type spiking pourrait être utilisée pour minimiser la taille temporelle de l'ondelette et ainsi améliorer la précision du pointé.
- 2. Détection d'ondes réfléchies : l'importance de cette étape est cruciale et des informations a priori comme le signe de la vitesse apparente pourraient être utilisées pour automatiser la détection d'ondes réfléchies (cf. Cosma et al., 1996).
- 3. Anisotropie : la modélisation proposée fait l'hypothèse implicite d'un milieu isotrope. Or, de nombreux massifs présentent une anisotropie marquée, ce qui induit des artefacts importants.
- 4. Segmentation : un algorithme permettant la détermination automatique des zones de différentes impédance acoustique pourrait être élaboré.
- 5. Etude des cavités : dans le cadre de ce projet, nous nous sommes volontairement limités à l'étude d'objets plans ou du moins plans par morceaux, et l'étude de la détection de cavité n'a pas été effectuée. Les travaux actuels sont effectués depuis la surface dans des milieux très atténuants. Piwakowski et al. (1998) montrent qu'il semble illusoire d'espérer détecter des cavités par réflexion sauf dans des conditions très favorables. Ils font alors appel à des propriétés de masquage qui ne peuvent être utilisées qu'avec un réflecteur sous-jacent. Dans le cadre des travaux souterrains, l'utilisation d'un dispositif situé sous la zone altérée permettra d'améliorer la lisibilité des signaux. Cependant, Lagabrielle (1994) a montré que les variations sur les temps d'arrivée sont trop faibles pour espérer détecter directement les cavités. L'étude de l'amplitude et plus encore de la fréquence dominante des ondes permettrait (peut être) la détection de telles hétérogénéités, car de nombreux auteurs ont montré que ce paramètre est le plus sensible à la fracturation (Pyrak-Nolte et al., 1990). Les algorithmes développés pourraient donc être étendus à une inversion conjointe des temps d'arrivée et de la fréquence dominante comme le suggèrent Vasco et al. (1996), bien que les interférences entre les ondes induisent des variations de fréquence (cf. 3.3.4).

6. Etude des amplitudes : les études d'amplitude en fonction de l'offset (AVO) permettent de déterminer la nature de la couche réfléchissante. Ces informations sont inaccessibles par la méthode proposée dans le présent mémoire. Le logiciel de résolution des équations de Zoeppritz : Zoep (cf. chapitre 2) pourrait donc être utilisé dans un algorithme d'inversion pour estimer la nature du milieu réfléchissant.



Figure 3 : Proposition d'une méthodologie de résolution

ANNEXES

Table des matières

ANNEXE A : ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES	
1 INTRODUCTION	
2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	
3 RÉSOLUTION D'UNE ACP	
ANNEXE B : VALIDATION DE CALC3D	
1 Vérification dans le cas homogène	
2 COMPARAISON AVEC AXITRA	
ANNEXE C · TYPE DE SOURCE UTILISÉE	135
	105
 EMISSION DE L'ENERGIE EORME DE L'ONDE ÉMISE 	
2 FORME DE L'ONDE EMISE	
ANNEXE D : SOURCE DOWN-DIP ET UP-DIP	
ANNEXE E : ONDES D'INTERFACE	
1 ONDES DE SURFACE	
2 ONDES DE TUBE	
ANNEXE F : ALGORITHME DU RECUIT SIMULÉ	
	130
2 Exemple numérioue	
ANNEXE C . OPTIMICATION CUD CUAQUE CDITÈDE	140
ANNEXE G : OP HIMISATION SUR CHAQUE CRITERE	
1 OPTIMISATION DU CHAMP D'INVESTIGATION	
2 SEPARATION DES FENETRES TEMPORELLES D'ARRIVEE	
ANNEXE H : PRÉSENTATION STRUCTURALE DES SITES O	АГЬНА142
1 CONVENTION D'ORIENTATION	
1.1 Orientation d'un plan dans l'espace	
1.2 Orientation d'une droite dans l'espace	
2 PRESENTATION DE L'ETUDE	
2.1 Présentation des deux chantiers	
3 ETUDE DU SITE CALPHA1	
3.1 Structures Relevées Dans La Galerie N 40° De Paremen	t SW145
3.2 Structures Relevées dans la galerie N 120°, Parement NI	5
3.3 Conclusion	
4 ETODE DO SITE CALFITAZ 4.1 Structures Relevées Dans La Galerie N-S° Parement Ou	est 148
4.2 Structures Relevées dans la galerie Est-Ouest, Parement	Sud
4.3 Conclusion	
ANNEXE I : DESCRIPTION ACOUSTIQUE DES SITES CALP	HA151
	151
2 RÉSULTATS	
ΔΝΝΕΥΕΙ·ΡΟΙΝΤΈΕΝ CAIPHA?	153
ANNEAE J. I OINTE EN CALLINA2	
ANNEXE K : SIMULATION NUMÉRIQUE	
ANNEXE L : MESURE DES MODULES ÉLASTIQUES STATI	QUES155
1 RAPPEL	
2 MISE EN PLACE	
3 RÉSULTATS	
ANNEXE M : INTERFACE HOMME-MACHINE	
1 Présentation du logiciel	

Annexes

	1.1	Présentation	
	1.2	Architecture des programmes	
2 Résultats			
	2.1	Panneau de commande	
	2.2	Cartographie des vitesses	
ANN	EXE	N : UTILISATION D'INFORMATION A PRIORI	159
ANN	EXE	O : PRÉSENTATION DU SITE BURG	160
1 GÉOLOGIE RÉGIONALE			
2 CADRE GÉOLOGIQUE DE LA MINE			
3 Présentation du site expérimental			
4	Sot	SOURCE UTILISÉE	
ANN	IEXE	P : POSITION PRÉCISE DES POINTS DE RÉFLEXION OBTENUS	
BIB	LIOG	RAPHIE	165

Annexe A : Analyses en composantes principales

L'objectif de cette annexe est de rappeler le principe de l'analyse en composantes principales (ACP). Cette méthode est utilisée en traitement du signal pour séparer diverses ondes (cf. 1.3).

1 Introduction

Dans le cas général, p variables statistiques quantitatives notées $X^1,...X^p$ sont observées sur n individus. On note alors :

- X : la matrice n*p des observations xⁱ_i = Xⁱ(i) : valeur de la j^{ième} variable sur l'individu i. Ces données sont supposées centrées, réduites.
- V : la matrice p*p des variances et covariances empiriques de X.
- D : la matrice diagonale des poids affectés à chaque variable.

Si les individus sont de moyenne nulle, on peut vérifier : V=X'DX

2 Analyse en composantes principales

Soit T : le tableau des données : $T=(T_{ij})=(X^{i}(i))$ i=1..n, j=1..p. A chaque variable X^{i} est associée la colonne de dimension n de ses coordonnées sur les n individus. A chaque individu i est associé la ligne de longueur p de ses coordonnées sur les p variables.

L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est la réduction des données au moyen d'un autre tableau qui comportera moins de colonnes dans plusieurs buts :

- Résumés linéaires des variables : ces nouvelles colonnes seront obtenues par combinaison linéaire des X_i et appelées Composantes Principales.
- Représentation graphique au moyen de ces nouvelles colonnes.

Le principe de l'ACP est de chercher à projeter les points $P_1...P_n$ sur un espace noté E_q de dimension réduite q qui fournira une « bonne » représentation des individus. Ce « meilleur » espace de projection sera aussi proche que possible du nuage des points et déformera le moins possible sa structure.

3 Résolution d'une ACP

On montre que le premier vecteur propre de V (matrice des variances et covariances) maximise l'inertie. Ce vecteur est appelé premier vecteur principal.

Soit C la matrice de taille (n*p) définie par :

C=XU

avec : X matrice n*p des observations,

U matrice des vecteurs propres de V.

C donne dans sa i^{ème}ligne les coordonnées de l'individu i dans la base des vecteurs propres. Les colonnes de C, notées C¹...C^p sont appelées composantes principales de l'analyse. Les valeurs des variables C^k sont les composantes des points du nuage sur l'axe Δ_k .

On montre que le rapport $\lambda_k/(\Sigma\lambda_i)$ représente la part d'inertie expliquée par l'axe Δ_k (λ_i correspond à la valeur propre de rang i).

Annexe B: Validation de Calc3D

L'objectif de cette annexe est de valider le logiciel de tracé de rayons Calc3D. Lors du calcul des points de réflexion, la relation de Descartes est vérifiée a posteriori. Ceci permet de garantir l'exactitude des résultats apportés.

Pour valider définitivement le logiciel développé, deux types de tests seront présentés :

- 1. La vérification dans le cas homogène.
- 2. La comparaison des temps d'arrivée calculés avec ceux obtenus avec le logiciel Axitra (Bouchon, 1981).

1 Vérification dans le cas homogène

Pour une configuration homogène, les points de réflexion peuvent être calculés de manière analytique. Nous allons vérifier que les points de réflexion obtenus avec Calc3D correspondent bien aux points de réflexion exacts.

L'unique réflecteur est vertical et placé à une distance de 20 mètres de l'origine (en x=20) (figures 1 et 2). La source est placée en (0;10;10). Les 15 récepteurs sont placés sur le front de taille et ont les coordonnées suivantes : (5,1,0); (6;2;0)...(19;15;0). Pour tester le logiciel développé, nous avons simulé une couche verticale virtuelle placée en x=4 et séparant deux milieux de même vitesse (3000 m/s). La minimisation de la fonction objectif est donc effectuée dans le cas où les deux couches sont de vitesse différente (i.e. Vit1 \neq Vit2, cf. figure 2.7).

La figure 3 présente les points de réflexion obtenus après utilisation de Calc3D et les points de réflexion exacts. L'écart entre ces points est donc nul. La minimisation par méthode de gradient permet donc de déterminer la position exact des points de réflexion. Ceci permet de valider le logiciel Calc3D.



Figure 1 : Dispositif dans le plan (x,y)

Figure 2 : Dispositif dans le plan (x,z)



Figure 3 : Comparaison entre les points de réflexion obtenus et les points exacts

2 Comparaison avec Axitra

La configuration retenue est un modèle tri-couche tridimensionnel. Le dispositif d'acquisition est semblable au précédent mais seuls les huit premiers récepteurs ont été utilisés (pour les autres, il y avait des interférences entre les ondes S et PP ce qui aurait faussé le pointé). Une première couche verticale située en x=4 sépare un milieu de vitesse V_{P1} =2000 m/s d'un milieu de vitesse V_{P2} =3000 m/s. Une seconde couche verticale en x=20 (correspondant au réflecteur) sépare un milieu de vitesse V_{P2} =3000 m/s d'un milieu de vitesse V_{P3} =2000 m/s. Les signaux obtenus sont présentés en figure 4. L'onde directe P est parfaitement visible (temps=0.005 s, trace 8), elle est suivie d'une onde S (temps=0.0065 s, trace 8) puis d'une onde réfléchie de faible amplitude (temps=0.011 s, trace 8).

La figure 5 présente la comparaison entre les temps d'arrivée pointés sur les signaux obtenus avec Axitra et les temps d'arrivée donnés par Calc3D. Les temps sont très proches les uns des autres. Nous attribuons les différences à des erreurs de pointé.



Figure 4 : Signaux simulés avec Axitra

Figure 5 : Temps d'arrivée obtenus avec Calc3D

Annexe C : Type de source utilisée

Cette annexe a pour objectif la présentation de la source utilisée lors des simulations effectuées avec le logiciel Axitra (cf. 2.2).

1 Emission de l'énergie

La source utilisée est un choc frontal (Aki et al., 1980).

Plus précisément, considérons une source S (0;0), un choc émis en S, parallèle à l'axe z, et un ensemble de récepteurs placés à une distance de 15 m de la source (figure 1), différents types d'énergie sont présentés par la figure 2 :

- 1. L'énergie globale du signal enregistré par chaque capteur.
- 2. L'énergie du signal enregistré par chaque capteur et correspondant à un déplacement selon la direction x.
- 3. L'énergie du signal enregistré par chaque capteur et correspondant à un déplacement selon la direction z.

L'énergie globale correspond donc principalement à un déplacement selon la direction z, c'est à dire parallèlement à la direction du choc initial.

Pour toutes les simulations effectuées avec Axitra, le choc initial est dirigé perpendiculairement à la faille.



Figure 1 : Position des sources et récepteurs

Figure 2 : Energie émise selon plusieurs axes

2 Forme de l'onde émise

La forme de l'onde choisie est un Ricker d'ordre 2 dont l'expression temporelle est la suivante (Ricker, 1953) :

$$f(t) = (1 - 2\pi^2 f_d^2 t^2) e^{-(\pi f_d t)^2}$$

avec : f_d fréquence dominante, t temps.

L'expression fréquentielle d'un Ricker de fréquence dominante f_d est :

$$A(f) = \left(\frac{f}{f_d}\right)^2 e^{-\left(\frac{f}{f_d}\right)^2}$$

La figure 3 présente la représentation graphique d'un Ricker de fréquence dominante 1 kHz dans l'espace temps. Son spectre est assez large comme le montre la figure 4 (correspondant à un Ricker centré sur la fréquence $f_d=1$ kHz).





Figure 3 : Représentation d'un Ricker dans l'espace temps

Figure 4 : Représentation d'un Ricker dans l'espace des fréquences

Annexe D : Source down-dip et up-dip

Le choix de la position des sources est effectué selon plusieurs critères. On distingue deux classes de position : position up-dip et position down-dip.

On appelle position up-dip, une position de source dirigée vers le sens de plongement du réflecteur (figure 1).

On appelle position down-dip, une position de source opposée par rapport à la position up-dip (figure 1).



Figure 1 : Différentes positions de sources

Annexe E : Ondes d'interface

Dans cette annexe, nous présentons les différentes ondes d'interface pouvant être rencontrées en VSP.

1 Ondes de surface

Les principales ondes de surface sont les ondes de Rayleigh. Sheriff et al. (1995) ont montré que pour un coefficient de poisson de 0.25, leur vitesse est donnée par :

$$V_{R} = 0.919 V_{S}$$

avec : V_{R} vitesse des ondes de Rayleigh, V_{s} vitesse des ondes de cisaillement.

Les ondes de Rayleigh sont dispersives, lentes et de basse fréquence. Leur spectre est à large bande (Dobrin, 1951). Elles se propagent le long d'une surface libre et leur amplitude décroît de manière exponentielle au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de la surface. Leur profondeur de pénétration est donc très faible (de l'ordre de une à deux longueurs d'onde).

Ces ondes peuvent être utilisées pour estimer le module de rigidité : G (Clayton et al., 1995).

2 Ondes de tube

L'onde se propageant à l'interface entre deux milieux semi-infini, l'un liquide l'autre solide, est une onde de Stoneley (Stoneley, 1924). Les ondes de tube sont des ondes de Stoneley se propageant le long d'un forage rempli de fluide selon la direction de l'axe du forage. Elles n'ont qu'un seul degré de liberté. Elles sont donc très énergétiques et leur amplitude décroît faiblement avec la distance (Sherif et al., 1995).

En sismique de puits, les ondes de tube sont générées par des ondes de Raylegh qui excitent le fluide contenu dans le forage ce qui génère une onde de forte amplitude car ne se propageant que dans une seule direction (Boyer et al., 1994).

En sismique pétrolière, la fréquence de ces ondes est semblable aux ondes utilisées en PSV (P, S, PP) (Scholte, 1947). Par ailleurs, Cheng et al. (1981) ont montré que les ondes de Stoneley étaient dispersives et leur vitesse de phase et de groupe étaient de l'ordre de :

 $V=0.9V_{lp}$

avec : V_{lp} vitesse des ondes P dans le fluide.

Une façon simple, selon Boyer et al. (1994), d'atténuer les ondes de tube consiste à abaisser la colonne de fluide dans le forage et/ou déporter la source par rapport à la tête du trou. Hardage (1985) a montré que dans certaines configurations, un filtre fréquentiel permettait de les atténuer.

Annexe F : Algorithme du recuit simulé

L'objectif de cette annexe est de présenter l'algorithme du recuit-simulé utilisé pour minimiser des fonctions non convexes et non différentiables (Huang et al., 1997). Dans le cadre de ce projet, il est utilisé pour déterminer le dispositif d'acquisition optimal (cf. 2.3). Il procède par analogie avec les équations thermodynamiques.

1 Principe de base

```
L'algorithme est le suivant :
         Soit une solution C_{a}
         Soit une température T
         Soit une température finale T<sub>fin</sub>
         Tant que T est supérieur à T<sub>fin</sub> faire
                    Tirer de manière aléatoire une solution C dans le voisinage de C<sub>a</sub>
                    Si cette solution est meilleure que C_{0}
                              Alors C_{meil}=C
                    Fin Si
                    Si cette solution est meilleure que C<sub>n</sub>
                              Alors C<sub>0</sub>=C
                    Sinon
                              Remplacer C<sub>0</sub> par C selon une loi de Bernouilli de paramètre e<sup>-k(T-Tfin)</sup>
                    Fin Si
                    Faire décroître T
         Fin Tant que
         La meilleure solution correspond alors à C<sub>meil</sub>.
```

L'idée est de converger vers le minimum tout en laissant la possibilité d'étudier une autre direction de recherche (le choix est effectué de manière aléatoire par la loi de Bernouilli). Ceci permet de déterminer le minimum même lorsque la fonction à optimiser présente des minima locaux.

2 Exemple numérique

Pour montrer l'efficacité de la méthode, nous proposons de minimiser la fonction représentée figure 1 :

$$F(x) = (x-10)^{2*}(2+\cos(10x))$$

Cette fonction est fortement non convexe et les algorithmes classiques de type gradient ne convergent pas vers la solution exacte car ils sont « piégés » dans les minima locaux. L'algorithme du recuit simulé permet d'obtenir la solution x=9.856 qui est très proche de la solution exacte (x=10).



Figure 1 : Représentation graphique de la fonction à minimiser

Annexe G : Optimisation sur chaque critère

Pour tester le logiciel Optimis, nous allons présenter des exemples pour lesquels nous optimisons sur chaque critère pris séparément (cf. 2.3).

1 Optimisation du champ d'investigation

La configuration choisie est classique : un forage de longueur 15 mètres. Trente hydrophones y sont insérés avec un pas d'espacement de 50 cm. Deux sources sont disposées le long du front de taille compris entre les plans y=26 et y=34. Le réflecteur est vertical et situé à une distance de 25 m du front de taille, le tunnel est de diamètre 8 m (figure 1) :

La figure 2 présente le champ initial, la figure 3 le champ d'investigation après optimisation sur la position des sources et sur l'orientation du forage. Celui-ci est alors oblique et le champ d'investigation (ainsi que la répartition angulaire) sont considérablement élargis.



Figure 1 : Dispositif expérimental



Figure 2 : Champ d'investigation initial

Figure 3 : Champ d'investigation final

2 Séparation des fenêtres temporelles d'arrivée

Le réflecteur est de pendage de 45°. Le forage est initialement horizontal. La distance entre le front de taille et le réflecteur est de 25 m. Le front de taille et le dispositif d'acquisition sont identiques à ceux décrits au paragraphe précédent (figure 4).

La figure 5 présente les temps d'arrivée avant optimisation, la figure 6 après optimisation. Le forage est alors perpendiculaire au réflecteur. Les deux courbes reliant les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes de surface et des ondes réfléchies deviennent presque perpendiculaires, la distance entre les deux fenêtres est ainsi maximisée.

Par contre, nous n'avons pas tenu compte du critère « maximisation du champ d'investigation ». La figure 7 (respectivement 8) présente le champ avant optimisation (respectivement après optimisation). Celui-ci est

alors considérablement réduit. Ceci montre bien que, si le réflecteur est proche du front de taille, ces deux critères sont contradictoires, un compromis doit donc être réalisé.



Figure 4 : Dispositif expérimental



Figure 5 : Résultats avant optimisation







Figure 8 : Champ d'investigation après optimisation

Annexe H : Présentation structurale des sites Calpha

Pour obtenir un site expérimental, nous avons retenu la mine de calcaires asphaltiques exploitée par la société SFA (Société Française des Asphaltes). Cette exploitation est traversée par la faille de Rebésou dont le décrochement moyen est 15 m. Cette faille a un pendage moyen de 88°.

Deux sites expérimentaux ont été définis :

- Calpha1 où le parement se trouve entre 3 et 5 m de la faille à un niveau -140 m.
- Calpha2 où le parement se trouve à environ 40 m de la faille à un niveau –156 m.

La mine SFA est exploitée par la technique de chambres et piliers. Les piliers sont foudroyés après l'exploitation d'une zone. Le site "CALPHA" est en dehors des zones d'exploitation actuelles. La hauteur moyenne des galeries est de 2.5 m.

L'objet de la présente annexe est de caractériser les sites Calpha1 et Calpha2 du point de vue de la fracturation. Les mesures ont eu lieu les 18 et 19 février 1997. Toutes les fractures majeures seront données en orientation par la direction et le pendage.

1 Convention d'orientation

Pour décrire la géométrie de structures tridimensionnelles complexes, le géologue doit pouvoir caractériser l'orientation dans l'espace, de surfaces et de lignes, soit à partir de mesures à l'affleurement, soit à partir de cartes géologiques.

Nous donnons ci-dessous les conventions utilisées pour déterminer la direction et le pendage d'un plan. On utilise pour cela l'article de Carron et al. (1992) :

- La direction est notée : α.
- Le pendage est noté : β .

1.1 Orientation d'un plan dans l'espace

Le repérage de l'orientation d'une surface géologique (stratification, schistosité, miroir de faille...) est fait en assimilant celle-ci à un plan (figure 1) :

- soit un plan tangent à une surface courbe, au point de mesure,
- soit un plan enveloppe d'ondulations de détail.



Figure 1 : Orientation d'un plan dans l'espace

La direction d'une surface est la direction d'une horizontale de cette surface, c'est-à-dire l'angle entre le Nord géographique et une horizontale de la surface (le sens de rotation est orienté vers l'est). Sur le terrain, cet angle est mesuré à l'aide d'une boussole. La valeur est comprise entre 0 et 180°.

Le pendage d'une surface est l'angle entre un plan horizontal et la ligne de la plus grande pente de la surface, compté vers les pentes descendantes (valeur comprise entre 0° pour une surface horizontale et 90° pour une

surface verticale). Sur le terrain, cet angle est mesuré à l'aide d'un clinomètre, dont sont munies les boussoles de géologue (figure 2). Par ailleurs, pour faciliter la lecture des résultats, nous avons indiqué le sens de plongement du plan (vers l'Est (E) ou l'Ouest (W)).



Figure 2 : Définition d'un pendage

1.2 Orientation d'une droite dans l'espace

Une ligne assimilée à sa tangente est également caractérisée par deux angles (figure 3) :

- La direction de la ligne est la direction du plan vertical qui contient cette ligne, c'est-à-dire l'angle entre le Nord et le plan vertical qui contient la ligne.
- Le plongement de la ligne est l'angle entre un plan horizontal et la ligne descendante.

Lorsqu'une ligne est contenue dans un plan porteur matérialisé (par exemple strie sur un miroir de faille), il est souvent recommandé de mesurer soigneusement l'orientation de la ligne et celle du plan porteur. Dans ce plan, l'angle entre l'horizontale et la ligne est appelé : "pitch" ou "angle de chute" (figure 3).



Figure 3 : Orientation d'une droite dans l'espace

2 Présentation de l'étude

2.1 Présentation de la mine

La Société Française des Asphaltes exploite un gisement de calcaires asphaltiques éocènes à Saint Jean de Maruejols. Cette localité se situe à 25 kilomètres au nord d'Alès en bordure est du fossé tertiaire d'Alès

Ce gisement est classiquement considéré par les exploitants comme une série de panneaux à faible pendage ouest, décalés verticalement par un champ de failles normales, à l'origine de l'effondrement du fossé d'Alès.

Le gisement considéré comme d'âge Ludien inférieur se trouve dans une série de calcaires et de marnes feuilletés contenant des restes de poissons. Certains horizons de cette formation sont plus ou moins imprégnés de bitume, d'autres (marnes vertes, niveaux à silex) représentent pour les mineurs des horizons repères.

2.2 Présentation des deux chantiers

Les figures 4 et 5 présentent la localisation des deux chantiers. Le premier chantier : Calpha1 se trouve à proximité immédiate de la faille principale, l'effet de cette hétérogénéité pourra donc être soigneusement étudié (figure 6). Le second chantier Calpha2 se trouve à plus grande distance de la faille mais est précédée d'une succession de fractures de pendage ouest, on pourra ainsi comparer l'influence de la dimension des structures faillées (figure 7).



Figure 4 : Plan de la mine SFA et localisation des sites Calpha



Figure 6 : Localisation des fractures du site Calpha1



Figure 5 : Localisation par rapport à la faille



Figure 7 : Localisation des fractures du site Calpha2
3 ETUDE DU SITE CALPHA1

Ce site se trouve à proximité de la faille de Rebésou (de 6 à 10 mètres).

3.1 Structures Relevées Dans La Galerie N 40° De Parement SW

Seuls des plans de stratification et des plans de fractures ont été relevés (voir la localisation des fractures figure 6).

Station S_1 : fracture F_1 (α =88°, β =88° E)

Il s'agit d'une cassure sans déplacement affectant des alternances de couches bitumineuses (20-30 cm) et des couches sans bitume (2-5 cm). Dans les parties supérieures, l'amplitude de ces alternances devient plus régulière (de l'ordre du centimètre). La hauteur totale de front est d'environ 3 m. Les stratifications ont pour orientation : (α =15° et β =16° W).

Station S, : fracture F, (α =50°, β =30° W)

On observe un ensemble de cassures discontinues sans déplacement, définissant une zone de bréchification. La surface des cassures est patinée et les stratifications sont identiques aux précédentes.

Station S_3 : fracture F_3 (α =140°, β =75° W)

Il s'agit de fractures sans déplacement à brèches calcifiées (ciment de calcite). On observe des micro-fractures associées en échelon.

Au mur de la fracture F_3 , les stratifications se perturbent (boudinage). On a apparition de structures bréchiques en bas de parement et les stratifications sont plus plongeantes (α =0°, β =30° W).

Station S_4 : fracture F_4 (α =0-10°, β =50° E)

C'est une fracture à faible déplacement avec une structure bréchique (idem F_2). Cette fracture est dédoublée parallèlement avec un espacement de 12 cm. Les stratifications (α =0°, β =22° W) sont perturbées et bréchiques vers le bas. On observe par ailleurs un suintement d'hydrocarbures à proximité de cette fracture.

Station S_5 : fracture F_5 (α =NS, β =50° W)

Il s'agit d'une fracture semblable à F_2 . Les lits à alternances décimétriques cèdent progressivement la place à partir du bas de parement à un faciès d'asphalte à rubannement centimétrique et millimétrique. Les stratifications ont l'orientation suivante : α =NS, β =22° W.

Station S_6 : fracture F_6 (α =160°, β =65° W) C'est une fracture semblable à F_5 .

A partir de S_6 , à 1.2 m du bas de parement, l'asphalte est pauvre en bitume et de teinte claire mais toujours d'aspect rubané.

Station S_7 : ensemble de fractures

Il s'agit d'une zone à texture bréchique très perturbée et on n'observe pas de fractures précises. A mi hauteur de parement, les éléments de brèche sont centimétriques à décimétriques. Les stratifications sont d'orientation α =15° et β =28° W.

Station S_s : *ensemble de fractures*

Les textures bréchiques remontent vers le toit. Le niveau clair (faible en hydrocarbure) se trouve à 1.9 m du sol. On observe par ailleurs, de petites lentilles de silex (épaisseur centimétrique, longueur décimétrique). Les stratifications sont d'orientation : α =NS et β =24° W.

Station S_9 : ensemble de fractures

On n'observe plus de structures rubanées mais des brèches grossières (pluri-décimétriques) à texture en nodules (20 cm de diamètre) (figure 8). Un petit niveau très riche en hydrocarbures (centimétrique) apparaît au milieu du front de taille. Les stratifications sont semblables à celles obtenues en S_g . Par ailleurs, dans le niveau supérieur, on observe un réseau de micro-fractures parallèles de longueur décimétriques et subverticales.



Figure 8 : Vue de S, avec la structure en nodules

De S₉ à S₁₀, il s'agit d'une zone fortement bréchifiée et broyée qui est limitée par une fracture majeure (cf. S₁₀).

Station $S_{10'}$ fracture F_{10} (α =140°-150°, β =52° W)

Les éléments de brèche sont pluri-décimétriques. Au mur de S_{10} jusqu'à la limite de la zone d'étude, la structure bréchique disparaît et la zone devient moins perturbée. A 1.6 m du sol, au niveau de la limite, la texture est légèrement plus perturbée que dans les parties supérieures du parement. La stratification est constituée de rubannements centimétriques.

3.2 Structures Relevées dans la galerie N 120°, Parement NE

Cette galerie coupe la faille majeure dite faille de Rebésou. En début de recoupe, les stratifications sont orientées : α =140°, β =20° W. Le faciès est rubané et parfois riche en bitume (zone de 30 cm qui reste régulière jusqu'à la fracture F_{11}).

Station S_{11} : fracture F_{11} ($\alpha = NS$, $\beta = 45^{\circ}-50^{\circ}$ E)

Cette fracture parcourt toute la recoupe (visible sur les deux parements et au toit), elle comporte des stries parallèles à la ligne de plus grande pente.

Entre S_{11} et S_{127} on observe une zone de brèche à gros éléments et une stratification perturbée : la texture est très hétérogène.

Station S_{12} : fracture F_{12} (α =10°-20°, β =90°) Cette fracture croise une seconde fracture de direction : (α =25°, β =48° E).

Station S_{13} : fracture F_{13} ($\alpha=20^\circ$, $\beta=80^\circ$ W)

Entre S_{12} et S_{13} , on observe une zone bréchique.

Station S_{14} : faille F_{14} ($\alpha=20^{\circ}-25^{\circ}$, $\beta=80^{\circ}$ W)

Il s'agit de la faille principale : la grande faille de Rebésou. On se reportera à la figure 9 afin de mesurer son importance.



Figure 9 : Faille de Rebésou

3.3 Conclusion

Nous avons reporté les différentes mesures précédentes sur un canevas de Schmidt donné figure 10 (projection anglo-saxonne selon l'hémisphère sud vue de l'hémisphère Nord).

On détermine alors les quatre familles de plans suivants :

- Φ_1 d'orientation (α =148°, β =64° W),
- Φ_2 d'orientation (α =9°, β =59° W),
- Φ_3 d'orientation (α =8°, β =61° E),
- Φ_4 d'orientation (α =88°, β =88° E).

Il est à noter que ce dernier plan a été obtenu avec une seule mesure, son intervalle de confiance est donc très faible.



Figure 10 : Résultats reportés sur le canevas de Schmidt

4 ÉTUDE DU SITE CALPHA2

Ce chantier est situé à une quarantaine de mètres de la grande faille de Rebésou. Ce site correspond donc à la situation réelle et présente de nombreuses fractures assez importantes.

Par ailleurs, lors de l'expérimentation géophysique, les mineurs avaient foudroyé la galerie auxiliaire qui était alors comblée au niveau de la fracture F_{33} (figure 7). Nous avons cependant indiqué toutes les fractures relevées lors des mesures structurales.

4.1 Structures Relevées Dans La Galerie N-S°, Parement Ouest

Dans cette galerie qui sera instrumentée, on observe quelques fractures qui restent assez modestes.

Station S_1 : fracture F_{15} (α =20°, β =68° W) C'est une fracture assez importante avec des stries de déplacement (pitch de 40°-45°). On observe par ailleurs, des stratifications relativement massives et riches en matières organiques d'orientation : (α =145°, β =10° W).

Station $S_{1,i}$: fracture $F_{1,i}$ (α = 35°, β =68° W, Pitch : Nord 40°)

C'est une fracture avec déplacement et stries. Les stratifications deviennent plus fines et régulières (infracentimétriques à centimétriques) d'orientation (α =140°, β =10°-15° W).

Station S_3 : fracture F_{17} (α =75°, β =68° W, Pitch : Nord 30°) Il s'agit d'une fracture importante avec des stries de déplacement.

Station S_4 : fracture F_{18} ($\alpha=90^\circ$, $\beta=68^\circ E$) Il s'agit d'une petite fracture.

Station S_5 : fracture F_{19} (α =100°, β =58° W) C'est également une fracture mineure.

Station $S_{_{6}}$: fracture $F_{_{20}}(\alpha=40^{\circ}, \beta=80^{\circ} E)$ C'est une fracture importante semblable à la fracture transversale suivante.

Fracture transversale F_{21} (α =40°, β =90°) Il s'agit d'une fracture majeure traversant toute la galerie.

Station S_{7} : fracture F_{22} (α =105°, β =75° E) Entre S_{7} et S_{8} , on observe des stratifications ayant pour direction : N 160° et pour pendage : 20° W.

Station S_s : fracture F_{23} ($\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$) On observe un aspect rubané avec une alternance de lits (centimétriques à pluri-centimétriques) plus ou moins riche en bitume.

Station S_9 : fracture F_{24} (α =35°, β =75° W) C'est une fracture majeure avec des stries ayant un pitch de 50°. Les abords de celle-ci sont marquées par des suintements d'hydrocarbures. Les stratifications restent inchangées.

Station S_{10} : fracture F_{25} (α =30°, β =70° W) C'est une fracture majeure ayant un pitch de 60° avec un suintement important d'hydrocarbures.

Station S_{11} : fracture F_{26} ($\alpha=60^{\circ}$, $\beta=68^{\circ}$ W) Il s'agit d'une fracture mineure.

Station S_{12} : fracture F_{27} (α =35°, β =0°) Il s'agit d'une grande fracture avec un suintement important de bitume.

4.2 Structures Relevées dans la galerie Est-Ouest, Parement Sud

Cette galerie est orientée Est-Ouest et présente une succession de fractures majeures présentant souvent un déplacement décimétrique.

Station S_{13} : fracture F_{28} ($\alpha = NS$, $\beta = 80^{\circ}$ W)

Il s'agit d'une fracture inverse à ramifications avec un déplacement de l'ordre de deux à trois centimètres. La partie centrale est massive et riche en bitume tandis que les stratifications deviennent alternées vers le haut du parement.

Station S_{14} : fracture F_{29} (α =160°, β =75° W)

C'est une fracture à ramifications en fracture inverse avec un décalage de cinq à dix centimètres.

Station S_{15} : fracture F_{30} ($\alpha=20^\circ$, $\beta=0^\circ$)

Il s'agit d'une fracture inverse avec un décalage de cinq à dix centimètres.

Station S_{16} : fracture F_{31} ($\alpha=28^\circ$, $\beta=90^\circ$)

C'est une fracture importante semblable à la précédente.

Station S_{17} : fracture F_{32} ($\alpha = NS$, $\beta = 90^{\circ}$)

Il s'agit d'une fracture semblable à la précédente. On notera le parement Sud sur la figure 11.



Figure 11 : Recoupe N-S sur la fracture F₃₂

Station S_{18} : fracture F_{33} ($\alpha=10^\circ$, $\beta=70^\circ$)

Il s'agit d'une fracture très importante en fracture normale avec bréchification et un décalage de stratifications de l'ordre de 15 centimètres (figure 12).

Station S_{19} : fracture F_{34} ($\alpha=5^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Il s'agit d'une fracture inverse dont l'effondrement est de l'ordre de dix centimètres.

Station S_{20} : fracture F_{35} (α =10°, β =80° W) Il s'agit d'une fracture normale

Station S_{21} : fracture F_{36} (α =NS, β =75° W) C'est également une fracture normale avec un décalage de 15 cm.

Station S_{22} : fracture F_{37} (α =40°, β =80° E) Il s'agit d'une fracture inverse très importante avec un décalage d'une dizaine de centimètres.

Station S_{23} : fracture F_{38} (α =20°, β =75° W)

Il s'agit d'une fracture très importante et qui croise F_{37} . On observe par ailleurs, aux abords de la fracture F_{38} , une zone bréchifiée d'épaisseur décimétrique.

Pour les fractures F_{37} et F_{38} , on se reportera à la figure 13.





Figure 13 : Fractures F₃₇ (10) et F₃₈ (11)

Figure 12 : Décalage des stratifications de F₃₃

4.3 Conclusion

L'étude sur le canevas de Schmidt montre qu'il existe quatre familles de plans (figure 14).

- ϕ_1 d'orientation : (α =178°, β =77° W),
- ϕ_2 d'orientation : (α =28°, β =71° W),
- ϕ_3 d'orientation : (α =84°, β =73° W),
- ϕ_4 d'orientation : (α =72°, β =86° E),

On superpose ensuite les deux canevas pour visualiser les familles communes aux deux sites (figure 15). La famille la plus représentée est donc orientée : NE-SW à pendage W, correspondant aux grandes failles en bordure du bassin d'effondrement d'Ales, qui affecte les couches d'asphalte en faille normale.



Figure 14 : Canevas de Schmidt du chantier 2



Figure 15: Superposition des deux canevas

Annexe I : Description acoustique des sites Calpha

Pour déterminer les caractéristiques du site Calpha (cf. annexe H et chapitre 3) des mesures acoustiques sur échantillons ont été effectuées.

1 Analyse des mesures acoustiques

Les mesures acoustiques ont été effectuées avec un Pundit et un Sofranel. Pour estimer la fiabilité et la reproductibilité des résultats ci-après, nous avons effectué 5 mesures sur le même échantillon de calcaire asphaltique (échantillon D526 dont la photographie est présentée en figure 1) (les mesures de longueur ayant été effectuées avec un pied à coulisse). Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

L'écart de vitesse est donc très faible. Le pundit semblant plus fiable (au moins pour cet échantillon), il sera utilisé pour les mesures suivantes.

	Distance (mm)	Tps Pundit (ms)	Tps Sofranel (ms)	Vit Pundit (m/s)	Vit Sofranel (m/s)
	139.8	36.8	37	3799	3776
	139.78	36.9	37.2	3788	3756
	139.76	36.8	37.4	3798	3736
	139.58	36.8	37.4	3793	3736
	139.7	36.9	37.3	3786	3746
Moy	139.72	36.84	37.26	3793	3750
Ec Type	0.08	0.05	0.15	5.15	15.11

Tableau 1 : Analyses de la fiabilité des mesures au Pundit

2 Résultats

Les tableaux suivants présentent le volume, la densité, la vitesse des ondes de compression et le module d'Young dynamique (en supposant un coefficient de Poisson de 0.25) pour des matériaux issus du site Calpha (calcaire classique et calcaire asphaltique).

La figure 1 présente la photographie de la plupart des échantillons.

No échantillon	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy
V (cm ³)	741	172	188	377	439	373	359	420	1472	
ρ	2.54	2.35	2.45	2.65	2.48	2.32	2.3	2.35	2.06	2.38
$V_{P}(m/s)$	4300	3706	4357	5765	4375	3266	3203	3788	3897	4073
E dyn (Gpa)	34.9	23.9	34.5	65.39	35.27	18.38	17.5	25	23.2	31

Tableau 2 : Caractéristiques du calcaire

No échantillon	C	K'	Ι	G	М	J	N	D526	E	Moy
Vol (cm ³)	1066	334	477	452	733	96.2	1058.	534.9	168	
ρ	1.98	2.06	2.08	2.1	2.14	2.05	2.06	2.13	2.21	2.09
$V_{p}(m/s)$	2989	3281	3300	3560	3420	3338	3134	3793	3800	3352
E dyn (Gpa)	14.7	18.4	18.8	22.1	20.8	18.9	16.8	25	26	20

Tableau 3 : Caractéristiques du calcaire asphaltique

La figure 1 présente la photographie de tous les échantillons utilisés.



Figure 1 : Photographie de tous les échantillons utilisés

Annexe J : Pointés

Le pointé des temps de propagation en sismique est très délicat (Dillon et al., 1985). Si le rapport signal sur bruit est suffisamment élevé des algorithmes peuvent être utilisés pour pointer de manière automatique (Mao et al. 1995). Sinon, le pointé doit être effectué manuellement.

Dans le cadre de cette thèse, les rapports « signal sur bruit » étant trop faibles, tous les pointés ont été effectués manuellement.

Si le pointé des ondes directes peut être effectué avec une erreur de l'ordre de 2 à 3%, le pointé des ondes réfléchies est beaucoup plus délicat et il n'existe pas de procédure clairement établie.

A titre d'exemple, la figure 1 suivante présente les pointés réalisés sur le signal enregistré par l'accéléromètre 20 en Calpha2, après filtre passe-haut, moyenne glissante et filtre FK (cf. 3.4.5).



Figure 1 : Pointé en Calpha2 sur le signal enregistré par l'accéléromètre 20

Annexe K : Simulation numérique

Pour valider les configurations choisies au chapitre 4, nous allons présenter les signaux que l'on pourrait obtenir in situ. Nous montrerons alors que l'onde réfléchie pourra être détectée et la tomographie réflexion pourra être utilisée pour caractériser le massif.

Le modèle théorique choisi est le suivant (figure 1) :

- une couche verticale comprise entre les plans $x=-\infty$ et x=4, de vitesse $V_{p_1}=3500$ m/s,
- une deuxième couche verticale comprise entre les plans x=4 et x=20, de vitesse V_{p} =2500 m/s,
- une troisième couche verticale comprise entre les plans x=20 et x= ∞ , de vitesse V₁₃=4000 m/s.

Trente neuf récepteurs sont répartis le long de l'axe x entre les points (0.5;0) et (19.5;0) avec un pas d'espacement de 0.5 m. Un émetteur est placé en (0;4). Le réflecteur est situé le long de la droite x=20 (figure 1).

Le signal obtenu est alors présenté sur la figure 2. L'onde directe est parfaitement visible (temps=0.007 s, trace 40), elle est suivie de l'onde réfléchie de vitesse apparente de signe opposé (temps=0.0075 s, trace 40). Cette onde est parfaitement visible et pourrait être détectée.

Par ailleurs, l'onde réfléchie sur la première interface est également visible (temps=0.002 s, trace 5) et pourrait être utilisée comme information a priori.



Figure 1 : Dispositif expérimental

Figure 2 : Signal enregistré

Annexe L : Mesure des modules élastiques statiques

L'objectif de cette annexe est de rappeler la démarche utilisée pour déterminer les modules élastiques statiques (cf. 4.3.2).

1 Rappel

Dans un essai de compression simple, lorsque le matériau étudié n'est pas parfaitement élastique, les cycles de chargement/déchargement présentent des boucles d'hysterisis importantes, caractéristiques d'une dissipation d'énergie (Niandou, 1994). Les paramètres élastiques obtenus en négligeant ce phénomène ne vérifient pas d'une manière exacte la symétrie de la matrice d'élasticité. Pour résoudre ce problème, il suffit de procéder à un palier de relaxation ou de fluage ou n'importe quel autre cheminement de contraintes pour atteindre la « courbe de stabilisation ». Cette courbe se définit comme le lieu des points où le champ de contraintes et de déformations sont indépendants du temps. Lorsque la « courbe de stabilisation relative » est atteinte, une décharge est ensuite appliquée pour déterminer le module élastique recherché. Les coefficients élastiques déterminés de cette manière (méthode statique) doivent être égaux aux coefficients dynamiques (Cristescu, 1993).

2 Mise en place

Les échantillons sont placés sous une presse mécanique (ADAMEL LHOMARGY DY26 – force maximale 10 tonnes). En cycle de chargement-déchargement, la vitesse de déplacement axiale est de 10 μ m/min. Les échantillons sont instrumentés de jauges d'extensométrie. Elles sont reliées à un conditionneur de signaux puis à un système d'acquisition. Les sorties analogiques donnent l'effort axial lu sur le capteur de force de la presse.

Les essais de compression uniaxiaux ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de diamètre 45 mm. Les déformations longitudinales et transversales ont été mesurées par 4 jauges d'extensométrie (2 jauges longitudinales, 2 jauges transversales) (figure 1). Chaque cycle comporte 3 phases :

- une phase de chargement jusqu'à une contrainte σ_i (plus i augmente, plus σ_i augmente),
- une phase de relaxation jusqu'à stabilisation de la contrainte (environ 30 mn),
- une phase de déchargement jusqu'à 30% de σ_i .

Trois à quatre cycles sont réalisés pour chaque essai.



Figure 1 : Mise en place des jauges d'extensométrie

3 Résultats

La figure 2 présente les cycles de chargement/déchargement obtenus. L'ordonnée correspond à la contrainte exercée, l'abscisse à la moyenne des déplacements mesurés sur les jauges longitudinales e_i et transversales e_i. On mesure alors un module d'Young de 9 GPa et un coefficient de poisson de 0.26. On n'observe pas de cycle d'hystérisis, les modules élastiques issus de cette expérimentation sont donc validés.



Figure 2 : Mesure du module d'Young statique

Annexe M : Interface Homme-Machine

Pour visualiser facilement les données issues de l'inversion tomographique, un logiciel spécifique a été développé. L'objectif est la visualisation des vitesses, de l'ouverture angulaire et du nombre de rayons. Une sauvegarde sous la forme d'une image BMP est ensuite possible.

1 Présentation du logiciel

1.1 Présentation

Le logiciel a été écrit à l'aide de Visual Basic. L'interface se décompose en deux « masques » successifs :

- 1. Demande du nom de fichiers paramètres (extension « .par »),
- 2. Demande du nom de fichier résultat qui peut correspondre à la vitesse, au nombre de rayons ou à la répartition angulaire dans chaque cellule.

La cartographie bidimensionnelle des vitesses est alors présentée. Lorsque la tomographie est effectuée en trois dimensions, l'utilisateur peut faire varier le plan de coupe à sa guise. Ces plans sont parallèles au plan (x,y) ou au plan (x,z). Par convention, l'axe x est parallèle à la génératrice du tunnel.

1.2 Architecture des programmes

La programmation sous Visual Basic est événementielle. C'est à dire que les procédures sont appelées en fonction des actions de l'utilisateur (clic sur bouton...).

Plusieurs événements peuvent être déclenchés :

- 1. Changement de direction du plan de coupe (à l'aide d'un bouton radio).
- 2. Changement de la position du plan de coupe (à l'aide d'un ascenseur).
- 3. Enregistrement de l'image sous forme d'un bitmap (à l'aide d'un bouton).

2 Résultats

Les résultats se présentent sous la forme d'une cartographie des vitesses. Un panneau de commande y est associé en fonction du type d'images désiré.

2.1 Panneau de commande

La figure 1 présente le panneau de commande. On peut reconnaître :

- 1. L'ascenseur permettant de choisir l'abscisse du plan de coupe lorsque l'inversion est tridimensionnelle. Deux types de plan peuvent être choisis : un plan parallèle à (y,z) (dénommé « vers l'avant ») et un plan parallèle à (x,y) (dénommé « vers la gauche »). Le choix est effectué à l'aide de la case à cocher.
- 2. Les boutons permettent de sauvegarder le résultat obtenu ou les contrôles sous forme d'une image bitmap.

Une légende est également fournie, les vitesses d'intervalles peuvent être paramétrées à l'aide du fichier de paramètres associé (fichier .par).

かい Visualisation du tune よし	nel - [Controle de l'imâge]
LEGEND	
> 3800m/s 3200 - 3800m/s 3000 - 3200m/s 2800 - 3000m/s 2200 - 2800m/s < 2200m/s	
CHOIX DE L'ABSCI Abscisse de coupe	
O Vers la gauche	impression dessin
O Vers l'avant	impression controle

Figure 1 : Panneau de commande

2.2 Cartographie des vitesses

La figure 2 suivante représente une cartographie des vitesses (elle correspond à la coupe par rapport au plan z=0 de l'expérimentation dans la mine du Burg).

L'utilisateur peut ainsi visualiser la zone en avant du front de taille. En outre, l'utilisation de l'enregistrement permettra de sauvegarder les images obtenues, ce qui pourrait être fort utile en cas de contentieux.

😹 Visualisation du tunnel	
Visualisation du tunnel Linage du tunnel	Image LEGEND > 3600m/s 3500 - 3600m/s 3400 - 3500m/s 3300 - 3400m/s 3200 - 3300m/s < 3200 - 3300m/s < 3200 - 3300m/s < 3200 - 3300m/s CHOIX DE L'ABSCISSE DE COUPE Abscisse de coupe CHOIX DU TYPE DE COUPE
	CHOIX DU TYPE DE COUPE

Figure 2 : Résultat type

Annexe N : Utilisation d'information a priori

Pour améliorer les images obtenues en 4.2.2 b), nous utilisons la tomographie transmission qui permet d'obtenir une première approximation du modèle initial (cf. figure 4.24). On sait alors que la vitesse dans la zone comprise entre les plans x>0 et x<10 est égale à 3500 m/s.

L'inversion est ensuite réalisée à l'aide de rayons courbes. Le modèle initial correspond au modèle obtenu par tomographie transmission. La figure 1 présente alors le modèle de vitesse obtenu. Il est beaucoup plus proche du modèle théorique. A titre de comparaison, la figure 2 présente les modèles de vitesse obtenus sans informations a priori, la qualité des images obtenues est moins bonne.



Figure 1 : Modèle de vitesse obtenu avec informations a priori



Figure 2 : Modèle de vitesse obtenu sans informations a priori

Annexe O : Présentation du site Burg

1 Géologie régionale

Le gisement de Spath Fluor du Burg se trouve dans le sud ouest de la France à 30 km à l'est de la ville d'Albi et à 5 km au sud ouest d'Alban, chef lieu de canton du Tarn. L'environnement géologique est constitué de schistes paléozoïques épimétamorphiques. Après des phases de déformations souples, les terrains ont subi une tectonique cassante entraînant la formation de fractures. Celles N 80° à N 120°E sont fréquemment minéralisées en fluorine dans la région d'Albi (Bains, 1998 ; Couturier 1980).

2 Cadre géologique de la mine

Le gîte du Burg est lié à une fracturation de direction générale N 110° plongeant de 80° vers le nord. La minéralisation est reconnue sur environ 1,2 km de longueur et 250 m de hauteur. La minéralisation forme une succession de lentilles. Le minerai est constitué de fluorine massive (la teneur en CaF2 peut atteindre 95%), les autres minéraux majeurs sont le Quartz, la Sidérose et la Chalcopyrite. Les épontes sont constituées de schistes comportant des niveaux gréseux et volcaniques. La hauteur connue est actuellement de 250 mètres avec un aval non reconnu. La puissance du filon varie de 0 à 10 mètres avec des amincissements, des élargissements et des digitations.

3 Présentation du site expérimental

L'objectif de l'expérimentation dans la mine du Burg était la recherche d'un filon de fluorine dans un encaissant schisteux. Les accéléromètres ont été disposés le long d'une galerie auxiliaire (parallèle à l'axe x). Les sources ont été disposées le long de la galerie principale (parallèle à l'axe y) (figure 1). L'axe z est orienté vers le centre de la terre.

Le site expérimental est marqué par de nombreuses fractures ouvertes notamment les fractures F_1 (la plus importante, figures 2 et 3), F_2 (figure 4) et F_3 (figures 5 et 6).

On notera la présence de pièces métalliques aux abords de la fracture F_1 (figure 3) : elles permettent d'assurer la stabilité de la galerie et indiquent donc une zone fragile ce qui devrait se traduire par une zone de faible vitesse des ondes sismiques. De plus, des traces de fluorine sont également visibles aux alentours de cette fracture (figure 3).

Au toit de la galerie principale, la fracture F_2 est ouverte et d'épaisseur de l'ordre de 10 cm comme en témoigne la figure 4 : une bouteille d'évian peut y être insérée. Cette fracture est néanmoins fermée sur le parement principal de la galerie principale (plan x>0).

La fracture F_3 est une succession de fractures. Celles-ci sont ouvertes du côté x<0 (d'épaisseur d'une dizaine de centimètres mesurable grâce à la bouteille d'évian, figure 7) mais fermées du coté x>0 (figures 5 et 6).



Figure 1 : Représentation du site (vue de dessus)



Figure 2 : Fracture F₁ (parement galerie auxiliaire)



Figure 3 : Fracture F₁ (parement galerie auxiliaire) (noter la présence de filon)



Figure 4 : Fracture F₂ (toit de la galerie principale)



Figure 5 : Fracture F, (parement x>0)



Figure 6 : Fracture F₃ (parement x>0)



Figure 7 : Epaisseur de la fracture F₃ (parement x<0)

4 Source utilisée

La source est une masse de 2 kg. Les ondes sismiques sont émises par un simple choc frontal (figure 8).



Figure 8 : Source utilisée

Annexe P : Position précise des points de réflexion obtenus

L'objectif de cette annexe est de donner la position des points de réflexion obtenus lors de l'expérimentation dans la mine du Burg (cf. chapitre 5).

х	Y	Z	Х		Y	Z		х	Y	Z		х	Y	Z
19,6338	7,807	1,9791	19,27	32	-7,3152	4,6322		16,4403	-8,6867	3,3992		23,2207	4,1787	-0,7345
19,6457	7,7651	1,9715	19,30	88	-7,2496	4,634		16,4722	-8,6554	3,4025		23,2237	4,1875	-0,7354
19,6579	7,7226	1,9637	19,3	5	-7,1733	4,6368		16,5509	-8,5777	3,4131		23,2266	4,1964	-0,7363
19,6791	7,6398	1,9579	19,38	9	-7,1011	4,6391		16,6197	-8,5098	3,4221		23,2158	4,1602	-0,7393
19,6861	7,6207	1,9487	19,38	34	-7,1135	4,6335		6,46007	-11,7337	9,6488		23,2275	4,1975	-0,7389
19,6966	7,5862	1,94	19,42	04	-7,0451	4,6353		6,60245	-11,69011	9,6425		23,2341	4,2182	-0,7393
19,7015	7,5766	1,93	19,46	06	-6,9708	4,6377		6,74545	-11,64632	9,6361		23,2496	4,2679	-0,7383
19,7168	7,5208	1,9222	19,45	54	-6,9824	4,632		6,87586	-11,61932	9,6061		23,2493	4,2661	-0,7399
19,7336	7,4589	1,9145	19,48	55	-6,9273	4,6324		7,02846	-11,56452	9,6145		23,2472	4,2584	-0,7417
19,7471	7,4117	1,9059	19,50	78	-6,887	4,6314		7,17663	-11,51592	9,614		23,2505	4,2682	-0,7427
19,7619	7,3585	1,8974	9,356	49	-5,7042	12,7103		7,33312	-11,45666	9,6284		23,252	4,2722	-0,744
19,7723	7,3254	1,8877	9,444	95	-5,6728	12,6585		7,47606	-11,41611	9,616		23,2608	4,3002	-0,7441
19,7805	7,3025	1,8773	9,534	29	-5,6412	12,6062		7,61825	-11,37745	9,6005		23,2735	4,3405	-0,7437
19,7901	7,2738	1,8669	9,609	85	-5,6505	12,5352		7,7657	-11,3323	9,594		23,2845	4,3753	-0,7436
7,8637	-13,17539	9 4,0569	9,710	21	-5,5925	12,4932		7,91235	-11,28903	9,5844		23,2639	4,3073	-0,7484
7,98076	-13,118	4,0696	9,805	96	-5,5495	12,4438		8,06539	-11,23725	9,5869		23,2731	4,3363	-0,7486
8,09863	-13,06024	4 4,0825	9,911	72	-5,4801	12,4056		8,22168	-11,18118	9,5954		23,2843	4,3718	-0,7485
8,1997	-13,01131	4,0899	10,002	205	-5,4571	12,346		8,37698	-11,12703	9,6009		23,2632	4,3022	-0,7535
8,33025	-12,94694	4 4,1063	10,091	58	-5,4392	12,2834		8,5102	-11,10763	9,5548		23,2668	4,313	-0,7547
8,4549	-12,88569	9 4,1208	10,187	52	-5,4052	12,2273		8,6656	-11,05509	9,5572		23,2647	4,305	-0,7567
8,59081	-12,81852	2 4,1387	10,282	268	-5,3761	12,1681		8,82276	-11,00033	9,5627		8,24258	-9,71378	11,2344
8,70842	-12,76102	2 4,1506	10,386	502	-5,3254	12,1181		8,95938	-10,98012	9,5161		8,35718	-9,66385	11,2066
8,82492	-12,70416	6 4,162	10,493	92	-5,2636	12,0725		9,11315	-10,93306	9,5092		8,4726	-9,61356	11,1786
8,94852	-12,64358	3 4,1754	10,60)1	-5,2065	12,024		9,2641	-10,8919	9,493		8,57116	-9,59129	11,1278
9,07097	-12,58363	3 4,1883	10,67	91	-5,2404	11,9325		9,41708	-10,84847	9,4798		8,69934	-9,52254	11,1135
9,20225	-12,51905	5 4,204	10,78	66	-5,188	11,8803		9,57424	-10,79871	9,4759		8,82167	-9,46407	11,0905
9,3381	-12,45206	5 4,221	10,89	69	-5,1296	11,83		9,73527	-10,74268	9,4814		8,95556	-9,3875	11,0817
9,47261	-12,3858	4,2375	10,97	86	-5,1635	11,7356		9,88946	-10,70058	9,465		9,07084	-9,3424	11,047
9,57579	-12,33627	7 4,2428	11,08	42	-5,1263	11,6736		10,04457	-10,65823	9,4485		9,18491	-9,3006	11,0091
9,71031	-12,2701	4,2588	11,18	58	-5,1052	11,603		10,20159	-10,61361	9,435		9,30629	-9,2477	10,9797
9,84737	-12,20259	9 4,2756	15,33	72	-9,77686	3,2506		10,36137	-10,56475	9,4278		9,42647	-9,198	10,9471
9,95458	-12,1511	4,2813	15,40	46	-9,71023	3,2597		10,52824	-10,50174	9,4428		9,55589	-9,1336	10,926
10,08649	-12,08645	5 4,2956	15,44	46	-9,67082	3,2645		10,7005	-10,4268	9,4768		9,69021	-9,0618	10,9107
10,21413	-12,02414	4 4,3081	15,53	09	-9,58554	3,2764		10,8485	-10,40889	9,4188		9,82322	-8,9931	10,8924
19,0135	-7,7912	4,6282	15,70	18	-9,4165	3,3		11,0047	-10,37491	9,3858		9,92273	-8,9844	10,8231
19,0382	-7,746	4,6285	15,76	55	-9,3536	3,3084		11,1646	-10,33472	9,3623		10,05566	-8,9184	10,8013
19,0631	-7,7003	4,6289	15,82	63	-9,2936	3,3164		11,3138	-10,32591	9,2865		10,1914	-8,8485	10,7824
19,0681	-7,6924	4,6258	15,89	83	-9,2224	3,326		11,4779	-10,28115	9,2689		10,29454	-8,8388	10,7116
19,1062	-7,6218	4,6284	15,96	75	-9,154	3,3353		11,643	-10,23612	9,2512		10,42448	-8,7822	10,68
19,1371	-7,5649	4,6297	16,05	16	-9,071	3,3468		11,8122	-10,18095	9,25		10,5496	-8,736	10,6388
19,1811	-7,4832	4,6332	16,14	33	-8,9802	3,3595		11,9786	-10,13733	9,2289				
19,2024	-7,4444	4,6327	16,23	23	-8,8922	3,3717		12,1444	-10,09932	9,1975				
19,2214	-7,41	4,6318	16,26	21	-8,863	3,3748		12,3137	-10,05315	9,1794				
19,2485	-7,3604	4,6322	16,34	91	-8,777	3,3867		12,4864	-9,99694	9,178]			

BIBLIOGRAPHIE

Abraham O., Ben Slimane K., Côte Ph., 1998, Factoring anisotropy into iterative geometric reconstruction algorithm for seismic tomography, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 35, No. 1, pp. 31-41.

Aki K., Richards P.G., 1980, *Quantitative seismology theory and method*, Vol. 1 & Vol. 2, Ed. W.H. Freman and Company, San Francisco.

Al-Fares M.H., Sengbush R.L., 1987, Optimal Processing of VSP data. 19th Annual OTC in Houston, Texas, April 27-30, 1987.

Bains Ph, 1998, Modélisation géologique et ses conséquences de la mine de Spath Fluor du Burg (Sogerem), Rapport de Projet Industriel, Ecole des Mines d'Alès.

Baker G.S., Steeples D.W., Drake M., 1998, Muting the noise cone in near-surface reflection data: An example fromt southern Kansas, Geophysics, Vol. 63, No. 4, pp. 1332-1338.

Bleinstein N., 1986, Two-and-one-half dimensional in-plane wave propagation, Geophysical Prospecting, Vol. 34, pp. 686-703.

Bording R.P., Gersztenkorn A., Lines L., Scale J., Treitel S., 1987, Applications of seismic traveltime tomography, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., Vol. 90, pp. 285-303.

Bouchon M., 1981, A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol. 71, pp. 959-971.

Bourge J.P., 1990, Tomographie géologique par une méthode géométrique avec rais courbes, TFE, Liège.

Boyer S., Mari J.L., 1994, Sismiques et diagraphies, Editions technip, Paris, 194 p.

BRGM, CGG, CPGF, LCPC, 1992, *Géophysique appliquée* : code de bonne pratique.

Carron, Gauthier, Schaaf, Ulysse, Wozniak, 1992, Comprendre et enseigner la planète Terre, édition OPHRYS.

Cassel B.R., Alam M.A., Millahn K.O., 1984, Interactive VSP-CDP mapping in complex media, 54th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 842-845.

Celse B., 1996, *Inversion Tomographique*, Rapport de DEA (Mathématiques Appliquées), Université Joseph Fourier, Grenoble.

Celse B. (a), Côte Ph., Abraham O., Piwakowski B., Vayssade B., Henry J.P., 1998, Reconnaissance par microsismique haute résolution de discontinuités autour des ouvrages souterrains. Résultats d'essais sur site expérimental, Colloque de l'Association Universitaire de Génie Civil, Reims, pp. 442-449.

Celse B. (b), Côte Ph., Abraham O., Piwakowski B., Vayssade B., Henry J.P., 1998, Characterisation of rock structures ahead of tunnel face: feasibility study, EEGS Congress, Barcelona, pp. 527-530.

Celse B. (a), Côte Ph., Abraham O., Piwakowski B., Vayssade B., Henry J.P., 1999, Characterisation of rock masses in underground works using seismic reflection tomography, Colloque GeoVision, Liège, à paraître.

Celse B. (b), 1999, *Reconnaissance sismique en avant du front de taille par sismique haute résolution*, Colloque de l'Association Universitaire de Génie Civil, Poitiers (à paraître).

Celse B. (c), Côte Ph., Abraham O., Piwakowski B., Vayssade B., Henry J.P., 1999, Three dimensional characterisation of rocks using reflection tomography, EEGS Congress, Budapest (à paraître).

Celse B. (d), Côte Ph., Abraham O., Piwakowski B., Vayssade B., Henry J.P., 1999, Reconnaissance souterraine par tomographie réflexion, Revue Française de Génie Civil (en préparation).

Chakraborty A., Okaya D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods, Geophysics, Vol. 60, No. 6, pp. 1906-1916.

Chang Xu, 1996, Relationship between ray distribution and reconstructed velocity image in reflection tomography, Journal of Applied Geophysics, Vol. 35, Issues 2-3, Octobre.

Cheng C.H., Toksoz M.N., 1981, Elastic wave propagation in fluid filled borehole and synthetic acoustic logs, Geophysics, Vol. 46, pp. 1042-1053.

Claerbout J.F., 1976, Fundamentals of geophysical data processing. Blackwell Scientific Publications.

Clayton C.R.I. et al., 1995, Reinterpretation of surface wave test for the Oresund crossing, Proc. 11th European conference on soil mech. And fdn engng, Danish Geotechnical Society, Vol. 1, pp. 141-147.

Clement F., 1994, Une formulation en temps de parcours par migration pour la détermination des vitesses de propagation acoustique à partir de données sismiques bidimensionnelles, Th. Université Paris IX.

Corbetta F., Lantier F., 1994, *Reconnaissance à l'avancement d'un tunnelier par géophysique : Le cylindre électrique Techsol sur le chantier de la Devèze à Bordeaux*, Tunnels et Travaux Souterrains, No. 125, pp. 269-274.

Corin L., Couchard I., Dethy B., Halleux L., Richter Th., 1996, Application des techniques de radar en forage aux grands travaux, Géologues, Vol. 110, pp. 29-42.

Cosma C., Heikkinen P., 1996, Seismic investigations for the final disposal of spent nuclear fuel in Finland, Journal of Applied Geophysics, Vol. 35, pp. 151-157.

Côte Ph., 1988, Tomographies sismiques en Génie Civil, Th. d'Etat, Université J. Fourier, Grenoble.

Couturier P., 1980, Contribution à l'étude géolgique et gitologique du district à fluorine de l'Albigeois cristallin, Région de Montroc et du Burg (Tarn), Thèse, Université Paul Sabatier (Toulouse), 1980.

Cristescu N.D., 1993, *Rock rheology*, In comprehensive Rock Engineering. Vol. 1 : Fundamentals. Pergamon Press. Oxford. pp. 523-544.

Cuxac, 1994, Propagation et atténuation des ondes ultrasoniques dans des roches fissurées et anisotropes, Thèse, Ecole Nationale Supérieure de Géologie.

Denham L.R., 1981, Extending the resolution of seismic reflection exploration, J.Can. Soc. Expl. Geophys.

Dillon P.B., Thomson R.C., 1984, Offset source VSP surveys and their image reconstruction, Geophysical Prospecting, Vol. 32, pp. 790-811.

Dillon P.B., Collyer V.A., 1985, On timing VSP first arrival, Geophysical Propsecting, Vol. 33, pp. 1174-1194.

Dobrin M.B., 1951, Dispersion in seismic waves, Geophysics, Vol. 16, pp. 63-80.

Ducan G., Bereford G., 1995, Median filter behaviour with seismic data, Geophysical Prospecting, Vol. 43, pp. 329-345.

Dyer B.C., Worthington M.H., 1988, *Seismic reflection tomography: a case study*, First break, Vol. 6, No. 11, pp. 354-366.

Dynes K.A., Lytle. R.J., 1979, Computerized geophysical tomography, Proc. IEEE, Vol. 67, pp. 1065-1073.

Essebar A., 1992, Séparation paramétrique des ondes en sismique, Thèse de l'INPG, Grenoble.

Fermat P., 1881, Oeuvres de Fermat, Paris, Vol. 2, 354 p.

Foster M.R., Sengbush R.L., 1971, Optimum stack, US Patent No. 3,622,967, field 11/7/68, issued 11/23/71.

Foucauld A., Raoult J.F., 1992, Dictionnaire de Géologie, Edition Masson, 352 p.

Gabor D., 1946, Theory of communication, J. Inst. Electr. Eng., Vol. 93, pp. 421-429.

Gardner G.H.F, Gardner L.W., Gregory A.R., 1974, Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, Vol. 39, pp. 770-780.

Gautier V., 1991, Imagerie sismique 2D et 3D – Applications aux ouvrages d'art, Thèse, Université Pierre et Marie Curie.

Gerszenkorn A., Scales J., 1987, Smoothing seismic tomography with alpha-trimmed means, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., Vol. 91, pp. 67-72.

Gilbert P., 1972, Iterative methods for the three dimensional reconstructions of an object from projections., J. Theor. Biol., Vol. 36, pp. 105-117.

Glangeaud F., Mari J.L., 1993, Wave Separation, Revue de l'IFP, Vol. 48 No. 5, pp. 467-500.

Gordon R., Bender R., Herman G.T., 1970, Algebric reconstruction technique (ART) for three dimensional electron microscopy and X-Ray photography, J. Theor. Biol., Vol. 29, pp. 471-481.

Hadamart J., 1932, Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique, Bull. Univ. Princeton, V. 13, pp. 1-20.

Hasegawa Masahiro, Usui Masaru, Gotoh Keinosuke, 1993, Geological prognosis ahead of a tunnel face, Engineering Geology, Vol. 35, pp. 229-235.

Hartse H.E., Knapp J.S., 1990, Understanding offset VSP, The Leading Edge, Vol. 9, No. 4, pp. 30-36.

Harwijanto J.A., Wapenaar C.P.A., Berkhout A.J., 1987, VSP migration by single shot record inversion, First Break, Vol. 5, No. 7, pp. 247-255.

Hardage B., 1985, Vertical Seismic Profiling, Geophysical Press.

Henry G., 1994, La sismique réflexion : principes et développements, editions Technip, 172 p.

Huang M.W., Arora J.S., 1997, Optimal design with discrete variables: some numerical experiments, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, pp. 165-188.

Inazaki T., Jinbo S., Takahashi Y., Watanabe F., 1988, *Application of seismic tomography to the evaluation of rock mass properties*, 2ndInternational Symposium on Field Measurements in Geomechanics, eds Balkema (Holland), pp. 347-356.

Inazaki T., 1995, HSP : A new tool for detecting fractures ahead of tunnel face, ISRM Congress, Japan.

Ivanson S., 1983, Remark on an earlier proposed iterative tomographic algorithm, Geo. J. R. Astr. Soc., Vol. 75, pp. 855-860.

Kenett B.L.N., Kerry N.J., 1979, Seismic waves in a stratified half space, Geo. J. R. Astr. Soc., Vol. 57, pp. 557-583.

Koefoed O., De Voogd N., 1980, The linear properties of thin layers, with an application to synthetic seismograms over coal seems, Geophysics Vol. 48, pp. 12-18.

Koren Z., Mosegaard K., Landa E., Thore P., Tarantola A., 1991, Monte Carlo estimation and resolution analysis of seismic background velocity, J. of Geophys. Res., Vol. 96, No. B12, pp. 20,289-20,299.

Kuhl D.E., Edwards R.Q., 1963, Image separation in radioisotopic scanning, Radiology, Vol. 80, pp. 653-661.

Lambaré G., 1991, Inversion linéarisée de données de sismique réflexion par une méthode quasi-newtonienne, Thèse, Université Paris VII.

Lagabrielle R., 1994, La détection des cavités souterraines, Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, Vol. 191, pp. 91-92.

Lavergne M., 1987, Méthodes sismiques, eds Masson.

Leparoux D., 1997, Mise au point de méthodes radar pour l'auscultation structurale de milieux géologiques très hétérogènes (Modélisation, Migration, Expérimentation), Thèse, Université de Rennes I.

Lines L., 1993, Ambiguity in analysis of velocity and depth, Geophysics, Vol. 58, pp. 596-597.

Mao W.J., Gubbins D., 1995, Simultaneous determination of time delays and stacking weight in seismic arrays beamforming, Geophysics, Vol. 60, pp. 491-502.

Mao W., Stuart G.S., 1997, Transmission-reflection tomography: Application to reverse VSP data, Geophysics, Vol. 62, No. 3, pp. 884-894.

Mari J.L., Coppens F., 1989, La sismique de puits, Revue de l'IFP, Vol. 44, No. 2, Mars-Avril 1989.

Mari J.L. (a), Glangeaud F., 1994, Wave separation: applications, Revue de l'IFP, Vol. 49, No. 1, pp. 21-61.

Mari J.L. (b), Gavin Ph., Coppens F., 1994, An example of acoustics and very high resolution seismic in a highy deviated well, Revue de l'IFP, Vol. 49, No. 6, pp. 615-625.

Mari J.L., Glangeaud F., Coppens F., 1997, Traitement du signal pour Géologues et géophysiciens, Editions Technip, Paris, 453 p.

Mari J.L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., 1998, Géophysique de gisement et de Génie-civil, Editions Technip, Paris, 468 p.

Maurer H., Green A.G., 1997, Potential coordinate mislocations in crosshole tomography: Results from the Grimsel test site, Switzerland, Geophysics, Vol. 62, No. 6, pp. 1696-1709.

MeyerHoltz K.A., Pavlis G.L., Szpakowski S.A., 1989, Convolutional quelling in seismic tomography, Geophysics, Vol. 54, pp. 570-580.

Moreaux D., 1997, Localisation de cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution : étude numérique, étude de terrain, Université des Sciences et Technologies de Lille.

Muller G., 1984, The reflectivity method: a tutorial, Internal school of applied geophysics, Erice, Novembre, pp. 18-24.

Niandou H., 1994, Etude du comportement rhéologique et modélisation de l'argilite de Tournemire. Applications à la stabilité d'ouvrages souterrains, Thèse de l'USTL, Lille.

Nemeth T., Normark E. Qin F., 1997, Dynamic smoothing in crosswell traveltime tomography, Geophysics, Vol. 62, No. 1, pp. 168-176.

Neumann G., 1981, Determination of lateral inhomogeneities in reflection seismic by inversion of traveltime residuals, Geophysical Prospecting, Vol. 29, pp. 161-177.

Nord G., Olsson P., By T.L., 1989, *Geophysical ground probing in TBM Tunneling*, Congrès international de Mécanique des roches (Pau), pp. 581-586.

Olayinka A.I., Yaramanci U., 1998, Optimum model in 2D geolectrical imaging: example from a dump site with high resistivity contrasts, EEGS Meeting, Barcelona, pp. 119-122.

Oldendorf W.H., 1961, Isolated flying spot detection of radiodensity discontinuities displaying the internal structrural pattern of a complex object, IRE trans. Bio. Med. Elect. BME, Vol. 8, pp. 68-72.

Papoulis A., 1962, The Fourier integral and its application, Mc Graw Hill, 318p.

Payne M.A., Eriksen E.A., Rape T.D., March, 1994 Considerations for high-resolution VSP imaging, The Leading Edge, pp. 173-180.

Philips W.Scott, Fehler Michael.C., 1991, *Traveltime Tomography: A comparison of popular methods*, Geophysics, Vol. 56, No. 10, pp. 1639-1649.

Pierson d'Autrey L., George B., Balan A., 1995, *Eole : le radar de forage pour la reconnaissance à l'avancement du tunnelier*, Tunnels et ouvrages souterrain, Vol. 132, Novembre-Décembre, pp. 341-347.

Piwakowski B., Shahrour I., 1998, Imagerie du proche sous-sol par la sismique réflexion haute résolution. *Application à la détection des cavités*, Revue de Liaison des Ponts et Chaussées, Vol. 214, pp. 19-29.

Plan Génie Civil, 1997, Appel à propositions de recherche : Reconnaissances à l'avancement dans les travaux souterrains, METT – DRAST – Mission Génie Civil, Tour Pascal B, 92055 La défense Cedex 04.

Plessix R.E., 1996, Détermination de la vitesse pour l'interprétation de données sismiques très hautes résolution à l'échelle géotechnique, Th. Université Paris IX.

Pratt R.G., Goulty N.R., 1991, Combining wave-equation imaging with traveltime tomography to form highresolution images from crosshole data, Geophysics, Vol. 56, pp. 95-116.

Pyrak-Nolte, L.J., Myer L.R., Cook N.G.W., 1990, *Transmission of seismic waves across single natural fractures,* J.Geophys. Res., Vol. 95, pp. 8617-8638.

Rector J.W., Washbourne J.K., 1994, Characterization of resolution and uniqueness in crosswell direct-arrival traveltime tomography using the Fourier projection slice theorem, Geophysics, Vol. 59, No. 11, pp. 1642-1649.

Ricker N., 1953, Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution, Geophysics, Vol. 18, pp. 769-792.

Rühl, Hubral, 1996, Frequency space domain diffraction tomography in practical application, J. of Seismic exploration, pp. 141-156.

Sabatier P.C., 1971, Comparative evolution of inverse problems, NASA tech. Mem X-62, 150

Saini G.S., Dube A.K., 1989, Severe tunneling problems in young Himalayan rocks for deep underground opening, in Rock at great depth, eds Balkema, pp. 677-685.

Sattel G., Frey G., Amberg R., 1992, Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, First Break, Vol. 10, No. 1.

Scholte J.C., 1947, The range of existence of Stoneley waves, Royal. Astron. Soc. Monthly Notices Geophys. Supp., Série A, Vol. 106, pp. 416-428.

Semblat J.F., 1998, Amortissement et dispersion des ondes : points de vue physique et numérique, Revue Française de Génie Civil, Vol. 2, No. 1, pp. 91-111.

Semblat J.F., 1999, Validation des calculs de propagation d'ondes : approche par éléments finis et éléments frontières, Congrès de l'AUGC, Poitiers, pp. 22-25.

Sheriff R.E, Geldart L.P., 1995, Exploration Seismology, 2nd édition. Cambridge University Press, 584 p.

Shuey R.T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations, Geophysics, Vol. 50, pp. 609-614.

Stockli R.F., 1984, Two-point ray tracing in a three dimensional medium consisting of homogeneous nonisotropic layers separated by plan interfaces, Geophysics, Vol. 49, pp. 767-770.

Stockwell, Jr. J. W., 1997, Free Software in Education: A case study of CWP/SU: Seismic Unix, The Leading Edge, Juillet.

Stoffa P.L., Sen M.K., 1996, Non linear multiparameter opimization using genetic algorithms: inversion of planewave seismograms, Geophysics, Vol. 56, pp. 1794-1810.

Stoneley R., 1924, Elastic waves at the surface of separation of two solids, Proc. Roy. Soc. (Londres), Vol. A-106, pp. 416-428.

Stork C., Clayton R.W., 1991, Linear aspects of tomographic velocity analysis, Geophysics, Vol. 56, No. 4, pp. 483-495.

Symes W.W., 1991, *The reflection inversion problem for acoustic waves*, in Mathematical and Numerical Aspect of the Wave Propagation Phenoma, eds SIAM, pp. 423-433.

Tarantola A., Valette B., 1982, *Generalized non linear inverse problems solved using the least squares criterion*, Rev. Geoph. Spec. Phys., Vol. 20, pp. 219-232.

Tarantola A., 1986, A strategy for non linear elastic inversion of reflection data, Geophysics, Vol. 51, pp. 1893-1903.

Tikhonov A., Arsenine V., 1976, Méthodes de résolution de problèmes mal posés, Ed. MIR, Moscou.

Tunnels et Ouvrages souterrains, 1992, Les reconnaissances du tunnel de la Bretelle, Vol. 110, pp. 78-128.

Van Loan C., 1991, A survey of matrix computations, Theory Center Technical Report, Advanced Computing Research Intitute, Cornell Theory Center, Cornell University, 82 p.

Vasco D.W., Peterson J.E., Majer E.L., 1996, A simultaneous inversion of seismic traveltimes and amplitudes for velocity and attenuation, Geophysics, Vol. 61, No. 6, pp. 1737-1757.

Venard O., Prémel D., Mohamad-Djafari A., 1997, Modèle de la membrane faible associée à une loi Beta : *Application à la tomographie par courants de Foucault*, Colloque Gretsi, Grenoble, pp. 319-322.

Ville J., 1948, Théorie et applications de la Notion de Signal Analytique, Cables et Transmissions 2^e, pp. 61-74.

Virieux J., 1984, SH wave propagation in heterogeneous media : Velocity-stress finite difference method, Geophysics, Vol. 49, pp. 1933-1957.

Widess M.B., 1973, How thin is a thin bed ?, Geophysics, Vol. 38, No. 6, pp. 1176-1180.

Widmaier M.T., Shapiro S.A., Hubral P., 1996, AVO correction for scalar waves in the case of a thinly layered reflector overburden, Geophysics, Vol. 61, No. 2.

Williamson P.R., 1990, Tomographic inversion in reflection seismology, Geophys. J. Int., Vol. 100, pp. 255-274.

Williamson P.R., Worthington M.H., 1993, Resolution limits in ray tomography due to wave behavior : Numerical experiments, Geophysics, Vol. 58, pp. 727-736.

Zhou C., Cai W.Y., Luo Y., Schuster G., 1993, *High resolution crosswell imaging by seismic traveltime + waveform inversion*, The Leading edge, Vol. 12, No. 10, pp. 988-991.

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

Zoeppritz K., 1919, Uber reflexion und durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkerlsfläsche, Uber rdbebenwellen VII zu Göttingen, Math Phys., K1: 57-84.