HAL
open science

Détection des zones de failles par tomographie en transmission : application à la station expérimentale de Tournemire

Elise Vi Nhu Ba

To cite this version:

Elise Vi Nhu Ba. Détection des zones de failles par tomographie en transmission : application à la station expérimentale de Tournemire. Géophysique [physics.geo-ph]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. NNT : 2014ENMP0078 . tel-01151545

HAL Id: tel-01151545

https://pastel.hal.science/tel-01151545

Submitted on 13 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MINES ParisTech

École doctorale n° 398
Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité "Dynamique et Ressources des Bassins Sédimentaires"

présentée et soutenue publiquement par

Elise VI NHU BA

Le 12 décembre 2014

Détection des zones de failles par tomographie en transmission: Application à la station expérimentale de Tournemire.

Directeur de thèse : **Mark Noble**
Co-encadrement de la thèse : **Alexandrine Gesret**

Jury

M. Jean-Michel MARTHELOT, Professeur, Université de Strasbourg	Président
M. Philippe CÔTE, Directeur de Recherche, IFSTTAR	Rapporteur
M. Emmanuel GAUCHER, Chargé de recherche, Karlsruhe Institute of Technology	Examinateur
Mme Céline GELIS, Ingénieur de recherche, IRSN	Examinatrice
Mme Alexandrine GESRET, Chargé de recherche, MINES ParisTech	Examinatrice
M. Mark NOBLE, Maître de recherche, MINES ParisTech	Examinateur

T H È S E

MINES ParisTech
Centre de Géosciences
35 rue Saint-Honoré, 77300 Fontainebleau Cedex

Résumé

Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans le cadre général de l'expertise des projets de stockage de déchets radioactifs en couche argileuse. La présence de failles dans ces roches peut modifier ses propriétés de perméabilité ; la détection des failles constitue donc un enjeu majeur. Depuis de nombreuses années, l'IRSN mène des travaux de recherche dans la station expérimentale de Tournemire où des failles à faible décalage vertical sont interceptées dans le milieu argileux depuis des ouvrages souterrains. Les travaux précédents ont montré la difficulté de détecter ces failles depuis des acquisitions de surface que cela soit en sismique réflexion ou réfraction. Toutefois, une campagne de résistivité électrique à grande échelle a permis de mettre en évidence une large zone de faible résistivité au dessus des ouvrages souterrains. Des acquisitions sismiques entre les ouvrages souterrains ont mis en évidence une zone de faille fortement hétérogène.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé une nouvelle géométrie d'acquisition sismique en transmission (sources en surface-récepteurs dans les ouvrages souterrains). Pour traiter ces données, un code de tomographie a été développé afin de maîtriser parfaitement les paramètres d'inversion et aussi d'introduire de l'information a priori. De nombreux tests synthétiques ont ensuite été menés dans le souci d'analyser de manière fiable les résultats obtenus, notamment en termes de résolution et de pertinence de l'image. L'application de ce code de tomographie aux données en transmission nouvellement acquises permet de mettre en évidence pour la première fois une discontinuité latérale des vitesses sismiques dans les calcaires et les argilites de la Station Expérimentale de Tournemire. Cette anomalie de vitesse est localisée à l'aplomb de la zone de failles visible depuis les ouvrages souterrains et est aussi en accord avec les observations de surface. Ces travaux mettent en avant le potentiel des méthodes sismiques pour imager des zones de failles dans des milieux fortement hétérogènes et montrent l'importance du choix de la géométrie d'acquisition et de l'information a priori disponible.

Cette thèse a été cofinancée par MINES ParisTech et par l'IRSN.

Mots clés: Tomographie en transmission, modélisation, optimisation, détection des failles, Station Expérimentale de Tournemire

Abstract

Deep argillaceous formations have physical properties adapted to the radioactive waste disposal but their permeability properties can be modified by the presence of fractured zones; detection of these faulted zones are thus of primary importance. Several experiments have been led by IRSN in the Experimental Platform of Tournemire where faults with small vertical offsets in the deep argillaceous formation have been identified from underground works. Some previous studies have shown the difficulty to detect this fractured zone from surface acquisitions using reflection or refraction seismic data. However, a large-scale electrical survey allowed the detection of a large conductive area above underground works. Seismic data acquired between underground works highlights the presence of a complex fault zone in depth.

We here propose a new seismic transmission acquisition geometry where seismic sources are deployed at the surface and receivers are installed in the underground works. In the aim to process these data, a new tomography algorithm has been developed in order to control the inversion parameters and also to introduce a priori information. Several synthetic tests have been led to reliably analyze the results in terms of resolution and relevance of the final image. A lateral discontinuity of the seismic velocities in the limestones and clay-rocks of the Tournemire Platform is evidenced for the first time by applying the algorithm to the data recently acquired. This low velocity anomaly is located just above the fracture zone visible from the underground works and its location is also consistent with observations from the surface. This study shows the potential of seismic methods to image fractured zones in a complex medium and highlights the importance of choosing the appropriate acquisition geometry together with a priori information such as the geological knowledge of main layers.

This study was funded by MINES ParisTech and IRSN.

Keywords: Transmission tomography, modeling, optimization, fault detection, Experimental Platform of Tournemire

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse **Mark Noble**, pour m'avoir fait confiance sur ce sujet. Je remercie **Alexandrine Gerset**, co-encadrante de cette thèse, pour son aide précieuse lors de la rédaction de ce mémoire ainsi que pour l'intérêt qu'elle a montré pour l'ensemble des développements que j'ai pu proposer. Je remercie également **Céline Gélis et Justo Cabrera** encadrants IRSN de cette thèse, pour leurs conseils et l'orientation qu'ils ont donnée à ces travaux.

Je remercie **Philippe Cote et Jean-Michel Marthelot**, rapporteurs de ce mémoire de doctorat, pour avoir accepté de lire et évaluer ce travail. Je remercie également **Emmanuel Gaucher** qui a accepté d'examiner ces travaux et pour l'intérêt qu'il a témoigné.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à **Hervé Chauris**, Directeur de l'équipe Géophysique et **Daniela Donno** qui m'ont donné l'envie et la confiance nécessaire de m'engager dans ce projet. Je remercie également **mes professeurs de l'université de Rennes 1**, Loic Le Marrec, Mariko Dunseath-Terao, Nathalie Rittemard, Lalao Rakatomanana ainsi que tous les autres qui m'ont donné le goût des sciences. Merci de m'avoir donné l'envie d'aller plus loin.

J'aimerais également remercier :

Les membres de mon équipe. Hervé, Mark, Daniela, Alexandrine, Véronique, Jiangbo, Nidhal, Sébastien, Carlos qui m'ont accueillie chaleureusement dans leur équipe. Merci également à Fang, Charles Antoine, Emmanuel, Youbing, Sven, Abed qui sont arrivés après moi.

Les agents et permanents du site de Fontainebleau. Merci Anne-Marie, Isabelle, Domimique, Pascal, Corinne, Hugues, Mathieu, Serge, Christophe, Denis, ... Chaque jour, c'est avec plaisir que je suis venue au centre.

Les doctorants. Amira, Gilles, Nidhal, Malek, Daker, Khouzama, Salma, Rima qui m'ont accueillie à Fontainebleau, à la résidence, au centre. Lionel, Andrès, Maxime, Manon, Stéphanie qui sont arrivés avec moi. Merci également à Emmanuel, Enguerrand, Bassam, Benjamin, Gianni, Lydia, Théo et Mauro.

Ma famille et mes amis. Ma maman, mon frère, mémé, mon père, pépé, les cousins, les cousines, tous les Vi (Nhu Ba), Gabrielle que j'ai « retrouvée » pendant cette thèse, mes amis bretons et plus particulièrement Pierre et Simon qui se sont déplacés pour assister à ma présentation.

"Doucement se mange l'aubergine.
Ceux qui se sont dépêchés sont partis."
Emmanuel Chevallier

Table des matières

Introduction générale **1**

I Contexte et objectifs de la thèse **5**
1.1 La sûreté nucléaire . . . 7
1.1.1 Gestion des déchets radioactifs . . . 7
1.1.2 La sûreté des installations de stockage . . . 8
1.1.3 Le stockage en couche argileuse . . . 8
1.1.4 Détection des failles . . . 10
1.2 Station Expérimentale de Tournemire (SET) . . . 11
1.2.1 Localisation et contexte géologique . . . 11
1.2.2 Failles identifiées . . . 11
1.3 Méthodes géophysiques utilisées sur la SET . . . 12
1.3.1 Méthodes sismiques . . . 12
1.3.2 Méthodes électriques . . . 16

II Méthode et théorie : La tomographie des temps de première arrivée **23**

Introduction **25**

2 Mesures expérimentales : Les temps de première arrivée **27**
2.1 Mesures sismiques . . . 27
2.1.1 Sources sismiques . . . 28
2.1.2 Récepteurs et sismogrammes . . . 29
2.1.3 Le pointé des temps de première arrivée . . . 32
2.2 Algorithme de pointé automatique . . . 32
2.2.1 Energy Ratio . . . 32
2.2.2 Entropy Method . . . 35
2.3 Implémentation du code de pointé PickFirst . . . 36
2.3.1 Motivation . . . 36
2.3.2 Algorithme . . . 37
2.3.3 Applications . . . 39
2.3.4 Conclusions . . . 39

3 Problème direct : Modélisation des temps de première arrivée **43**
3.1 De la propagation d'une onde à l'équation eikonale . . . 43
3.2 Résolution par la méthode des différences finies . . . 44
3.2.1 Propagation des temps sur la grille . . . 45
3.2.2 Extrapolation des temps . . . 45
3.2.3 Extrapolation des temps autour de la source . . . 47
3.2.4 Implémentation du code SolveEik3D . . . 48
3.3 Tracé de rais . . . 54
3.3.1 Tracé de rais a posteriori . . . 54
3.3.2 Implémentation du code RayPath3D . . . 54
3.3.3 Validation et exemples . . . 55
3.4 Conclusions . . . 58

4 Problème inverse : Inversion des temps de première arrivée **59**
4.1 Généralités sur le problème inverse . . . 59
4.1.1 Définition du problème inverse . . . 60
4.1.2 Ajustement au sens des moindres carrés . . . 62
4.1.3 Régularisation d'un problème inverse . . . 64
4.2 Optimisation et conditions d'optimalité . . . 65
4.2.1 Méthode d'optimisation globale . . . 66
4.2.2 Méthode d'optimisation locale . . . 66
4.3 Inversion des temps de première arrivée . . . 72
4.3.1 Formulation des équations . . . 72
4.3.2 Algorithme d'optimisation local . . . 74
4.3.3 Méthode géométrique . . . 75
4.4 Implémentation des méthodes dans le code Tomo3D . . . 76
4.4.1 Implémentation de la méthode de Newton . . . 77
4.4.2 Implémentation de la méthode de Gradient . . . 78
4.4.3 Implémentation de la méthode d'approximation du Hessien . . . 79
4.4.4 Implémentation de la méthode SIRT . . . 79

5 Discussion sur les méthodes **81**
5.1 Influence du dipositif d'acquisition . . . 82
5.2 Influence de la paramétrisation . . . 89
5.3 Contraintes sur les paramètres recherchés . . . 92
5.4 Conclusion . . . 97

Conclusion **99**

III Application et résultats : Tomographie de la Station Expérimentale de Tournemire **101**

Introduction **103**

6 Campagne d'acquisition Surface-Tunnel, Juillet 2013 **105**
6.1 Nécessité d'une nouvelle campagne . . . 105
6.1.1 Rappel du contexte . . . 105
6.1.2 Campagnes de résistivité électrique . . . 106
6.1.3 Campagne de sismique 2D haute résolution . . . 106
6.1.4 Conclusion . . . 108
6.2 Présentation de la nouvelle acquisition . . . 109
6.2.1 Campagne de faisabilité . . . 109
6.2.2 Matériel . . . 110
6.2.3 Définition de la zone d'étude et des repères d'inversion . . . 112
6.3 Première analyse des nouvelles données . . . 115
6.3.1 Temps de première arrivée observés . . . 115
6.3.2 Vitesses apparentes . . . 118

7 Évaluation du potentiel et des limites du dispositif **121**
7.1 Considérations sur les erreurs . . . 122
7.2 Potentiel et sensibilité du dispositif d'acquisition . . . 123
7.2.1 Détection des hétérogénéités . . . 123
7.2.2 Caractérisation des hétérogénéités . . . 129
7.3 Imagerie et introduction d'information a priori . . . 131
7.3.1 Géométrie de la faille . . . 131

7.3.2 Prise en compte de la couche argileuse 138
7.3.3 Etude d'un cas réaliste 141
7.4 Conclusions 148

8 Résultats d'inversion et interprétation 149
8.1 Détection des failles sur la SET 150
8.1.1 Hétérogénéités de la zone auscultée 150
8.1.2 Détection des variations latérales 150
8.1.3 Bilan 152
8.2 Imagerie de la Station Expérimentale de Tournemire 152
8.2.1 Présence de la couche argileuse 152
8.2.2 Hétérogénéités de surface 154
8.2.3 Propriétés des roches 154
8.2.4 Résultats de l'inversion 156
8.2.5 Comparaison des résultats avec les observations géologiques 157
8.2.6 Discussion sur les résultats 164

Conclusion 167

IV Conclusions et perspectives 169

Liste des figures 185

Bibliographie 187

Introduction générale

Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans un questionnement actuellement mené par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) sur des questions relatives au stockage de déchets radioactifs. Ils s'inscrivent également dans une thématique de recherche qui concerne le développement et la validation de modèles théoriques dédiés à l'imagerie du sous-sol, qui sont développés au sein de l'équipe Géophysique du centre de Géosciences de MINES ParisTech.

Dans une première partie introductive, nous aborderons les problématiques liées à la gestion des déchets nucléaires et les solutions proposées par les différents pays concernés en insistant plus particulièrement sur le stockage en couche géologique profonde choisi par la France pour certains types de déchets (Le Dars, 2004). La caractérisation des sites de stockage potentiels constitue un enjeu majeur pour lequel les méthodes de reconnaissance doivent être testées et validées in situ. Nous verrons dans cette partie l'intérêt de l'utilisation des méthodes géophysiques pour la caractérisation des sites et les limites associées. Dans ce but, les méthodes permettant l'imagerie du sous-sol et plus particulièrement la détection des failles sont actuellement testées au sein de laboratoires méthodologiques (Lanz et al., 1998; Marschall et al., 2005; Dehandschutter et al., 2002). Celles-ci peuvent en effet être la cause d'une détérioration possible des propriétés de confinement du milieu géologique hôte et c'est pourquoi il est primordial de pouvoir les détecter. L'IRSN est notamment en charge de l'expertise du projet de stockage de déchets radioactifs en couche argileuse profonde géré par l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) et mène depuis de nombreuses années divers programmes de recherche scientifique afin d'asseoir son expertise. A cet effet de nombreuses acquisitions sont réalisées sur la Station Expérimentale de Tournemire. Ce site, présenté en détail dans la première partie de ce manuscrit, présente une zone de failles à faible décalage vertical qui en fait un outil idéal pour l'évaluation des méthodes de reconnaissance utilisées pour la caractérisation des sites potentiels. Parmi les travaux réalisés sur ce site, les travaux de Gélis et al. (2010) ont permis d'imager de façon très large cette zone de failles. Nous verrons également dans cette partie que les acquisitions réalisées depuis la surface dans le but d'obtenir une image plus détaillée des couches superficielles n'ont cependant pas permis d'atteindre la zone de failles en profondeur (Gélis et al., 2012; Vi Nhu Ba et al., 2013) et l'imagerie de la zone de failles présumée dans les calcaires et argilites de la Station reste partielle. Ces travaux de thèse dont l'objectif général est l'évaluation du potentiel des méthodes de reconnaissance utilisées pour la caractérisation des sites potentiels de stockage se sont principalement consacrés à la réalisation d'une nouvelle campagne d'acquisition en transmission réalisée sur la Station Expérimentale de Tournemire et appelée campagne Surface-Tunnel, ainsi qu'à l'implémentation d'une méthode d'imagerie utilisée pour traiter ces données.

La méthode que nous avons choisie pour le traitement de ces données est la tomographie des temps de première arrivée. La tomographie est une technique d'imagerie utilisée en géophysique (Grand et al., 1997) mais également très utilisée en imagerie médicale (Atlas, 2009), ainsi qu'en astrophysique (Berry et al., 2012). Elle permet de reconstruire une coupe des propriétés physiques d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées à l'extérieur de celui-ci. Plus particulièrement, en tomographie des temps de première arrivée, les mesures réalisées sont les vibrations du sous-sol induites par le passage d'une onde. Généralement utilisées dans le but d'obtenir des informations sur le sous-sol, ces mesures permettent d'accéder aux temps de propagation des ondes entre des sources et des récepteurs. Ces temps de propagation peuvent être, à l'aide des lois de la physique, corrélés aux propriétés de

vitesse de propagation des ondes du milieu. Le but de cette méthode est alors de reconstruire la distribution spatiale des propriétés de vitesse du milieu à partir des temps de première arrivée issus des mesures. Pour ce faire, nous verrons qu'il est nécessaire de pouvoir modéliser ces temps de propagation. Cette étape est appelée la résolution du problème direct et est généralement résolue de façon numérique, permettant ainsi la représentation d'un milieu complexe. Il s'agit ensuite de rechercher la meilleure représentation du milieu permettant d'expliquer les temps de propagation observés. Cette étape, appelée résolution du problème inverse, n'est pas triviale et de nombreux ouvrages y sont consacrés (Berryman, 1991; Kelley, 1999; Vogel, 2002; Tarantola, 2002; Menke, 1989; Kern, 2002; Gill et al., 1981; Chabert, 1989).

La seconde partie de ce manuscrit est consacrée à cette méthode. Elle regroupe les chapitres 2, 3, 4 et le chapitre 5. Dans le chapitre 2 je présente la première étape de cette méthode qui est l'acquisition des données. Nous verrons dans ce chapitre que les temps de première arrivée ne sont pas directement mesurés mais obtenus après le traitement des signaux sismiques enregistrés via l'étape de pointé. Dans ce chapitre, après avoir présenté les principaux matériels d'une acquisition sismique, je présente deux algorithmes de pointé automatique choisis pour leur simplicité d'implémentation, basés sur l'énergie et l'entropie des signaux. Nous verrons dans ce chapitre que l'utilisation de ces méthodes ne permet de prendre en compte ni la géométrie de l'acquisition, ni les caractéristiques du site ausculté c'est pourquoi nous proposons l'ajout de critères physiques dans le code de pointé PickFirst implémenté dans le cadre de cette thèse. Le troisième chapitre présente la résolution du problème direct. Dans ce chapitre nous verrons comment calculer les temps de première arrivée théoriques en considérant les propriétés de vitesse du milieu connues et pouvant être décrites par un modèle discret. Après avoir introduit l'équation eikonale qui permet la description de ces temps, nous présentons en détail la méthode employée pour la résolution de cette équation, à savoir une discrétisation par différences finies. Nous verrons dans ce chapitre l'importance des schémas numériques utilisés pour la résolution de cette équation mais également pour le calcul des trajectoires des rais, nécessaire pour l'inversion des temps de première arrivée. Ces outils numériques respectivement implémentés dans les codes SolveEik3D et RayPath3D sont dans ce chapitre confrontés aux résultats obtenus sur des modèles simples, pour lesquels une solution analytique existe. Le quatrième chapitre décrit la résolution du problème inverse. Après avoir présenté le problème inverse de façon générale, je présente plus particulièrement les méthodes employées pour l'inversion des temps de première arrivée. Nous verrons dans ce chapitre quatre méthodes permettant la résolution de ce problème par une méthode d'optimisation locale correspondant à une approche linéarisée. La première est la méthode de Newton. La résolution du problème linéarisé est obtenue par une méthode directe (inversion de matrice) à chaque itération. La seconde est une méthode de gradient simple. Il s'agit cette fois non pas de résoudre le problème linéarisé à chaque itération mais plutôt de retrouver un modèle plus proche de la solution. La troisième, dite géométrique, est la méthode SIRT. De la même façon, il ne s'agit pas de résoudre le problème linéarisé à chaque itération mais de se rapprocher de la solution de manière itérative en utilisant cette fois une approche géométrique. Enfin la quatrième méthode implémentée est à mi chemin entre la méthode de gradient simple et la méthode SIRT. Cette méthode ici appelée approximation du Hessien procède, tout comme les deux précédentes méthodes, de manière itérative de façon à se rapprocher progressivement du modèle solution. Ces quatre méthodes sont présentées de façon théorique mais aussi pratique, par la description détaillée des équations discrétisées. On présentera également dans ce chapitre la stratégie utilisée pour introduire de l'information a priori dans chacune de ces méthodes. Enfin, dans le chapitre 5, je présente les résultats obtenus par ces différentes méthodes pour l'inversion de données synthétiques. Nous verrons dans ce chapitre le comportement de ces quatre méthodes en considérant différentes configurations.

Les algorithmes sont, dans cette partie, analysés pour différents modèles initiaux, différentes paramétrisations et avec et sans contrainte.

Les développements méthodologiques présentés dans cette deuxième partie nous ont permis la réalisation de notre propre code d'inversion Tomo3D ce qui nous permet d'avoir le contrôle sur chacune des étapes de l'inversion. Comme illustré dans cette partie théorique, le problème soulevé par la tomographie des temps de première arrivée peut être mal contraint et nécessite l'apport d'information par des données complémentaires. Ces données peuvent être simplement issues de connaissances générales sur les propriétés physiques des roches ou encore être spécifiques au site évalué. Dans la partie suivante, les outils développés sont utilisés pour l'inversion de données réelles.

La troisième et dernière partie *Tomographie de la Station Expérimentale de Tournemire* est consacrée à l'étude de l'acquisition Surface-Tunnel de sismique transmission réalisée dans le but de détecter les zones de failles sur la Station Expérimentale de Tournemire. Dans le chapitre 6 je présente en détail cette nouvelle campagne. Après avoir défini l'objectif particulier de cette thèse, à savoir l'évaluation de la méthode de Tomographie des temps de première arrivée appliquée à la détection des failles à faible décalage vertical présentes sur le site de Tournemire, nous ferons un bref rappel des travaux réalisés sur la Station. Ceux-ci qui n'ont, jusqu'ici, pas permis d'imager finement la zone de failles présumée dans les calcaires supérieurs et argilites. Dans ce chapitre, nous verrons que cette nouvelle acquisition en transmission permet d'explorer la zone ciblée. Une première analyse des vitesses apparentes nous permet de montrer l'existence d'une zone hétérogène dans le massif. Dans le chapitre 7, je présente l'inversion de données synthétiques obtenues dans une configuration correspondant à celle des données de l'acquisition Surface-Tunnel. Ces tests sont réalisés dans le souci d'analyser de manière fiable le potentiel du dispositif d'acquisition utilisé. Nous verrons dans ce chapitre que le dispositif utilisé est idéal pour la détection des variations latérales des propriétés de vitesse du site. La réalisation d'une imagerie 2D n'est cependant pas intégralement contrainte et nous verrons que l'ajout d'information a priori est nécessaire pour la réalisation d'une imagerie plus fine. Nous considèrerons des apports d'informations réalistes puisque nous nous appuierons sur des données de forage et sur les résultats issus des interprétations des coupes de résistivité électrique de l'acquisition de 2007 (Gélis et al., 2010), ainsi que sur la connaissance a priori des vitesses de propagation maximales dans les couches argileuse et calcaire. Enfin le chapitre 8 présente les résultats d'inversion des données de la campagne Surface-Tunnel obtenus par le code Tomo3D. Une comparaison avec la géométrie présumée de la zone de failles nous permettra de conclure sur le potentiel de cette méthode pour l'imagerie des failles décrochantes à faible décalage vertical ainsi que sur l'intérêt de l'usage de cette méthode pour la caractérisation et l'évaluation des sites de stockage.

Première partie

Contexte et objectifs de la thèse

Contexte et objectifs de la thèse

Sommaire

1.1 La sûreté nucléaire **7**
1.1.1 Gestion des déchets radioactifs 7
1.1.2 La sûreté des installations de stockage 8
1.1.3 Le stockage en couche argileuse 8
1.1.4 Détection des failles 10
1.2 Station Expérimentale de Tournemire (SET) **11**
1.2.1 Localisation et contexte géologique 11
1.2.2 Failles identifiées 11
1.3 Méthodes géophysiques utilisées sur la SET **12**
1.3.1 Méthodes sismiques 12
1.3.2 Méthodes électriques 16

1.1 La sûreté nucléaire

1.1.1 Gestion des déchets radioactifs

L'industrie nucléaire, mais aussi les hôpitaux, les universités et certaines industries non nucléaires produisent des déchets radioactifs. Ces déchets émettent des rayonnements et présentent de ce fait un risque spécifique pour la santé de l'homme (Godard et al., 2005; Giusti, 2009). Les paramètres de classification des déchets radioactifs diffèrent d'un pays à l'autre et certains pays comme le Japon ont fait le choix d'une classification par filière de production, alors qu'en Allemagne la classification porte principalement sur le caractère exothermique des déchets. En France, les déchets radioactifs sont classés selon leur activité et la période radioactive des radionucléides qu'ils contiennent. L'activité également appelée niveau de radioactivité est exprimé en becquerel (Bq) par gramme et est qualifiée de très faible (inférieure à 100 becquerels par gramme), faible (entre quelques centaines de becquerels et un million de becquerels par gramme), moyenne (entre un million et un milliard de becquerels r gramme) ou haute (plusieurs milliards à plusieurs dizaines de milliards de becquerels par gramme). La durée de vie est définie en fonction de la période radioactive propre à chaque radionucléide qu'ils contiennent. Les déchets dont la radioactivité provient principalement de radionucléides à vie courte (période $\leq$ 31 ans) sont appelés déchets à vie courte, et inversement pour les déchets contenant une quantité importante de radionucléides à vie longue (période $>$ 31 ans).

Dès 1991, plusieurs voies ont été étudiées pour la gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue. En 2006, après 15 années de recherches, la loi française a retenu le stockage profond, étudié par l'Andra, comme seule solution sûre à long terme qui permet de ne pas reporter la charge de la gestion de ces déchets sur les générations futures. Considéré aujourd'hui par la plupart des pays concernés comme la solution de référence pour le stockage des déchets de moyenne ou haute activité à vie longue (Pusch, 2009; Miller et al., 2000) le degré d'avancement des programmes et les stratégies adoptées en vue de l'ouverture d'un stockage en couche géologique profonde varient d'un pays à l'autre. Les études et recherches en cours sont principalement centrées sur trois types de formation géologique

que sont le granite, les formations sédimentaires et plus particulièrement les couches d'argile et le sel. Les programmes développés en Suède (Molinero-Huguet et al., 2004) et en Finlande (Paulamäki et al., 2002) sont centrés sur le stockage dans des roches granitiques. Le granite est également étudié en Corée (Cho et al., 2008), au Japon (Onishi & Shimizu, 2005), en Suisse (Marelli et al., 2010), ou encore en Chine (Wang et al., 2005). Les formations argileuses font également depuis de nombreuses années l'objet d'études et recherches importantes en Belgique (argile de Boom, Dehandschutter et al. (2002); Monfared et al. (2012)) et en Suisse (argiles à Opaline, Lanz et al. (1998); Marschall et al. (2005)). Il en est de même en Allemagne pour les formations de sel (Hunsche & Hampel, 1999).

1.1.2 La sûreté des installations de stockage

Concernant la sûreté des installations de stockage, l'ensemble des pays participe en partenariat à des projets de recherche (Bennett & Gens, 2008) à l'élaboration de normes internationales publiées par l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) sur des pratiques à mettre en œuvre pour la gestion de leurs déchets. Concernant les déchets de haute activité et à vie longue, aucune installation de stockage en formation géologique profonde destinée à les accueillir n'a encore été mise en service. Des projets avancés ont cependant été conduits dans certains pays tels qu'aux États-Unis où une demande d'autorisation de création d'un stockage a été déposée en 2008 sur le site de Yucca Mountain. La formation concernée est un tuff volcanique formé il y a 11 à 14 millions d'années sur laquelle des études exploratoires ont été menées depuis une installation souterraine creusée en 1993 pour démontrer la faisabilité du stockage (Bodvarsson et al., 1999). Les autres pays concernés ont également entrepris la création de laboratoires de recherche souterrains pour progresser dans leur projet de stockage en couche géologique. Des laboratoires méthodologiques ont été créés dans le granite au Canada (Underground Research Laboratory de Whiteshell, Stepanik et al. (2011)), en Suède (laboratoire d'Äspö, Wallin & Peterman (2014)), en Suisse (laboratoire de Grimsel, Cañamón et al. (2014)) et plus récemment en Corée (Kaeri Underground Research Tunnel - KURT, Kwon et al. (2009)) et au Japon (Tono Mizunami URL, Kunimaru et al. (2012)) dans le but de développer des connaissances et valider des méthodes et des technologies à portée relativement générale sur un type de roche donné (fig 1.1). Il en existe du même type dans des formations argileuses en Belgique (Mol, Hemes et al. (2011)), en Suisse (Mont-Terri, Thury & Bossart (1999); Wersin et al. (2011)), au Japon (Horonobe URL, Tokiwa et al. (2014)), ou encore en France (Tournemire, Cabrera et al. (1999)). D'autre part, des laboratoires de caractérisation et de qualification référencés sur la figure 1.2 ont été réalisés dans le but de caractériser un site spécifique et ainsi d'évaluer la faisabilité d'une installation de stockage sur un site donné.

1.1.3 Le stockage en couche argileuse

Le principe du stockage en couche géologique profonde consiste à déposer les colis de déchets dans des ouvrages souterrains creusés dans un milieu géologique imperméable. Il doit présenter des caractéristiques favorables en termes de stabilité géologique, d'hydrogéologie, de géochimie et de comportement mécanique et thermique et être choisi de façon à éviter des zones présentant un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines extractibles. En France, la loi de 2006 sur le traitement des déchets radioactifs a confirmé l'option du stockage réversible dans une couche géologique profonde d'argilites pour les déchets à haute activité à vie longue. L'argile est en effet un candidat idéal de par ses propriétés de faible perméabilité et de confinement (Boisson et al., 2001; Bonin, 1998; Leroy et al., 2007; Yven et al., 2007; Leroy et al., 2007; Trouiller, 2006; Matray et al., 2007). Dans le cadre de ses recherches sur les formations argileuses, L'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) a pour mission d'évaluer la capacité d'une telle installation à contenir

Generic URL *Operation*	Country *Organization*	Host rock, depth	Comments
Whiteshell Underground Research Laboratory (URL) *1984–2003*	Canada *AECL*	Granite, 240–420 m	Purpose built; generic Shaft sealed
Olkiluoto Research Tunnel *1992–*	Finland *Posiva*	Granite (tonalite), 60–100 m	Purpose built; parallel to repository facilities
Amelie *1986–1992*	France *Andra*	Bedded salt	Pre-existing tunnels
Fanay-Augères *1980–1990*	*IRSN*	Granite Uranium mine	Pre-existing tunnels
Tournemire (Tournemire Research Tunnel) *1990–*	*IRSN*	Sediments (shale), 250 m	Pre-existing tunnels
Asse Mine *1965–1997*	Germany *GSF*	Permian rock salt anticline, mining levels 490–800 m, cavern 950 m	Pre-existing tunnels
Tono *1986–2006*	Japan *JNC/JAEA*	Sediments, uranium mine, 130 m	Pre-existing tunnels
Kamaishi *1988–1998*		Granite, Fe mine	Pre-existing tunnels
Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) *2004– (Shaft sinking initiation currently at 500 m)*		Granite, 1000 m (shaft)	Purpose built; generic Surface investigations since 1996
Horonobe Underground Research Laboratory *2005– (Shaft sinking initiation)*		Sedimentary rock, 500 m (shaft)	Purpose built; generic Shafts under construction
KURT – Korean Underground Research Tunnel *2006–*	South Korea *KAERI*	Granite, 90 m	Purpose built; generic
Stripa Mine *1976–1992*	Sweden *SKB*	Granite, Fe mine, 360–410 m	Pre-existing tunnels
Aspö Hard Rock Laboratory (HRL) *1995–*		Granite, 200–460 m (ramp/spiral)	Purpose built; generic
High-Activity Disposal Experiment Site URL, Mol (HADES) *1984–*	Belgium *GIE EURDICE*	Boom Clay (plastic clay), 230 m	Purpose built; generic
Grimsel Test Site (GTS) 1984–	Switzerland *Nagra*	Granite, 450 m	Purpose built; parallel to existing tunnels
Mt Terri *1995–*	*SWISSTOPO*	Opalinus Clay, 400 m	Purpose built; parallel to existing tunnels
Climax, Nevada *1978–1983*	USA *US-DOE*	Granite, mine, 420 m	Pre-existing tunnels
G-Tunnel, Nevada *1979–1990*		Tuff, 300 m	Pre-existing tunnels
Busted Butte, Yucca Mountain, Nevada *1998–*		Bedded tuff, 100 m	Purpose built; generic

FIGURE 1.1 – Tableau résumant l'ensemble des laboratoires méthodologiques permettant de développer des connaissances et valider des méthodes et des technologies à portée relativement générale sur un type de roche donné dans le cadre des projets de stockage en couche géologique profonde (d'après Delay et al. (2014))

Site-specific URL *Operation*	Country *Organization*	Host rock, depth	Comments
ONKALO, Olkiluoto *2003–*	Finland *Posiva*	Granite (tonalite), 500 m (ramp)	Purpose built; site-specific
Meuse/Haute-Marne (Bure URL) *2000–*	France *ANDRA*	Shale (indurated clays), 450–500 m	Purpose built; site-specific
Gorleben *1985–1990 and 2010*	Germany *BfS, DBE*	Salt dome, below 900 m	Purpose built; site-specific, moratorium cancelled in 2010
Konrad *1980–*		Limestone, Fe mine, 800–1300 m	Facility in former iron mine
Morsleben (ERAM) *1981–1998*		Salt dome, K/salt mine, below 525 m	Facility decommissioned
Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) *1982–(1999)*	USA *US-DOE*	Salt (bedded), 655 m	Operating repository since 1999
Exploratory Studies Facility (ESF) Yucca Mountain, Nevada *1996–2010*		Welded tuff, 300 m (ramp)	Purpose built; site-specific; activities stopped in 2010

FIGURE 1.2 – Tableau résumant l'ensemble des laboratoires de caractérisation et de qualification dont le but est de caractériser un site spécifique et ainsi d'évaluer la faisabilité d'une installation de stockage. (D'après Delay et al. (2014))

suffisamment longtemps les radionucléides au moyen des différentes barrières interposées entre les déchets et les écosystèmes de surface à travers différents programmes de recherche. Il s'agit en particulier d'étudier et de discuter des évolutions très complexes à long terme du système et leurs incertitudes : radiolyse, réactions chimiques, interactions entre les matières radioactives stockées, les constituants des colis et l'ouvrage (métaux, bétons, etc.), endommagement de l'argilite par le creusement, mais également les hétérogénéités locales de la roche induites par la présence de failles ou de zones fracturées. Les études et résultats obtenus par l'IRSN ont confirmé que les temps de transfert de l'eau dans la roche argileuse saine sont extrêmement lents et sont évalués à quelques centimètres par million d'année (Boisson et al., 1998). Ils ont également montré la complexité de la prédiction du comportement de la roche autour des galeries (Valès et al., 2004).

1.1.4 Détection des failles

Connaître la géologie de la roche-hôte par des méthodes non destructives constitue un enjeu majeur pour l'évaluation des potentiels sites de stockage de déchets radioactifs. La présence de faille se manifeste par des hétérogénéités dans les formations géologiques (Boadu & Long, 1994). Ces failles sont susceptibles de draîner les radionucléides depuis la couche d'argilite contenant les déchets radioactifs vers les formations calcaires aquifères supérieures ou inférieures et ainsi perturber le confinement des éléments radioactifs. Les méthodes d'imagerie géophysique sont largement répandues afin d'imager les hétérogénéités du sous-sol et notamment pour la détection des failles (Boadu, 1997, 2000; Leucci & De Giorgi, 2006). Comme l'illustre la figure 1.3, les failles sont caractérisées par l'orientation de leurs déplacements. Les failles décrochantes dont le mouvement est essentiellement horizontal sont les plus difficiles à détecter par les méthodes géophysiques classiques (Cabrera, 2003). Afin de pouvoir exclure ou non la présence de failles ou de zones altérées dans les formations géologiques investiguées, il est indispensable de connaître les limites des méthodes de reconnaissance utilisées. La présence de zones homogènes et de zones fracturées de différentes tailles, principalement de type décrochantes observées depuis les ouvrages de la station expérimentale de Tournemire (Cabrera, 1991; Cabrera et al., 1999; Boisson et al., 2001; Cabrera et al., 2001; Constantin et al., 2002) font de ce laboratoire un outil idéal pour l'évaluation des capacités et des limites des méthodes géophysiques pour la détection

des failles à faible décalage vertical.

Dans les prochaines sections, je présente la Station Expérimentale de Tournemire ainsi qu'un bilan des campagnes géophysiques réalisées dans le but de détecter la zone de failles localisée depuis les ouvrages souterrains.

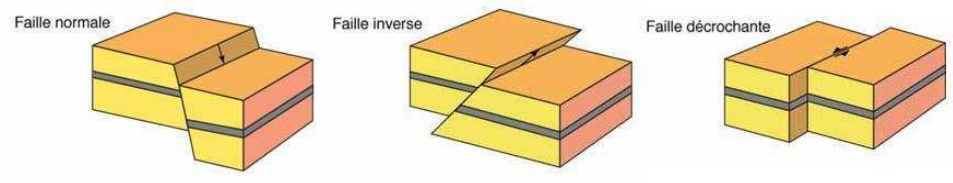


FIGURE 1.3 – Illustration des déplacements observés pour les différents types de faille : normale, inverse et décrochante.

1.2 Station Expérimentale de Tournemire (SET)

1.2.1 Localisation et contexte géologique

Le laboratoire méthodologique de Tournemire aussi appelé station expérimentale de Tournemire a été acquis en 1992 par l'IRSN même s'il y menait des expérimentations dès 1989. L'objectif de l'IRSN est de réaliser des recherches in-situ afin d'acquérir des connaissances méthodologiques et phénoménologiques sur les formations argileuses, potentiellement intéressantes pour un futur stockage de déchets radioactifs. Situé à environ 250 mètres de profondeur dans un ancien tunnel ferroviaire de près de 2 km de long creusé entre 1882 et 1888, ce laboratoire se trouve dans le bassin des Grands Causses, en bordure sud du Massif Central au sud de l'Aveyron (fig 1.4). L'ancien tunnel ferroviaire traverse la formation argileuse jurassique du Toarcien qui s'est déposée en domaine marin il y a environ 180 millions d'années. Cette couche argileuse, composée d'argilites et de marnes, est encadrée par des formations calcaires dans lesquelles circulent des aquifères (fig 1.5). L'épaisseur de cette couche argileuse est d'environ 250 mètres, et se situe à 200-250 mètres de profondeur. Dans ce laboratoire, des études géologiques sont abordées dans le cadre de plusieurs programmes de recherche menés depuis 1990 (Bonin, 1998; Cabrera et al., 1999, 2001; Cabrera, 1991; Boisson et al., 2001; Constantin et al., 2002; Cabrera, 2003; Altinier, 2006; Masri et al., 2014) au moyen de différentes techniques d'observation et d'analyse à partir de la surface, du tunnel, des six galeries excavées depuis 1996 et des nombreux forages (plus de 250) réalisés dans le tunnel et les galeries (fig 1.6). La connaissance géologique du secteur est un atout pour le développement des différents programmes de recherche et pour le choix des zones d'expérimentation. En effet, celle-ci apporte des informations nécessaires pour l'évaluation des méthodes d'investigation et la validation des modèles.

1.2.2 Failles identifiées

Les différents travaux de Bonin (1998); Cabrera et al. (1999, 2001); Cabrera (1991); Boisson et al. (2001); Constantin et al. (2002); Cabrera (2003) ont permis l'identification de failles sur la station expérimentale de Tournemire. Ces travaux ont permis d'identifier deux failles d'échelle hectométrique à kilométrique de direction N-S environ affectant la couche argileuse : une faille dite principale avec des zones de brèches et une faille dite secondaire avec une argilite broyée (fig 1.6). Des petites failles à l'échelle décamétrique et des microfissures d'origine tectonique sont présentes dans le milieu argileux. Elles se caractérisent par un remplissage de calcite. Des failles normales anciennes sont observées et correspondent

à la tectonique en extension jurassique. Elles ont été réactivées en décrochement lors de la phase pyrénéenne compressive il y a 40-50 millions d'années. Cette réactivation s'est accompagnée de la formation de failles décrochantes à faible décalage vertical dont deux sont celles visibles depuis les ouvrages souterrains. Ce sont ces zones de failles à faible décalage vertical qui nous intéressent particulièrement dans le cadre de cette thèse. Ces travaux ont également permis d'identifier la présence d'une zone endommagée autour du tunnel qui est caractérisée par une zone de fracturation néoformée de plus de 2 mètres de large, de part et d'autre de l'ouvrage. Elle est également présente autour des galeries et autour des forages dans une moindre mesure.

FIGURE 1.4 – Localisation de la station expérimentale de Tournemire sur la carte du relief de la France.

Dans le but de valider les méthodes utilisées pour l'expertise des sites de stockage, l'IRSN développe et teste différentes méthodes d'imagerie géophysique sur la station expérimentale de Tournemire. Dans la prochaine section, je présente les acquisitions précédemment réalisées dans le but d'imager les failles présentes sur la station Expérimentale de Tournemire.

1.3 Méthodes géophysiques utilisées sur la SET

La station expérimentale est depuis plusieurs années utilisée dans le but de tester les méthodes d'imagerie géophysique. Dans cette section, différentes acquisitions sismiques et électriques sont présentées.

1.3.1 Méthodes sismiques

1.3.1.1 Campagnes réalisées sur le plateau de Tournemire

L'objectif de la campagne d'acquisition de 2001 réalisée par la CGG était d'évaluer les capacités et les limites de la méthode de sismique réflexion 3D pour la détection des zones de failles à faible décalage vertical identifiées dans les argilites et localisées depuis les ouvrages souterrains, en utilisant des données acquises depuis la surface. Pour ce faire, un dispositif d'acquisition, présenté sur la figure 1.7, a été mis en place sur une surface de 950 m de long et 650 m de large. Une ligne de 6 géophones localisée dans les galeries, à 250

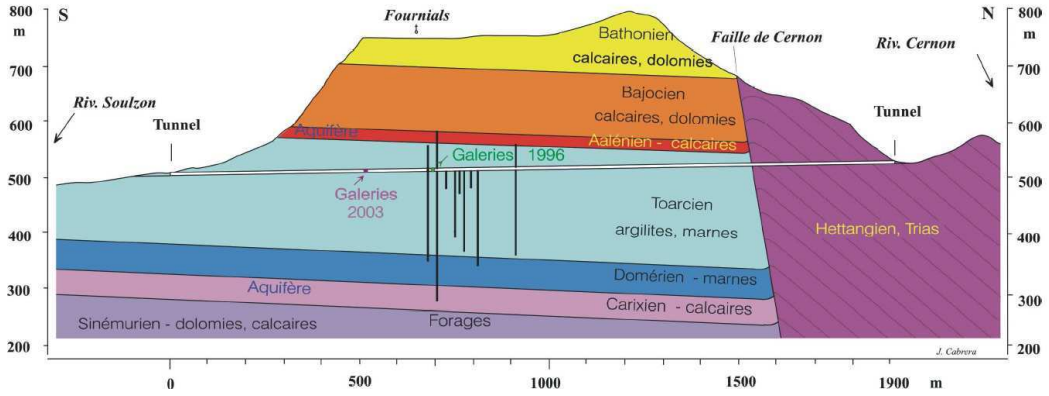


FIGURE 1.5 – Coupe géologique générale de la station expérimentale de Tournemire

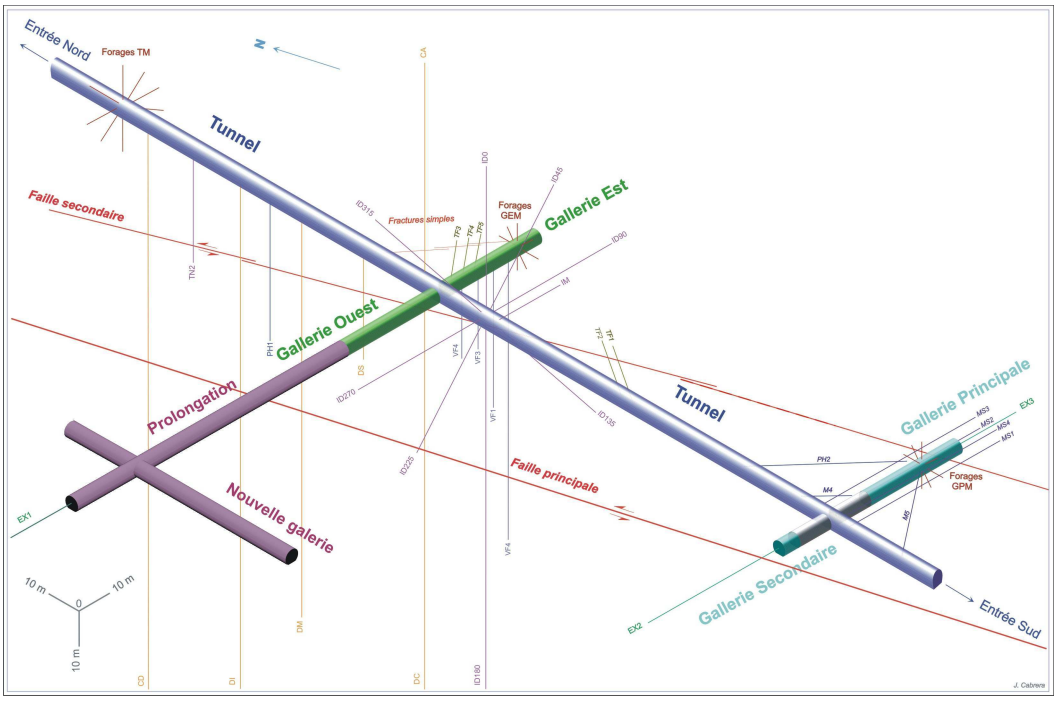


FIGURE 1.6 – Schéma 3D des ouvrages souterrains et des principales failles présents dans la station expérimentale de Tournemire

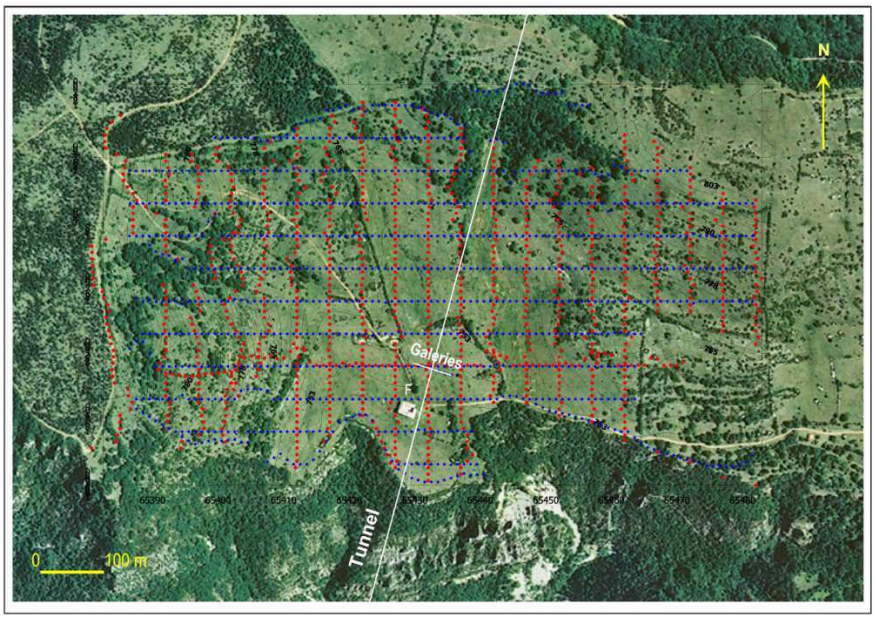


Fig. 5. Dispositif d'acquisition sur la surface du plateau de la ferme de fournials (F). Vue aérienne (IGN) avec les lignes E-W de points d'enregistrements (géophones) et les lignes N-S de points d'émission. Chaque point d'enregistrement (trace) regroupe 6 géophones.

FIGURE 1.7 – Dispositif d'acquisition de la campagne sismique de 2001

mètres de profondeur, a également été installée afin de mesurer les trajets directs entre la surface et la profondeur et d'évaluer les vitesses associées. La source sismique utilisée pour cette acquisition est un vibroseis (source mécanique vibrante dont le contenu fréquentiel est contrôlé sur une durée de plusieurs secondes). Le traitement et l'analyse de ces données réalisés par la CGG ont permis de remarquer une discontinuité des réflecteurs dans les calcaires inférieurs (fig 1.8), interprétée comme la présence de la faille principale (Cabrera, 2003). Cependant la présence de cette faille n'a pas pu être mise en évidence dans les argilites du fait des faibles contrastes d'impédance dans ce milieu et du décalage vertical de cette faille plus faible dans le milieu argileux qu'à l'interface entre le milieu argileux et les calcaires inférieurs.

Le prétraitement des données de 2001 a permis de réaliser une première estimation des vitesses dans les couches calcaires superficielles et a ainsi montré l'existence d'un fort gradient de vitesse en surface (Perroud et al., 2009). L'analyse des données de 2001 a conduit à choisir une source ponctuelle (marteau) plutôt que le vibroseis (qui ne permettait pas un pointé des temps de première arrivée de bonne qualité) et à réduire l'écartement entre les sources et les récepteurs pour une meilleure résolution. La qualité des données haute résolution a ainsi permis la réalisation d'un pointé précis et une meilleure résolution des images en surface avec la tomographie des temps de premières arrivées. Cependant, de par les propriétés du milieu, il n'a pas été possible d'imager le milieu en profondeur et de dépasser les premières dizaines de mètres.

Les acquisitions réalisées depuis la surface ont montré les limites des méthodes sismiques employées pour la caractérisation des failles à faible décalage vertical sur la Station Expérimentale de Tournemire. En parallèle, des acquisitions ont été menées depuis les ouvrages. Celles-ci sont présentées dans le prochain paragraphe.

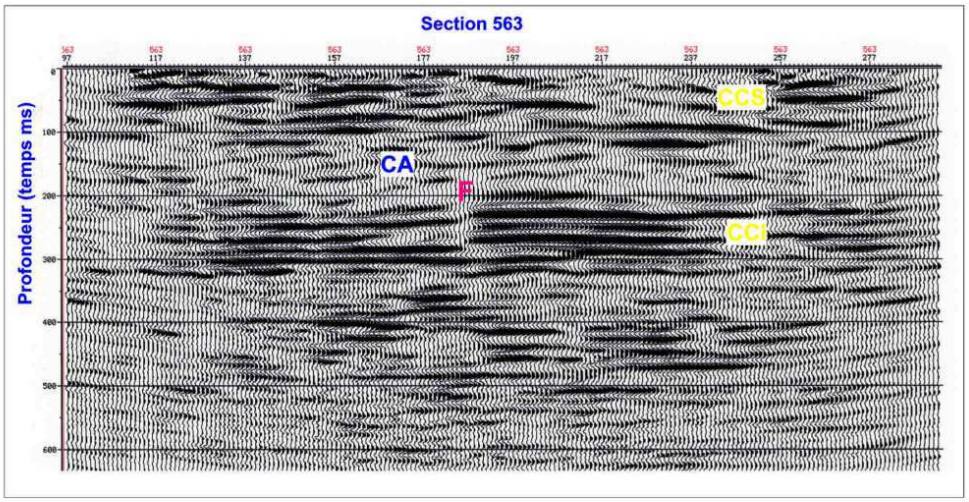


Fig. 9. Section sismique migrée, transversale au tunnel de Tournemire, montrant une faille dans la couche calcaire sous-jacente. CCS - Couche calcaire supérieure, CA - Couche argileuse, CCI - Couche calcaire inférieure.

FIGURE 1.8 – Interprétation des données sur une section migrée de la campagne sismique de 2001. Cette campagne a permis d'identifier la présence de la faille principale dans les calcaires inférieurs (F) se manifestant par un décalage vertical d'environ 25 mètres. La présence de la faille dans la couche argileuse et dans les calcaires supérieurs n'a cependant pas pu être identifiée.

1.3.1.2 Campagnes réalisées depuis les ouvrages de la SET

Devant la difficulté à détecter les failles dans les argiles depuis la surface, des campagnes d'acquisition ont été mises en place depuis les ouvrages souterrains. Une première campagne d'acquisition a été réalisée par le LCPC, Teraseis et l'IRSN en 2007 dans le but d'observer une éventuelle réflexion des ondes sismiques sur la faille principale depuis le tunnel. Le traitement de ces données a permis d'identifier une onde potentiellement liée à une réflexion des ondes sur la faille, cependant il n'a pas été possible de conclure de manière claire.

En 2010, une acquisition de sismique réfraction réalisée depuis les ouvrages souterrains avait pour objectif de caractériser la variation des vitesses sismiques au passage de la zone faillée (Magnin, 2010). Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont : la caractérisation d'une vitesse dans les argilites saines de 3700 – 3750 m/s, une zone de failles hétérogène en termes de vitesses sismiques, avec des zones de vitesses faibles (2600 – 2700 mètres par seconde) caractéristiques de zones fracturées, alternant avec des zones de vitesses plus élevées (3700 mètres par seconde) caractéristiques des argilites saines, ainsi qu'une vitesse sismique moyenne sur toute la longueur de la zone faillée de 3350 mètres par seconde, soit une baisse de 10% par rapport à la vitesse de 3750 mètres par seconde observée dans les argilites saines.

A la suite de l'acquisition réalisée en 2007 depuis les ouvrages souterrains, d'autres campagnes d'acquisition ont été réalisées en 2010-2011. Les investigations par sismique réflexion/migration à partir d'une seule galerie n'ont pas donné de résultats probants. A l'inverse, les travaux de Bretaudeau et al. (2011, 2013) en utilisant la tomographie puis l'inversion des formes d'ondes en transmission entre galeries ont permis la détection des zones de failles. Ces résultats sont illustrés sur la figure 1.9. Ces travaux illustrent la complexité de la zone de faille et le potentiel des méthodes géophysiques en transmission pour imager cette zone de faille depuis les ouvrages souterrains.

1.3.2 Méthodes électriques

En mai 2007, l'IRSN en collaboration avec l'équipe du CEREGE du CNRS, a effectué une campagne de mesures de résistivité électrique dans le but d'évaluer le potentiel de cette méthode pour détecter des zones de failles. Trois profils de résistivité électrique de 2,5 km de long ont été acquis avec un espacement entre électrodes de 40 m (fig 1.10) sur le plateau de Tournemire. Les données de résistivité électrique, traitées avec le logiciel RES2DINV (Loke & Barker, 1996) par Gélis et al. (2010), ont permis de différencier différentes unités géologiques (des calcaires et dolomies du Bathonien et Bajocien ainsi que le Toarcien argileux). Une zone de 500-600 m de large avec des valeurs de résistivité plus faible que celle associée aux calcaires homogènes a été interprétée comme une zone fracturée dans les calcaires supérieurs sur deux profils W-E. De cette étude, Gélis et al. (2010) ont conclu que la zone plus conductrice observée dans les calcaires supérieurs pourrait correspondre à une zone de fracturation située dans le prolongement de la faille principale visible depuis les ouvrages souterrains (fig 1.11 et 1.12). Cependant la résolution de ce dispositif n'a pas permis de caractériser finement la zone de failles.

En 2011, l'IRSN et Mines ParisTech ont réalisé dans le cadre du GNR TRASSE l'acquisition d'une ligne 2D dans le but d'imager plus précisément la zone de plus faible résistivité interprétée comme une zone fracturée dans les calcaires supérieurs. Plusieurs acquisitions ont été réalisées le long de la ligne sud de l'acquisition de 2007, avec un écartement entre électrodes valant respectivement 2, 4 et 8 mètres. En comparaison avec les résultats obtenus avec les données de 2007, cette acquisition plus haute résolution a permis une investigation plus détaillée des 100 premiers mètres localisés dans les calcaires supérieurs (Gélis et al.,

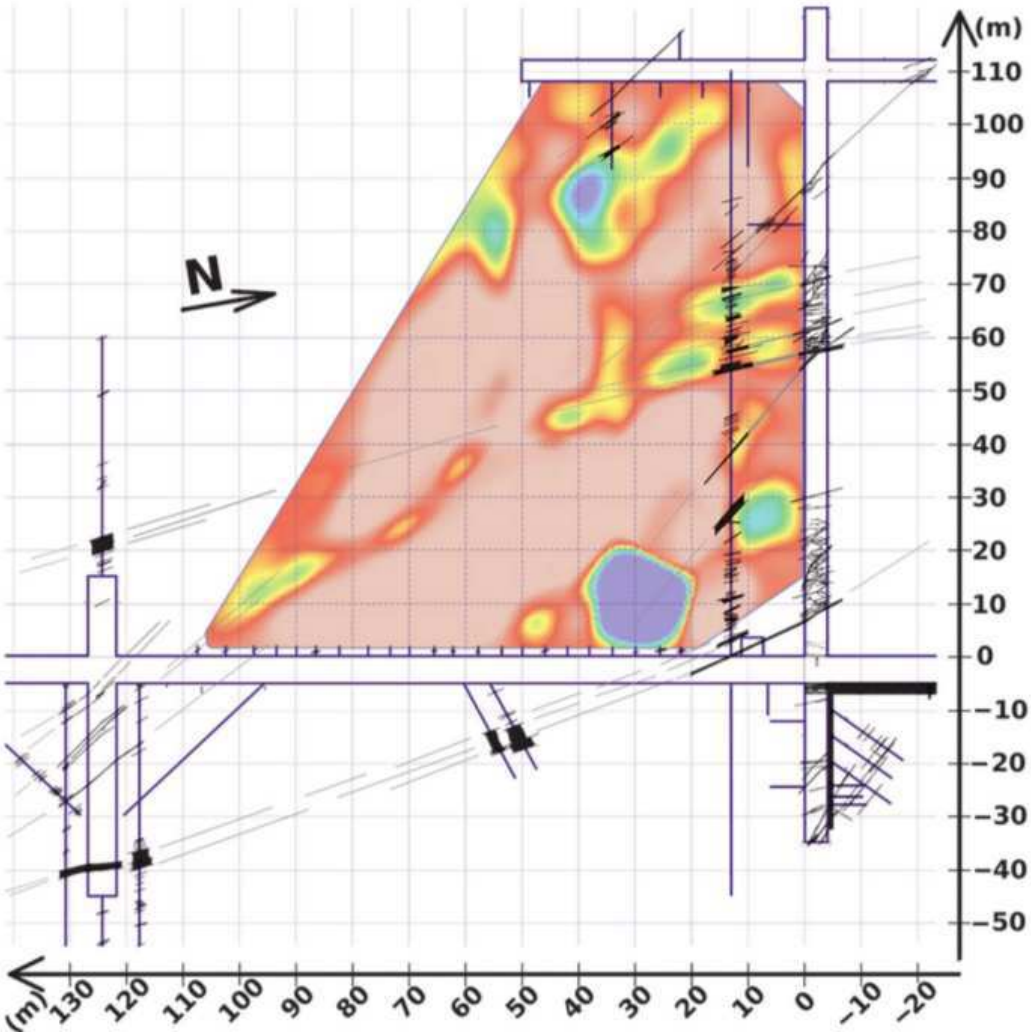


FIGURE 1.9 – Modèle de vitesse obtenu par Bretaudeau et al. (2013) avec en noir la zone de fracturation cartographié dans les ouvrages souterrains et forages.

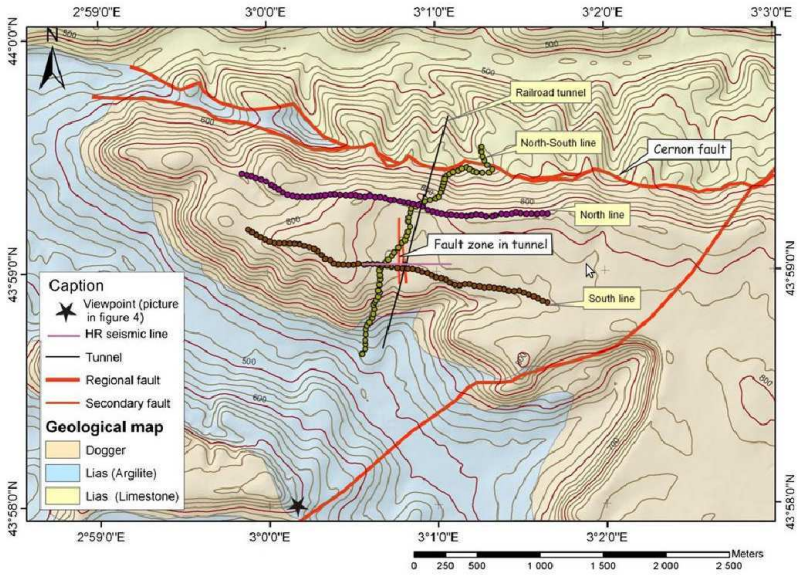


FIGURE 1.10 – Carte géologique du plateau de Tournemire montrant la position du tunnel et les profils de résistivité électrique réalisés durant la campagne 2007 (Gélis et al., 2010).

2012) mais la profondeur de pénétration est limitée à une centaine de mètres seulement (fig 1.13). Cette acquisition montre néanmoins l'hétérogénéité de la proche surface du point de vue des propriétés de résistivité électrique du milieu. En particulier, la localisation de deux zones de plus faible résistivité en surface coïncide avec des zones de fracturation identifiées depuis la surface sur la base de données géologiques.

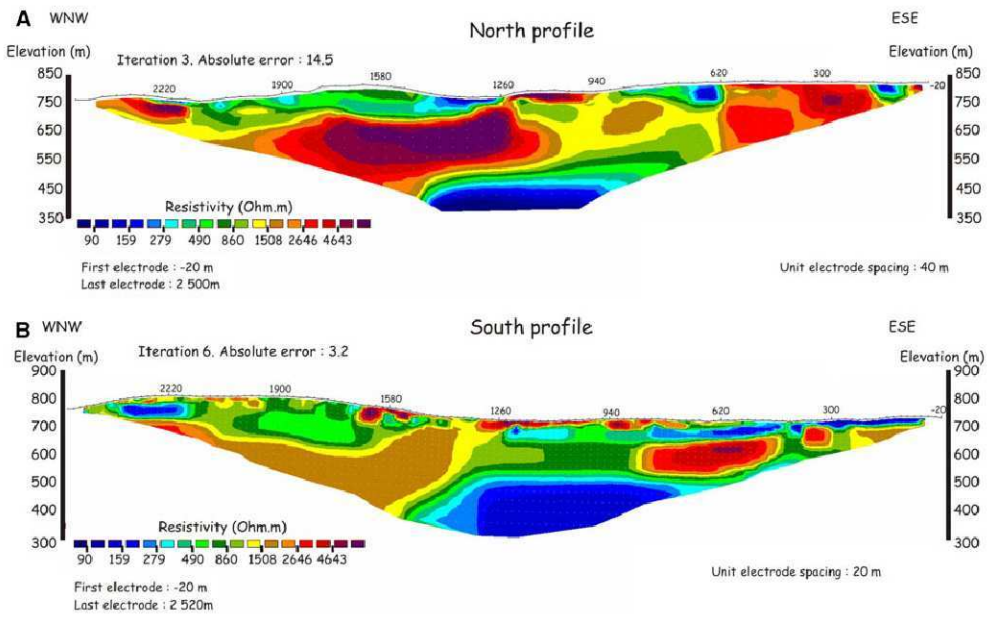


FIGURE 1.11 – Premières images de tomographie de résistivité électrique résultant de l'inversion du profil Nord (a) et Sud (b) de l'acquisition de 2007 (Gélis et al., 2010).

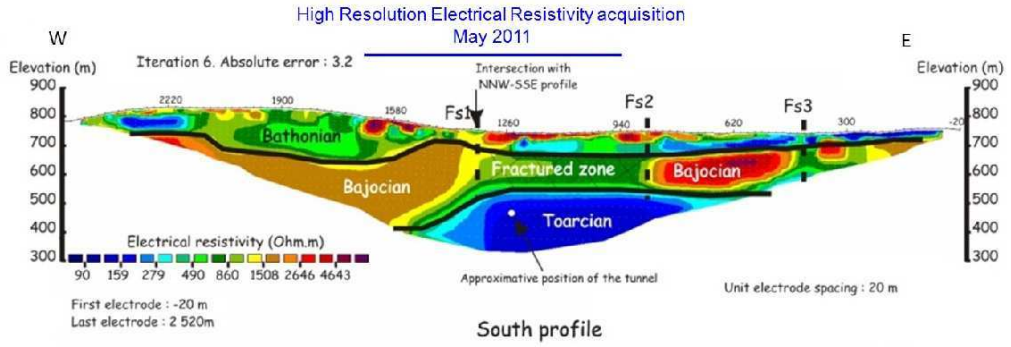


FIGURE 1.12 – Coupe interprétée des résultats d'inversion de résistivité électrique obtenue par Gélis et al. (2010) d'après la campagne électrique 2D réalisée en 2007 sur la station expérimentale de Tournemire. Cette figure permet de remarquer un contraste de résistivité entre la couche argileuse (Toarcien) et la couche calcaire supérieure. On remarque également de nombreux contrastes de résistivité dans les calcaires supérieurs qui ont motivé la réalisation d'une campagne haute résolution en mai 2011 dont l'envergure est représentée par la ligne bleue.

En résumé ...

Plusieurs méthodes géophysique telles que l'imagerie sismique et l'imagerie de résistivité électrique ont été testées sur la station expérimentale de Tournemire dans le but d'évaluer leur capacité à détecter les failles présentes. Parmi elles, la campagne de sismique 3D haute résolution réalisée en 2001 à partir de la surface du massif de Tournemire a permis de mettre en évidence la faille principale nord-sud (à 450 m de profondeur) dans les couches calcaires du Lias (couche inférieure à la roche argileuse) pour laquelle le décalage vertical est évalué à environ 25 mètres (fig. 1.8). Les travaux de Gélis et al. (2010) et Gélis et al. (2012) sur la détection des failles par résistivité électrique ont permis d'obtenir une cartographie 2D de la résistivité en partie corrélée avec les zones de fracturation (plus conductrices) dans les séries calcaires du Dogger.

D'autre part, les connaissances acquises sur la géologie de la station expérimentale de Tournemire en font un outil idéal de développement et de validation des méthodes utilisées pour la caractérisation des sites de stockage en couche argileuse. Les campagnes réalisées jusqu'à présent sur la détection des failles ont permis de montrer la sensibilité des méthodes sismique et électrique à la présence de failles. Cependant, de par les techniques mises en œuvre pour l'acquisition et le traitement des données, ces méthodes n'ont pas permis d'imager distinctement dans la couche argileuse et les calcaires supérieurs la présence des failles à faible décalage vertical pourtant localisées dans les ouvrages souterrains. Dans le but de répondre à la problématique sur le potentiel des méthodes géophysiques pour la détection des failles à faible décalage vertical, les travaux de cette thèse se sont tournés vers l'utilisation d'une méthode sismique mais cette fois avec un dispositif en transmission et vers une analyse des temps de première arrivée.

Dans la suite de ce manuscrit j'expose le principe de la tomographie de temps de première arrivée qui sera utilisée pour le traitement de données sismiques de notre nouvelle acquisition en transmission Surface-Tunnel. Les résultats du traitement de ces données seront, quant à eux, présentés dans la dernière partie de ce manuscrit.

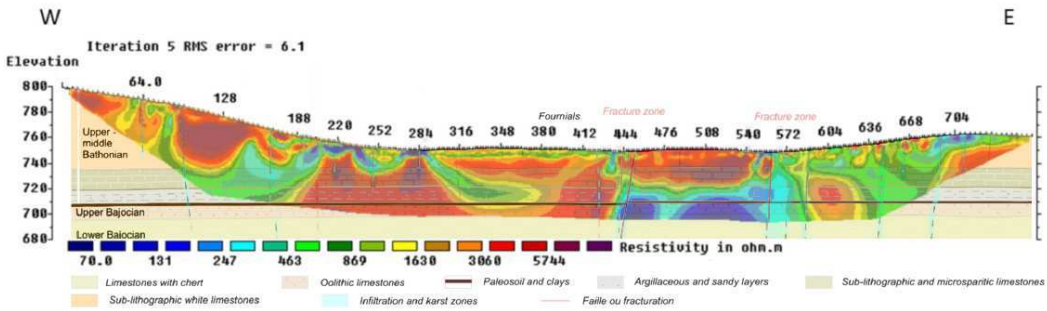


FIGURE 1.13 – Coupe interprétée des résultats d'inversion de résistivité électrique obtenue par Gélis et al. (2012) d'après la campagne électrique 2D réalisée en 2011 sur la station expérimentale de Tournemire. Cette figure permet de remarquer une corrélation entre la distribution des propriétés de résistivité du milieu et les failles identifiées sur le site.

Deuxième partie

Méthode et théorie

Tomographie des temps de première arrivée

Introduction **25**

2 Mesures expérimentales : Les temps de première arrivée **27**

3 Problème direct : Modélisation des temps de première arrivée **43**

4 Problème inverse : Inversion des temps de première arrivée **59**

5 Discussion sur les méthodes **81**

Conclusion **99**

Introduction

Dans cette partie je présente les différentes étapes de la méthode de tomographie des temps de première arrivée ainsi que les différents outils de calcul implémentés.

- **Mesures expérimentales**

Le chapitre 2 est consacré à la réalisation des mesures expérimentales et au traitement des mesures nécessaire pour obtenir les temps de première arrivée. Je présente dans ce chapitre les éléments principaux d'une campagne d'acquisition sismique ainsi que les différents algorithmes de pointé automatique qui ont permis la création de l'outil de pointé PickFirst.

- **Résolution du problème direct**

Le chapitre 3 est consacré à la modélisation des temps des première arrivée. Je présente dans ce chapitre les équations théoriques permettant de réaliser le calcul des temps de première arrivée en fonction des propriétés physiques du milieu. La résolution de ces équations implémentée dans le code SolveEik3D est réalisée par la méthode de différences finies et est détaillée dans ce chapitre. Ce chapitre présente également la méthode de tracé de rais a postériori implémentée dans le code RayPath3D.

- **Résolution du problème inverse**

Le chapitre 4 présente la résolution du problème inverse, qui vise à retrouver le modèle de vitesse de propagation des ondes. Nous verrons dans ce chapitre différentes méthodes d'optimisation permettant la résolution du problème inverse implémentée dans le code Tomo3D.

- **Comparaison des méthodes d'inversion**

Pour finir, le chapitre 5 propose d'illustrer par des exemples les différences entre les méthodes d'inversion exposées dans le chapitre 4. Ce chapitre sera également l'occasion de justifier les choix réalisés pour l'inversion des données réelles présentée dans la partie III de ce manuscrit.

Chapitre 2

Mesures expérimentales

Le temps de première arrivée

Sommaire

2.1 Mesures sismiques **27**
2.1.1 Sources sismiques 28
2.1.2 Récepteurs et sismogrammes 29
2.1.3 Le pointé des temps de première arrivée 32
2.2 Algorithme de pointé automatique **32**
2.2.1 Energy Ratio 32
2.2.2 Entropy Method 35
2.3 Implémentation du code de pointé PickFirst **36**
2.3.1 Motivation 36
2.3.2 Algorithme 37
2.3.3 Applications 39
2.3.4 Conclusions 39

La tomographie des temps de première arrivée est une méthode d'imagerie pour laquelle une campagne de mesures sismiques doit être mise en œuvre. Dans la première section de ce chapitre, après avoir présenté les principaux éléments d'une campagne d'acquisition sismique, j'introduis les méthodes utilisées dans la littérature pour l'obtention des temps de première arrivée. Dans une seconde section, je détaille les algorithmes de deux méthodes choisies pour leur simplicité d'implémentation. Nous verrons dans cette section que ces méthodes uniquement fondées sur l'analyse statistique et énergétique des signaux peuvent conduire à des pointés physiquement improbables. Afin de prendre en considération la physique des phénomènes observés, je propose dans la dernière section une légère amélioration de ces méthodes en ajoutant trois critères sur le pointé des temps de première arrivée. Ces améliorations implémentées dans l'outil de pointé PickFirst développé en Matlab et permettant le traitement de données sismiques dans leur format original (su ou segy) sont présentées et appliquées aux données réelles de la campagne Surface-Tunnel.

2.1 Mesures sismiques

Une campagne d'acquisition sismique se compose généralement de plusieurs sources sismiques réparties dans l'espace et le temps, et d'un système d'acquisition composé par une série de récepteurs répartis en différentes positions de l'espace. Nous ne verrons pas ici le détail des petits matériels mais simplement les principaux éléments que sont les sources et les récepteurs.

2.1.1 Sources sismiques

Sismique passive

La sismique dite passive utilise une source sismique d'origine naturelle. Cette méthode est idéale pour étudier les structures de la Terre à très grandes profondeurs. Elle est utilisée dans le domaine de la sismologie globale (Jeffreys & Bullen, 1940; Clearbout, 1985; Zhao et al., 1992). La source sismique est alors un séisme donnant naissance à des ondes pouvant être mesurées aux stations sismiques disposées dans différentes positions à la surface de la Terre. Parmi les nombreuses découvertes on pourra citer celle de Andrija Mohorovičić. En 1909, suite au séisme de Zagreb, Andrija Mohorovičić observe, en comparant les enregistrements de différentes stations, qu'à partir d'une certaine distance du foyer deux trains d'ondes se succèdent. L'un des deux arrivant plus tôt que la vitesse moyenne des ondes dans la croûte le laisserait prévoir, il en déduit que les deux trains d'ondes ont suivi des trajets différents. L'un a suivi un trajet direct à une vitesse à peu près constante, alors que l'autre en s'enfonçant dans la croûte terrestre, atteint un milieu différent où il est accéléré avant de regagner la surface. De cette analyse, Andrija Mohorovičić met en évidence l'interface entre la croûte et le manteau. Cette discontinuité porte depuis son nom, le plus souvent raccourci en « Moho » (Mohorovičić, 1992). L'utilisation de la sismique passive permettra également les découvertes de :

- Beno Gutenberg en 1912, qui positionne l'interface manteau/noyau à 2900 km de profondeur grâce à l'étude des ondes P,
- Harold Jeffreys en 1926, qui établit la fluidité du noyau externe métallique,
- Inge Lehmann en 1936, qui découvre la graine, encore appelée noyau interne, qui constitue la partie solide métallique de l'intérieur du noyau.

La sismique passive est, par exemple, également utilisée pour le suivi de l'exploitation des réservoirs pétroliers et l'exploitation de mines. Les sources sismiques sont alors des microséismes induits par l'exploitation réalisée (Kristiansen et al., 2000; Dou et al., 2012; Gesret et al., 2013). On trouvera également l'utilisation du bruit de fond sismique. La source sismique correspond dans ce cas au bruit ambiant (Sens-Schönfelder & Wegler, 2011; de Ridder & Dellinger, 2011).

L'utilisation d'une source naturelle possède certaines limitations par rapport à la sismique active puisqu'elle ne permet ni le choix ni la connaissance exacte de la position de la source ni dans l'espace ni dans le temps. Cette ignorance ajoute des inconnues supplémentaires qui devront être déterminées lors de l'inversion des données (Gesret et al., 2011).

Sismique active

La sismique active utilisée en sismique d'exploration, est une méthode pour laquelle la source sismique est produite de façon intentionnelle dans le seul but de la campagne d'acquisition. On parlera dans ce cas de sources artificielles par opposition aux sources d'origine naturelle. Elle est généralement utilisée pour l'imagerie du sous-sol et plus particulièrement pour des profondeurs d'investigation réduite (Bois et al., 1972). Dans ces conditions il est possible de maîtriser les caractéristiques de la source utilisée ou encore sa position. La maitrise de la géométrie d'acquisition permet de déterminer avec plus de précision les limites de la zone auscultée ainsi qu'une meilleure connaissance de la résolution de la tomographie réalisée.

La création de l'onde sismique peut être réalisée par différents types de source. Elle sera choisie en fonction de la puissance ainsi que du contenu fréquentiel désiré (Kim &

Keehm, 2011) et de considérations pratiques sur le terrain (par exemple, pas d'explosif dans certaines zones). En sismique terrestre les sources utilisées peuvent être regroupées en trois catégories.

- Les sources à impact de type chute de masse accélérée. Elles permettent de produire une onde de pression orientée de haute fréquence (Jeong & Kim, 2012).
- Les sources explosives généralement enterrées dans le sous-sol. Elles permettent de générer une onde de pression isotrope dont la puissance est fonction de la charge de poudre utilisée.
- Et les sources vibrantes, qui permettent de contrôler le contenu fréquentiel de l'onde produite. Les signaux produits devront cependant être corrélés dans le temps afin d'obtenir un signal comparable à une impulsion.

De nombreuses études comparatives des sources dont le but était la sélection d'une source optimale pour un site donné, mais également l'évaluation du comportement des différentes sources pour une zone de caractéristiques données ont été mises en ouvres (Herbst et al., 1998; Miller et al., 1986, 1992, 1994; Pullan & MacAulay, 1987). Indépendamment de la nature de la zone d'étude, les études comparatives des différentes sources sismiques proposées par Bühnemann & Holliger (1998); Feroci et al. (2000); Miller et al. (1986, 1992) ont révélé que les principaux critères pour la sélection d'une source appropriée dans un site particulier sont l'énergie et le contenu fréquentiel des signaux générés. La teneur en énergie doit être suffisamment élevée afin d'acquérir des informations en profondeur sur la cible, tandis que le contenu fréquentiel doit être suffisamment haut pour fournir une résolution suffisante. Outre ces grandes exigences, la portabilité, la sécurité, la répétabilité ainsi que le coût de la mise en œuvre de la source sont également pris en compte.

2.1.2 Récepteurs et sismogrammes

L'enregistrement de la propagation de l'onde produite par la source est réalisé ponctuellement par une série de récepteurs. En sismique terrestre les récepteurs utilisés sont des géophones. Ils permettent de convertir les déplacements du sol en un courant électrique qui sera mémorisé sous la forme d'un signal numérique. Le géophone est constitué d'un ressort et d'une masse magnétique se déplaçant dans une bobine. Le mouvement de cette masse donne naissance au signal électrique qui est échantillonné et stocké dans un ordinateur (fig. 2.1). Initialement conçu pour mesurer les déplacements dans une seule direction de l'espace les géophones possédant des systèmes à 3 composants (géophones 3-C) ont vu le jour et sont de plus en plus utilisés (Hauer et al., 2008; Stotter et al., 2008). Ils permettent d'obtenir une description plus complète des ondes sismiques naturelles ou artificielles qui se propagent généralement dans le sol de manière tridimensionnelle.

Lors de l'acquisition de données sismiques l'expérimentateur doit choisir différents paramètres d'acquisition. Parmi eux, il devra fixer la durée d'acquisition T, à savoir le temps durant lequel le signal est enregistré. Il devra également choisir le pas dt d'échantillonnage du signal ainsi que le trigger $trig$. Le trigger correspond à la durée du signal qui sera enregistrée avant le déclenchement de la source. En d'autres termes, il s'agit d'enregistrer le signal avant que le déclenchement de l'acquisition soit donné. Dans la pratique ceci est possible car le système d'acquisition est en perpétuel fonctionnement. Il enregistre le signal dans un fichier temporaire jusqu'au déclenchement de la source. Une fois la source déclenchée il copie l'ensemble des valeurs numériques concernées qu'il a temporairement enregistrées vers un fichier cette fois non temporaire. La première valeur de cet ensemble correspond à la valeur du signal $trig$ secondes avant le déclenchement de la source si le trigger a été défini

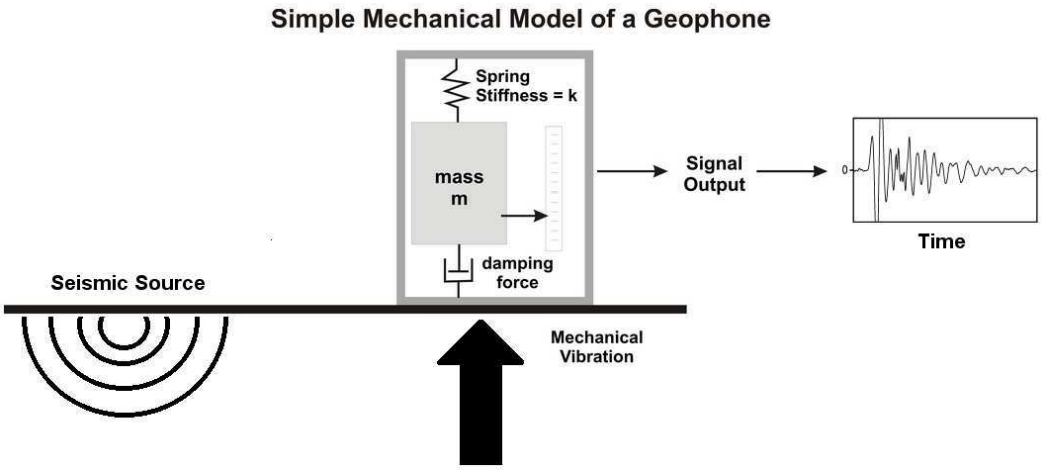


FIGURE 2.1 – Représentation schématique du fonctionnement mécanique d'un géophone.

en seconde. Le nombre de valeurs nt de cet ensemble est égal à la durée totale d'enregistrement divisée par le pas d'échantillonnage, $nt = T/dt$. Le temps t n'est pas défini de façon absolue mais donné de façon relative par rapport au moment où la source est déclenchée. Ce moment est appelé t_0 et on lui attribue la valeur nulle. On note $s(t)$ le signal au temps t et le vecteur s l'ensemble des valeurs numériques enregistrées telles que $s = (s_1, s_2, s_3, ..., s_{nt})$ représente le signal $s(t)$ échantillonné. On a donc s_i la i^{eme} composante du vecteur s telle que $s_i = s(i * dt - trig)$. A chaque déclenchement de source, une nouvelle acquisition est lancée et un ensemble de signaux est enregistré. Le nombre de signaux enregistrés, encore appelés sismogrammes, est égal au nombre de sources multiplié par le nombre de récepteurs.

On représente généralement les sismogrammes acquis à la verticale pour une source donnée, ordonnés en fonction de la distance entre le récepteur et la source. Cette visualisation permet alors de mettre en valeur la propagation de l'onde en fonction de la distance. Sur la figure 2.2 une représentation des sismogrammes pour une source située entre les récepteurs 62 et 63 est illustrée. Cette représentation permet d'obtenir une première estimation de la distribution spatiale des propriétés du milieu. On peut notamment remarquer sur cette figure que la vitesse de propagation des ondes de première arrivée n'est pas linéaire en fonction de la distance, en d'autres termes que la vitesse de propagation dans le milieu n'est pas constante, ainsi qu'une dissymétrie de part et d'autre de la source qui témoigne de la dissymétrie des propriétés physiques du milieu.

Le format généralement utilisé pour le stockage des données sismiques est le format SEG-Y. Il correspond à une des normes élaborées par la Société des géophysiciens d'exploration (SEG) (Barry et al., 1975). Ce format permet entre autres de garder dans un même fichier l'ensemble des sismogrammes d'une acquisition sismique avec, pour chaque sismogramme, un en-tête permettant de décrire les conditions d'acquisition telles que la position de la source, la position du récepteur, le pas d'échantillonnage temporel, le temps d'enregistrement T, ou encore le trigger $trig$. Stockwell Jr (1997) introduit quelques années plus tard le format SU qui permet l'utilisation de nombreuses fonctions développées dans le cadre de la création d'un logiciel libre (Seismic Unix) très pratique et largement utilisé par la communauté.

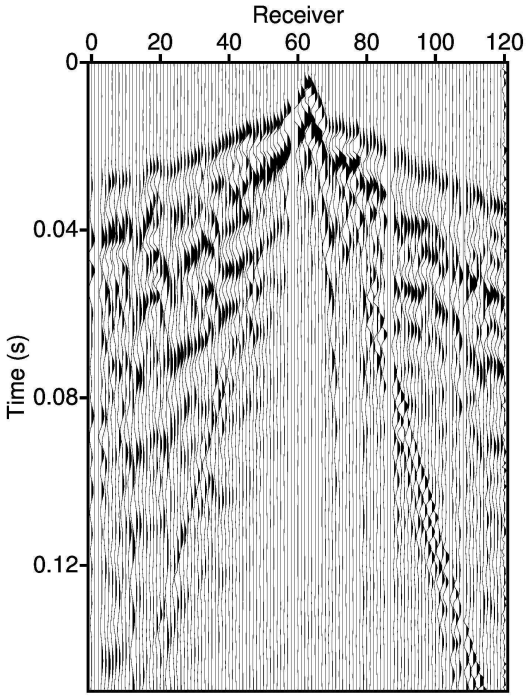


FIGURE 2.2 – Exemple de traces sismiques enregistrées pour un point de tir lors de la campagne sismique haute résolution 2011 sur la Station Expérimentale de Tournemire. En abscisse le numéro du récepteur, en ordonnée le temps en seconde depuis le déclenchement de la source.

2.1.3 Le pointé des temps de première arrivée

Une analyse des signaux sismiques mesurés lors de la campagne d'acquisition est nécessaire pour obtenir les temps de première arrivée. L'objectif de cette étape, appelée le pointé, est de localiser sur le sismogramme le temps minimum pour lequel le signal enregistré est issu de la source sismique. Yilmaz (2001) souligne que la qualité de la tomographie réalisée est étroitement liée à la qualité de ce pointé. Aujourd'hui, le pointé automatique reste encore difficile et notamment lorsque les données sont acquises sur des milieux dont la proche surface est complexe ou encore lorsque le rapport signal sur bruit est faible. Il est courant que le pointé soit réalisé manuellement par une inspection visuelle des sismogrammes. Cette stratégie très coûteuse en temps donne une entière liberté à l'appréciation de l'opérateur qui pourra néanmoins utiliser des critères précis pour garantir une cohérence dans l'évaluation de ces temps. Une stratégie alternative consiste à utiliser un algorithme automatique ou semi-automatique dans un premier temps puis à corriger les résultats par inspection visuelle.

On trouvera dans la littérature de nombreuses techniques basées sur la corrélation des traces adjacentes (Peraldi & Clement, 1972). Ces techniques montrent cependant leurs limites lorsque des changements trop importants de la forme du signal apparaissent entre les traces ou en présence de traces mortes (récepteurs défaillants). D'autres approches ont mis l'accent sur la détection d'une augmentation soudaine de l'énergie du signal (Coppens, 1985). Comme indiqué par Coppens (1985), cette méthode est très robuste lorsque le rapport signal sur bruit est suffisamment élevé. D'autres méthodes impliquent l'utilisation de statistiques d'ordre supérieur (Yung & Ikelle, 1997). On trouvera également des approches fondées sur l'analyse de dimension fractale (Boschetti et al., 1996b; Jiao & Moon, 2000), ou encore sur la transformée en ondelettes (Tibuleac et al., 2003). Lorsque le bruit de fond est élevé et la qualité des données est médiocre, ces techniques ont cependant tendance à échouer et le problème de l'obtention d'un pointé automatique cohérent et fiable n'est toujours pas résolu.

2.2 Algorithme de pointé automatique

Dans cette section je propose de considérer certaines de ces méthodes choisies pour leur simplicité d'implémentation et leur faible coût de calcul. Afin d'illustrer ces méthodes, nous utiliserons ici les données réelles de l'acquisition réalisée sur la Station Expérimentale de Tournemire, présentée en détail dans le chapitre 6.

2.2.1 Energy Ratio

L'énergie d'un signal est définie comme égale à l'intégrale du carré du signal sur le temps. Le calcul de l'énergie E d'un signal donné sous sa forme discrète est alors égale à la somme des carrés de ses valeurs, $\mathsf{E} = \sum_i s_i^2$. L'énergie est fonction de la longueur du signal et augmente au cours du temps. On pourra alors calculer l'évolution de l'énergie au cours du temps telle que $\mathsf{E}(it) = \sum_{i=1}^{i=it} s_i^2$, avec $it = 1, ..., nt$ si nt représente le nombre de valeurs contenues dans $\mathbf{s}$.

2.2.1.1 Coppens Method

L'énergie du signal est fonction de son amplitude, et c'est pourquoi Coppens (1985) propose de distinguer le signal issu de la source du bruit de fond en termes de leur différence d'énergie (fig. 2.3). Pour ce faire, l'énergie $\mathsf{E}_1(t)$ du signal est calculée dans une première fenêtre appelée Leading Window (eq. 2.1). La longueur de cette fenêtre est fixée à tw

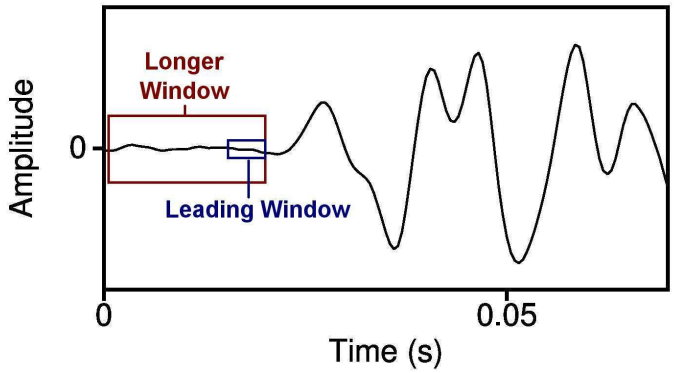


FIGURE 2.3 – Illustration schématique des fenêtres utilisées pour le calcul du temps de première arrivée de la méthode **Energy Ratio** proposée par Coppens (1985).

secondes et est composée de nl échantillons. L'énergie $\mathsf{E}_2(t)$ est calculée dans une deuxième fenêtre appelée Longer Window (eq. 2.2). La longueur de cette seconde fenêtre augmente en fonction du temps et est égale à t secondes et est composée de it échantillons. Le calcul du rapport de ces deux énergies permet de définir la fonction caractéristique de cette méthode qui est l'Energy Ratio $\mathsf{E}_r(t)$ (eq. 2.3). Le temps de première arrivée est obtenu en localisant le temps correspondant à l'abscisse du maximum de cette fonction (eq 2.4). Cette méthode ne permet pas de retrouver précisément le temps de première arrivée cependant elle permet d'en obtenir une bonne estimation lorsque le rapport signal sur bruit est grand (Coppens, 1985). Un exemple est donné sur la figure 2.4 avec en haut à gauche le signal analysé. D'après Coppens (1985) la longueur de la Leading Window doit être calculée en fonction de la période du signal de première arrivée. Comme le montre cet exemple une bonne approximation du temps de première arrivée est obtenue en fixant la longueur de la Leading Window à $nl = 10$ échantillons, correspondant à la moitié de la période de l'onde de première arrivée. Les énergies $\mathsf{E}_1(t)$ et $\mathsf{E}_2(t)$ sont également représentées et l'on peut voir le rapport de ces deux énergies sur le graphe de $\mathsf{E}_r(t)$. Le temps pour lequel ce rapport est maximum permet de définir le temps de première arrivée qui est représenté sur le signal par une étoile rouge. Comme stipulé dans la littérature, cet exemple illustre un pointé peu précis mais permet néanmoins une approximation du temps de première arrivée.

Energy Ratio (Coppens, 1985)

$$\textbf{Leading Window Energy : } \mathsf{E}_1(t) = \sum_{i=t-nl+1}^{t} s_i^2 \tag{2.1}$$

$$\textbf{Longer Window Energy : } \mathsf{E}_2(t) = \sum_{i=1}^{t} s_i^2 \tag{2.2}$$

$$\textbf{Energy Ratio : } \mathsf{E}_\mathsf{r}(t) = \frac{\mathsf{E}_1(t)}{\mathsf{E}_2(t)} \tag{2.3}$$

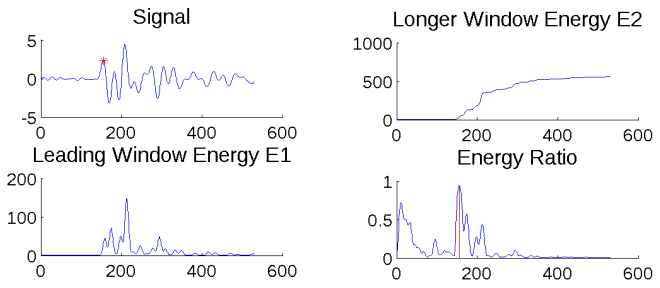


FIGURE 2.4 – Exemple illustrant le pointé automatique réalisé avec la méthode **Energy Ratio** proposée par Coppens (1985).

First Arrival time

$$\mathsf{t_p}\ ,\ \forall t\ \mathsf{E_r}(\mathsf{t_p}) \geq \mathsf{Er}(t) \tag{2.4}$$

2.2.1.2 Modified Coppens's Method

Sabbione & Velis (2010) proposent une modification de l'algorithme de Coppens en ajoutant d'abord une constante de stabilisation β à l'énergie de la plus grande fenêtre afin de réduire les fluctuations rapides de $\mathsf{E_r}(t)$ qui apparaissent notamment lorsque la dimension de la Longer Window est petite (eq 2.5). L'application d'un filtre EPS (Edge-preserving smoothing, (Luo et al., 2002)) permet ensuite de mettre en valeur la variation d'énergie dans le signal de façon plus nette (eq 2.6). La fonction caractéristique de cette méthode est calculée en dérivant le rapport des énergies filtré par rapport au temps. Le critère utilisé pour localiser le temps de première arrivée considère le temps associé au maximum de cette fonction caractéristique (eq 2.10). Cette méthode considère alors trois paramètres : la taille de la première fenêtre nl, la dimension ns du filtre EPS, et le coefficient de stabilisation β. Sabbione & Velis (2010) proposent de fixer nl et ns en fonction de la période p de l'onde de première arrivée ($nl = 1p$, et $ns = 2p$) et proposent $\beta = 0.2$ d'après les tests qu'ils ont pu réaliser.

Modified Coppens's Method (Sabbione & Velis, 2010)

$$\textbf{Modified Coppens's Method :}\ \mathsf{MCM}(t) = \frac{\mathsf{E}_1(t)}{\beta + \mathsf{E}_2(t)} \tag{2.5}$$

$$\textbf{EPS Filter :}\ \mathsf{MCM}_{eps}(t) = \overline{\mathsf{MCM}_A(t)}, \tag{2.6}$$

$$\forall a \in [1, ns]\ \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{j=1}^{ns}(\mathsf{MCM}_A(t,j) - \overline{\mathsf{MCM}_A(t)})^2} \leq \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{j=1}^{ns}(\mathsf{MCM}_a(t,j) - \overline{\mathsf{MCM}_a(t)})^2} \tag{2.7}$$

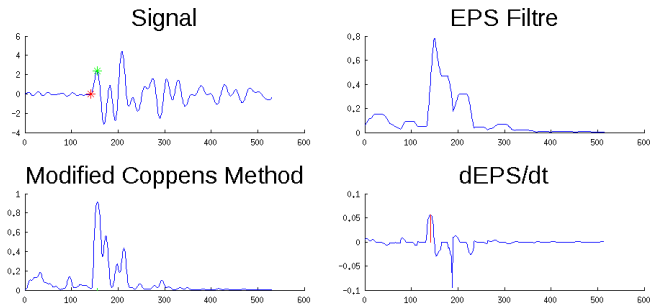


FIGURE 2.5 – Pointé automatique réalisé avec la méthode **Modified Coppens's Method** proposée par Sabbione & Velis (2010)

$$\text{avec } \mathsf{MCM}_a(t,j) = \mathsf{MCM}(t+a-ns+j-1) \tag{2.8}$$

$$\mathsf{MCM}_a(t) = (\mathsf{MCM}_a(t,1),...,\mathsf{MCM}_a(t,j),...,\mathsf{MCM}_a(t,ns))^t \tag{2.9}$$

First Arrival time

$$\mathsf{t_p}\ ,\ \forall t\ \frac{d\ \mathsf{MCM}_{eps}(\mathsf{t_p})}{dt} \geq \frac{d\ \mathsf{MCM}_{eps}(t)}{dt} \tag{2.10}$$

La figure 2.5 illustre un exemple de pointé réalisé avec cette méthode. Le signal analysé est représenté en haut à gauche de l'image. Le rapport des énergies est illustré en bas à gauche ainsi que sa forme filtrée après le passage de l'algorithme EPS sur le graphe en haut à droite. La fonction caractéristique est représentée en bas à droite, avec en rouge le maximum de cette fonction qui est associé au temps de première arrivée. Sur le signal on peut voir en vert le pointé réalisé par la méthode de Coppens (1985) et en rouge celui obtenu par la Modified Coppens Method proposée par Sabbione & Velis (2010). Cet algorithme permet un pointé plus précis, mais nécessite cependant plus de calculs.

2.2.2 Entropy Method

Le terme entropie a été introduit par Rudolf Clausius et est dérivé d'un mot grec signifiant « transformation ». Il caractérise le degré d'organisation ou d'information d'un système, mais possède également de nombreuses significations. En théorie de l'information l'entropie est introduite par Shanon en 1948 et porte parfois son nom : entropie de Shanon. Pour un signal l'entropie correspond au nombre minimum de bits nécessaires pour coder ce signal sans perdre d'information (Herbulot, 2007). Plus le signal est redondant plus son entropie est faible. Sabbione & Velis (2010) proposent une méthode de pointé basée sur le calcul de l'entropie des courbes, un concept utilisé par Denis & Crémoux (2002) dans le cadre de la segmentation du temps ou de la série spatiale. Dans leurs travaux, l'entropie d'une courbe est considérée comme une mesure de la variabilité de la structure et de la corrélation d'une série temporelle. Ceci permet de détecter des changements dans les propriétés statistiques du signal. Le temps de première arrivée associé à un changement rapide des propriétés statistiques du signal peut alors être localisé par une variation de l'entropie. La série temporelle considérée est approchée par la somme des valeurs absolues des dérivées premières du signal. Le calcul de l'entropie est alors estimé par $\mathsf{H}(t)$ dans une fenêtre mobile de longueur nh fixée et dont la valeur est attribuée au dernier point de la fenêtre (eq 2.11). Il est à noter que lorsque la fenêtre mobile est trop courte les variations d'entropie sont

importantes tout le long du signal. D'autre part, si elle est trop longue, la précision obtenue sur le temps est diminuée. Le choix de nh pourra être réalisé en fonction de la durée du signal de première arrivée. Sabbione & Velis (2010) proposent d'après les tests qu'ils ont pu réaliser de choisir nh égale à deux fois la période principale du signal de première arrivée ainsi que l'application d'un filtre EPS (eq. 2.12) afin de renforcer la précision du temps pour lequel le changement d'entropie est le plus fort. Le temps de première arrivée est ainsi obtenu en localisant le maximum de la dérivée temporelle de l'entropie filtrée (eq. 2.16).

Entropie Method

$$\mathsf{H}(t) = \log\left(\frac{1}{nh}\sum_{i=t-nh+1}^{t-1}|s_{i+1}-s_i|\right) \tag{2.11}$$

$$\textbf{EPS Filter :}\ \mathsf{H}_{eps}(t) = \overline{\mathsf{H}_A(t)}, \tag{2.12}$$

$$\forall a \in [1, ns]\ \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{j=1}^{ns}(\mathsf{H}_A(t,j) - \overline{\mathsf{H}_A(t)})^2} \leq \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{j=1}^{ns}(\mathsf{H}_a(t,j) - \overline{\mathsf{H}_a(t)})^2} \tag{2.13}$$

$$\text{avec } \mathsf{H}_a(t,j) = \mathsf{H}(t+a-ns+j-1) \tag{2.14}$$

$$\mathsf{H}_a(t) = (\mathsf{H}_a(t,1), ..., \mathsf{H}_a(t,j), ..., \mathsf{H}_a(t,ns))^t \tag{2.15}$$

First Arrival time

$$\mathsf{t_p}\ ,\ \forall t\ \frac{d\ \mathsf{H}_{eps}(t)(\mathsf{t_p})}{dt} \geq \frac{d\ \mathsf{H}_{eps}(t)(t)}{dt} \tag{2.16}$$

La figure 2.6 illustre le résultat du pointé obtenu par cette méthode pour le signal précédemment considéré. Sur la figure, le signal, l'entropie et l'entropie filtrée par l'algorithme EPS sont représentés respectivement en haut à gauche, en haut à droite et en bas à gauche. La fonction caractéristique dont le maximum est représenté en rouge permet la localisation du temps de première arrivée. Ce temps pointé est illustré sur le signal par l'étoile rouge. Cette méthode donne pour cet exemple un pointé confondu avec celui obtenu par la Modified Coppens Method.

2.3 Implémentation du code de pointé PickFirst

2.3.1 Motivation

Les méthodes de pointé automatique précédemment présentées nécessitent le contrôle visuel d'un opérateur. En effet ces méthodes sont essentiellement basées sur les propriétés statistiques et énergétiques des signaux et ne considèrent ni la géométrie d'acquisition ni les propriétés physiques du milieu. De telles approches peuvent conduire à un pointé physiquement improbable. Le contrôle visuel permet alors d'évaluer si le pointé réalisé peut

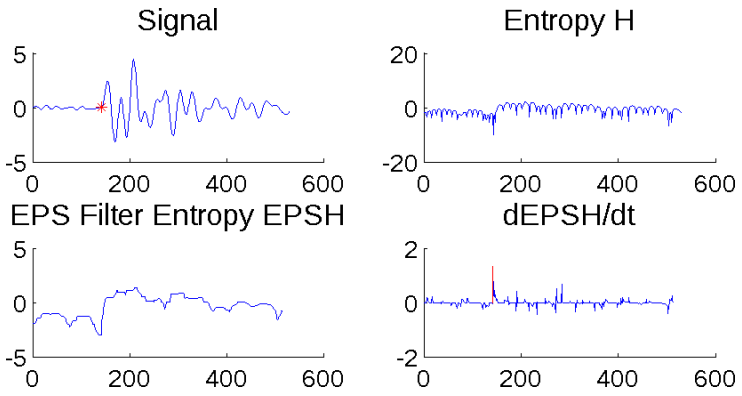


FIGURE 2.6 – Exemple de pointé automatique réalisé en utilisant l'Entropy Method (Sabbione & Velis, 2010)

correspondre ou non au temps de première arrivée. Pour cela l'opérateur utilise des critères que nous avons tenté de formuler :

- **Critère n°1 :** Les temps pointés correspondent à des vitesses apparentes qui peuvent être expliquées par les propriétés de vitesse de propagation des ondes des structures qui composent le milieu étudié,
- **Critère n°2 :** La puissance de la source est suffisamment importante pour que l'onde de première arrivée puisse être remarquée,
- **Critère n°3 :** Les temps pointés sont spatialement cohérents.

Afin d'ajouter un caractère plus représentatif de la physique de l'acquisition nous avons choisi d'ajouter l'implémentation de ces critères dans les processus de pointé automatique présentés précédemment.

2.3.2 Algorithme

A partir du critère n°1 utilisé lors du contrôle visuel nous avons choisi de considérer deux modèles de vitesse a priori, un rapide et un lent. Les temps de première arrivée théoriques sont calculés à l'aide du code de résolution du problème direct (voir chapitre 3) pour ces deux modèles. Ils permettent de déterminer un intervalle de temps I_{t_p} borné par le temps théorique t_{min} calculé dans le modèle rapide et le temps théorique t_{max} calculé dans le modèle lent pour chacun des sismogrammes. Il est alors possible d'introduire une contrainte supplémentaire dans l'algorithme de pointé automatique. Le temps de première arrivée t_p est physiquement explicable si $t_p \subset \mathsf{I}_{t_p}$. Le pointé du temps de première arrivée peut être impossible si la puissance de la source est trop faible, et l'onde trop fortement atténuée le long de sa trajectoire. Nous avons choisi ici d'évaluer le critère n°2 de façon automatique en fonction de la distance séparant le récepteur de la source. Le critère n°3 est partiellement contenu dans le premier. Cependant il reste difficile de l'introduire intégralement de façon simple et rapide. En effet ce critère nécessite la connaissance des temps de première arrivée des sismogrammes des récepteurs voisins et complexifie son implémentation. Nous avons choisi d'utiliser ce critère comme un critère de vérification automatique a postériori. Les temps pointés spatialement incohérents sont en effet spécifiés et peuvent par la suite être éliminés, confirmés ou corrigés. Le choix de la méthode (Entropy ou Modified Coppens's Method) est laissé libre à l'utilisateur qui pourra également comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes et identifier les pointés redondants ou incohérents.

Algorithme du code PickFirst

```
! Boucle sur les sources
do is=1:nbs

   ! Definition de l'intervalle Itp
   tmin = call SolveEik3D(ps(is),pr,velmax)
   tmax = call SolveEik3D(ps(is),pr,velmin)

   ! Boucle sur les recepteurs
   do ir=1:nbr

     ! Evaluation de la distance source-recepteur
     if (dist(pr,ps) < criticalDistance(is,ir))

       ! Calcul du temps de premiere arrivee
       pickedTime(is,ir) = call Pick(Sismo(is,ir),tmin(ir),tmax(ir))

     end

   end
   ! Fin de Boucle sur les recepteurs

end
! Fin de la Boucle sur les sources


! Listes des pointes pour lesquels l'incoherence spatiale invite
!  a realiser un controle visuel
verifiedPick = call SpatialCoheVerification(pickedTime,ps,pr)
```

FIGURE 2.7 – PickFirst : Algorithme de pointé automatique permettant l'évaluation d'un critère physique et l'analyse des attributs du signal.

Les étapes du pointé (figure 2.7) :

- La première étape consiste à calculer l'intervalle de temps I_{tp}. Il est obtenu par la résolution de l'équation eikonal détaillée dans le chapitre 3 dans les modèles de vitesse rapide et lent permettant le calcul respectif des bornes inférieure t_{min} et supérieure t_{max}. Ces modèles de vitesse sont donnés en entrée de la méthode.
- La seconde étape considère une méthode de pointé classique basée sur une propriété statistique ou énergétique du signal. Dans le cas de la Modified Coppens Method, il s'agit de calculer la fonction caractéristique définie par la dérivée de l'énergie ratio filtrée par l'algorithme EPS. Dans le cas de l'Entropy Method la fonction caractéristique est évaluée par la dérivée de l'entropy filtrée par l'algorithme EPS. Le temps de première arrivée est ensuite localisé par le critère de la méthode choisie qui correspond pour ces deux méthodes à la recherche du maximum de la fonction caractéristique et limité par le critère n°1. En d'autres termes il s'agit de localiser le maximum de la fonction caractéristique contenu dans l'intervalle I_{t_p}.
- La dernière étape est l'étape de vérification. Elle consiste à calculer le gradient spatial des temps pointés. Les temps pour lesquels le gradient des temps est supérieur à la moyenne des gradients sont alors spécifiés.

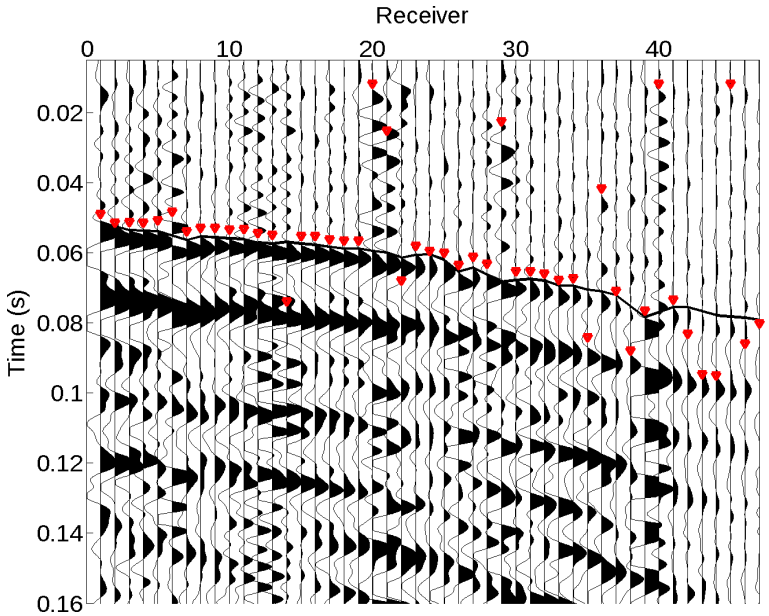
2.3.3 Applications

Afin de mettre en images les améliorations proposées par le code de pointé PickFirst, on considère ici les sismogrammes des données réelles de l'acquisition Surface-Tunnel réalisée en 2013 sur la Station Expérimentale de Tournemire et présentée en détail dans le chapitre 6. On présente ici les sismogrammes de deux sources, l'une réalisée à une distance importante du dispositif d'acquisition et l'une plus proche, afin d'évaluer l'algorithme dans un cas où le signal sur bruit est grand mais aussi dans un cas où celui-ci est faible (fig. 2.8). Nous illustrerons ici la Modified Coppens's method qui s'est montrée plus adaptée au traitement de ces données que l'Entropy Method. Ceci pouvant être expliquer par l'application d'un filtre sur les données, atténuant la variation d'entropie entre le bruit et le signal. Les pointés sont réalisés dans un premier temps avec la méthode originale puis dans un second temps par l'algorithme PickFirst considérant les critères définis précédemment. La figure 2.8 présente par les triangles rouges les pointés obtenus par la Modified Coppens's Method pour les deux sources de cette acquisition ainsi que le pointé manuel en noir. La figure 2.9 présente les étapes supplémentaire implémentées dans le code PickFirst, à savoir le calcul des temps de première arrivée théoriques dans deux modèles définis a priori avec des propriétés de vitesse du milieu qui permettront un pointé plus fiable prenant en compte les caractéristiques géométriques et physiques du milieu. Sur la figure 2.10, on peut constater les améliorations apportées par ces nouveaux critères notamment lorsque le rapport signal sur bruit est important mais également lorsque celui-ci est plus faible. L'algorithme de vérification de la cohérence permet de cibler les pointés les moins fiables de façon pertinente.

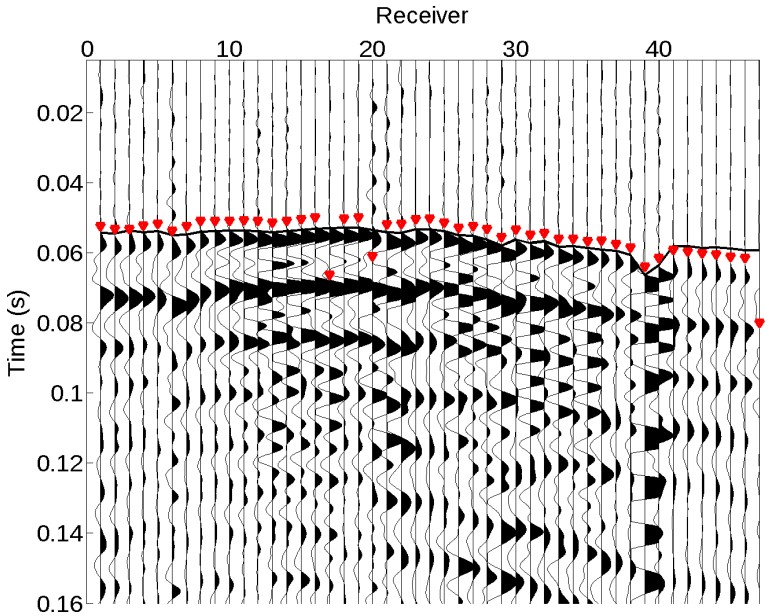
2.3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, après avoir présenté les principaux éléments d'une campagne sismique et introduit les données utilisées à savoir les temps de première arrivée, nous avons vu deux méthodes pour la réalisation d'un pointé automatique. Ces méthodes fondées sur l'énergie et l'entropie des signaux ne tiennent compte ni de la physique du milieu ni de la géométrie d'acquisition. Nous avons vu ici qu'il est possible d'améliorer les performances de ces algorithmes en ajoutant des critères physiques. Ces améliorations ont été implémentées dans le code PickFirst qui permet le traitement des données sismiques dans leur format original su ou segy.

L'implémentation de ce nouvel algorithme nous a permis d'obtenir un outil facilitant le pointé des temps de première arrivée qui a pu être utilisé pour l'analyse des données réelles traitées au cours de cette thèse. Cet outil reste néanmoins très basique et de multiples améliorations peuvent être réalisées. L'évaluation du critère n°2 simplement basé sur la distance source récepteur, pourrait être évaluée en fonction de la géométrie d'acquisition ainsi que des propriétés atténuantes du milieu. Le critère n°3 sur la cohérence spatiale entre les temps pointés pourrait également être évalué en fonction de la similitude de la forme d'onde, et pourrait être inclus dans l'algorithme comme une contrainte et non comme un critère de vérification.

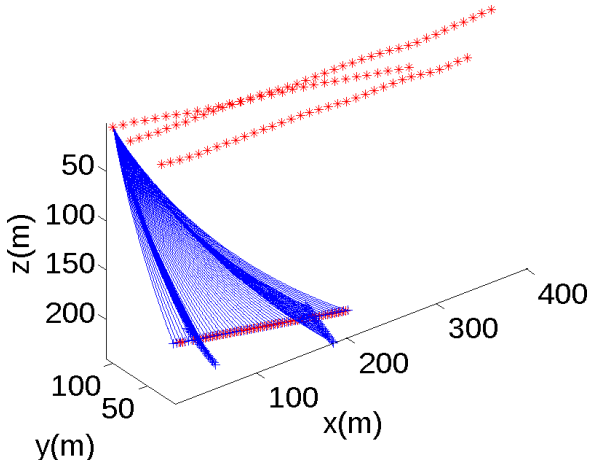


(a) Source N 1 , Modified Coppens Method

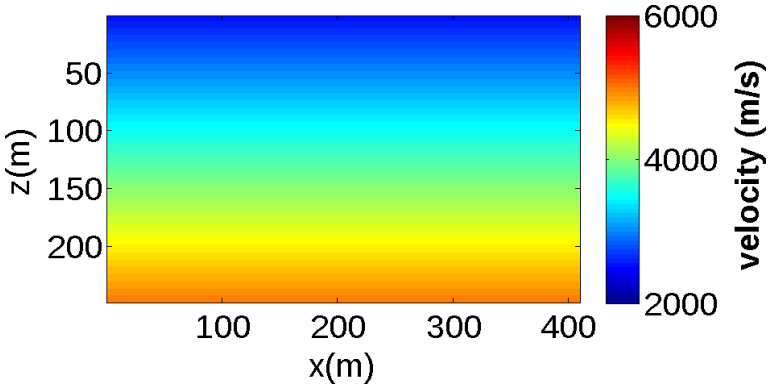


(b) Source N 14 , Modified Coppens Method

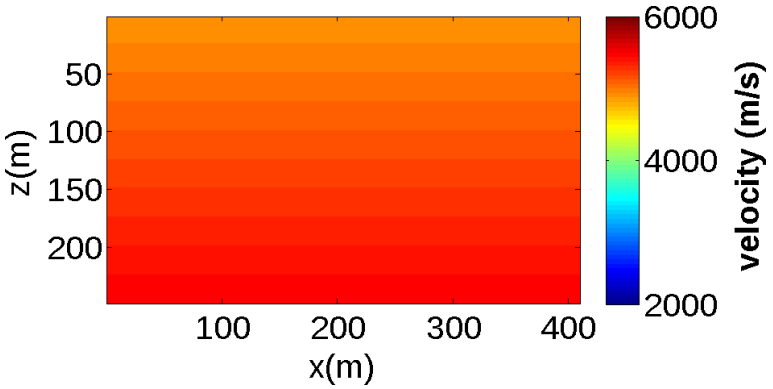
FIGURE 2.8 – Pointés automatique obtenus par la Modified Coppens Method illustrés par les triangles rouges sur les données réelles de la campagne Surface-Tunnel, avec en noir les temps pointés manuellement.



(a) Ray Path

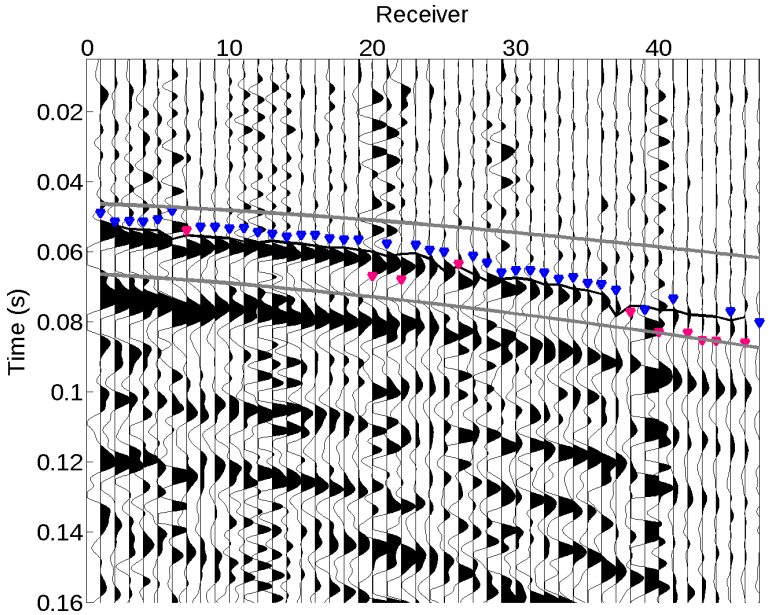


(b) Low Velocity Model

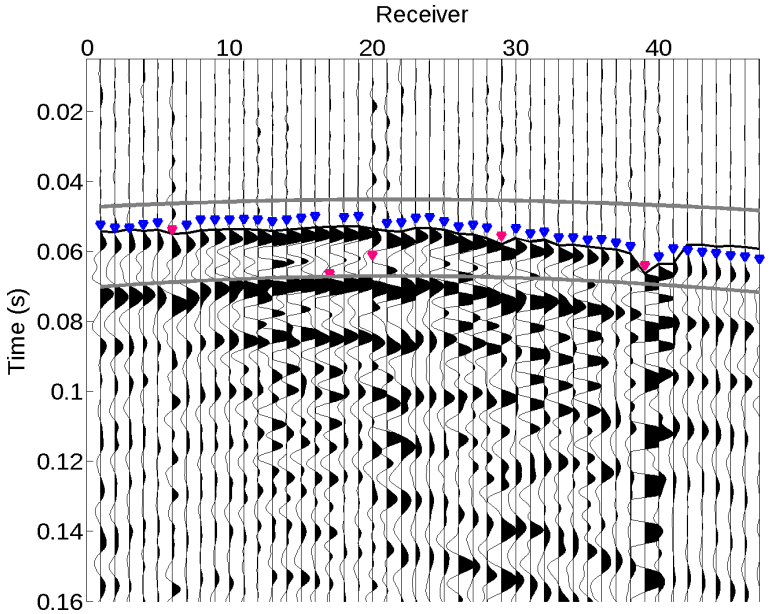


(c) Fast Velocity Model

FIGURE 2.9 – PickFirst : Première étape pour l'évaluation d'un critère physique sur le pointé. (a) La géométrie du dispositif d'acquisition est prise en compte ainsi que la trajectoire des rais dans un modèle a priori. Un intervalle de temps I_{t_p} est défini par les temps calculés dans un modèle de vitesse a priori lent (b) et un modèle de vitesse a priori rapide (c).



(a) Source N 1 , PickFirst using Modified Coppens Method



(b) Source N 14 , PickFirst using Modified Coppens Method

FIGURE 2.10 – PickFirst : Pointé automatique avec en gris les limites de l'intervalle physique, en noir le pointé manuel, et en bleu les temps de première arrivée obtenus par l'algorithme PickFirst. Les temps pointés en rose correspondent aux temps pour lesquels des discontinuités fortes ont été remarquées par l'algorithme lors de l'étape de vérification.

Chapitre 3

Problème direct

Modélisation des temps de première arrivée

Sommaire

3.1 De la propagation d'une onde à l'équation eikonale 43
3.2 Résolution par la méthode des différences finies 44
3.2.1 Propagation des temps sur la grille 45
3.2.2 Extrapolation des temps 45
3.2.3 Extrapolation des temps autour de la source 47
3.2.4 Implémentation du code SolveEik3D 48
3.3 Tracé de rais 54
3.3.1 Tracé de rais a posteriori 54
3.3.2 Implémentation du code RayPath3D 54
3.3.3 Validation et exemples 55
3.4 Conclusions 58

L'inversion des temps de première arrivée nécessite la résolution du problème direct. Celui-ci consiste à établir une relation entre les propriétés de lenteur (inverse de la vitesse) de l'objet et les temps de première arrivée. Plus précisément la résolution du problème direct consiste, après avoir établi un modèle supposé des propriétés physiques du sous-sol, à simuler la campagne d'acquisition et générer des données théoriques. Dans ce chapitre, après avoir présenté l'équation eikonale, qui permet le calcul des temps de première arrivée en fonction des propriétés de vitesse du milieu, nous présentons la méthode de résolution par différences finies que nous avons implémentée dans le code SolveEik3D d'après l'algorithme proposé par Noble et al. (2014). Nous présentons ici le détail de la résolution numérique ainsi que l'évaluation de la méthode dans les cas où une solution analytique existe. Nous verrons dans le chapitre 4 qu'il est nécessaire de connaître les trajectoires des rais pour l'inversion des temps de première arrivée. Dans ce chapitre, la méthode utilisée et implémentée dans le code RayPath3D pour la reconstruction de ces trajectoires est présentée.

3.1 De la propagation d'une onde à l'équation eikonale

La propagation d'une onde dans un milieu est fonction de ses propriétés physiques. Le développement des équations permettant la description de la propagation des ondes se trouve dans de nombreux ouvrages tels que Duvaut (1998); Sheriff & Geldart (1982); Chapman (1985) ou encore Cerveny (2005) et ne sera pas exposé ici. On trouve notamment dans la thèse de Belayouni (2013) le développement des équations et la description des lois et hypothèses utilisées, depuis le principe fondamental de la dynamique jusqu'à l'obtention de l'équation eikonale. Cette équation permet de mettre en relation la vitesse de propagation des ondes du milieu et les temps de trajet, en faisant l'approximation des hautes fréquences. Il est important de rappeler que, pour être valable, cette approximation doit être réalisée

dans le cas où la longueur d'onde du signal qui se propage dans le milieu est négligeable devant la longueur d'onde caractéristique des structures du milieu étudié. En utilisant les lois de la mécanique des milieux continus et après avoir fait l'approximation que la perturbation engendrée par la source peut être modélisée par une onde acoustique haute fréquence, on estime les temps de première arrivée solutions de l'équation eikonale 3.1.

Equation eikonale :

$$|\nabla T|^2 = s^2 \tag{3.1}$$

avec T le temps de première arrivée et s la lenteur du milieu.

Le temps de première arrivée est fonction de la position spatiale $\mathbf{x}$ considérée. Les surfaces définies par l'ensemble des $\mathbf{x}$ tels que $T(\mathbf{x}) = t$ sont des surfaces d'isovaleur de temps de première arrivée et correspondent à la description du front d'onde au temps t. Les courbes spatialement perpendiculaires aux fronts d'onde correspondent aux trajectoires des ondes de première arrivée et sont appelées les rais. La résolution de cette équation aux dérivées partielles de premier ordre peut être réalisée de façon analytique pour des modèles de vitesses simples. Dans le cas d'un modèle plus complexe il est nécessaire de recourir aux méthodes numériques. Deux types de méthodes sont couramment utilisées :

- Le tracé de rais (Julian & Gubbins, 1977; Červenỳ & Hron, 1980; Um & Thurber, 1987).
- La résolution de l'équation eikonale par différences finies (Reshef & Kosloff, 1986; Vidale, 1988; Podvin & Lecomte, 1991).

Nous avons choisi ici de nous intéresser à la seconde méthode qui possède l'avantage d'obtenir une résolution spatialement régulière des temps de première arrivée. Plusieurs solveurs de l'équation eikonale par différences finies ont été développés au premier ordre (Vidale, 1990, 1988; Podvin & Lecomte, 1991; van Trier & Symes, 1991; Hole & Zelt, 1995; Kim & Cook, 1999; Koketsu et al., 2000; Kim, 2002; Qian & Symes, 2002; Zhang et al., 2005; Fomel et al., 2009), ainsi que pour des ordres supérieurs (Kao et al., 2004; Zhang et al., 2006b; Luo & Qian, 2011; Luo et al., 2012). Ici nous avons choisi d'utiliser la méthode de résolution de l'équation eikonale par différences finies proposée par Noble et al. (2014) développée et exposée dans le manuscrit de Belayouni (2013). Dans le paragraphe suivant je décris plus en détail cette méthode.

3.2 Résolution par la méthode des différences finies

Le milieu est représenté par un modèle de vitesse discrétisé par un maillage cartésien. La vitesse de propagation est considérée homogène dans chacune des mailles. Le temps de première arrivée est calculé en tout point de la grille par extrapolation des temps précédemment calculés à partir de la source. A partir du modèle de vitesse discrétisé, la méthode consiste à parcourir chacun des nœuds de la grille afin d'y calculer le temps de première arrivée à partir des temps connus. Initialement le seul temps connu est situé au point de la source initié a zéro. C'est donc à partir de ce temps que les autres temps de la grille vont pouvoir être calculés. L'implémentation du calcul des temps du reste de la grille suscite alors deux questions :

- Dans quel ordre parcourir les nœuds de la grille ?
- Comment calculer le temps d'un nœud à partir des temps déjà connus ?

3.2.1 Propagation des temps sur la grille

Les premières tentatives de Vidale (1988) pour parcourir les nœuds de la grille de calcul des temps se basent sur la considération d'anneaux carrés de plus en plus grands, centrés au niveau de la source. Le calcul est réalisé sur les points de grille adjacents à la source puis progressivement sur un carré dont la dimension augmente d'un point de grille dans chacune des directions de l'espace. Cette méthode de propagation repose sur l'hypothèse que le front d'onde s'éloigne toujours de la source. Cette hypothèse n'est cependant pas vérifier lorsque le modèle de vitesse possède de fort contraste et des erreurs sont alors introduites. Une autre approche permettant de résoudre ce problème consiste à utiliser la Fast Sweeping Method. Cette méthode largement utilisée pour la résolution numérique des équations de type Hamilton-Jacobi ou plus généralement pour des équations hyperboliques (Boué & Dupuis, 1999; Kao et al., 2004; Zhao et al., 2000; Kao et al., 2005; Zhao, 2005; Zhang et al., 2006a,b; Qian et al., 2007a,b) consiste à balayer la grille discrète suivant différentes orientations et ceci jusqu'à la convergence des calculs réalisés. Le parcours de la grille est réalisé suivant 8 balayages pour un milieu 3D (4 en 2D). Les balayages représentent l'ensemble des combinaisons possibles considérant que l'onde se propage soit dans le sens des x positifs, soit dans le sens des x négatifs et de même pour les axes y et z. On considère alors toutes les directions de propagation possibles, en ne considérant plus que le front d'onde s'éloigne toujours de la source. On notera sx le sens de propagation tel que $sx = 1$ pour une propagation vers les x positifs et $sx = -1$ pour une propagation vers les x négatifs. De la même façon, on définit sy et sz les sens de propagation respectifs le long des axes y et z. L'orientation du balayage dépend alors des trois valeurs sx, sy, et sz, chacune pouvant prendre la valeur 1 ou -1. L'ensemble des combinaisons possibles est 2^3, ce qui nous donne le nombre de balayages nécessaires. Cette série de balayages va être répétée jusqu'à convergence des temps calculés.

3.2.2 Extrapolation des temps

L'extrapolation est réalisée à partir des temps précédemment calculés et en faisant l'hypothèse que suffisamment loin de la source l'onde peut être considérée plane. La résolution de l'équation eikonale donnée par l'équation 3.1 est réalisée par différences finies. On considère une direction de balayage définie par sx, sy et sz. La grille de calcul est définie par l'ensemble des points $P(i, j, k)$ avec $i = 1, nz$, $j = 1, nx$ et $k = 1, ny$ si nx, ny, et nz représentent les nombres de points discrétisant respectivement les axes x, y, et z. Le calcul du temps au point $P(i, j, k)$ est réalisé en considèrent la lenteur dans la maille $(i - sz, j - sx, k - sy)$ noté s_m. Afin d'alléger les notations on appellera t_x le temps situé au point de grille $P(i, j - sx, k)$. On définira de la même façon t_y et t_z. On notera également t_{xy} le temps situé au point de grille $P(i, j - sx, k - sy)$. On définira de la même façon t_{xz} et t_{yz}. Et enfin t_{xyz} le temps situé au point de grille $P(i - sz, j - sx, k - sy)$.

3.2.2.1 Formulation de la dérivée par différences finies

Le calcul de la dérivée peut être réalisé de différentes façons. En fonction de la géométrie des points à partir desquels l'extrapolation du temps de première arrivée est calculée, nous utiliserons l'une des trois formulations détaillées ci-après. L'équation 3.2 propose de réaliser le calcul de la dérivée au milieu de l'arête adjacente au point courant (voir le schéma 3.1a). L'utilisation du schéma 3.3 permet de calculer la valeur de la dérivée au centre de la face adjacente au point courant (voir le schéma 3.1b). Une autre possibilité est d'utiliser le schéma 3.4 qui permet le calcul de la dérivée au centre de la maille (voir le schéma 3.1c). Les équations 3.2, 3.3 et 3.4 sont ici formulées pour le calcul de la dérivée suivant l'axe x et peuvent être exprimées de la même façon pour le calcul des dérivées suivant les axes y et z.

Les différents schémas

Dérivée au milieu de l'arrête :

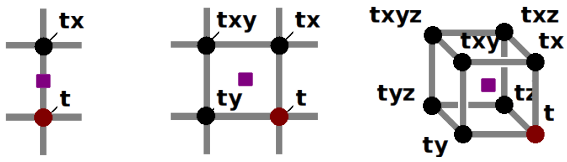
$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t - tx}{dx} \tag{3.2}$$

Dérivée au centre de la face :

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t - tx + ty - txy}{2dx} \tag{3.3}$$

Dérivée au centre de la maille :

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t - tx + ty - txy + tz - txz + tyz - txyz}{4dx} \tag{3.4}$$



(a) (b) (c)

FIGURE 3.1 – Schéma de l'approximation de la dérivée des temps par différences finies pour différentes positions dans la maille

Dans un souci de simplification de l'algorithme, ces différents schémas sont regroupés dans une formulation commune proposée par l'équation 3.5.

Formulation générale

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t - ta}{da} \tag{3.5}$$

avec da et ta définis en fonction du schéma choisi pour le calcul de la dérivée (eq. 3.2, 3.3 et 3.4)

3.2.2.2 Résolution des équations

L'équation eikonale discrétisée nous donne l'équation 3.7. Dans le cas où deux des dérivées spatiales sont nulles, la solution de l'eikonale est donnée par l'équation 3.8 . Dans le cas où une seule des trois dérivées est nulle, on utilise la solution donnée par l'équation 3.9. Dans le cas général, on utilisera la solution proposée par l'équation 3.10.

Résolution de l'equation Eikonale

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = s^2 \tag{3.6}$$

Approximation par différences finies :

$$\frac{(t-ta)^2}{da^2} + \frac{(t-tb)^2}{db^2} + \frac{(t-tc)^2}{dc^2} = s_m^2 \tag{3.7}$$

Solution d'une propagation dite 1D :

$$t = ta + da\ s_m, \tag{3.8}$$

Solution d'une propagation dite 2D :

$$t = \frac{\left(\frac{ta}{da^2} + \frac{tb}{db^2}\right) + \sqrt{s_m^2\left(\frac{1}{da^2} + \frac{1}{db^2}\right) - \frac{(ta-tb)^2}{da^2 db^2}}}{\left(\frac{1}{da^2} + \frac{1}{db^2}\right)} \tag{3.9}$$

Solution d'une propagation dite 3D :

$$t = \frac{\left(\frac{ta}{da^2} + \frac{tb}{db^2} + \frac{tc}{dc^2}\right) + \sqrt{s_m^2\left(\frac{1}{da^2} + \frac{1}{db^2} + \frac{1}{dc^2}\right) - \frac{(ta-tb)^2}{da^2 db^2} - \frac{(tb-tc)^2}{dc^2 dc^2} - \frac{(tc-ta)^2}{dc^2 da^2}}}{\left(\frac{1}{da^2} + \frac{1}{db^2} + \frac{1}{dc^2}\right)} \tag{3.10}$$

3.2.3 Extrapolation des temps autour de la source

Nous avons vu dans la partie précédente comment réaliser l'extrapolation des temps en faisant l'hypothèse de propagation d'une onde plane. Autour de la source cette hypothèse n'est pas vérifiée et c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser une autre approche. Belayouni (2013) montre que l'utilisation de la formulation de l'équation eikonale en perturbation permet le calcul de la propagation d'une onde sphérique et permet une amélioration très nette de l'estimation des temps de première arrivée autour de la source mais également pour l'ensemble de la grille puisque les erreurs se situant autour de la source sont propagées. On considère ici la formulation en perturbation de l'équation eikonale décrite par l'équation 3.11.

Equation eikonale en perturbation

$$|\nabla(T_0 + \tau)|^2 = (s_0 + \gamma)^2 \tag{3.11}$$

avec $T = T_0 + \tau$ le temps de première arrivée et $s = s_0 + \gamma$ la lenteur du milieu tels que s_0 et T_0 sont solutions de l'équation Eikonal : $|\nabla T_0|^2 = s_0^2$.

Le calcul des dérivées par différence finies se fait de la même façon que dans la partie précédente mais cette fois sur la variable τ et permet d'obtenir l'équation 3.13. L'expression de sa solution est donnée par l'équation 3.14.

Résolution de l'equation Eikonale en perturbation

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial z}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial\tau}{\partial x}\frac{\partial T_0}{\partial x} + \frac{\partial\tau}{\partial y}\frac{\partial T_0}{\partial y} + \frac{\partial\tau}{\partial z}\frac{\partial T_0}{\partial z}\right) = s^2 - s_0^2 \tag{3.12}$$

Approximation par différences finies :

$$\sum_i \left(\frac{\tau - \tau i}{di}\right)^2 + 2\frac{\tau - \tau i}{di}\frac{\partial T_0}{\partial i} = s^2 - s_0^2 \tag{3.13}$$

Solution :

$$\tau = \frac{\left(\sum_i \frac{\tau i}{di^2} - \frac{T_{0,i}}{di}\right) + \sqrt{\frac{1}{2}\left(\sum_i \frac{T_{0,i}}{di} - \frac{\tau i}{di^2}\right) - \left(\sum_i \frac{1}{di^2}\right)\left(s_0^2 - s^2 + \left(\sum_i \frac{\tau i^2}{di^2} - 2\frac{\tau i T_{0,i}}{di}\right)\right)}}{\sum_i \frac{1}{di^2}} \tag{3.14}$$

Avec $i = \{a, b, c\}$ et $T_{o,a} := \frac{\partial T_0}{\partial x}$, $T_{o,b} := \frac{\partial T_0}{\partial y}$ et $T_{o,c} := \frac{\partial T_0}{\partial z}$

3.2.4 Implémentation du code SolveEik3D

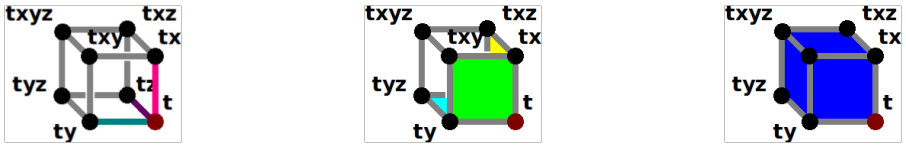
L'algorithme de résolution SolveEik3D présenté sur la figure 3.3 est largement issu des travaux de Noble et al. (2014). Les différences sont essentiellement portées sur la qualité logicielle. Ce nouveau code a de meilleures performances ainsi qu'une meilleure maintenabilité. Les temps de calcul sont amoindris, l'algorithme y est plus clair et les calculs redondants sont formulés en terme de fonction ce qui limite le risque d'erreurs. Le calcul du gradient des temps utilisé pour le tracé de rais a posteriori y est également intégré.

Cet algorithme comprend une première étape d'initialisation réalisée en utilisant la formulation en perturbation présentée dans le paragraphe précédent. Cette partie n'est pas détaillée puisqu'elle s'effectue de la même façon, à savoir en réalisant une série de balayages. À la seule différence que celle-ci n'est réalisée qu'une seule fois et dans un périmètre restreint autour de la source. Cette étape est essentielle pour le calcul des temps situés à proximité de la source pour lesquels l'approximation de propagation d'onde plane n'est pas justifiée. Après cette étape, le cœur de l'algorithme présentée sur la figure 3.3 comprend une première boucle permettant d'évaluer la convergence des temps de première arrivée. La condition de sortie de cette boucle est que les temps calculés à la fin des opérations contenues dans cette boucle soient identiques à ceux évalués à l'entrée. Dans cette boucle, une seconde boucle assure la réalisation des balayages à partir de la position de la source en suivant les 8 différentes directions de l'espace possibles. L'extrapolation des temps est implémentée à l'intérieur de ces deux boucles. Pour chaque point de grille $P(i, j, k)$, le temps de première arrivée calculé à partir de 7 propagations possibles est actualisé si un temps plus grand avait été préalablement attribué à ce point. Les 7 propagations considérées sont les suivantes :

- 3 propagations dites 1D, fig. 3.2a : L'extrapolation est réalisée à partir d'un seul temps t_a de grille. On utilise alors la solution proposée par l'équation 3.8 implémentée dans la fonction 1DTime. Dans l'algorithme implémenté nous réalisons ce calcul à partir des trois temps t_x, t_y, et t_z.
- 3 propagations dites 2D, fig. 3.2b : L'extrapolation est réalisée à partir des temps situés sur plusieurs points de grille se situant dans un plan commun au point courant $P(i, j, k)$. On utilise alors la solution proposée par l'équation 3.9 implémentée dans la fonction 2DTime. Les dérivées peuvent alors être calculées sur les arêtes en utilisant le schéma proposé par l'équation 3.2 ou au centre de la face si on utilise le schéma proposé par l'équation 3.3. D'après les travaux de Belayouni (2013) le calcul des dérivées établi au centre des faces permet un calcul plus précis et c'est pourquoi nous considérons ici uniquement ce cas. Trois temps sont alors calculés. Le premier calculé à l'aide des temps

t_x, t_y et t_{xy}, le second à l'aide des temps t_x, t_z et t_{xz}, et enfin le troisième à l'aide des temps t_y, t_z et t_{yz}.

- 1 propagation dite 3D, fig. 3.2c : L'extrapolation est réalisée à partir des temps situés sur des points de grille ne se situant ni sur une droite ni sur un plan commun au point courant $P(i, j, k)$. On utilise alors l'équation 3.10 implémenté dans la fonction 3DTime. Le calcul des dérivées peut à nouveau être calculé sur les arêtes, au centre des faces ou au centre de la maille. D'après les travaux de Belayouni (2013) ce dernier cas permet un calcul plus précis et c'est pourquoi nous avons choisi de calculer les trois dérivées au centre de la maille à l'aide de l'ensemble des temps t_x, t_y, t_z, t_{xy}, t_{xz}, t_{yz} et t_{xyz}.



(a) Propagations 1D (b) Propagations 2D (c) Propagation 3D

FIGURE 3.2 – Schémas des 7 propagations utilisées pour l'estimation du temps t. (a) représente les trois propagations 1D calculées respectivement par les temps t_x, t_y et t_z. (b) représente les 3 faces pour lesquelles 3 propagations 2D sont calculées. Enfin (c) représente la propagation 3D calculée à l'aide de l'ensemble des points de la maille.

3.2.4.1 Comparaison avec une solution analytique

Dans cette section je propose de regarder les performances de l'algorithme dans les cas où une solution analytique peut être calculée.

Modèle homogène : Considérons un modèle homogène dont la vitesse est égale à $3600m/s$. Dans le cas d'un milieu homogène, l'initialisation autour de la source permet d'obtenir des résultats correspondant à la solution analytique. L'erreur sur les temps calculés est donc relative à la précision numérique du calcul. La figure 3.4 illustre l'influence de la dimension de la zone autour de la source sur laquelle est réalisée l'initialisation des temps par la formulation de l'équation eikonale en perturbation. Cette méthode permet d'obtenir un temps analytique lorsque le milieu est homogène et présente donc une erreur nulle sur tout le domaine lorsque l'initialisation est réalisée sur tout le domaine (fig 3.4c). Si celle-ci est réalisée sur un nombre de points trop faible, l'hypothèse de propagation d'onde plane ne permet pas de bien représenter la courbure du front d'onde et d'importantes erreurs apparaissent et se propagent dans le domaine (fig 3.4a). Une initialisation des temps sur un rayon de 5 points permet de mieux représenter la courbure du front d'onde à partir duquel l'approximation ondes planes peut être réalisée tout en conservant une faible erreur sur les temps calculés (fig 3.4b). Les erreurs sont minimales le long des axes de la grille et sur les diagonales en raison de l'utilisation de l'opérateur de propagation 1D qui permet le calcul d'un temps analytique à la précision numérique près dans ces directions.

Modèle à couches : Considérons le modèle de vitesse bi-couches présenté sur la figure 3.5a. La source est placée dans le milieu le plus lent afin d'observer une carte des temps discontinue représentée sur la figure 3.5b. Ces discontinuités s'expliquent par la présence d'ondes réfractées par la couche de vitesse plus rapide. La figure 3.5e illustre l'erreur relative entre les temps analytiques et l'estimation réalisée par le code de résolution du problème

Algorithme du code SolveEik3D

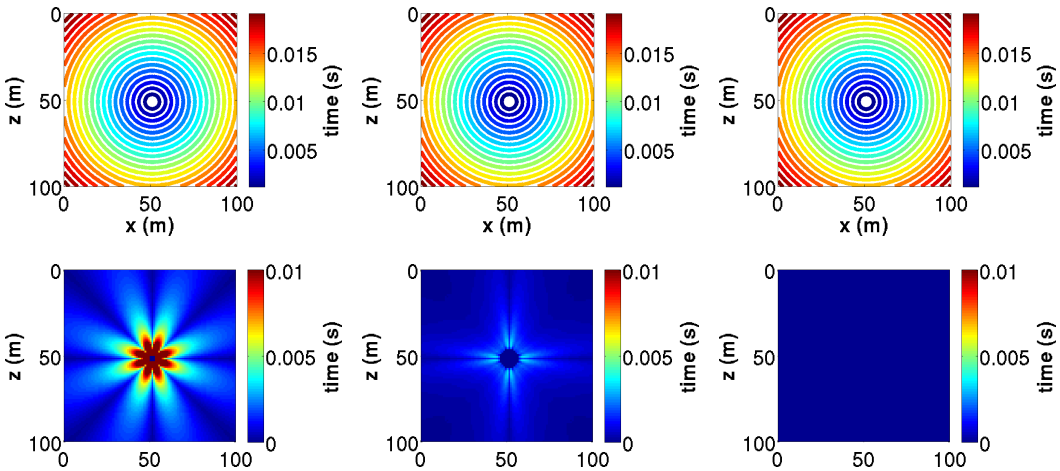
```
!Boucle de convergence des temps
modify=1
while(modify=1)
modify=0

  !Boucle sur les directions de balayages
  do sx=1:-2:-1
    do sy=1:-2:-1
      do sz=1:-2:-1

        !Boucle sur les noeuds
        do iz=izbeg(sz) :sz:izend(sz)
          do ix=ixbeg(sx):sx:ixend(sx)
            do iy=iybeg(sy):sy:iyend(sy)

              s    = slow(iz-sz+1,ix-sx+1,iy-sy+1)
              tx   = time(iz,ix-sx,iy)
              ty   = time(iz,ix,iy-sy)
              tz   = time(iz-sz,ix,iy)
              txy  = time(iz,ix-sx,iy-sy)
              txz  = time(iz-sz,ix-sx,iy)
              tyz  = time(iz-sz,ix,iy-sy)
              txyz = time(iz-sz,ix-sx,iy-sy)

              !Calcul des propagations dites 1D
              t(1) = call 1DTime(tx,dx,s)
              t(2) = call 1DTime(ty,dy,s)
              t(3) = call 1DTime(tz,dz,s)

              !Calcul des propagations dites 2D
              t(4) = call 2DTime(tx,ty,txy,dx,dy,s)
              t(5) = call 2DTime(ty,tz,tyz,dy,dz,s)
              t(6) = call 2DTime(tz,tx,txz,dx,dz,s)

              !Calcul des propagations dites 3D
              t(7) = call 3DTime(tx,ty,tz,txy,txz,txyz,dx,dy,dz,s)

              !Actualisation du temps de premiere arrivee
              if time(iz,ix,iy) < min(t) then
                Modify=1
                time(iz,ix,iy) = min(t)
              end
            end
          end
        end
        !Fin de la Boucle sur les noeuds

      end
    end
  end
  !Fin de la Boucle sur les directions de balayages

end
!Fin de la Boucle de convergence des temps!
```

FIGURE 3.3 – SolveEik3D : Algorithme de résolution de l'équation eikonale par différences finies.

direct. Les erreurs les plus importantes sont localisées au niveau de l'intersection des ondes directes et réfractées. Ces erreurs sont la conséquence de l'amalgame des temps provenant de ces deux fronts d'onde différents qui sont pourtant utilisés ensemble pour le calcul de la propagation des temps. A titre de comparaison la figure 3.5c illustre les erreurs sur les temps obtenus avec l'algorithme proposé par Podvin & Lecomte (1991). La principale différence de cet algorithme avec celui utilisé ici est un calcul des dérivées réalisé non pas au centre de la maille mais au centre des arêtes. Les erreurs plus importantes remarquées sur cet exemple témoignent de la précision apportée par le calcul des temps utilisant des schémas centrés. L'utilisation de la formulation en perturbation montre de meilleurs résultats sur des milieux lisses cependant, en présence de forts contrastes dans le modèle de vitesse, des erreurs importantes apparaissent. La figure 3.5d illustre les temps calculés en utilisant la formulation en perturbation sur tout le domaine. On voit ici des imprécisions importantes pour le calcul des temps de l'onde transmise en raison du fort contraste du modèle de vitesse. Il faut donc préférer une approche hybride en utilisant la méthode des perturbations autour de la source et l'approximation d'ondes planes sur le reste du modèle.

Conclusion

L'implémentation du code SolveEik3D nous permet d'obtenir les temps de première arrivée pour des modèles hétérogènes 3D avec un faible temps de calcul. L'utilisation de la formulation en perturbation autour de la source permet de bien représenter la courbure du front d'onde dans les zones où celle-ci est non négligeable et peut alors être extrapolée sur le reste du domaine avec l'approximation d'onde plane. Le calcul des dérivées au centre des mailles montre de meilleurs résultats que lorsqu'il est réalisé au centre des arêtes et permet ainsi le calcul des temps de première arrivée plus précis que les algorithmes fréquemment cités dans la littérature (fig 3.5c).

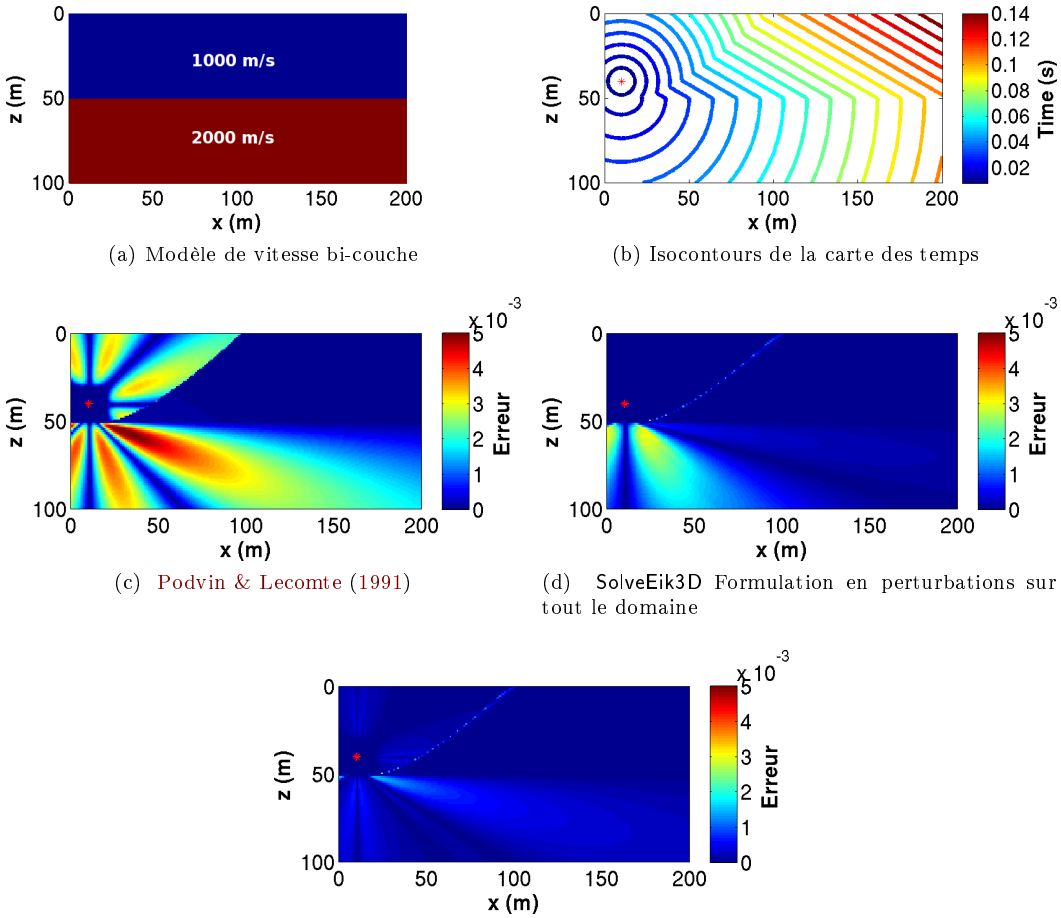


(a) Utilisation de la formulation en perturbations sur un rayon de 1 point

(b) Utilisation de la formulation en perturbations sur un rayon de 5 points

(c) Utilisation de la formulation en perturbations sur tout le domaine

FIGURE 3.4 – Comparaison des temps calculés avec la formulation de l'équation Eikonale en perturbations pour différents rayons autour de la source. Les figures en haut représentent les isocontours de la carte des temps, et celles en bas l'erreur sur les temps calculés par rapport à la solution analytique.



(a) Modèle de vitesse bi-couche

(b) Isocontours de la carte des temps

(c) Podvin & Lecomte (1991)

(d) SolveEik3D Formulation en perturbations sur tout le domaine

(e) SolveEik3D Formulation en perturbations sur 10 points

FIGURE 3.5 – Comparaison à la solution analytique des temps calculés pour un modèle bi-couche (a). La figure (c) représente l'erreur relative des temps calculés par l'algorithme de Podvin & Lecomte (1991), (d) l'erreur relative des temps calculés avec la formulation en perturbations sur tout le domaine, et (e) l'erreur relative des temps calculés avec la formulation en perturbations sur 10 points.

3.3 Tracé de rais

Nous verrons lors de la résolution du problème inverse qu'il est nécessaire de connaître la trajectoire de l'onde de première arrivée. Cette information nous permettra également de visualiser la couverture de notre dispositif d'acquisition. Dans cette section, après avoir introduit les méthodes de tracé de rais, je détaille la méthode que j'ai implémentée dans l'algorithme RayPath3D.

3.3.1 Tracé de rais a posteriori

La trajectoire peut être calculée de façon analytique dans le cas où le milieu peut être représenté par un modèle de vitesse homogène, ou encore par une fonction linéaire de l'espace. Dans des configurations plus complexes, le tracé de rais est réalisé par des méthodes numériques. Le tracé de rais peut être obtenu par la formulation des équations des rais (Cerveny, 2005) ou à posteriori par la résolution de l'équation eikonale. Dans ce dernier cas, il est réalisé en utilisant l'un des principes suivants :

- Le principe de réciprocité utilisé par (Matsuoka & Ezaka, 1992) qui propose de réaliser le calcul des temps de première arrivée en simulant la propagation depuis la position du récepteur. En sommant cette carte des temps à celle obtenue en modélisant la propagation depuis la source, on peut retrouver les positions pour lesquelles la somme des temps prend la valeur du temps de première arrivée du récepteur considéré et ainsi retrouver la trajectoire du rai.
- Le principe de stationnarité utilisé par (Vidale, 1988) qui propose de calculer localement le gradient de la carte des temps. Le rai est retrouvé en suivant depuis le récepteur vers la source la direction opposée au gradient des temps.

La méthode utilisant le principe de réciprocité nécessite la résolution du problème direct à partir de chacun des récepteurs ce qui augmente considérablement le temps de calcul. Pour cette raison, nous avons choisi d'utiliser le principe de stationnarité, qui consiste à remonter le gradient des temps.

3.3.2 Implémentation du code RayPath3D

Le tracé de rais a postériori implémenté dans le code RayPath3D permet de retrouver la trajectoire des rais. Il s'agit plus précisément de décrire le chemin parcouru par l'onde depuis la source jusqu'au récepteur. Le rai R est supposé rectiligne dans chacune des mailles de la grille. Sa description est réalisée par un ensemble de points $R = \{R_{rec}, R_2, ..., R_{src}\}$ dont la longueur est a priori inconnue. Le premier point R_{rec} de cette liste correspond à la position du récepteur. Le dernier point R_{src} est quant à lui situé au niveau de la position de la source. Le principe de stationnarité consiste, étant donné le point R_{ip}, à rechercher le point suivant R_{ip+1} tel que le segment $R_{ip}R_{ip+1}$ soit colinéaire au gradient des temps de première arrivée. Il s'agit plus précisément de rechercher R_{ip+1} appartenant soit à une face, soit à une arête ou encore confondu avec un point du maillage tel que $R_{ip}\vec{R}_{ip+1} = \alpha\nabla t$ avec $-\sqrt{dx^2 + dz^2 + dy^2} < \alpha < 0$.

Le calcul du gradient des temps ∇t est généralement calculé par différences finies en utilisant l'hypothèse que la carte des temps est continue et dérivable en tout point de la

grille. Cependant nous verrons dans les exemples proposés dans la section suivante que la carte des temps ne respecte pas toujours cette hypothèse. Les points critiques localisés sur les discontinuités de la carte des temps sont situés aux interfaces du modèle de vitesse ainsi qu'à l'intersection des différents fronts d'ondes. L'erreur engendrée par l'utilisation de cette hypothèse pour le calcul de la dérivée peut alors avoir une conséquence importante sur le résultat et notamment lors de la recherche de la trajectoire des ondes et par conséquent sur l'estimation des vitesses dans le problème inverse. Le calcul du gradient des temps de première arrivée est implémenté dans le code RayPath3D en fonction des différentes propagations (type 1D, 2D ou 3D) afin d'utiliser en chaque point le schéma numérique permettant la meilleure évaluation du gradient.

Pour chacune des sources, les temps de première arrivée sont calculés à l'aide du code SolveEik3D. Le calcul du gradient des temps est ensuite réalisé pour chaque point de grille (fig 3.6). Nous avons vu dans l'algorithme de résolution de l'équation eikonale que le temps de première arrivée est calculé par l'une des 7 propagations possibles. Le calcul du gradient est ici réalisé de façon cohérente avec la propagation utilisée pour le calcul des temps, ce qui n'est pas le cas classiquement. Un temps obtenu par une propagation 1D verra son gradient calculé de façon similaire. Pour chaque récepteur, la trajectoire d'un rai est ensuite calculée. A partir de la position du récepteur, le gradient est interpolé de façon linéaire à partir des huit points de grille situés autour de cette position. Le point suivant est défini par la direction inverse du gradient des temps de telle sorte qu'il appartienne soit à une arête, soit à une face, ou encore qu'il soit confondu à un point du maillage. Un second point de rai est alors défini, et l'intégralité du rai est dessinée en répétant l'opération jusqu'à la source.

3.3.3 Validation et exemples

Gradient des temps : La figure 3.7 illustre les résultats obtenus pour le calcul du gradient des temps de première arrivée pour un modèle de vitesse à deux couches. La source est placée à $X = 5$ et $Z = 40$ mètres. Le milieu est plus rapide dans la zone décrite par $Z > 50$ mètres, et donne naissance à des ondes réfractées. Le champ de vecteurs obtenu par le calcul analytique du gradient des temps de première arrivée est représenté en noir. En rouge, le gradient obtenu par un calcul sans distinction des différents schémas de propagation rend compte des erreurs au niveau de l'interface entre les deux couches du modèle de vitesse ainsi qu'à l'intersection des deux fronts d'ondes. En bleu, l'algorithme implémenté pour le calcul du gradient permet une précision accrue au niveau de l'interface. On retrouve néanmoins des imprécisions au niveau de l'intersection des fronts d'onde. Ceci étant la conséquence de l'amalgame des deux fronts d'onde dans l'implémentation du calcul des temps de première arrivée.

Trajectoire des rais : La figure 3.8a illustre la trajectoire du rai d'une onde réfractée. Le modèle de vitesse est un modèle à deux couches et la source et le récepteur sont suffisamment distants pour que l'onde de première arrivée soit l'onde réfractée. Sur cette figure le rai en vert calculé sans tenir compte du schéma de propagation dans le calcul du gradient des temps illustre les limites de ce calcul au niveau de l'interface. Le calcul de la dérivée sur une discontinuité fait apparaître des oscillations de la trajectoire le long de l'interface dont la fréquence est fonction de la discrétisation du modèle. En rouge le rai obtenu par le code RayPath3D est lui confondu avec le rai analytique. Un deuxième exemple (fig. 3.8b) illustre une source et un récepteur dans un milieu où la vitesse de propagation des ondes est égale à 3600 mètres par seconde. Une zone plus lente dont la vitesse est égale à 1000 mètres par seconde est située entre la source et le récepteur. Les isovaleurs des temps sont

Algorithme du code RayPath3D

```
!Boucle sur les sources
do is=1,nbs

  !Calcul des temps de premiere arrivee et schema utilisee
  [time schema] = call SolveEik3D(ps(is),slow)

  !Calcul du gradient des temps
  grad = call GradTime(time,schema,slow)

  !Boucle sur les recepteurs
  do ir=1:nbr

    !Initialisation du rais
    rais(is,ir,1)=pr(ir)
    ip=1

    !Boucle sur les points decrivant le rai
    while ( dist(rais(is,ir,ip),ps(is)) > srqt(dx^2+dz^2+dy^2) )

      !Calcul du point suivant r
      ip=ip+1
      rais(is,ir,ip)= call FindNext(grad,rais(is,ir,ip-1)),dx,dy,dz)

    end
    !Fin de la Boucle sur les points decrivant le rai
  end
  !Fin de la Boucle sur les recepteurs
end
!Fin de la Boucle sur les sources
```

FIGURE 3.6 – RayPath3D : Algorithme de tracé de rais a posteriori.

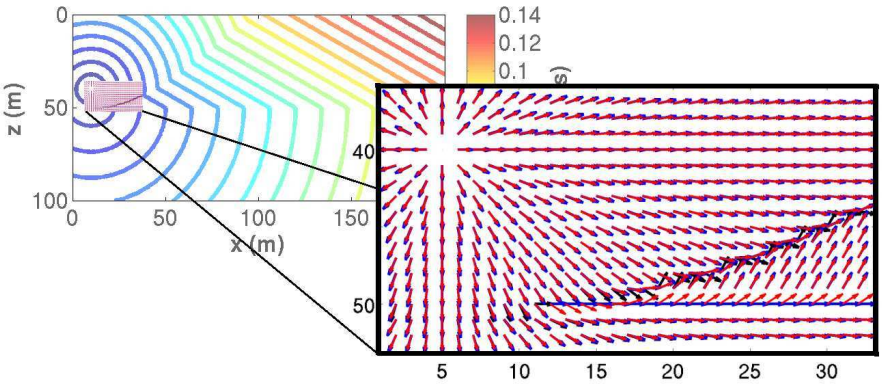
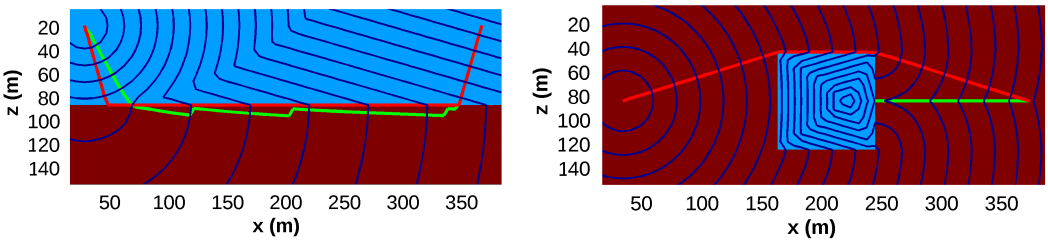


FIGURE 3.7 – Représentation du gradient calculé sur les discontinuités de la carte des temps (interface et intersection des fronts d'ondes directes et réfractées). En noir le gradient des temps analytique, en rouge la solution calculée avec une méthode classique de différences finies, en bleu le gradient issu de la nouvelle méthode.

représentées par les contours bleus et permettent de remarquer que le récepteur est placé à l'intersection de deux fronts d'ondes. Le calcul du gradient des temps réalisé sans différencier les deux différents fronts d'onde donne alors un tracé de rai (en vert) complètement erroné. L'amalgame de ces deux fronts d'onde va être perçu comme une onde plane se déplaçant horizontalement. Le rai ainsi mal mené ne retrouvera jamais la source. La prise en compte des différents schémas permet de résoudre le problème, ainsi la trajectoire calculée par le code RayPath3D représentée en rouge sur la figure retrouve la position de la source.



(a) Tracé de rai le long d'une interface

(b) Tracé de rai sur une discontinuité de la carte des temps

FIGURE 3.8 – Situation critique du tracé de rais classique représenté ici en vert. Le tracé de rais (en rouge) réalisé par le code RayPath3D retrouve la source avec une trajectoire quasi analytique.

Conclusion

La considération des différents schémas pour le calcul du gradient des temps lors du tracé de rais a postériori a permis des améliorations non négligeables. Les exemples proposés dans la section (fig. 3.8) ont permis de montrer que le code RayPath3D permet de retrouver le juste rai là où un algorithme couramment utilisée échoue (Podvin & Lecomte, 1991).

3.4 Conclusions

Les algorithmes implémentés permettent de réaliser la résolution du problème direct, à savoir le calcul des temps de première arrivée et le tracé de rais a posteriori dans des milieux 3D pouvant être représentés par un modèle de vitesse homogène par bloc. Une attention particulière est portée au choix des schémas utilisés pour le calcul du gradient des temps dans ces deux codes afin de prendre en compte les discontinuités du milieu pour ainsi les reporter sur le calcul des temps et sur la trajectoire des rais. La figure 3.9 illustre sur le modèle de vitesse Marmousi 3.9a les résultats obtenus par les codes SolveEik3D et RayPath3D. Les isochrones de la carte des temps sont illustrées en gris sur la figure 3.9b et les trajectoires des rais correspondant aux lignes de courants sont illustrées sur la figure 3.9c.

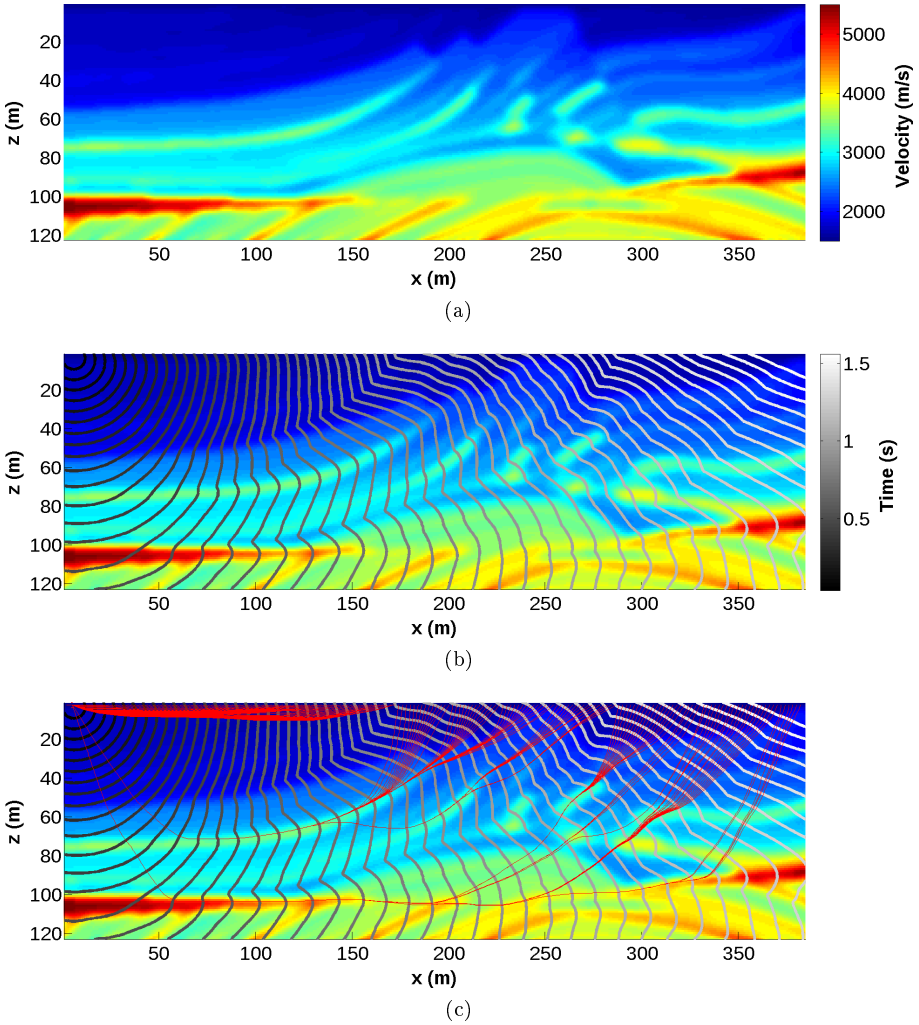


FIGURE 3.9 – Application des algorithmes SolveEik3D et RayPath3D au modèle de vitesse Marmousi.

Chapitre 4

Problème inverse

Inversion des temps de première arrivée

Sommaire

4.1 Généralités sur le problème inverse 59
4.1.1 Définition du problème inverse 60
4.1.2 Ajustement au sens des moindres carrés 62
4.1.3 Régularisation d'un problème inverse 64
4.2 Optimisation et conditions d'optimalité 65
4.2.1 Méthode d'optimisation globale 66
4.2.2 Méthode d'optimisation locale 66
4.3 Inversion des temps de première arrivée 72
4.3.1 Formulation des équations 72
4.3.2 Algorithme d'optimisation local 74
4.3.3 Méthode géométrique 75
4.4 Implémentation des méthodes dans le code Tomo3D 76
4.4.1 Implémentation de la méthode de Newton 77
4.4.2 Implémentation de la méthode de Gradient 78
4.4.3 Implémentation de la méthode d'approximation du Hessien 79
4.4.4 Implémentation de la méthode SIRT 79

Dans ce chapitre, après avoir défini le problème inverse dans un cadre général ainsi que les méthodes de résolution les plus classiques rencontrées dans la littérature, nous verrons plus particulièrement la résolution du problème inverse soulevé par l'inversion des temps de première arrivée. Dans ce chapitre je présente la théorie et la mise en œuvre des méthodes qui ont permis la réalisation du code d'inversion Tomo3D.

4.1 Généralités sur le problème inverse

A partir des lois de la physique et à l'aide de modèles mathématiques, la résolution du problème direct permet de connaître la réponse d'un objet soumis à une sollicitation à partir de ses propriétés physiques. L'imagerie géophysique a cependant l'objectif inverse puisqu'il s'agit de déterminer les propriétés physiques d'un objet à partir d'observations et de mesures (fig. 4.1). La résolution de ce type de problème appelé problème inverse est rarement triviale. Elle constitue un domaine de recherche à part entière et de nombreux ouvrages y sont entièrement dédiés (Berryman, 1991; Kelley, 1999; Vogel, 2002; Tarantola, 2002; Menke, 1989; Kern, 2002; Gill et al., 1981; Chabert, 1989).

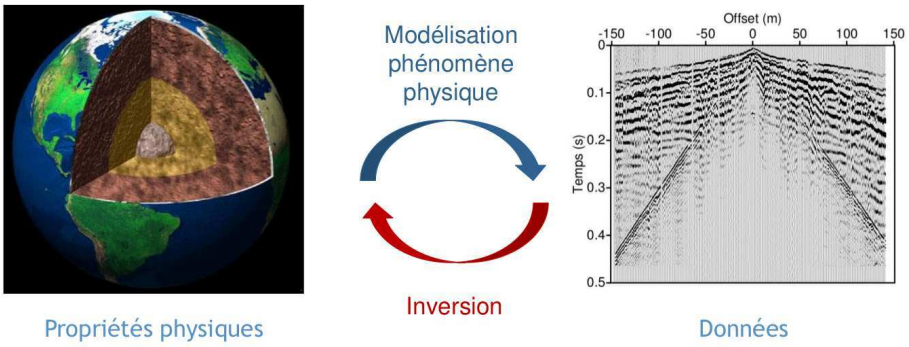


FIGURE 4.1 – Schéma de principe du problème inverse posé en géophysique

4.1.1 Définition du problème inverse

A partir de mesures réalisées sur un objet caractérisant la réponse à une sollicitation, on cherche à retrouver certaines de ses propriétés.

- La sollicitation $\mathcal{Q}$, pouvant être d'origine naturelle ou artificielle, peut être introduite par une source de chaleur, l'injection d'un courant électrique, ou encore une sollicitation mécanique donnant naissance à la propagation d'une onde.
- Les mesures réalisées sur l'objet permettent d'estimer une grandeur physique $\mathcal{G}$ comme par exemple la température, le champ électrique, ou encore un temps de propagation.
- Les propriétés $\mathcal{P}$ que nous cherchons à déterminer correspondent aux propriétés physiques de l'objet comme par exemple sa conductivité thermique, sa résistivité électrique ou encore la vitesse de propagation des ondes qui le traversent.

Il est primordial que la grandeur physique mesurée soit en lien avec les propriétés physiques que nous cherchons à déterminer. On admettra alors qu'il existe une relation représentée par l'application $\mathcal{Y}$ entre les grandeurs physiques représentées par $\mathcal{G}$ sensible à la sollicitation $\mathcal{Q}$ et les propriétés physiques recherchées représentées par $\mathcal{P}$. La résolution du problème direct consiste à déterminer l'application $\mathcal{Y}$ (eq 4.1) alors que la résolution du problème inverse consiste à déterminer $\mathcal{Y}^{-1}$ (eq 4.2)

Problème direct : $$\mathcal{Y}(\mathcal{Q},\mathcal{P}) \longmapsto \mathcal{G} \tag{4.1}$$

Problème inverse : $$\mathcal{Y}^{-1}(\mathcal{Q},\mathcal{G}) \longmapsto \mathcal{P} \tag{4.2}$$

4.1.1.1 Les données observées du problème

Les données généralement issues de la campagne d'acquisition réalisée sur le terrain permettent d'estimer une quantité correspondant à une grandeur physique à un instant et à un endroit x donné. Si l'on considère que ces données sont indépendantes du temps et que l'on s'intéresse uniquement aux variations spatiales alors on peut définir les données d comme un vecteur contenant les q mesures réalisées en fonction de leur position dans l'espace. Ces données expérimentales peuvent être décrites comme égales à la grandeur mesurée perturbée par la présence de bruit et les imperfections de l'outil de mesure telles que

$$d^{obs}(x_i) = \mathcal{G}(x_i) + \zeta_i \quad \text{avec } i = 1, \ldots, q, \tag{4.3}$$

x_i la position de l'espace où est réalisée la mesure $d^{obs}(x_i)$, et ζ_i l'erreur associée.

4.1.1.2 Les inconnues du problème

Les propriétés physiques de l'objet $\mathcal{P}$ sont représentées par une fonction de p paramètres. On trouvera dans la littérature les fonctions permettant une représentation de $\mathcal{P}$ homogène par blocs (Aki et al., 1977; Oncescu et al., 1984; Humphreys & Clayton, 1988; Saltzer & Humphreys, 1997). On peut alors définir P tel que $P(x;m) = \sum_j^p m_j \; I(x,j)$ avec m_j la valeur de P dans le bloc j, et $I(x,j) = 1$ si et seulement si x est contenu dans le bloc j. Ou, d'une façon plus générale, on peut définir $\mathcal{P}$ par une somme de fonctions caractéristiques pondérées par p paramètres (Thurber, 1983; Eberhart-Phillips, 1986; Rawlinson et al., 2006). On a alors $P(x;m) = \sum_j^p m_j \; f_j(x)$. L'espace de description de $\mathcal{P}$ est ainsi réduit à l'espace des modèles $\mathcal{M}$ formulé par les p paramètres. Les inconnues du problème sont ainsi définies par les $(m_i)_{i=1,\ldots,p}$ paramètres permettant la description de la distribution spatiale des propriétés de l'objet.

$$P : \mathbb{R}^p \longmapsto \mathcal{M} \tag{4.4}$$

$$m \longmapsto P(m) \tag{4.5}$$

4.1.1.3 Résolution du problème direct

La résolution du problème est donnée par l'application $\widehat{\mathcal{F}}(\mathcal{Q}, P(m))$. Issue des lois de la physique, elle permet, à partir de la description des propriétés physiques $P(m)$ d'un objet, de calculer les valeurs théoriques d des grandeurs physiques sensibles à la sollicitation $\mathcal{Q}$. Sa résolution est généralement établie à l'aide de méthodes numériques car trop complexe pour être déterminée de façon analytique. En considérant P et $\mathcal{Q}$ donnés, on définit l'application $\mathcal{F}$ permettant la résolution du problème direct telle que :

$$\mathcal{F} : \mathbb{R}^p \longmapsto \mathcal{D} \tag{4.6}$$

$$m \longmapsto \mathcal{F}(m) = d \tag{4.7}$$

4.1.1.4 Problématique du problème inverse

$$\text{On cherche } m \text{ tel que } \; \mathcal{F}(m) = d^{obs}. \tag{4.8}$$

Le problème posé par l'équation 4.8 est par définition mal posé. En d'autres termes cela signifie qu'il ne satisfait pas les conditions d'un problème bien posé défini par Hadamard (1902). La première est l'existence d'une solution. La seconde est l'unicité de la solution. Enfin la troisième condition requiert la stabilité de la réponse par rapport aux petites erreurs.

Ce problème est mal posé pour plusieurs raisons.

- La description des propriétés de l'objet est réduite à l'ensemble des fonctions à p paramètres définie par $P(m)$. Il est alors possible que $\mathcal{P} \notin \mathcal{M}$, ce qui signifie

qu'aucune combinaison de paramètres ne peut représenter les propriétés de l'objet. Ceci conduit à la non existence d'une solution.

- Le caractère discret des mesures participe également à rendre le problème mal posé. Si l'on suppose que l'erreur sur la mesure est nulle, les données d permettent une description partielle de $\mathcal{G}$ qui pourra alors conduire à la non unicité de la solution.
- L'inexistence d'une formulation explicite de $\mathcal{F}^{-1}$ et qui est dans de nombreux cas non linéaire en est une troisième cause. De plus la description de $\mathcal{F}$ est une approximation de l'application $\mathcal{Y}$ pour laquelle des approximations simplificatrices sont réalisées. L'existence d'une solution est alors à nouveau mise en question.

4.1.1.5 Approche de résolution d'un problème inverse

On trouvera dans la littérature trois types d'approche pour la résolution des problèmes inverses. La première relève de l'analyse fonctionnelle. Cette approche consiste à modifier l'espace des variables et leur topologie afin d'obtenir un problème bien posé. Une autre approche, appelée inversion stochastique ou bayésienne, consiste à évaluer l'incertitude de l'ensemble des variables du problème. La solution est alors donnée sous la forme d'une fonction de densité de probabilité. Enfin la dernière approche consiste à rechercher la solution d'un problème bien posé supposé proche du problème initial. Ce dernier type d'approche est regroupé sous le nom de méthodes de régularisation. Nous avons choisi ici d'orienter nos travaux vers ce dernier type d'approche en utilisant l'ajustement au sens des moindres carrés détaillés dans la prochaine section.

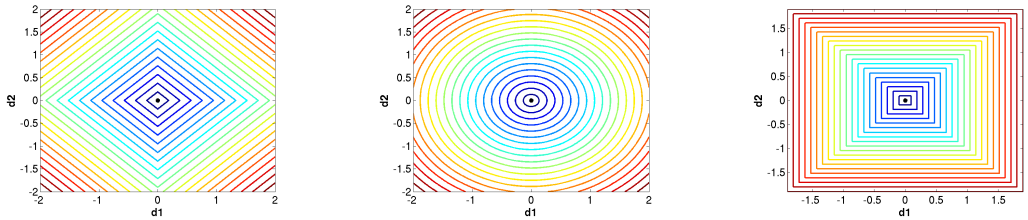
4.1.2 Ajustement au sens des moindres carrés

La méthode des moindres carrés proposée par Legendre (1805) et Gauss (1809, 1855, 1857) permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure, à un modèle mathématique censé décrire ces données. Le modèle théorique est une famille de fonctions $\mathcal{F}(x; P(m))$ dont x est une variable muette de l'espace et indexées par p paramètres inconnus représentés par le vecteur m. La méthode des moindres carrés permet de calculer la valeur des paramètres m qui reproduisent le mieux les données expérimentales. On parle dans ce cas d'ajustement par la méthode des moindres carrés. La méthode fait l'hypothèse que la fonction $\mathcal{F}(x; P(m))$ qui décrit « le mieux » les données est celle qui minimise la somme quadratique des déviations des mesures aux prédictions de $\mathcal{F}(x; P(m))$. En d'autres termes, si nous disposons de q mesures, les paramètres m « optimaux » au sens de la méthode des moindres carrés sont ceux qui minimisent la distance entre le point $D^{obs} = (d_1^{obs}, \ldots, d_q^{obs})$ avec d_i^{obs} la i_{me} donnée expérimentale et le point $D = (d_1, \ldots, d_q)$ avec d_i la i_{me} donnée calculée par le modèle mathématique $\mathcal{F}(x; P(m))$. La prescription des moindres carrés commande que cette distance soit minimale.

$$\text{On cherche m tel que } \|\mathcal{F}(m) - d^{obs}\|^2 \text{ soit minimum.} \tag{4.9}$$

Notion de distance

Dans un espace vectoriel normé $(E, \|\cdot\|)$, la distance $\mathcal{D}$ entre deux points A et B peut être définie de manière canonique à partir de la norme telle que $\forall (A, B) \in E \times E$, $\mathcal{D}(A, B) = \|A - B\|$. La norme 1 noté $\|\cdot\|_1$ est donnée par la somme des valeurs absolues des différences des coefficients. La distance obtenue par la considération de cette norme donnée par l'équation 4.10 est dite distance de Manhattan. Elle correspond au nombre



(a) Distance de Manhattan (b) Distance euclidienne (c) Distance de Tchebychev

FIGURE 4.2 – Contours représentant la distance d'un point de $\mathbb{R}^2$ au centre du domaine, évaluée par les distances de Manhattan, Euclidienne et de Tchebychev, correspondant respectivement à la définition des normes $\|\cdot\|_1$, $\|\cdot\|_2$, et $\|\cdot\|_\infty$

minimum de cases parcourues par la tour pour se déplacer d'une case à une autre de l'échiquier. La norme euclidienne noté $\|\cdot\|_2$ est obtenue à partir du produit scalaire ou du produit hermitien canonique et permet de définir la distance Euclidienne (eq 4.11). Elle correspond à la norme habituellement utilisée pour la distance entre deux points dans le plan ou l'espace usuel. Plus généralement, la distance de Minkowski est définie pour tout α supérieur ou égal à 1, par la norme α noté $\|\cdot\|_\alpha$ (eq. 4.12). La norme infinie $\|\cdot\|_\infty$ permet de définir la distance de Tchebychev exprimée par l'équation 4.13). Elle induit la distance de déplacement par les faces et par les coins dans un réseau, et correspond au nombre minimum de cases parcourues pour déplacer le roi d'une case à une autre de l'échiquier. La figure 4.2 illustre la distance à l'origine d'un point appartenant à $\mathbb{R}^2$ en fonction de ces différentes normes. Si on considère les deux points A et B appartenant à $\mathbb{R}^q$ et définis par leurs coordonnées $A = (a_1, a_2, ..., a_q)$ et $B = (b_1, b_2, ..., b_q)$, on exprime les différentes distances de la façon suivante :

$$\text{Distance de Manhattan : } \mathcal{D}^1(A,B) = \|A \cdot B\|_1 = \sum_{i=1}^{q} |a_i - b_i| \tag{4.10}$$

$$\text{Distance euclidienne : } \mathcal{D}^2(A,B) = \|A \cdot B\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{q} (a_i - b_i)^2} \tag{4.11}$$

$$\text{Distance de Minkowski : } \mathcal{D}^\alpha(A,B) = \|A \cdot B\|_p = \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^{n} |a_i - b_i|^\alpha} \tag{4.12}$$

$$\text{Distance de Tchebychev : } \mathcal{D}^\infty(A,B) = \|A \cdot B\|_\infty = \lim_{\alpha \to \infty} \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^{q} |a_i - b_i|^\alpha} = \sup_{1 \leq i \leq n} |a_i - b_i| \tag{4.13}$$

Afin d'illustrer la différence entre les normes et leurs distances décrites dans le paragraphe précédent, la figure 4.3 présente le résultat de la minimisation d'une fonction affine et d'un nuage de points. La fonction est définie en fonction de deux paramètres a et b telle que $f(x; a, b) = ax + b$. Les données sont représentées par les points noirs. La figure illustre clairement la non existence du couple de paramètres (a, b) tel que $f(x_i) = d(x_i)$. En se tournant vers un ajustement au sens des moindres carrés, la droite représentée en bleue correspond à la fonction affine définie par le couple de paramètres (a_1, b_1) tel que pour tout couple (a,b) on a $\|f(x; a_1, b_1) - d\|_1 \leq \|f(x; a, b) - d\|_1$. De la même façon la droite verte est

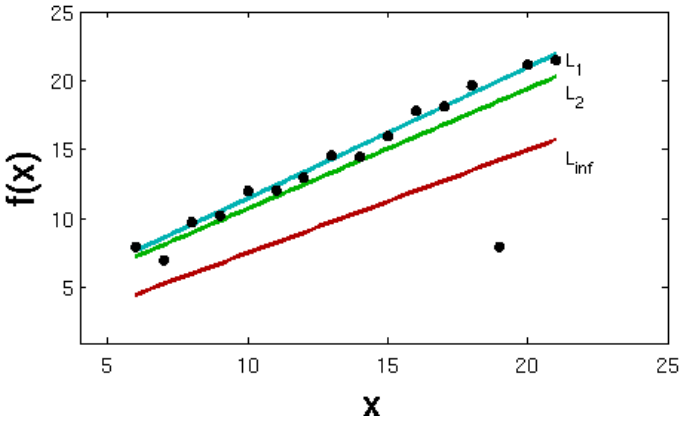


FIGURE 4.3 – Recherche de la droite permettant d'ajuster un nuage de points en fonction des normes $\|\cdot\|_1$, $\|\cdot\|_2$ et $\|\cdot\|_\infty$.

obtenue en considérant la norme Euclidienne $\|\cdot\|_2$ et la droite rouge la norme infinie $\|\cdot\|_\infty$. Le choix de la norme influe sur les paramètres solutions. Elle est choisie en fonction du type d'erreur associé aux données. Dans la mesure où les données sont affectées d'erreurs gaussiennes, on utilisera la norme Euclidienne $\|\cdot\|_2$. On appellera dans la suite de ce chapitre ϕ_d la fonction qui décrit la distance euclidienne entre les données observées provenant de la campagne d'acquisition et les données théoriques issues du modèle mathématique telle que :

$$\phi_d(m) = (\mathcal{F}(m) - d^{obs})^t(\mathcal{F}(m) - d^{obs}). \tag{4.14}$$

4.1.2.1 Ajustement au sens des moindres carrés pondérés

La distance définie ainsi donne un poids similaire à toutes les directions de l'espace. Cependant, dans la pratique, il est possible que l'on souhaite attribuer plus de poids à certaines composantes de l'espace vectoriel, ou en d'autres termes, à certaines mesures. Dans ce cas la prescription des moindres carrés se formule par l'équation 4.15 où $\mathbf{C}$ est appelé la matrice de covariance des mesures. Cette matrice est par construction symétrique et elle comporte les variances des variables sur sa diagonale. La covariance, qui quantifie le degré de dépendance de 2 variables, est alors établie sur le reste de la matrice.

$$\phi_{\widehat{d}}(m) := (\mathcal{F}(m) - d^{obs})^t\mathbf{C}^{-1}(\mathcal{F}(m) - d^{obs}) \tag{4.15}$$

4.1.3 Régularisation d'un problème inverse

Le problème se résume à la recherche du minimum d'une fonction appelée généralement fonction objective, ou encore fonction coût. On cherche à minimiser la distance entre la solution exacte du problème et la solution approchée. Cette distance est définie comme la distance entre les données observées d^{obs} et l'estimation des données calculées d^{cal} obtenues par la résolution du problème direct $\mathcal{F}$. Dans certains cas ce problème ne possède pas une unique solution et il est nécessaire de le « régulariser » afin de réduire le nombre de modèles solutions. Une solution couramment utilisée consiste à ajouter une contrainte sur la solution recherchée. On trouvera dans la littérature deux types de contrainte. La première consiste à

évaluer la distance du modèle à celle d'un modèle a priori m_0 . Elle s'exprime par l'équation 4.16 et permet d'orienter le modèle de paramètre m vers le modèle m_0 établi d'après des connaissances a priori que nous avons sur ce modèle. Il est ainsi possible de considérer des informations sur le milieu ausculté provenant d'une source extérieure. La seconde permet d'établir une corrélation entre les paramètres du modèle et s'exprime par l'équation 4.17. On pourra alors orienter la solution vers un modèle lisse en choisissant $\Omega(m) = \Delta m$. Dans la section 4.3, la prise en compte de ces contraintes dans l'inversion des temps de première arrivée est exposée et des exemples sont donnés dans le chapitre 5.

$$\phi_{m_0}(m) = \|m - m_0\|^2 \tag{4.16}$$

$$\phi_m(m) = \|\Omega(m)\|^2 \tag{4.17}$$

La fonction coût du problème régularisé peut alors s'exprimer par l'équation 4.18, correspondant à la somme des fonctions données par les équations 4.15 4.16 et 4.17, pondérée par les poids ω et ζ (Tarantola, 2005; Rawlinson et al., 2010).

$$\phi(m) = \phi_{\hat{d}}(m) + \omega\phi_m(m) + \zeta\phi_{m_0}(m) \tag{4.18}$$

Le choix des paramètres utilisés pour décrire le milieu ausculté ainsi que la définition de la fonction coût constituent une étape décisive pour la résolution du problème inverse. En effet, ces choix conditionnent la forme de la fonction coût, l'efficacité des méthodes d'optimisation utilisées et également les caractéristiques du modèle solution.

4.2 Optimisation et conditions d'optimalité

Considérons le problème d'optimisation Z : $\min_{x \in X} \ f(x)$ qui consiste à minimiser la fonction f. On appelle :

- minimum global de Z tout point x_* vérifiant $f(x_*) \leq f(x)$.
- minimum local de Z tout point x_* tel qu'il existe un voisinage V de x_* tel que $f(x_*) \leq f(x_v)$.
- une solution de Z tout point x_* défini comme un minimum global ou local de Z.

Les conditions d'optimalité sont un ensemble d'équations, d'inéquations et d'expressions diverses. Celles-ci sont dites « nécessaires » si elles sont simplement vérifiées par une solution d'un problème d'optimisation et dites « suffisantes » dans le cas où elles permettent d'affirmer qu'un point qui les vérifie est solution du problème d'optimisation considéré. On considère ici la condition d'optimalité de premier ordre, parfois appelée condition de Fermat, telle que si x_* est un minimum local de f avec f dérivable en x_*, on a $\nabla f(x_*) = 0$. On note que si f est convexe, ces conditions deviennent des conditions nécessaires et suffisantes d'optimalité globale de x_*. On trouvera dans la littérature deux types d'approche pour la résolution du problème d'optimalité. La première basée sur une approche globale permet l'étude de fonction coût quelconque. La seconde, orientée vers la recherche d'un minimum local correspondant également au minimum global si f est convexe, s'appuie sur la condition de Fermat évoquée précédemment. Ces deux approches sont présentées dans les paragraphes suivants.

4.2.1 Méthode d'optimisation globale

Dans le cas où la fonction f est quelconque, la recherche de son minimum global s'avère difficile et une solution consiste à explorer l'espace des modèles. On utilise alors des méthodes de résolution dites globales ou semi-globales de type Monte Carlo (MC), recuit simulé et algorithmes génétiques, qui sont les algorithmes les plus utilisés pour la résolution de problèmes inverses avec des méthodes globales en géophysique (Mosegaard & Sambridge, 2002). L'idée de ce type de méthode est de parcourir l'espace des modèles afin de sélectionner le meilleur modèle de paramètres, dans le sens où la fonction coût associée à ce dernier est minimale. Les algorithmes génétiques utilisent un analogue de l'évolution biologique afin de conduire la recherche de nouveaux modèles à partir d'un groupe initial de modèles paramètres générés aléatoirement (Shibutani et al., 1996; Jin & Madariaga, 1993). Le recuit simulé est, quant à lui, basé sur un analogue au recuit physique utilisé dans les systèmes thermodynamiques pour guider des variations des paramètres du modèle (Sen & Stoffa, 1991). Les moyens informatiques modernes ne permettent par d'explorer l'ensemble des solutions pour un très grand nombre de paramètres (quelques centaines d'inconnues au plus), ce qui limite l'utilisation de ces méthodes. Une alternative consiste à utiliser un modèle grossièrement paramétré, appliquer une technique de recherche globale, puis utiliser cette solution comme modèle initial d'une méthode locale en considèrent cette fois un plus grand nombre de paramètres. L'idée derrière cette approche hybride est de localiser un point dans l'espace des modèles assez proche de la solution pour qu'une méthode locale converge avec succès vers cette solution (Pullammanappallil & Louie, 1993; Improta et al., 2002; Boschetti et al., 1996a; Asad et al., 1999).

4.2.2 Méthode d'optimisation locale

Les méthodes présentées dans cette section sont utilisées dans le cas où f est convexe, ou si l'on se résout à la recherche d'un minimum local de Z. On considère dans cette section le problème d'optimisation donné par l'équation 4.9, à savoir

On cherche m tel que $\phi(m) = \|\mathcal{F}(m) - d^{obs}\|^2$ soit minimum.

Avant de présenter les méthodes d'optimisation, on définit ∇_ϕ le gradient exprimé par l'équation 4.19 et ∇^2_ϕ le Hessien exprimé par l'équation 4.20 correspondant respectivement au vecteur des dérivées partielles et à la matrice des dérivées partielles secondes de $\phi(m)$ par rapport aux paramètres m. On définit également la matrice jacobienne $\mathcal{J}_\mathcal{F}$ la matrice des dérivées partielles de $\nabla\mathcal{F}$ exprimée par l'équation 4.21.

$$\nabla\phi(m) := (\frac{\partial\phi(m)}{\partial m_1}, \frac{\partial\phi(m)}{\partial m_2}, \ldots, \frac{\partial\phi(m)}{\partial m_p})^t \tag{4.19}$$

$$\nabla^2\phi := \begin{pmatrix} \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_1\partial m_1} & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_1\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_1\partial m_p} \\ \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_2\partial m_1} & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_2\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_2\partial m_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_p\partial m_1} & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_p\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial^2\phi(m)}{\partial m_p\partial m_p} \end{pmatrix}. \tag{4.20}$$

$$\nabla\mathcal{F}(m) := \begin{pmatrix} \frac{\partial\mathcal{F}(m)_1}{\partial m_1} & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_1}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_1}{\partial m_p} \\ \frac{\partial\mathcal{F}(m)_2}{\partial m_1} & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_2}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_2}{\partial m_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial\mathcal{F}(m)_q}{\partial m_1} & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_q}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial\mathcal{F}(m)_q}{\partial m_p} \end{pmatrix}. \tag{4.21}$$

En utilisant la définition de $\phi(m)$ on exprime $\nabla\phi(m)$ et $\nabla^2\phi(m)$ tel que

$$\nabla\phi(m) = (\nabla\mathcal{F}(m))^t(\mathcal{F}(m) - d^{obs}), \tag{4.22}$$

$$\nabla^2\phi(m) = (\nabla\mathcal{F}(m))^t(\nabla\mathcal{F}(m)) + \nabla((\nabla\mathcal{F}(m))^t)(\mathcal{F}(m) - d^{obs}). \tag{4.23}$$

4.2.2.1 Cas particulier où $\mathcal{F}$ est linéaire

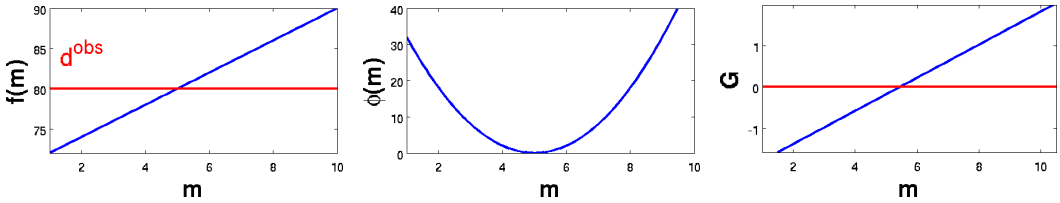


FIGURE 4.4 – Illustration de la fonction coût ϕ et de son gradient $\mathcal{G}$ pour $\mathcal{F}$ une fonction linéaire

En considérant le cas particulier où $\mathcal{F}$ est linéaire, il est possible de formuler l'application $\mathcal{F}$ par une relation linéaire des paramètres m. On utilisera alors la matrice des coefficients F pour représenter $\mathcal{F}$ tel que $\mathcal{F}(m) = Fm$. Le calcul du gradient de ϕ dans le cas particulier où $\mathcal{F}$ est linéaire est noté $\mathcal{G}^l_\phi$ et son expression est donnée par l'équation 4.24. D'après la condition d'optimalité, le minimum global de ϕ est atteint pour m_* solution de l'équation 4.25. m_* est ainsi donné par l'équation 4.26. Cet exemple est illustré sur la figure 4.4.

$$\mathcal{G}^l_\phi(m) = F^t(Fm - d^{obs}), \tag{4.24}$$

$$\mathcal{G}^l_\phi(m_*) = 0 \tag{4.25}$$

$$\Rightarrow \quad m_* = [F^tF]^{-1}F^td^{obs}. \tag{4.26}$$

La matrice $[F^tF]$ correspond, dans le cas où $\mathcal{F}$ est linéaire, au Hessien de la fonction ϕ. Le calcul direct de m_* nécessite l'inversion de cette matrice et l'on pourra considérer trois cas de figure :

- **La matrice hessienne est inversible**

L'inversion de la matrice est possible si le rang de la matrice est égal au nombre de paramètres. Cela signifie qu'il existe un unique modèle de paramètres solution du problème. En d'autres termes le dispositif expérimental permet de retrouver l'intégralité des paramètres du modèle. Il est alors possible d'utiliser une méthode d'inversion dite directe comme la méthode des cofacteurs ou encore la décomposition LU.

- **La matrice hessienne est inversible mais de très grande taille**

La matrice Hessienne est inversible cependant il est fréquent que nous ne souhaitions pas l'inverser par une méthode directe. Cette matrice carrée souvent creuse a la taille de $p*p$ et son inversion peut être coûteuse. On a alors recours à des méthodes d'inversion itératives telle que la méthode de la plus grande pente, les méthodes de gradient conjugué ou encore la méthode de Quasi-Newton (Culioli, 1994; Gill et al., 1981).

- **La matrice hessienne est singulière**

Une matrice Hessienne singulière signifie que les données ne permettent pas de contraindre l'intégralité des paramètres. Il est également possible d'avoir recours aux méthodes d'inversion itératives, qui dans ce cas, orientent la solution vers une des solutions du problème en fonction du choix du modèle initial.

Exemple : Résolution du problème linéaire sans contrainte

Afin d'illustrer ces différents cas, la fonction $\mathcal{F}$ est définie en fonction de deux paramètres notés m_1 et m_2 par la relation linéaire suivante : $\mathcal{F}(x, y; m_1, m_2) = xm_1 + ym_2$. Les données d^{obs} sont obtenues par q mesures réalisées en différentes positions définies par le couple $(x_i, y_i)_{i=1,;q}$ dans le but d'estimer les paramètres m_1 et m_2 définies par le système d'équations suivant :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \\ d_q \end{pmatrix}}_{\mathbf{d}} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_i & y_i \\ \vdots & \vdots \\ x_q & y_q \end{pmatrix}}_{\mathbf{F}} \underbrace{\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{m}} \tag{4.27}$$

Les exemples illustrés sur la figure 4.5 représentent les contours de la fonction coût $\phi(m_1, m_2)$ obtenue en considérant les 4 jeux de données présentés dans les paragraphes suivants.

La première illustration (fig. 4.5a) représente la fonction coût calculée d'après deux données réalisées aux points $d_1(x_1 = 1, y_1 = 0)$ et $d_2(x_2 = 0, y_2 = 1)$. Le système à résoudre est donné par l'équation 4.28. La matrice Hessienne est dans ce cas inversible et les techniques itératives les plus simples permettent de retrouver le minimum de cette fonction en une seule itération indépendamment du modèle initial. En effet, le Hessien ne possède que des termes diagonaux qui se trouvent être tous égaux. Chaque paramètre est déterminé par une seule mesure et de la même façon chaque mesure est sensible à un seul paramètre. Les poids des coefficients de l'application $\mathcal{F}$ font que la fonction cout est sensible de façon équivalente aux paramètres $m1$ et $m2$, ce qui ce manifeste par une fonction cout parfaitement quadratique et symétrique.

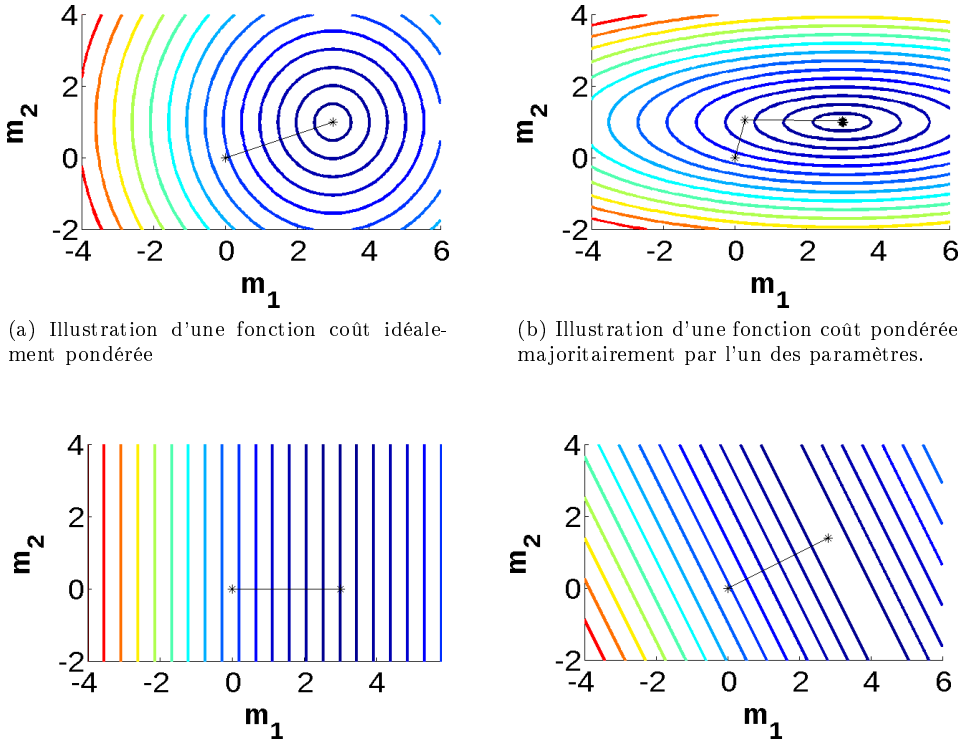
$$\underbrace{\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{d}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{F}} \underbrace{\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{m}} \qquad \Rightarrow \mathcal{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4.28}$$

La seconde illustration (fig. 4.5b) représente la fonction coût obtenue en considérant deux autres données réalisées aux points $d_1(x_1 = 0.333, y_1 = 0)$ et $d_2(x_2 = O, y_2 = 1)$. La

matrice Hessienne est dans ce cas également inversible. Elle est composée uniquement de termes diagonaux mais cette fois ceux-ci ne sont pas tous égaux. Une petite variation du paramètre m_2 entraînera une plus grande variation de la fonction coût qu'une petite perturbation du paramètre m_1. Les techniques itératives basées sur une descente de gradient simple nécessiteront alors plusieurs itérations en privilégiant une correction du paramètre le plus influent, à savoir m_2. Dans ce cas on pourra remarquer qu'une simple reformulation des paramètres en posant $\widehat{m_2} = m_2/3$ permettrait d'obtenir la fonction coût évoquée dans le cas précédent.

La troisième illustration (fig. 4.5c) représente la fonction coût obtenue en considérant les données aux points $d_1(x_1 = 1, y_1 = 0)$ et $d_2(x_2 = 2, y_2 = 0)$. Cet exemple illustre un cas pour lequel l'un des paramètres n'est pas déterminé par les données. Le rang de la matrice Hessienne est de 1 alors que le nombre d'inconnues s'élève à deux. Une méthode de résolution directe est dans ce cas impossible et l'utilisation d'une méthode itérative orientera le modèle de paramètres solution vers une solution particulière. Dans cet exemple le paramètre m_2 n'est pas contraint et le choix intial de m_2 sera maintenu dans le modèle solution obtenu par la méthode itérative si celle-ci est basée sur une méthode de descente de gradient.

La quatrième figure (fig. 4.5d) illustre un cas quasiment similaire au précédent à la différence près qu'il ne détermine ni le paramètre m_1 ni le paramètre m_2 mais une combinaison de ces deux paramètres. Les données réalisées aux points $d_1(x_1 = 1, y_1 = 1)$ et $d_2(x_2 = 2, y_2 = 2)$, permettent la formulation d'une matrice Hessienne de rang 1. De la même façon les paramètres ne sont pas bien contraints et la solution obtenue par l'utilisation d'une méthode itérative sera fonction du modèle initial. A noter que ni le paramètre m_1 ni le paramètre m_2 ne sont ici déterminés. Les données permettent uniquement de contraindre la combinaison des paramètres tels que $m_2 + 2m_1 = 5$. L'interprétation des valeurs m_1 et m_2 n'ont alors aucun sens et il sera judicieux de n'interpréter que la combinaison $m_2 + 2m_1$ qui est la seule chose que les données peuvent déterminer.



(a) Illustration d'une fonction coût idéalement pondérée

(b) Illustration d'une fonction coût pondérée majoritairement par l'un des paramètres.

(c) Illustration d'une fonction coût indéterminée sur l'un ce ses paramètres

(d) Illustration d'une fonction coût indéterminée sur l'ensemble de ses paramètres m_1 et m_2

FIGURE 4.5 – Contours des fonctions coût pour quatre exemples représentant les différents cas de figure rencontrés lors de la résolution du problème inverse linéaire. La première (a), illustre un problème bien posé pour lequel la recherche du minimum peut s'effectuer par une méthode de résolution directe. La seconde (b) illustre un cas pour lequel il est également possible d'utiliser une méthode directe. L'utilisation d'une méthode itérative permettra sur cet exemple de retrouver dans un premier temps le paramètre le plus influent, à savoir m_2, puis m_1. L'exemple (c) illustre la fonction coût d'un problème mal posé pour lequel une infinité de paramètres sont solutions. Le paramètre m_2 n'est pas contraint et peut alors prendre une valeur quelconque. Si on choisit une méthode de gradient, sa valeur sera fonction du modèle initial. Enfin (d) illustre le cas où aucun paramètre n'est véritablement déterminé. Leurs valeurs seront alors fonctions du modèle initial choisi.

4.2.2.2 Cas pour lequel $\mathcal{F}$ est non-linéaire

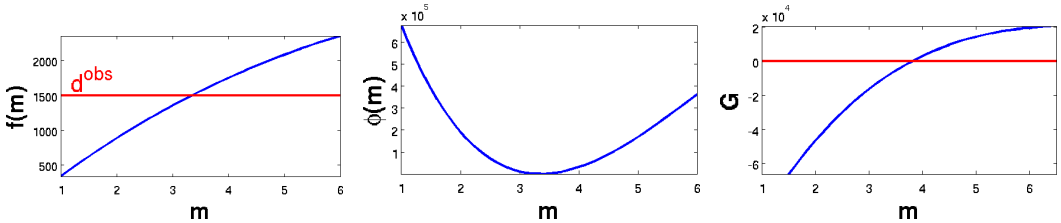


FIGURE 4.6 – Illustration de la fonction coût ϕ et de son gradient $\mathcal{G}$ pour $\mathcal{F}$ une fonction non linéaire

Si le modèle mathématique défini par l'application $\mathcal{F}$ est non linéaire (un exemple est donnée sur la figure 4.6), la recherche du zéro du gradient de la fonction coût est généralement obtenue en utilisant la méthode de Newton. Cette méthode consiste à approcher le gradient de la fonction coût ϕ par une droite, à partir d'une valeur initiale des paramètres (fig 4.7). L'idée est de répéter l'opération au point pour lequel cette droite s'annule jusqu'à convergence des paramètres.

La droite tangente au gradient de ϕ est donnée par l'équation 4.29, et s'annule pour m_* solution de l'équation 4.30 dont l'expression est donnée par l'équation 4.31. Comme dans le cas linéaire, il est nécessaire de calculer l'inverse de la matrice Hessienne permettant de trouver le zéro de cette droite. Encore une fois son calcul direct n'est pas toujours possible et il sera nécessaire d'utiliser une méthode itérative comme évoqué dans le cas linéaire. On utilise alors une méthode itérative imbriquée dans une méthode itérative ...

$$\nabla\widehat{\phi(m)} = \nabla\phi(m_0) + (m - m_0)\nabla^2\phi(m_0) \tag{4.29}$$

$$\nabla\widehat{\phi(m_*)} = 0 \tag{4.30}$$

$$\Rightarrow m_* = m_0 - [\nabla^2\phi(m_0)]^{-1}\nabla\phi(m_0) \tag{4.31}$$

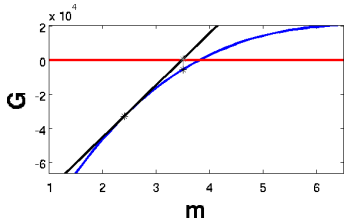


FIGURE 4.7 – Méthode de Newton : Le zero de la courbe représenté en bleu est obtenu en calculant itérativement le zéro de la droite tangente à cette courbe (en noir) à partir d'un modèle m initial.

Dans la pratique que nous verrons plus en détails dans la section suivante, lorsque la fonction est non linéaire la méthode itérative utilisée pour la recherche du zéro du gradient linéarisé est en réalité calculée en une seule itération. Ainsi la valeur du gradient est mise à jour dès lors que l'on considère de nouveaux paramètres.

4.3 Inversion des temps de première arrivée

Dans cette section je propose d'appliquer les méthodes de résolution générale d'un problème inverse au problème posé par la tomographie des temps de première arrivée. Après avoir défini les données et les inconnues du problème, je présente différentes méthodes d'optimisation locale couramment utilisées dans la littérature.

4.3.1 Formulation des équations

4.3.1.1 Les temps de première arrivée

Les données inversées par la méthode d'imagerie décrite dans cette partie sont les temps de première arrivée. Ces temps sont issus d'une campagne d'acquisition de données sismiques et obtenus après l'étape de pointé décrite dans le chapitre 2. Ils nous renseignent de manière ponctuelle sur le temps mis par l'onde de première arrivée pour se propager depuis une source vers un récepteur. Les q données du problème que l'on souhaite résoudre sont représentées par le vecteur t^{obs} tel que

$$t^{obs} = (t_1^{obs}, t_2^{obs}, ..., t_i^{obs}, ..., t_q^{obs})^t. \tag{4.32}$$

4.3.1.2 Discrétisation des propriétés de lenteur

L'objet est décrit par la distribution spatiale de ses propriétés de lenteur (la lenteur est égale à l'inverse de la vitesse). La discrétisation de cette distribution nécessaire dans le problème direct l'est également pour la résolution du problème inverse. Cette discrétisation peut néanmoins être différente de celle choisie pour la résolution du problème direct. Nous avons choisi ici de représenter les propriétés de l'objet par un modèle de p paramètres permettant une description en blocs homogènes dans lesquels la lenteur de l'objet est supposée constante. Les inconnues sont alors les valeurs de lenteur dans les p blocs constituant l'objet discrétisé. Elles sont représentées par le vecteur $\vec{s}$ tel que

$$s = (s_1, s_2, s_3, ..., s_j, ..., s_p). \tag{4.33}$$

4.3.1.3 Relation discrétisée temps - lenteur

Les temps de première arrivée peuvent être calculés de manière théorique en fonction des propriétés de lenteur de l'objet et s'expriment plus précisément par l'intégrale de la lenteur le long de la trajectoire de l'onde

$$t = \int_{\tau(l)} sdl. \tag{4.34}$$

Les mesures réalisées permettent de connaître une estimation des temps de première arrivée de façon ponctuelle seulement. On s'intéressera alors uniquement aux temps pour lesquels une donnée est disponible pour le calcul des temps théoriques. La modélisation des propriétés de lenteur également définies de façon discrète permet d'établir une relation matricielle entre les temps de première arrivée t_i et le modèle de lenteur défini par les p

paramètres s_j de la façon suivante

$$\underbrace{\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_q \end{pmatrix}}_{\mathbf{t}} = \underbrace{\begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1p} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{q1} & l_{q2} & \dots & l_{qp} \end{pmatrix}}_{\mathbf{L}} \underbrace{\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_p \end{pmatrix}}_{\mathbf{s}} \tag{4.35}$$

avec l_{ij} la distance parcourue par le rai du couple source-récepteur i dans le bloc j, s_j la lenteur dans le bloc j.

Remarque :

1. La matrice $\mathbf{L}$ est en pratique composée d'un grand nombre de valeurs nulles l_{ij} correspondant aux blocs j du modèle qui ne sont pas traversés par l'onde le long de trajectoire reliant chacun des couples source-récepteur i.
2. La matrice $\mathbf{L}$ est fonction du modèle de lenteur s puisqu'elle est définie par les trajectoires permettant de minimiser le temps de trajet pour chacun des couples source-récepteur. Ces trajectoires sont évidemment dépendantes du modèle de lenteur.

La recherche du modèle de lenteur à partir des temps de première arrivée n'est pas triviale. En effet, d'après la remarque 2, on comprend que la relation qui lie les temps au modèle de lenteur est non linéaire puisque la matrice $\mathbf{L}$ est fonction du modèle de lenteur. De plus, d'après la remarque 1, même si l'on considère que la matrice $\mathbf{L}$ est indépendante du modèle de lenteur, le nombre de données n'est généralement pas suffisant pour rendre $\mathbf{L}$ inversible, et soulève ainsi le caractère non-unique du modèle de lenteur solution de ce problème.

4.3.1.4 Stratégie d'inversion des temps de première arrivée

- **Problème inverse linéaire :** La résolution du problème inverse linéaire consiste à retrouver le modèle de lenteur $\mathbf{s}$ étant donné la matrice des longueurs $\mathbf{L}$ et les temps de première arrivée $\mathbf{t}$. L'hypothèse réalisée ici est que les trajectoires P_i sont connues a priori. Généralement les trajectoires sont alors des lignes droites connectant directement les sources aux récepteurs. Ce type d'approximation est largement répandu en imagerie médicale et également en imagerie géophysique lorsque le dispositif d'acquisition s'y prête. Cependant pour des dispositifs d'acquisition de surface classiquement utilisés, les trajectoires des rais ne sont généralement pas connues a priori et une approche linéaire n'est pas adaptée.
- **Problème inverse linéarisé :** On suppose ici que le problème peut être localement linéarisé. A partir d'un modèle initial, la trajectoire des rais est calculée et permet une estimation locale de la matrice $\mathbf{L}$. Cela correspond à l'approche de résolution par la méthode de Newton exposée dans la section 4.2.2.2. L'objectif est donc, à chaque itération, de rechercher la solution du problème local linéaire qui pourra être obtenue par méthode directe si cela est possible ou par une méthode itérative. Dans ce second cas, une seule itération est réalisée afin de mettre à jour le trajectoire des rais correspondant aux nouveaux paramètres calculés.

- **Problème inverse non linéaire :** La résolution du problème inverse non linéaire peut être réalisée par l'exploration de l'espace des paramètres par des méthodes globales brièvement introduites dans la section 4.2.1.

Dans le cas qui nous concerne nous avons choisi d'orienter ces travaux de thèse sur l'utilisation des méthodes de résolution linéarisées. Elles sont exposées dans la section suivante.

4.3.2 Algorithme d'optimisation local

Nous avons vu qu'il est possible de formuler une relation entre les données et les propriétés du milieu ausculté donnée par l'équation 4.35. Dans cette section, je propose d'appliquer les techniques d'inversion introduites dans la section 4.2.2 pour la résolution du problème soulevé par la tomographie des temps de première arrivée. Si on choisit de définir la fonction coût comme égale à la distance euclidienne entre les temps théoriques t et les temps t^{obs} issus de la campagne d'acquisition, le problème posé se résume à la recherche du minimum de la fonction ϕ définie par l'équation 4.36.

$$\phi(s) = \|t^{obs} - Ls\|^2 \tag{4.36}$$

Le problème est localement linéarisé et l'on suppose à chaque itération du problème non linéaire que L est connue. La résolution du problème linéaire peut alors être réalisée par une méthode directe quand cela est possible ou par une méthode itérative. Ces méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

4.3.2.1 Méthode de Newton

La matrice Hessienne est inversée par une méthode directe et le minimum global du problème linéaire est obtenu à chaque itération du problème non linéaire. Cette méthode peut être utilisée dans le cas où peu de paramètres sont utilisés pour représenter les propriétés du milieu et que ceux-ci sont bien contraints par les données. A chaque itération du problème non linéaire la perturbation calculée pour le modèle de lenteur s'exprime par l'équation 4.37, présentée également sous sa forme indicielle 4.38.

Méthode de Newton :

$$\delta s^N = [L^t L]^{-1} L^t (Ls - t^{obs}) \tag{4.37}$$

Formulation indicielle :

$$\delta s_j^N = \sum_{k=1}^{q} [H]_{jk}^{-1} \sum_{i=1}^{q} l_{ik} dt_i \tag{4.38}$$

4.3.2.2 Méthode d'approximation du Hessien

La matrice Hessienne est ici simplifiée par ses termes diagonaux. Son inversion est alors triviale. Cette méthode est idéale dans le cas où le nombre de paramètres est grand et que l'inversion intégrale de la matrice Hessienne est trop coûteuse (mémoire et temps de calcul). A chaque itération du problème non linéaire, la perturbation calculée pour le modèle de lenteur s'exprime par l'équation 4.39, présentée également sous sa forme indicielle 4.40. Si les paramètres utilisés ne sont pas contraints, des termes nuls peuvent être présents sur cette

diagonale. On pourra alors choisir d'attribuer une perturbation nulle pour ces paramètres de sorte qu'ils garderont leur valeur initiale, ou imposer une contrainte de lissage de sorte que la perturbation des paramètres sera déterminée par la perturbation de ces paramètres voisins. A chaque itération du problème non linéaire, cette méthode permet de se rapprocher du minimum du problème linéaire en tenant compte de la disparité de l'influence de chacun des paramètres. En d'autres termes cela signifie que dans le cas ou les variations de la fonction coût sont dominées par l'un des paramètres (gradient plus important dans la direction d'un des paramètres), la prise en compte de la diagonale du Hessien permet de réguler ces disparités de sorte que l'influence de chacun des paramètres est normalisée. La calcul du pas α est exposé dans le prochain paragraphe. Si on se réfère aux exemples donnés dans la section 4.2.2.1, le minimum de la fonction coût de l'exemple 1 et 2 est retrouvé en une seule itération.

Méthode d'approximation du Hessien :

$$\delta s^D = \alpha[Diag(L_k^t L_k)]^{-1} L_k^t (L_k s_k - t^{obs}) \tag{4.39}$$

Formulation indicielle :

$$\delta s_j^D = \alpha \frac{1}{\sum_{i=1}^q l_{ij}^2} \sum_{i=1}^q l_{ij} dt_i \tag{4.40}$$

4.3.2.3 Méthode du gradient

La matrice Hessienne est ici simplifiée par un scalaire α. La direction de la plus grande pente est donnée par l'opposé du gradient de la fonction coût. Le scalaire α généralement appelé le « pas » du gradient est déterminé par la recherche du minimum de la fonction coût dans la direction du gradient. Après avoir évalué la fonction coût pour 2 points situés dans la direction du gradient, il est possible de calculer une approximation de la fonction coût par un polynôme d'ordre deux dont l'abscisse du minimum permet d'obtenir le pas optimal α. La perturbation calculée à chaque itération du problème non linéaire est donnée par l'équation 4.41 ainsi que sous sa forme indicielle par l'équation 4.42. Cette méthode est la plus « faible » des trois méthodes présentées ici. Elle permettra de trouver le minimum global du problème linéaire en une itération uniquement dans l'exemple 1 de la section 4.2.2.1.

Méthode de gradient :

$$\delta s^G = \alpha L_k^t (L_k s_k - t^{obs}) \tag{4.41}$$

Formulation indicielle :

$$\delta s_j^G = \alpha \sum_{i=1}^q l_{ij} dt_i \tag{4.42}$$

4.3.3 Méthode géométrique

Dans cette section je décris un deuxième type de méthodes utilisées en tomographie des temps de première arrivée. Ces méthodes sont ici distinguées des précédentes de par leur approche basée sur des concepts géométriques. Je présente tout d'abord la méthode la

plus simple, permettant l'estimation d'un modèle de lenteur moyenné, puis une méthode de reconstruction algébrique et enfin une méthode de reconstruction itérative (Côte, 1988).

4.3.3.1 Back projection technique : BPT

Cette méthode utilisée par Oldendorf (1961); Kuhl & Edwards (1963) est la plus simple. Le milieu est décrit par blocs et les trajectoires des rais définies par des lignes droites. La lenteur de chacun des blocs est calculée comme la moyenne des lenteurs apparentes des rais qui traversent le bloc (eq. 4.43). Cette méthode permet le calcul direct d'un modèle de lenteur néanmoins elle demeure très limitée. En effet, une fois ce calcul réalisé même si des résidus sont observés, aucune possibilité n'est donnée pour modifier le modèle.

$$s_j = \frac{1}{N_j} \sum_i^{N_j} \frac{t_i}{L_i} \tag{4.43}$$

4.3.3.2 Algebraic reconstruction technique : ART

Cette méthode itérative propose de partir d'un modèle initial s_0 pour lequel il est possible de calculer les résidus dt_i représentant la différence entre les temps de première arrivée théoriques t et les temps observés t^{obs}. L'idée est de corriger le modèle s_0 itérativement de façon à annuler le résidu de chaque rai un à un (Cormack, 1963; Gordon et al., 1970). Cette technique, plus évoluée que la précédente, permet une diminution des résidus cependant la solution obtenue dépend de l'ordre dans lequel on considère les rais. Le calcul de la perturbation du modèle de lenteur se fait itérativement pour $k = 1, ..., q$ si q est le nombre de couples source-récepteur. Il est donné par l'équation 4.44.

$$s_j^{k+1} = s_j^k + \frac{L_{ij} \sum_j \left(L_{ij} s_j^k - t_i^{obs} \right)}{\sum_j L_{ij}^2} \tag{4.44}$$

4.3.3.3 Simultaneous iterative reconstruction technique : SIRT

Cette méthode consiste à répartir le résidu des temps dans les cellules parcourues par les rais en fonction de leur longueur relative dans la cellule. Cette fois l'ensemble des rais est pris en compte à chaque itération. On trouve dans la littérature plusieurs formulations dont la plus courante est la suivante (Van der Sluis & Van der Vorst, 1987) :

Méthode SIRT :

$$\delta s_j^S = \frac{1}{\sum_i L_{ij}^{2-\alpha}} \sum_i \frac{L_{ij} \sum_j \left(L_{ij} s_j - t_i^{obs} \right)}{\sum_j L_{ij}^{\alpha}} \tag{4.45}$$

4.4 Implémentation des méthodes dans le code Tomo3D

Les méthodes proposées dans la section précédentes sont classifiées en fonction de l'approche soit mathématique soit géométrique de la résolution du problème posé par l'inversion des temps de première arrivée. Du point de vue de l'implémentation, nous distinguerons la méthode de Newton, à savoir le calcul de la perturbation de lenteur par méthode directe à chaque itération du problème non linéaire des autres méthodes itératives telles que la méthode d'approximation du Hessien, la méthode du gradient et la méthode SIRT. En effet

une différence fondamentale distingue ces méthodes. La première (méthode de Newton) nécessite l'inversion de la matrice L. Cette méthode sera donc uniquement utilisée dans le cas où peu de paramètres sont utilisés pour décrire les propriétés de l'objet. Les autres méthodes (Ap. Hessien, gradient et SIRT) ne nécessitent pas l'inversion ni même la stockage explicite de la matrice L. L'implémentation ce ces méthodes est détaillée dans les paragraphes suivants.

4.4.1 Implémentation de la méthode de Newton

Cette méthode nécessite l'inversion et le stockage de la matrice L à chaque itération du problème non linéaire. Pour un modèle initial s_0 la matrice L est calculée en utilisant l'outil de tracé de rais RayPath3D. A chaque itération, on calcule la perturbation du modèle de lenteur en utilisant l'équation 4.38. Dans le cas où les paramètres sont contraints par les données, il n'est pas nécessaire d'ajouter de l'information a priori ni même des contraintes dans l'inversion. Dans le cas contraire il est possible d'ajouter des contraintes sur les paramètres comme évoqué dans le section 4.1.3.

Ajout d'une contrainte de lissage

Les contraintes que nous avons appelées contraintes de lissage ajoutent des équations au système qui possédait jusqu'ici plus d'inconnues que de données. Nous avons choisi ici d'ajouter à la fonction coût une contrainte telle que le gradient du modèle soit minimum. La contrainte se manifeste par l'équation 4.46

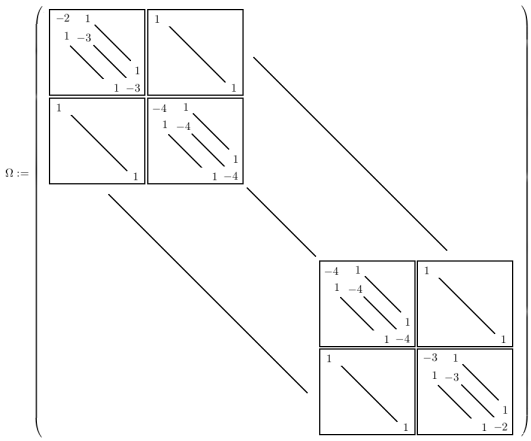
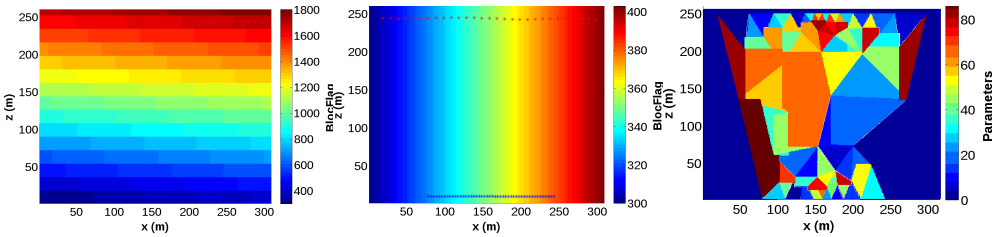


FIGURE 4.8 – Illustration de l'opérateur Laplacien pour une paramétrisation 2D

$$\phi_m(s) = \|\Delta s\|^2 \tag{4.46}$$

On considère ici l'opérateur matriciel Ω obtenu par l'approximation du Laplacien Δs par différences finies tel que $\Omega s = \Delta s$. La matrice Ω dont la taille est celle des paramètres au carré est représentée sur la figure 4.8 pour une paramétrisation 2D et des dérivées décentrées sur les bords du domaine. Le calcul de la perturbation de lenteur est alors donné par l'équation 4.47. Des exemples utilisant cette contrainte sont illustrés dans le chapitre 5



(a) Paramétrisation anisotrope (b) Paramétrisation 1D (c) Paramétrisation triangulaire

FIGURE 4.9 – Redéfinitions des paramètres d'inversion

à travers l'inversion de données synthétiques.

$$\delta s^{NC} = [L^t L + \omega \Omega^t \Omega]^{-1} L^t (Ls - t^{obs}) \tag{4.47}$$

Paramétrisation irrégulière

Une autre façon d'ajouter de l'information a priori est de modifier la paramétrisation. On utilise ici une matrice intermédiaire permettant de passer de la paramétrisation classique (grille discrète régulière) à une paramétrisation originale (fig. 4.9). La matrice intermédiaire a la dimension des paramètres et les valeurs contenues dans cette matrice correspondent à des entiers permettant de regrouper les paramètres en fonction des regroupements réalisés dans la nouvelle paramétrisation originale. La dimension de la matrice L peut ainsi être réduite et dans certains cas donner la possibilité d'une résolution directe. Cette méthode sera utilisée pour obtenir les vitesses moyennes du massif de Tournemire dans le traitement des données de l'acquisition Surface-Tunnel (chap. 8).

4.4.2 Implémentation de la méthode de Gradient

Cette méthode est plus légère que la précédente. Ici ni l'inversion ni le stockage de la matrice L ne sont nécessaires. En réalisant une boucle sur les sources, une boucle sur les récepteurs, et une boucle sur les mailles traversées par le rai décrivant la trajectoire entre la source et le récepteur considéré, la variable $\widehat{ds_j}$ est directement incrémentée. Un vecteur dont la taille est égale au nombre de paramètres est alors suffisant. Le calcul de la perturbation est obtenu en évaluant la fonction coût pour α_1 et α_2, et en calculant α tel que le polynôme d'ordre 2 approchant la fonction pour α_1 et α_2 soit minimum. La perturbation ds est donnée par le produit $\alpha\widehat{ds}$.

Ajout d'une contrainte de lissage

Tout comme pour la méthode de Newton, l'ajout d'un terme dans la fonction coût permet d'ajouter une contrainte sur les paramètres. Cependant, en utilisant la méthode du gradient, la contrainte est calculée pour le modèle de paramètres précédent. En effet, si l'on regarde l'équation 4.48 permettant le calcul de la perturbation des paramètres avec la prise en compte de la contrainte de lissage, on constate que le gradient du modèle est calculé sur le modèle courant. On peut alors choisir que cette stratégie est satisfaisante, ou alors opter pour une contrainte calculée sur la perturbation de lenteur elle-même. Dans ce dernier cas cela revient à calculer le gradient sans contrainte filtré.

$$\widehat{\delta s^{GC}} = (L^t L + \omega \Omega^t \Omega) s - L^t t^{obs} \tag{4.48}$$

Ajout d'une contrainte sur la valeur des paramètres

Il peut être utile d'ajouter des contraintes concernant la valeur des paramètres recherchés. D'un point de vue physique, il n'est par exemple pas possible d'observer des vitesses de propagation négatives. Le problème posé comme un problème d'optimisation ne prend pas en compte ces informations pourtant évidentes d'un point de vue physique. On peut alors choisir d'ajouter ces contraintes sur les paramètres en imposant un intervalle de valeurs dans lequel les paramètres doivent rester. L'implémentation de cette contrainte dans la méthode de gradient est simple et consiste à annuler les perturbations qui engendreraient un dépassement de cet intervalle. Comme nous le verrons dans la partie « applications », les intervalles choisis pour décrire les paramètres peuvent varier en fonction de leurs positions en définissant des blocs de contraintes.

4.4.3 Implémentation de la méthode d'approximation du Hessien

Cette méthode est proche de la méthode du gradient. Un terme de normalisation, si on peut l'appeler ainsi, est calculé dans un vecteur supplémentaire. Celui-ci a la taille des paramètres du modèle et est incrémenté également à l'intérieur des trois boucles (sources, récepteurs, mailles traversées), afin de sommer la longueur au carré des segments de rais traversant la maille. La direction de la perturbation du modèle est calculée par l'équation 4.40. De la même façon, il est possible d'introduire des contraintes de lissage (eq. 4.49) et/ou des contraintes sur la valeur des paramètres comme exposé dans la section précédente.

$$\widehat{\delta s^{HC}} = \frac{(L^t L + \omega \Omega^t \Omega)s - L^t t^{obs}}{Diag[L^t L + \omega \Omega^t \Omega]} \tag{4.49}$$

4.4.4 Implémentation de la méthode SIRT

Tout comme la méthode de gradient et la méthode d'approximation du Hessien, cette méthode ne nécessite ni l'inversion ni le stockage de la matrice L. Cette méthode possède un avantage supplémentaire, en calculant directement la valeur de la perturbation du modèle. Ainsi l'estimation de la fonction coût par un polynôme dans la direction de la perturbation n'est plus nécessaire et permet l'économie de la résolution du problème direct.

Ajout d'une contrainte de lissage

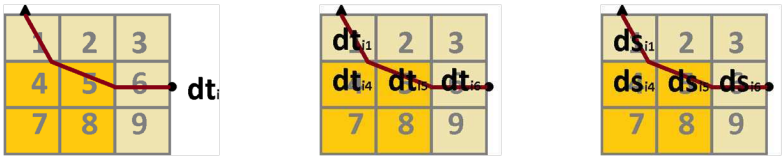
L'implémentation d'une contrainte de lissage est ici réalisée sur la perturbation du modèle en réalisant une moyenne pondérée par la densité de rais des corrections initialement calculées dans chaque maille. Le périmètre est déterminé en entrée du code d'inversion de façon à ce que les corrections calculées dans ce périmètre soient prises en compte dans le calcul avec une pondération gaussienne. Ce type de contrainte se rapproche ainsi de l'utilisation d'un rai gras.

Ajout d'une contrainte sur la valeur des paramètres

La contrainte sur la valeur des paramètres est très intéressante lorsque l'on utilise la méthode SIRT. Dans la méthode de gradient, nous avons vu que cette contrainte se manifeste par une mise à zéro des perturbations qui engendrerait un dépassement de valeur. Ici l'implémentation réalisée est plus subtile et permettra de ne pas bloquer l'inversion. Si on détaille le calcul de la perturbation de lenteur dans une maille, on peut l'expliquer facilement par un raisonnement géométrique de la façon suivante :

- A partir du modèle initial s_0 on calcule pour chaque rai i le temps t_i^{cal} .

- On calcule le résidu dt_i du rai i tel que $dt_i = t_i^{obs} - t_i^{cal}$ (fig. 4.10a).
- Ce résidu peut être réparti de façon homogène sur l'ensemble des mailles. On définit ainsi le résidu du rai i dans la maille j noté dt_{ij} de la façon suivante : $dt_{ij} = L_{ij}\frac{dt_i}{L_i}$, avec L_i la longueur totale du rai i (fig. 4.10b).
- On définit également la perturbation $ds_{ij} = \frac{dt_{ij}}{L_{ij}}$ correspondant à la perturbation de lenteur de la maille j qui permettra l'annulation du résidu du rai i (fig. 4.10c).



(a) Calcul du résidu (b) Calcul du résidu par maille (c) Calcul de la perturbation

FIGURE 4.10 – Décomposition du calcul de la perturbation du modèle de lenteur par la méthode SIRT pour le rai i

Le calcul de la perturbation dans chaque maille j correspond finalement à la moyenne pondérée des perturbations ds_{ij} calculées pour chacun des rais traversant la maille. Si on choisit de bloquer certains paramètres dès lors que ceux-ci ont atteint leur valeur limite, on pourra alors considérer lors du calcul du résidu par maille dt_{ij} non plus la longueur totale du rai mais uniquement la longueur effective correspondant à la longueur du segment appartenant aux mailles qui ne sont pas bloquées. Ainsi le résidu est uniquement réparti sur les paramètres restants et les paramètres qui ont atteint leurs limites ne sont plus considérés comme des inconnues de l'inversion.

Dans le prochain chapitre je propose de comparer ces méthodes (méthode de Newton, méthode du gradient, méthode d'approximation du Hessien et méthode SIRT) pour l'inversion de données synthétiques. Dans ce chapitre, nous testerons dans différents contextes, à savoir un modèle initial proche ou éloigné, une couverture dense ou éparse, une inversion avec ou sans contrainte, le comportement de ces méthodes afin de conclure sur leurs avantages et inconvénients.

Chapitre 5

Discussion sur les méthodes

Sommaire

5.1 Influence du dipositif d'acquisition 82
5.2 Influence de la paramétrisation 89
5.3 Contraintes sur les paramètres recherchés 92
5.4 Conclusion 97

Dans ce chapitre je propose de réaliser l'imagerie d'objet synthétique. L'objet est réduit à un ensemble de paramètres permettant la description de ses propriétés de vitesse. On utilise ici une paramétrisation par blocs dans laquelle les propriétés de lenteur de l'objet sont homogènes. L'ensemble de ces paramètres est représenté par le vecteur s^{obs}. Les données normalement mesurées lors d'une campagne d'acquisition sont ici simulées par la résolution du problème direct dans cet objet. Nous appelons ces données les données observées et celles-ci sont représentées par le vecteur t^{obs}. A travers différents exemples, je propose dans ce chapitre de comparer les méthodes d'inversion présentées dans la chapitre précédent en considérant les différents facteurs qui influent sur l'imagerie réalisée.

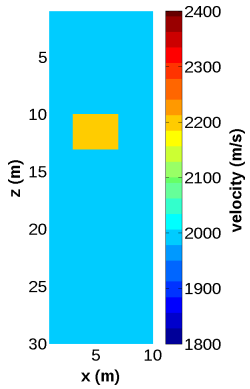


Figure 5.1 – Vitesse « vraie » de l'objet synthétique.

Critère d'évaluation des méthodes

La tomographie des temps de première arrivée permet à partir des données t^{obs} mesurées sur un objet de calculer un ensemble de paramètres s^{cal} permettant la description des propriétés de lenteur de cet objet. Dans le cas d'une étude synthétique, il est possible d'évaluer la qualité de l'imagerie réalisée à l'aide de deux critères :

1. Les données calculées t^{cal} pour des propriétés de lenteur décrites par les paramètes s^{cal} sont proches des données observées t^{obs}.
2. Les paramètres s^{cal} obtenus par la méthode sont proches des paramètres s^{obs} permettant la description exacte des propriétés de l'objet.

On pourra alors définir le résidu sur les données Res^t et le résidu sur les paramètres Res^s. Ce type d'évaluation ne prend pas en compte l'hétérogénéité de la couverture du dispositif. Suivant la géométrie d'acquisition, certains paramètres peuvent cependant être mieux contraints que d'autres. La qualité de l'imagerie peut alors être hétérogène. La qualité des paramètres obtenus par les différentes méthodes sera exprimée en fonction des deux critères décrits ci-dessus et la couverture du dispositif sera néanmoins spécifiée pour chacun des exemples afin de prendre en compte ces hétérogénéités lors de l'interprétation des résultats.

$$Res^t = \sqrt{\frac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}(t_i^{cal} - t_i^{obs})^2} \tag{5.1}$$

$$Res^s = \sqrt{\frac{1}{p}\sum_{j=1}^{p}(s_j^{cal} - s_j^{obs})^2} \tag{5.2}$$

La résolution du problème non linéaire par l'utilisation de méthode d'optimisation locale peut être pertinente si les hypothèses de linéarisation sont valables. Dans le cas de la tomographie des temps de première arrivée cela se traduit par une faible perturbation de la trajectoire des rais dans le domaine à chaque itération. Si l'on choisit cette approche, le problème linéarisé consiste alors à utiliser les méthodes itératives pour la résolution du problème linéaire en prenant le soin de réévaluer la trajectoire des rais à chaque itération. Dans ce chapitre, dans le but de dégager les tendances des différentes méthodes d'optimisation, on ne considèrera pas les variations de trajectoires, celles-ci complexifieraient l'analyse. En d'autres termes, on suppose que les trajectoires des rais sont connues. Plusieurs facteurs peuvent alors être déterminants sur la qualité de l'imagerie réalisée. Parmi eux le dispositif d'acquisition, la paramétrisation des propriétés de l'objet, le choix du modèle initial, la méthode d'optimisation, ou encore la définition de la fonction coût sont ici évalués. La tomographie des temps de première arrivée peut alors être réalisée avec pour uniques données d'entrée les données observées t^{obs}. Nous verrons dans une première sous-section 5.1 que ces données ne sont parfois pas suffisantes pour contraindre les paramètres choisis pour décrire l'objet. Afin de pallier ce problème, il est possible de réduire le nombre de paramètres. Cette alternative est présentée dans la sous-section 5.2. Une seconde alternative consiste à ajouter en donnée d'entrée une contrainte sur les paramètres recherchés. Cette alternative est présentée dans la sous-section 5.3.

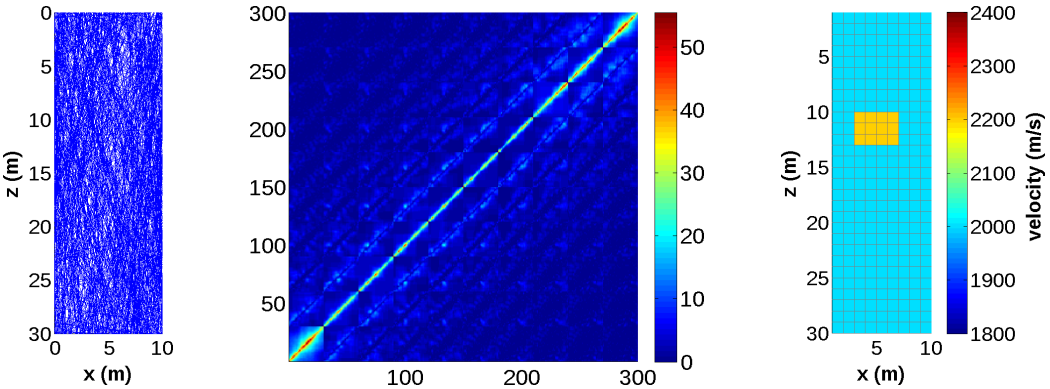
5.1 Influence du dipositif d'acquisition

Dans cette section, je propose de comparer les résultats de l'inversion des données observées par la méthode de descente de gradient, par la méthode d'approximation du Hessien ainsi que par la méthode SIRT respectivement décrites dans les section 4.3.2.2, 4.3.2.3 et 4.3.3.3, pour deux dispositifs d'acquisition. L'objet synthétique étudié est décrit par 30*10 paramètres représentés sur la figure 5.1. La paramétrisation utilisée pour l'inversion est composée elle aussi de 30*10 paramètres et permet de représenter de façon exacte les propriétés de vitesse de l'objet synthétique. On considère les 2 acquisitions suivantes :

Dispositif d'acquisition n°1 : fig.5.2. 600 données sont acquises tout autour de l'objet. Les trajectoires des rais sont représentées sur la figure 5.2a et le dispositif d'acquisition

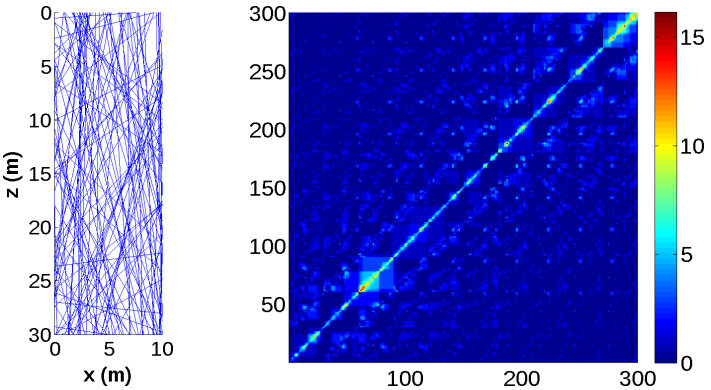
permet de contraindre l'ensemble des paramètres. La matrice Hessienne représentée sur la figure 5.3b est inversible et le calcul des paramètres peut être réalisé par une méthode directe comme le montre la figure 5.2c. Le modèle de paramètres solutions est unique dans le cas où les données inversées sont celles obtenues par l'acquisition n°1. Les résultats obtenus par les méthodes d'optimisation SIRT, descente de gradient et méthode d'approximation du Hessien tentent toutes les trois de converger vers ce modèle indépendamment du modèle initial (fig 5.4 et 5.5). L'application $\mathcal{F}$ est linéaire et ϕ est convexe. Le problème est bien posé et les trois méthodes convergent plutôt bien vers ce modèle quelque soit le modèle initial. Sur cet exemple la méthode SIRT permet une meilleure approximation des paramètres dans les premières itérations avec un plus faible coût de calcul. Ceci est remarquable lorsque le modèle de paramètres initial est loin du modèle solution. En revanche, à proximité du modèle solution, cette méthode n'est plus efficace et converge avec une extrême lenteur en se faisant rattraper par les méthodes de descente de gradient et d'approximation du Hessien. Cet exemple nous permet de conclure que lorsque le modèle solution est unique, les méthodes de gradient et d'approximation du Hessien permettent une meilleure approximation des paramètres du modèle à proximité de la solution. Néanmoins ces résultats montrent également que l'utilisation de la méthode SIRT pour les premières itérations permet d'accroître les performances d'une méthode de gradient ou d'approximation du Hessien.

Dispositif d'acquisition n°2 : fig.5.3. 120 données sont acquises autour de l'objet. Le nombre de données est inférieur au nombre des paramètres recherchés ce qui implique que la matrice Hessienne est singulière. Le modèle de paramètres solution n'est pas unique. Le nombre de données est inférieur au nombre de paramètres et la solution que l'on cherche à estimer correspond à un minimum local de la fonction coût. Les résultats obtenus par les méthodes d'optimisation SIRT, descente de gradient et méthode d'approximation du Hessien sont fonctions du modèle initial choisi ainsi que de la méthode de minimisation (fig 5.6 et 5.7). L'application $\mathcal{F}$ est linéaire cependant le problème est mal posé. Cette configuration nous place dans le troisième cas de figure évoqué dans la section 4.2.2.1. On remarque que si les paramètres initiaux sont proches des paramètres solutions, les trois méthodes donnent un modèle solution relativement bon avec une erreur d'environ $40m/s$ alors que si le modèle initial est fortement éloigné, chacune des méthodes converge vers une solution particulière différente. A noter que dans le cas d'un modèle initial éloigné du modèle vrai, la méthode d'approximation du Hessien donne ici une meilleure évaluation du modèle de paramètres que les deux autres méthodes. De ces deux exemples, on peut conclure que si le dispositif d'acquisition ne permet pas de contraindre l'ensemble des paramètres alors les paramètres solutions du problème de minimisation sont fortement influencés par le modèle initial et la méthode d'optimisation utilisée.



(a) Rais (b) Matrice Hessienne (c) Méthode de Newton

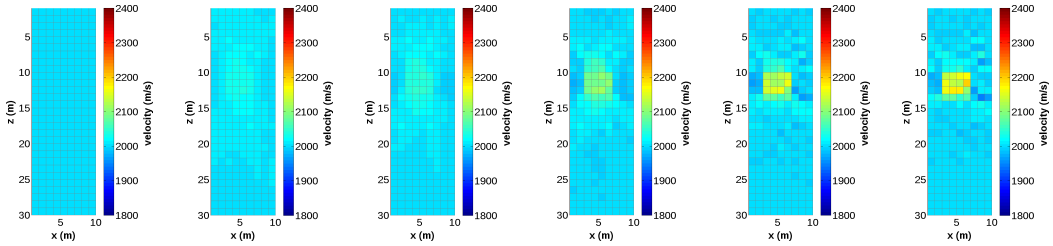
FIGURE 5.2 – Présentation du **dispositif d'acquisition n°1** (a) et de la matrice Hessienne (b). Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c).



(a) Rais (b) Matrice Hessienne

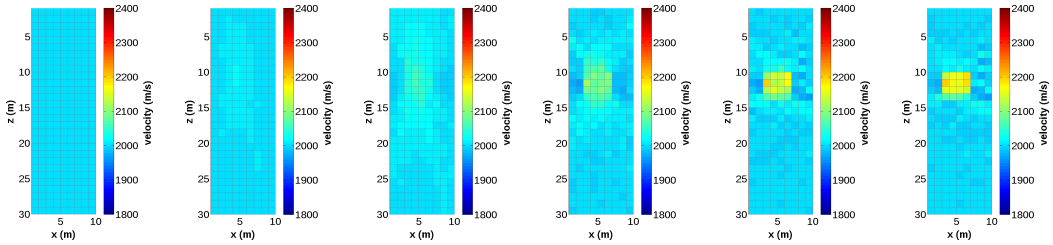
FIGURE 5.3 – Présentation du **dispositif d'acquisition n°2** (a) et de sa matrice Hessienne(b). Cette acquisition ne permet pas de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème n'est pas unique et ne peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien.

Méthode SIRT



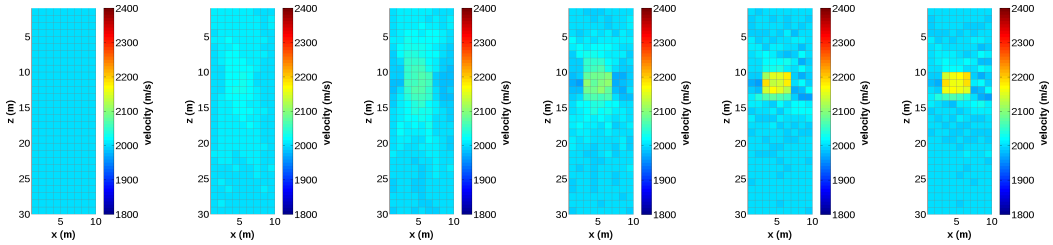
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

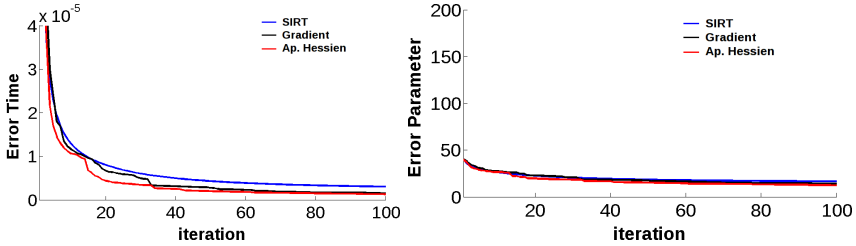


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



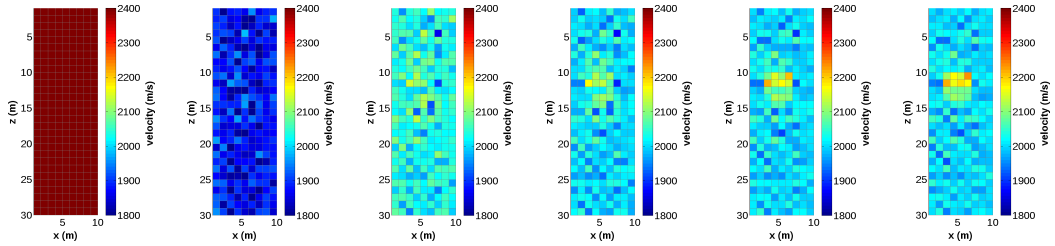
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Résidus des paramètres

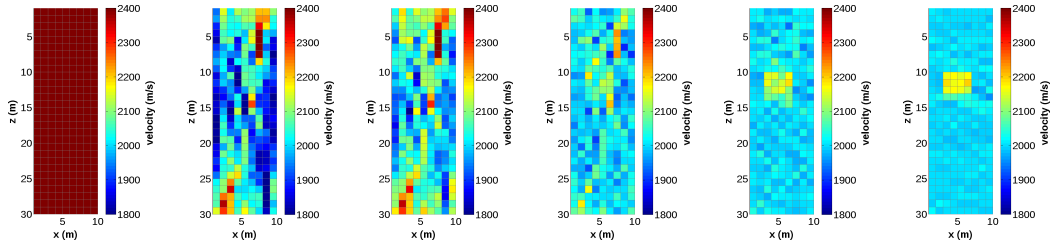
FIGURE 5.4 – Acquisition n°1 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché.

Méthode SIRT



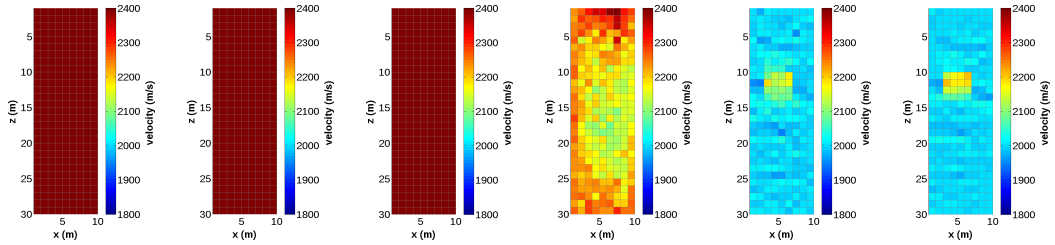
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

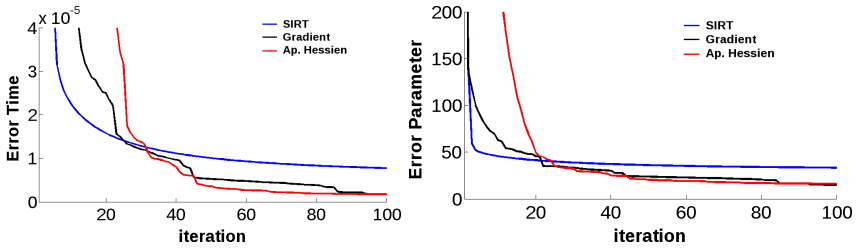


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



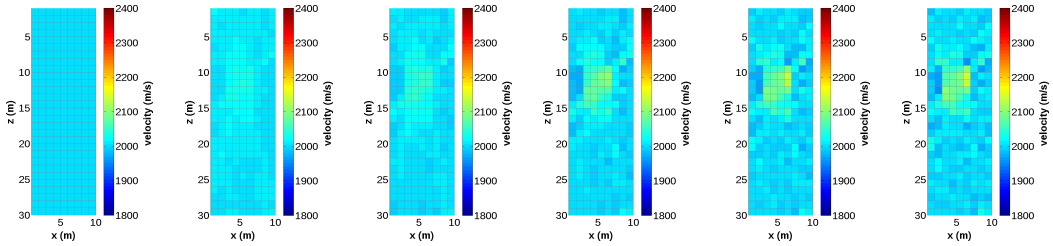
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Résidus des paramètres

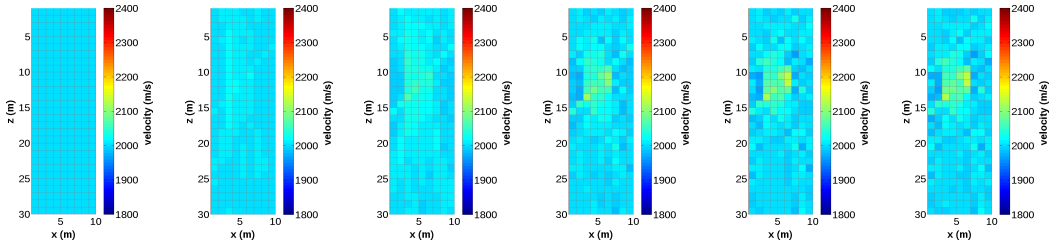
FIGURE 5.5 – Acquisition n°1 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché.

Méthode SIRT



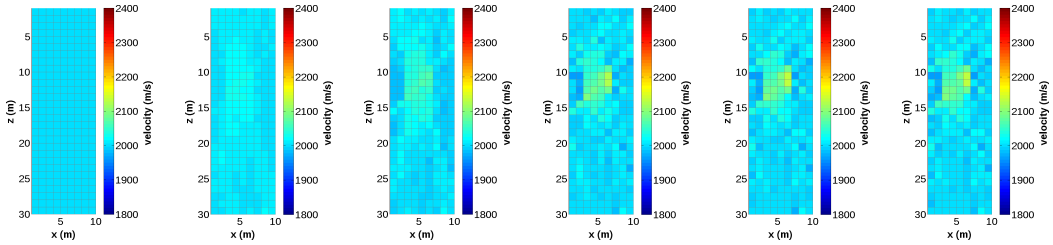
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

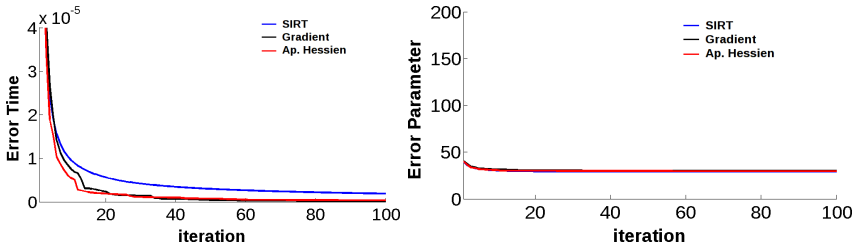


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



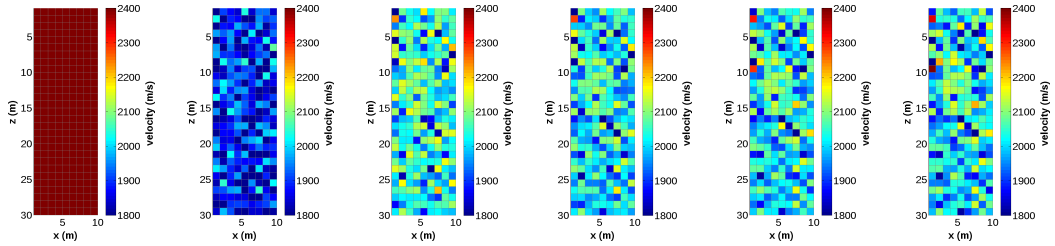
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Résidus des paramètres

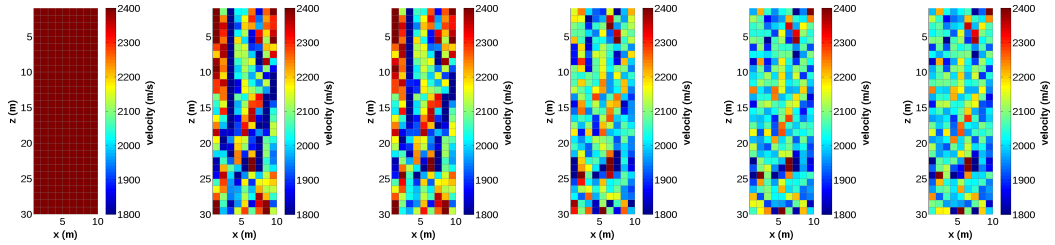
FIGURE 5.6 – Acquisition n°2 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché.

Méthode SIRT



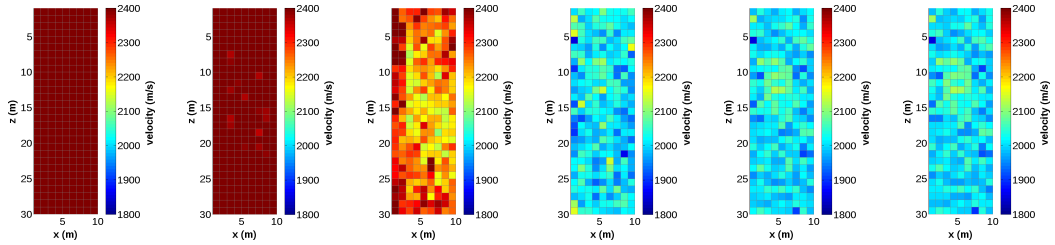
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

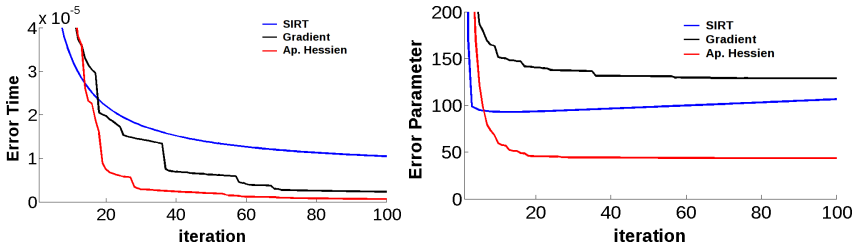


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100

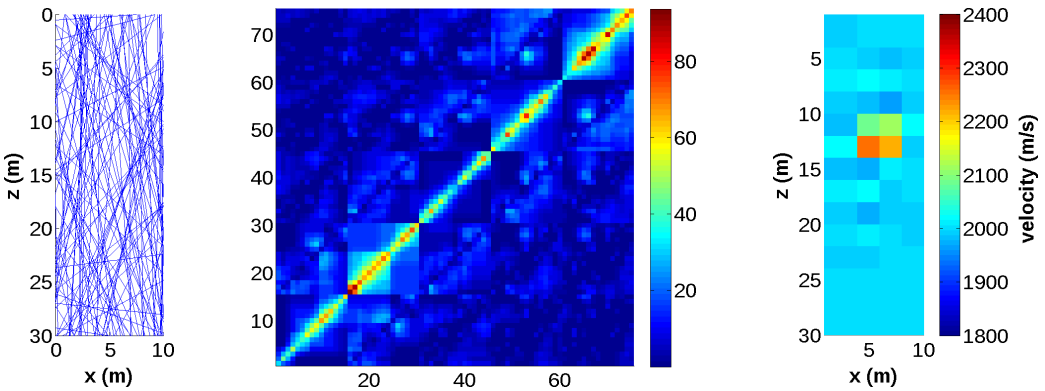


(s) Résidus des temps (t) Résidus des paramètres

FIGURE 5.7 – Acquisition n°2 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché.

5.2 Influence de la paramétrisation

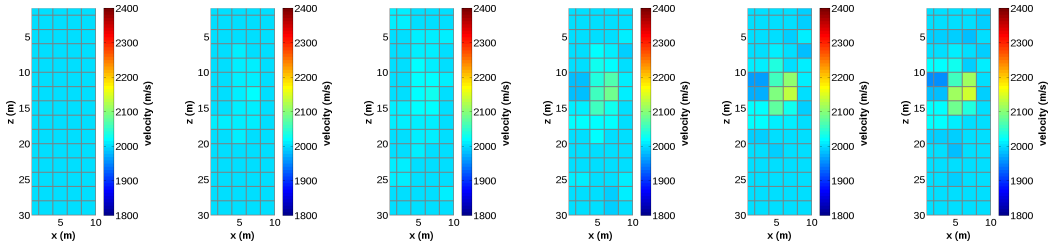
La définition de la matrice Hessienne est liée aux données de l'acquisition mais également à la paramétrisation de l'objet. Dans le cas précédent, les données de l'acquisition n°2 ne sont pas suffisantes pour contraindre l'intégralité des paramètres. Une re-définition des paramètres pourrait cependant permettre de définir un problème bien posé avec une unique solution. Dans cette section, je propose de regarder les résultats de l'inversion des données de l'acquisition n°2 en considérant cette fois 10*5 paramètres. La paramétrisation ainsi réalisée ne peut représenter exactement les propriétés de l'objet cependant le problème est maintenant bien posé et la matrice Hessienne inversible. La résolution du problème obtenue par le calcul de l'inverse de la matrice Hessienne par méthode directe est présentée sur la figure 5.8. Ce modèle correspond à la solution globale du problème de minimisation posé. Les figures 5.9 et 5.10 illustrent les trois méthodes itératives SIRT, descente de gradient et approximation du Hessien pour deux modèles initiaux. Les méthodes itératives convergent toutes vers l'unique solution avec encore une fois des différences liées à leur vitesse de convergence. A noter que la méthode SIRT donne ici de moins bons résultats que les deux autres méthodes. Si l'on compare les méthodes d'optimisation, on arrive aux mêmes conclusions que celles évoquées dans le paragraphe précédent. Cependant l'intérêt est ici de montrer que la redéfinition des paramètres a permis d'obtenir une solution unique au problème et les solutions obtenues par les trois méthodes sont ainsi plus proches du modèle de paramètres vrais que celles obtenues avec une paramétrisation 30*10. La conclusion de ces tests est que la définition du problème que l'on souhaite résoudre prime devant la méthode d'optimisation choisie.



(a) Rais (b) Matrice Hessienne (c) Méthode de Newton

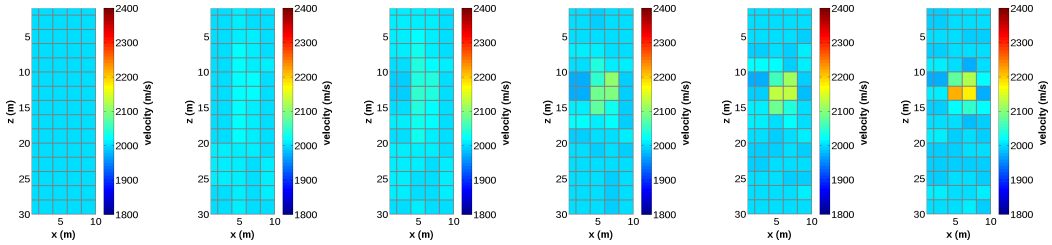
FIGURE 5.8 – Utilisation d'une paramétrisation réduite pour le dispositif d'acquisition n°2 (a). (b) représente la matrice Hessienne. Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c).

Méthode SIRT



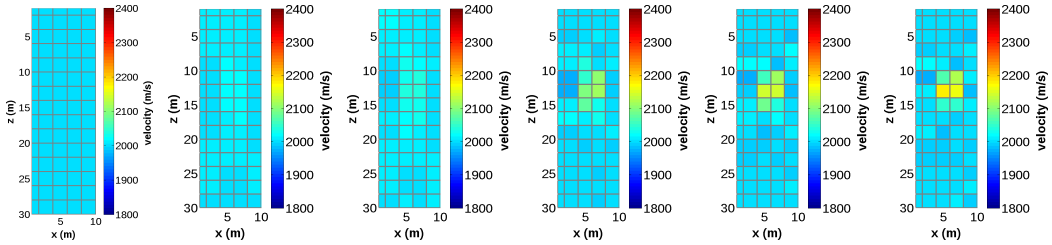
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

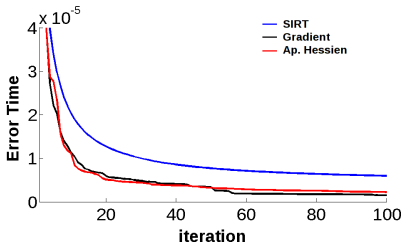


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

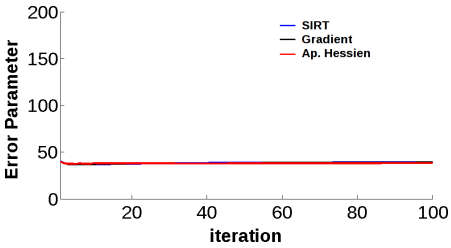
Méthode d'approximation du Hessien



(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



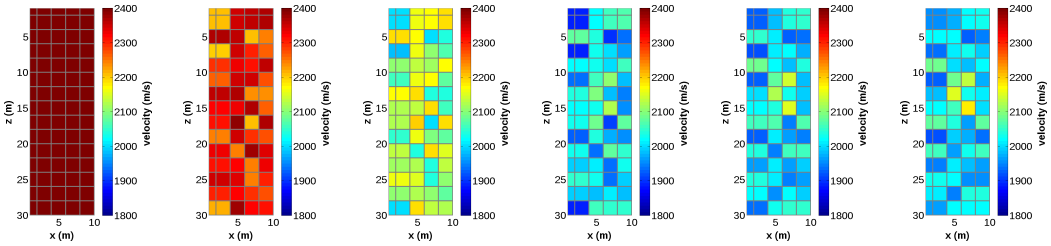
(s) Résidus des temps



(t) Résidus des paramètres

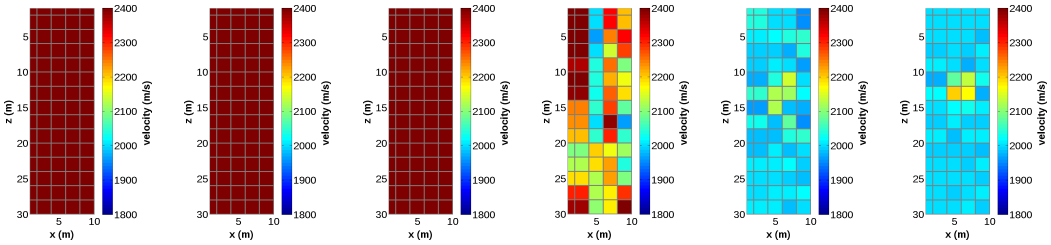
FIGURE 5.9 – Acquisition n°2 : paramètres calculés pour une paramétrisation réduite à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché.

Méthode SIRT



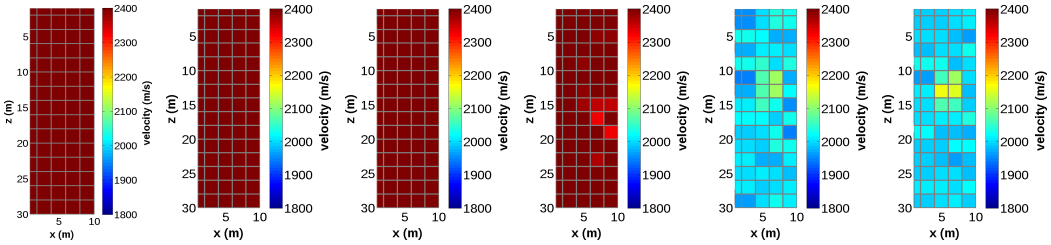
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

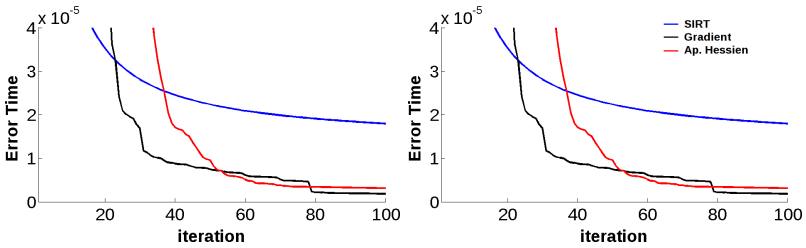


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Résidus des paramètres

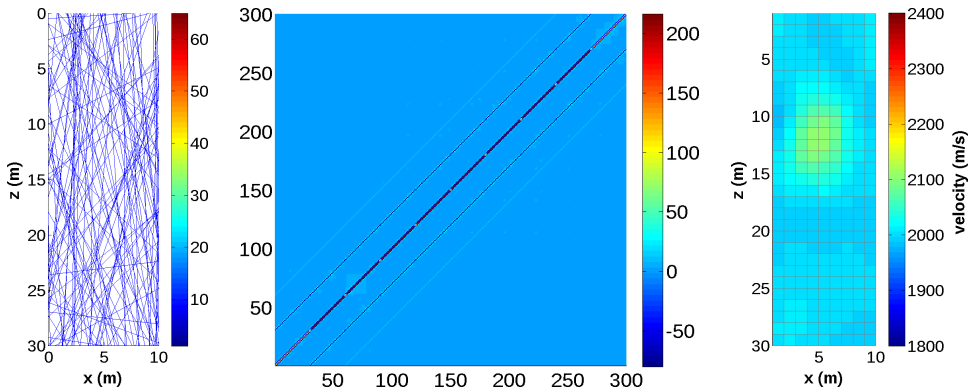
FIGURE 5.10 – Acquisition n°2 : paramètres calculés pour une paramétrisation réduite à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché.

5.3 Contraintes sur les paramètres recherchés

Dans la section précédente nous avons vu que si le problème est mal posé et que les données ne peuvent contraindre l'intégralité des paramètres une solution consiste à redéfinir les paramètres du modèle. Une autre alternative consiste à ajouter une contrainte sur les paramètres recherchés. On considère alors la fonction coût définie par l'équation 5.3. On considère ici le dispositif d'acquisition n°2 et le poids ω de cette contrainte est égale à 1. La matrice Hessienne est cette fois la somme de la matrice Hessienne calculée dans le cas d'optimisation sans contrainte à laquelle s'ajoute la matrice Hessienne liée à la contrainte de lissage (voir section 4.4). La figure 5.11b illustre la nouvelle matrice Hessienne, qui est alors inversible. La résolution par une méthode directe est possible et le modèle solution est unique et est présenté sur la figure 5.11c.

$$\phi = \|Ls - t^{obs}\| + \mu\|\Omega s\| \tag{5.3}$$

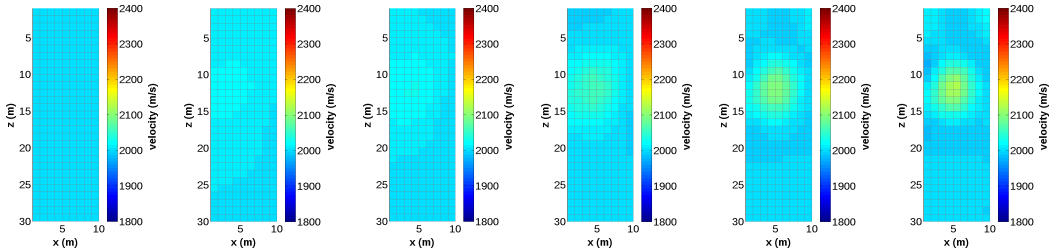
Les figures 5.12 et 5.13 illustrent les trois méthodes itératives SIRT, descente de gradient et approximation du Hessien pour deux modèles initiaux pour une contrainte fixe. Sur ces figures, on peut remarquer que le modèle est bien retrouvé pour les trois méthodes. Des résidus sur les temps plus élevés restent présents pour le modèle calculé par la méthode SIRT, cependant si l'on s'attache aux résidus des paramètres, la méthode SIRT permet de retrouver aussi bien le modèle de paramètres vrai que les deux autres méthodes. L'ajout d'une contrainte peut limiter la minimisation des résidus si celle-ci est trop importante. Si l'on souhaite orienter la solution sans « bloquer » l'inversion des données il est possible de faire varier le poids de la contrainte au cours des itération. Sur les figures 5.14 et 5.15 l'inversion est réalisée avec une contrainte décroissante dès lors que la décroissance de la fonction cout n'entraine plus une diminution des résidus des temps. Les trois méthodes permettent à nouveau une bonne estimation du modèle de paramètres indépendamment du modèle initial et les résidus des temps sont plus faibles que lorsque la contrainte de lissage est maintenue à sa valeur initiale au cours des itérations.



(a) Rais (b) Matrice Hessienne (c) Méthode de Newton

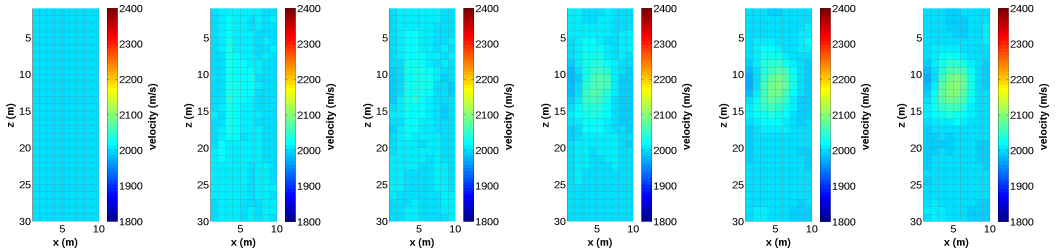
FIGURE 5.11 – Utilisation de contraintes sur les paramètres du modèle pour le dispositif d'acquisition n°2 (a). (b) représente la matrice Hessienne. Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c).

Méthode SIRT



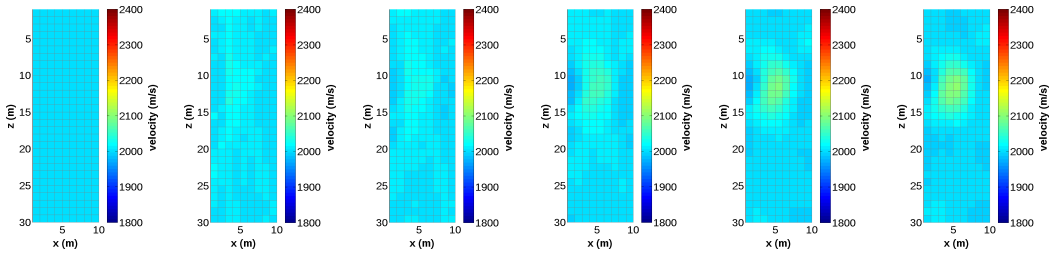
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

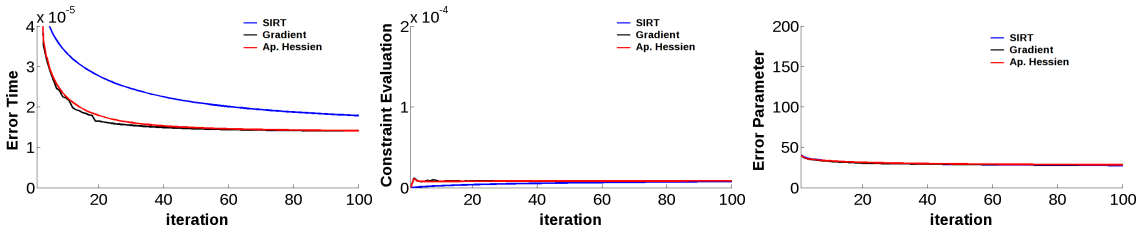


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



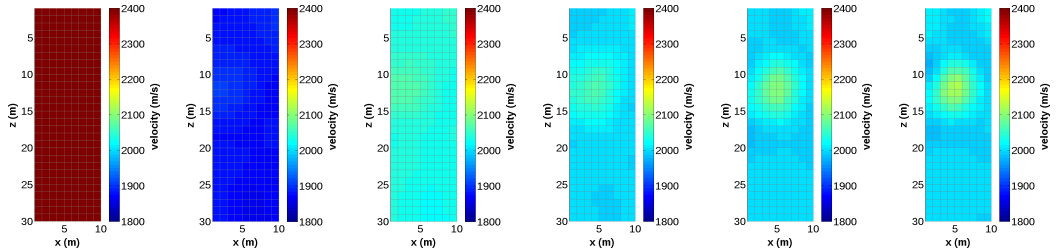
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Contrainte sur les paramètres (u) Résidus des paramètres

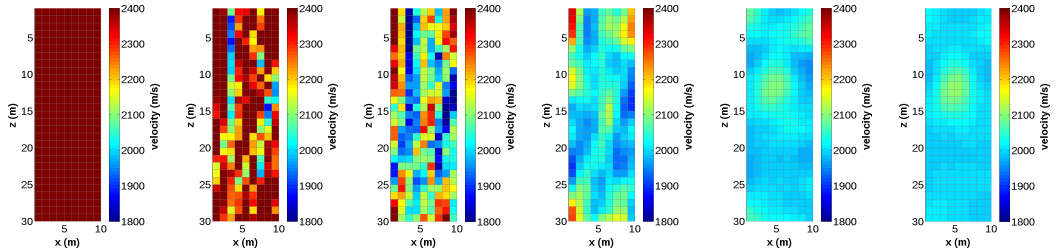
FIGURE 5.12 – Acquisition n°2 : paramètres contraints calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché.

Méthode SIRT



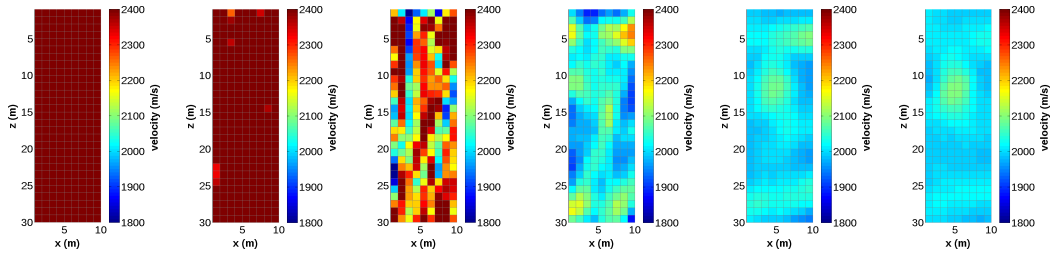
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

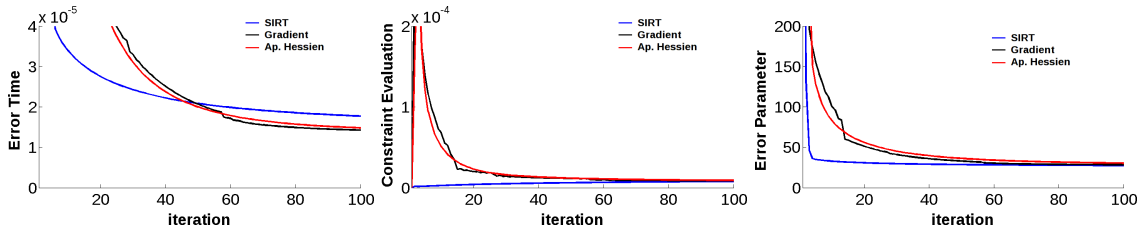


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



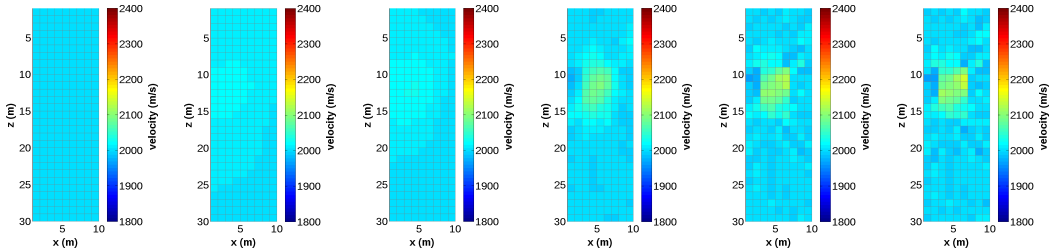
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Contrainte sur les paramètres (u) Résidus des paramètres

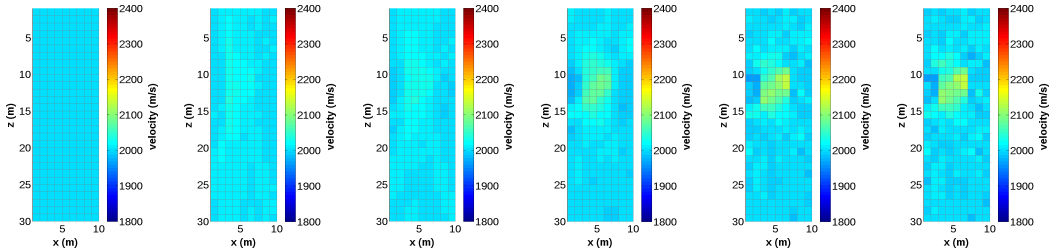
FIGURE 5.13 – Acquisition n°2 : paramètres contraints calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché.

Méthode SIRT



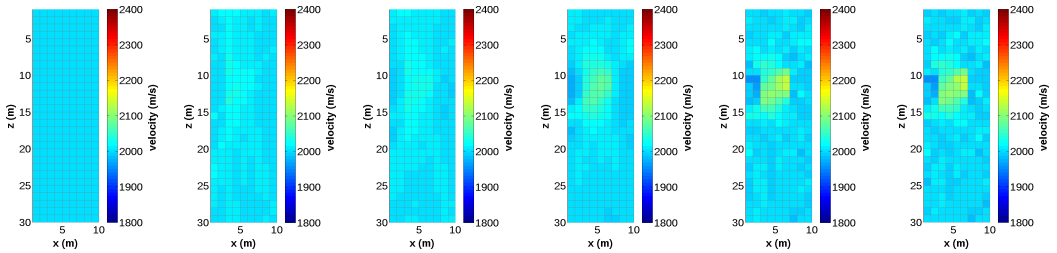
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

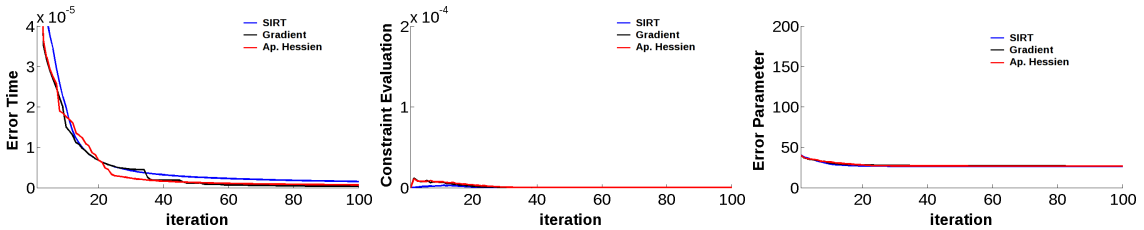


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

Méthode d'approximation du Hessien



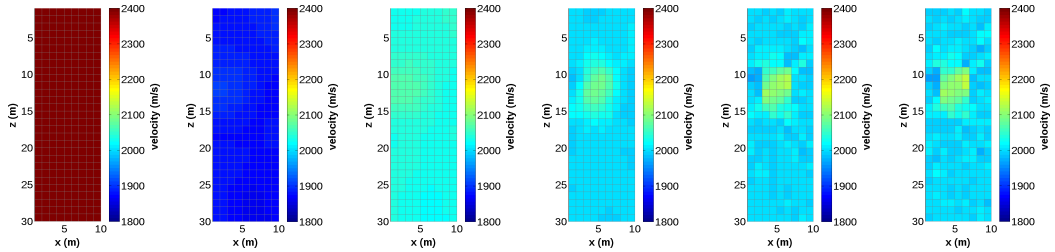
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps (t) Contrainte sur les paramètres (u) Résidus des paramètres

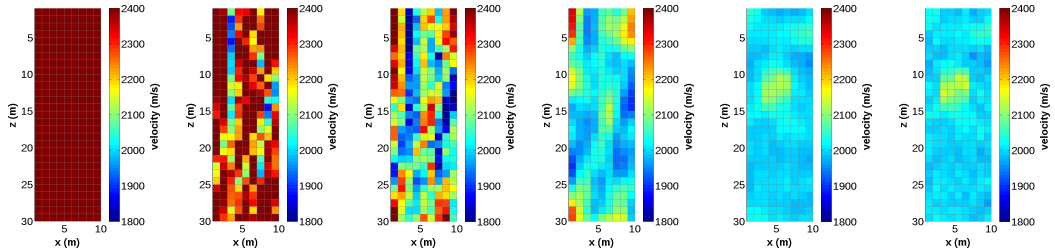
FIGURE 5.14 – Acquisition n°2 : paramètres avec contraintes relâchées calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché

Méthode SIRT



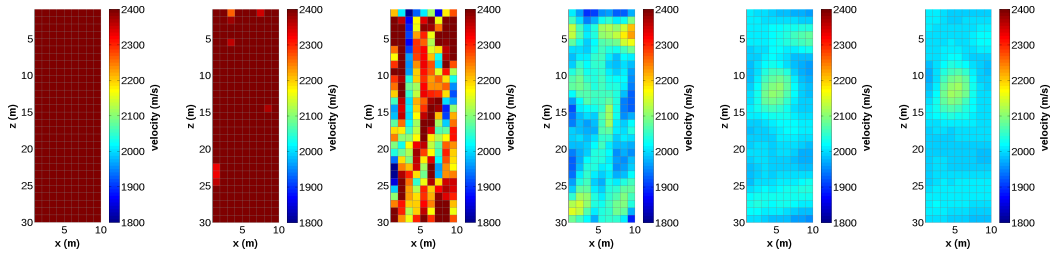
(a) Modèle initial (b) itération 1 (c) itération 2 (d) itération 10 (e) itération 40 (f) itération 100

Méthode de gradient

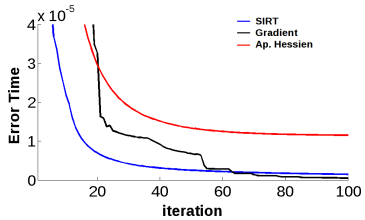


(g) Modèle initial (h) itération 1 (i) itération 2 (j) itération 10 (k) itération 40 (l) itération 100

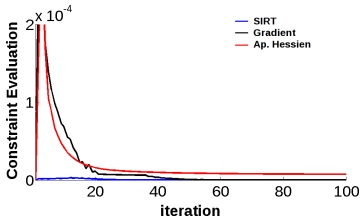
Méthode d'approximation du Hessien



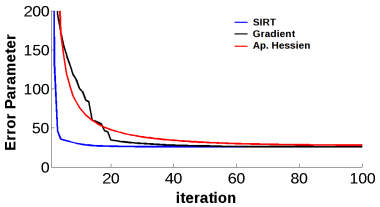
(m) Modèle initial (n) itération 1 (o) itération 2 (p) itération 10 (q) itération 40 (r) itération 100



(s) Résidus des temps



(t) Contrainte sur les paramètres



(u) Résidus des paramètres

FIGURE 5.15 – Acquisition n°2 : paramètres avec contraintes relâchées calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché.

5.4 Conclusion

La résolution d'un problème inverse n'est pas triviale. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, le problème inverse soulevé par la tomographie des temps de première arrivée peut être résolu en utilisant des méthodes linéarisées. Ainsi le problème non linéaire est résolu itérativement en considérant que celui ci est linéaire à chaque itération.

Les différentes méthodes d'optimisation présentées dans ce chapitre ont pu être comparées à travers différents exemples en fonction des éléments qui caractérisent le problème inverse. La méthode SIRT est la moins coûteuse des trois méthodes évaluées ici. Elle montre de très bons résultats dans les premières itérations cependant, proche du modèle solution, sa vitesse de convergence est inférieure aux autres méthodes. La méthode ici appelée méthode du gradient permet d'obtenir une juste évaluation des paramètres lorsque ceux-ci sont bien contraints par les données ou par une contrainte de lissage. La vitesse de convergence est meilleure que celle observée avec la méthode SIRT dans les dernières itérations cependant cette méthode est extrêmement coûteuse en temps de calcul. Le problème direct résolu une fois par itération doit ici être résolu au moins trois fois afin d'établir une approximation de la fonction coût dans la direction du gradient. Enfin la méthode d'approximation du Hessien par sa diagonale est la méthode qui lors de ces tests s'est montrée la meilleure. Elle combine les avantages ainsi que certains inconvénients des deux méthodes précédentes. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, la méthode SIRT est construite sur une approche plus physique et peut être formulée comme une méthode de gradient pondérée en fonction de critères physiques. La méthode d'approximation du Hessien possède un terme équivalent qui correspond à une pondération tenant compte de la densité de rais dans chaque maille. L'influence des paramètres du modèle sur les variations de la fonction coût peut être très hétérogène et la considération de ce terme permet alors d'en atténuer l'effet dans l'inversion. La convergence de cette méthode est proche de celle observée pour la méthode de gradient cependant le coût de calcul l'est également.

Le choix de la méthode est selon moi cas dépendant. Si le problème est bien posé, une méthode de gradient ou encore d'approximation du Hessien est pertinente dans le cas où l'inversion du Hessien est impossible. On pourra néanmoins réaliser une première itération avec la méthode SIRT qui permet de se rapprocher du minimum global de façon efficace. Dans le cas d'un problème mal posé, à savoir des paramètres mal contraints par les données l'utilisation des méthodes du gradient et d'approximation du Hessien est selon moi inadaptée. L'ajout d'une contrainte de lissage est alors nécessaire et atténue la vitesse de convergence de ces deux méthodes qui dans ce cas est proche de celle de la méthode SIRT. L'avantage de ces deux méthodes est alors réduit en gardant l'inconvénient d'un temps de calcul important. Nous avons choisi ici de réaliser l'implémentation de trois méthodes dans le code d'inversion Tomo3D laissant ainsi la possibilité de choisir la méthode la plus adaptée au problème considéré.

Conclusion

Dans cette partie consacrée à la Tomographie des temps de première arrivée nous avons pu voir les différentes étapes que sont le pointé, la modélisation du problème direct ainsi que la résolution du problème inverse. Les outils numériques nécessaires à la reconstruction de la distribution des propriétés de vitesse du milieu sont présentés de façon théorique mais également de façon pratique par la description des schémas numériques employés pour leur résolution.

L'analyse du comportement des méthodes d'optimisation présentée dans le dernier chapitre de cette partie met en valeur un point important qu'il est nécessaire de clarifier lors de la résolution d'un problème inverse. Nous avons en effet vu ici que le problème initialement mal posé peut, en ajoutant des contraintes ou en modifiant la paramétrisation, devenir un problème presque bien posé. Dès lors que cette condition est vérifiée, le choix de la méthode d'optimisation permettra de se rapprocher de manière plus ou moins précise de la solution du problème. Cependant dès lors que cette condition n'est pas vérifiée, le calcul des paramètres utilisés pour décrire le milieu est dépendant de la méthode d'optimisation choisie, de la couverture ou encore du modèle initial. L'ensemble des tests réalisés durant cette thèse ont montré qu'il est important de bien définir le problème inverse en ajoutant des contraintes sur les paramètres recherchés afin de réduire le nombre de modèles solutions et tendre vers un problème bien posé pour lequel une unique solution existe.

La suite de ce manuscrit est consacrée à l'imagerie des failles de la station expérimentale de Tournemire. Après avoir présenté la nouvelle acquisition dans un premier chapitre, nous verrons dans un second chapitre à travers l'étude de cas synthétiques, le potentiel de cette acquisition ainsi que la stratégie adoptée pour la prise en compte de contraintes dans l'inversion. L'ensemble des traitements réalisés dans la suite de ce manuscrit ont été possibles grâce au développement des outils présentés dans cette partie théorique.

Troisième partie

Application et résultats

Tomographie de la Station Expérimentale de Tournemire

Introduction 103

6 Campagne d'acquisition Surface-Tunnel, Juillet 2013 105

7 Évaluation du potentiel et des limites du dispositif 121

8 Résultats d'inversion et interprétation 149

Conclusion 167

Introduction

.

Cette partie est consacrée à la campagne Surface-Tunnel réalisée en juillet 2013 sur le site expérimental de Tournemire.

- **Campagne d'acquisition Surface-Tunnel, juillet 2013**

Dans le premier chapitre je présente les motivations ainsi que le dimensionnement de cette nouvelle campagne. Je rappelle l'objectif de cette thèse, à savoir l'évaluation de la méthode de la Tomographie des temps de première arrivée appliquée à la détection des failles à faible décalage vertical présentes sur le site de Tournemire. Les travaux de Gélis et al. (2010) réalisés sur ce site n'ont pas permis d'imager finement cette zone de failles, de plus les acquisitions réalisées dans le but d'obtenir une image plus détaillée des couches calcaires superficielles n'ont pas permis de pénétrer le milieu en profondeur (Gélis et al., 2012; Vi Nhu Ba et al., 2013). Dans ce chapitre, nous verrons que cette nouvelle acquisition en transmission permet d'explorer la zone ciblée et qu'une première analyse nous permet de mettre en évidence une zone de plus faible vitesse pouvant correspondre à la zone de failles présumée.

- **Évaluation du potentiel et des limites du dispositif**

Le second chapitre présente l'inversion de données synthétiques obtenues dans une configuration correspondant à celle des données de l'acquisition Surface-Tunnel. Nous verrons dans ce chapitre que le dispositif utilisé est idéal pour la détection des variations latérales des propriétés de vitesse du site. La réalisation d'une imagerie 2D n'est pas intégralement contrainte et nous verrons que l'ajout d'information a priori est nécessaire pour la réalisation d'une imagerie plus fine. Les informations apportées sont essentiellement basées sur la connaissance a priori des vitesses de propagation maximales dans les couches argileuse et calcaire ainsi que sur l'épaisseur de ces couches. Ces informations ont été tirées des données de forage pour le positionnement de l'interface argile-calcaire et d'après les hétérogénéités de résistivité électrique de l'acquisition 2007 (Gélis et al., 2010) pour l'épaisseur de la subsurface.

- **Résultats d'inversion et interprétation**

Enfin le dernier chapitre présente les résultats d'inversion des données Surface-Tunnel obtenus à l'aide du code Tomo3D présenté dans le chapitre 4. Une comparaison avec la géométrie présumée de la zone de failles nous permet de constater le potentiel de cette méthode pour l'imagerie des failles décrochantes et confirme l'intérêt de cette méthode géophysique non destructive pour la caractérisation et l'évaluation des sites de stockage.

Chapitre 6

Campagne d'acquisition Surface-Tunnel, Juillet 2013

Sommaire

6.1 Nécessité d'une nouvelle campagne 105
6.1.1 Rappel du contexte 105
6.1.2 Campagnes de résistivité électrique 106
6.1.3 Campagne de sismique 2D haute résolution 106
6.1.4 Conclusion 108
6.2 Présentation de la nouvelle acquisition 109
6.2.1 Campagne de faisabilité 109
6.2.2 Matériel 110
6.2.3 Définition de la zone d'étude et des repères d'inversion 112
6.3 Première analyse des nouvelles données 115
6.3.1 Temps de première arrivée observés 115
6.3.2 Vitesses apparentes 118

Ce chapitre rappelle dans une première partie les éléments qui nous ont conduit à réaliser la nouvelle campagne de données sismiques en transmission. Ces éléments étant beaucoup plus détaillés dans le premier chapitre de cette thèse. Dans une seconde partie, je décris la campagne Surface-Tunnel mise en place en juillet 2013. Une première analyse des temps de première arrivée pointés sur ces données est présentée et témoigne de la pertinence de cette acquisition.

6.1 Nécessité d'une nouvelle campagne

6.1.1 Rappel du contexte

La Station Expérimentale de Tournemire et son contexte géologique sont présentés dans le premier chapitre de ce manuscrit. Nous rappelons ici brièvement les principales caractéristiques du site pour replacer la problématique générale de ces travaux, à savoir l'évaluation du potentiel des méthodes géophysiques pour la caractérisation des sites de stockage en couches argileuses.

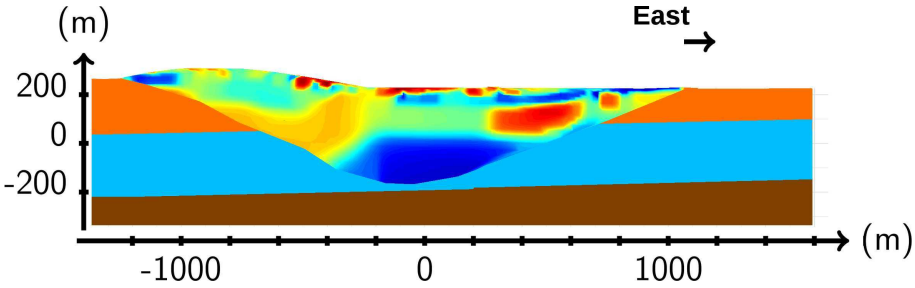
La Station Expérimentale de Tournemire est localisée au cœur du massif de Tournemire permettant un accès direct à la couche argileuse. L'ancien tunnel ferroviaire présent sur le site a permis la construction d'ouvrages souterrains depuis lesquels l'accès à la couche argileuse est possible. Les différentes études qui ont pu être menées ont permis d'identifier, depuis ces ouvrages, une zone de failles à faible décalage vertical (failles décrochantes). La présence de cette zone de failles à faible décalage vertical est idéale pour l'évaluation du potentiel des méthodes géophysiques pour leur détection et c'est dans ce but que différentes acquisitions ont été réalisées. Je rappelle brièvement dans les sections suivantes, les résultats issus de ces campagnes géophysiques.

6.1.2 Campagnes de résistivité électrique

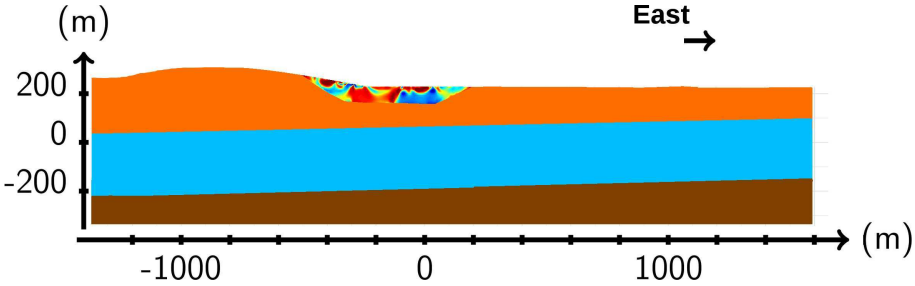
Les résultats des campagnes de résistivité électrique présentées dans le chapitre I sont représentés sur les figures 6.1a et 6.1b. Les coupes de résistivité sont illustrées dans un repère commun afin de rendre compte de leur dimension. La campagne de 2007 a permis de mettre en évidence un contraste vertical de résistivité sur le site, repéré à 200 mètres sous la surface et pouvant être expliqué par la présence de la couche argileuse. Les variations latérales des propriétés électriques du sous-sol ont été interprétées par Gélis et al. (2010) comme la prolongation des zones de failles interceptées depuis les ouvrages souterrains. Cette zone de failles identifiée sur une dizaine de mètres depuis les ouvrages est ici imagée par la zone en vert sur la figure 6.1a de façon très large ($>$ 400 mètres). La campagne de 2011 a permis l'investigation des premiers mètres sous la surface seulement (environs 50 mètres). Ces deux acquisitions n'ont cependant pas permis d'imager clairement la zone de failles visible depuis les ouvrages dans la partie supérieure de la couche argileuse ni dans la couche calcaire supérieure.

6.1.3 Campagne de sismique 2D haute résolution

La campagne de données sismiques 2D haute résolution s'est déroulée en 2010. Cette acquisition a été réalisée depuis le plateau de Tournemire pour 290 positions de récepteurs et 193 positions de sources. La zone d'investigation de cette campagne est illustrée sur la figure 6.2. De par les propriétés du site, cette acquisition n'a pas permis d'imager le milieu en profondeur. En effet, si l'on utilise la méthode de tomographie des temps de première arrivée, la dimension de la zone explorée par des données sismiques acquises en surface peut être limitée par la distribution spatiale des propriétés de vitesses du sous-sol. Comme expliqué dans la partie théorique de ce manuscrit, cette méthode utilise l'onde la plus rapide afin de reconstruire la distribution spatiale des vitesses de propagation des ondes le long de leurs trajectoires. Cette approche limite alors la zone imagée à la zone traversée par ces ondes. La conséquence est que lorsque les vitesses des couches situées directement sous la sub-surface sont élevées, la zone d'investigation se trouve limitée en profondeur. L'analyse des données 2DHR réalisée par la méthode de tomographie des temps de première arrivée n'a ainsi pas permis d'atteindre la zone cible.



(a) Coupe de résistivité électrique obtenue d'après les données électriques de l'acquisition de 2007.



(b) Coupe de résistivité électrique obtenue d'après les données électriques de l'acquisition de 2011.

FIGURE 6.1 – Positionnement des campagnes électriques 2007 et 2011 dans un repère commun. (a) représente l'envergure de la zone explorée par la campagne d'acquisition de 2007 (Gélis et al., 2010) et (b) celle de l'acquisition réalisée en 2011 (Gélis et al., 2012).

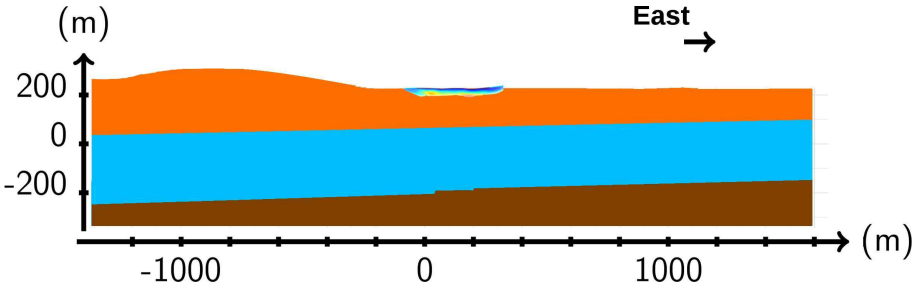
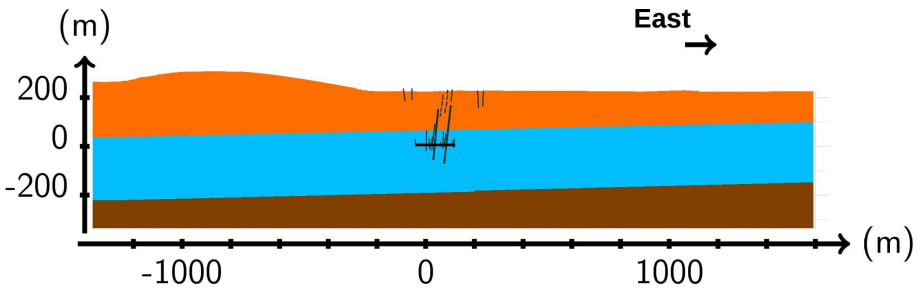


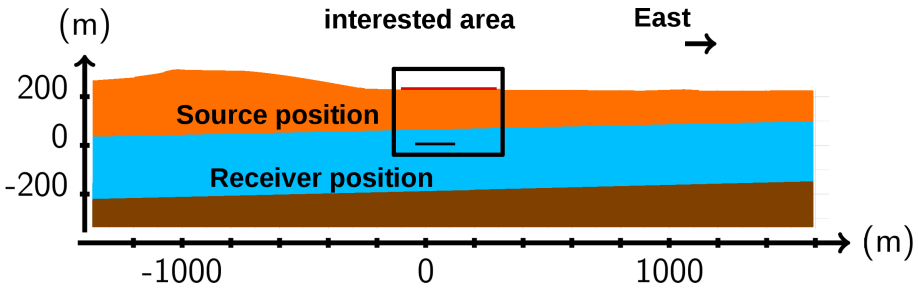
FIGURE 6.2 – Positionnement de la campagne 2D Haute Résolution.

6.1.4 Conclusion

L'imagerie de la zone de failles dans la couche calcaire supérieure et dans la couche argileuse n'est pas évidente. L'utilisation d'un dispositif en surface classiquement utilisé en sismique est ici insuffisant de par les propriétés du site. La présence d'une couche calcaire dont les vitesses de propagation sont plus élevées que celles dans les argiles élimine l'usage de la sismique réfraction. Comme l'a montré l'inversion des données de la CGG en 2001, l'utilisation de la sismique réflexion n'est pas non plus adaptée (chap. I). Les caractéristiques qui peuvent être imagées par cette méthode sont les décalages verticaux pouvant être remarqués en présence de failles mais ici, les failles sont à faible décalage vertical. Les données de résistivité électrique semblent être sensibles à la présence de cette zone de failles cependant le dimensionnement des précédentes acquisitions n'a pas permis d'imager la zone cible avec précision. Pour ces raisons, nous avons choisi de mettre en œuvre une nouvelle acquisition en transmission afin de mieux contraindre la zone cible (fig. 6.3).



(a) Prolongement des failles interceptées depuis les ouvrages et la surface



(b) Position de la nouvelle acquisition

FIGURE 6.3 – Position présumée de la zone de failles (a) et positionnement de la nouvelle campagne d'acquisition (b).

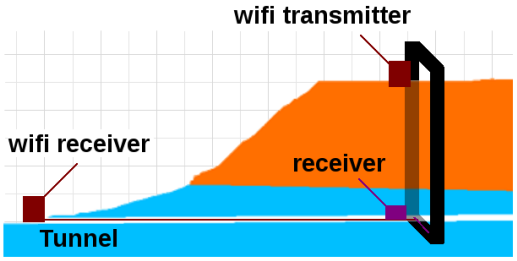


FIGURE 6.4 – Schéma présentant le déclenchement de l'acquisition par WIFI

6.2 Présentation de la nouvelle acquisition

La présence de la zone de failles présumée dans la couche calcaire supérieure ainsi que dans la partie supérieure de la couche argileuse n'a jusqu'ici jamais été imagée. Dans le but de tester le potentiel des méthodes géophysiques, mais également d'accroître notre connaissance du massif, nous avons réalisé une nouvelle acquisition de données sismiques en transmission, en plaçant les récepteurs dans les ouvrages souterrains et les sources en surface. La mise en œuvre de cette campagne en transmission a nécessité une première campagne de faisabilité en novembre 2012. En effet, l'utilisation d'un dispositif pour lequel la source est très éloignée du dispositif d'acquisition pose des difficultés techniques pour lesquelles différents tests ont du être réalisés.

6.2.1 Campagne de faisabilité

L'objectif de cette "pré-campagne" était de tester le matériel proposé par ABEM, une société créée en 1994, spécialisée dans les instruments de mesure géophysique. L'objectif étant de tester le matériel permettant la communication entre une source sur le plateau de Tournemire (à 250 mètres d'altitude si on se réfère à la position du tunnel) et le déclenchement du système d'acquisition des données situé dans le tunnel au sein de la couche argileuse (à environ 700 mètres de l'entrée du tunnel). Durant cette mission, différents tests ont été mis en œuvre pour comprendre le fonctionnement des appareils utilisés, les limites de leur utilisation ainsi que l'enregistrement de quelques traces. La source de cette acquisition est une masse située au niveau du plateau de Tournemire. Un accéléromètre est fixé à cette masse et transmet par une connexion filaire le signal à un émetteur wifi (fig. 6.4). Cette information est transmise au récepteur wifi situé à l'entrée du tunnel par voie aérienne. Le récepteur wifi est lui même connecté au dispositif d'acquisition par un câble de 750 m de long. La réception du signal envoyé par la source permet le déclenchement de l'enregistrement. L'émetteur a été positionné au bord de la falaise dans un premier temps, puis déplacé pour différentes positions sur le plateau. Aucun problème de réception n'est apparu lors de ces tests et c'est pourquoi la campagne d'acquisition de données sismiques en transmission a pu être programmée pour le mois de juillet suivant.

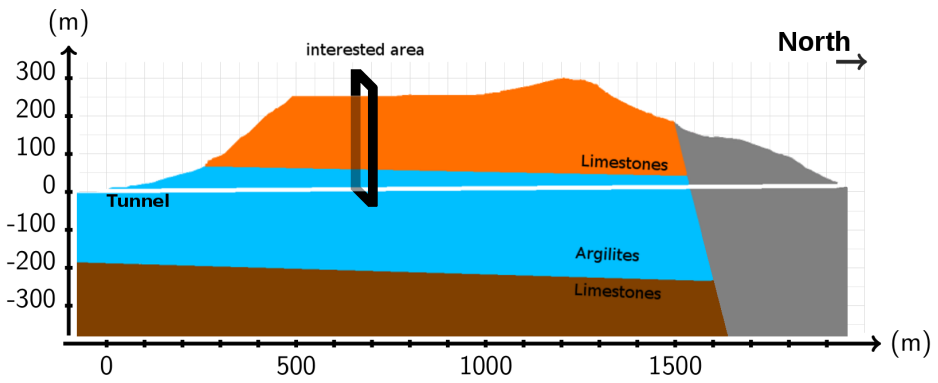


FIGURE 6.5 – Coupe géologique simplifiée du massif de Tournemire. La zone d'investigation de cette acquisition comprenant la couche calcaire supérieure et une partie de la couche argileuse est représentée par le carré noir.

La campagne d'acquisition s'est déroulée avec la participation de Justo Cabrera, Patrice Desveaux, Mathias Zillmer, Mark Noble, deux ouvriers jardiniers et moi-même, du 8 au 13 juillet 2013. La figure 6.5 présente une coupe géologique simplifiée du massif de Tournemire sur laquelle est représentée par le carré noir la zone d'investigation de cette acquisition. Elle comprend la couche calcaire supérieure et la partie supérieure de la couche argileuse. Cette zone est partiellement commune avec les zones d'investigation des campagnes de résistivité électrique précédemment réalisées sur la station.

6.2.2 Matériel

6.2.2.1 Les sources

Les sources utilisées pour cette campagne d'acquisition ont été générées à l'aide d'une masse (fig. 6.6). L'utilisation de ce type de source est facile à mettre en œuvre puisqu'elle permet une grande mobilité et une facilité d'exécution. Le signal émis est haute fréquence et donne naissance à une onde de compression se déplaçant dans l'orientation de la frappe. Les sources ont été réalisées avec un espacement de 10 mètres sur le plateau de la Station Expérimentale de Tournemire au-dessus des ouvrages souterrains (fig. 6.7). Une première ligne appelée ligne Centrale est composée de 29 sources et a été réalisée en parfait alignement avec la galerie Ouest-Est. La seconde ligne, appelée ligne Nord, est composée de 40 sources et a été réalisée dans l'orientation du profil de l'acquisition électrique de 2011. La troisième ligne (ligne Sud), parallèle à la ligne Nord, a été réalisée avec 34 sources à environ 50 mètres au sud de la ligne Nord. Pour chaque position, la source est répétée au minimum 5 fois afin d'éliminer le bruit incohérent sur les sismogrammes. Les tirs C1 à C6, correspondant aux tirs 1 à 6 de la ligne Centrale, sont réalisés dans une zone pour laquelle la signature d'une zone fracturée est visible en surface. Les tirs C14 (source 14 de la ligne Centrale) sont situés au niveau du chemin et correspondent à la même position que les tirs N14 (source 14 de la ligne Nord). Les tirs C16 à C21 sont réalisés au niveau d'une zone de champ.

FIGURE 6.6 – Photo de la source : chute de masse accélérée. La mobilité du système d'émission wifi est rendue possible par l'utilisation d'un quad permettant le transport de l'émetteur wifi et de la batterie.

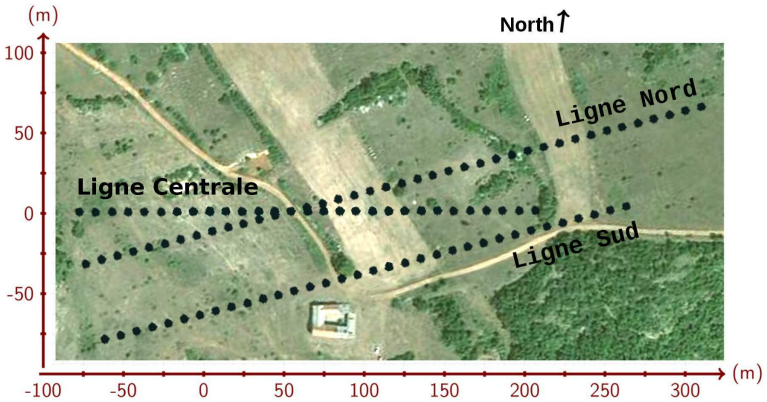


FIGURE 6.7 – Vue aérienne du plateau de Tournemire présentant les trois lignes sources.

FIGURE 6.8 – Photo de l'installation des géophones dans les ouvrages souterrains, avec (a) les géophones situés dans le tunnel, (b) les géophones dans la galerie Ouest, et (c) les géophones placés directement dans la couche argileuse de la galerie Est.

6.2.2.2 Les récepteurs

Les récepteurs utilisés sont des géophones de 4,5 Hz. Ces géophones sont unidirectionnels et ont été plantés dans le sol des ouvrages souterrains (fig. 6.8). Les données de cette acquisition ont été obtenues à l'aide de 96 géophones placés dans les ouvrages souterrains (fig. 6.9). Une première ligne de 48 géophones espacés de 3,5 mètres a été disposée dans les galeries Ouest et Est. La seconde ligne composée de 24 géophones situés dans les galeries Nord et Sud, ainsi que la troisième ligne composée également de 24 géophones situés dans le tunnel ont été réalisées avec un espacement de 3 mètres. La ligne des géophones situés dans les galeries Ouest et Est est composée des récepteurs numérotés de 1 à 48 et s'étend sur une distance de 164,5 mètres. Les six premiers géophones de cette ligne sont placés dans la dernière partie de la galerie Ouest. Le récepteur n°7 est placé à l'intersection de la galerie Ouest et de la galerie Nord. Les géophones de 8 à 38 sont situés dans la galerie Ouest, le géophone 39 est quant à lui placé à l'intersection de la galerie Ouest et du tunnel et les géophones 40 à 48 sont plantés directement dans la roche argileuse constituant le sol de la galerie Est. La seconde ligne disposée dans les galeries Nord et Sud se compose de géophones numérotés de 49 à 72 et s'étend sur une distance de 69 mètres. Les 6 premiers géophones (de 49 à 55) couvrent les 21 premiers mètres de la galerie Nord. Le récepteur 56 est placé à l'intersection de la galerie Ouest et de la galerie Nord à côté du récepteur n°7. Les 17 derniers géophones de cette ligne numérotés de 57 à 72 sont situés dans les 48 premiers mètres de la galerie Sud. La dernière ligne disposée dans le tunnel se compose des géophones 73 à 96 et s'étend sur 69 mètres. Elle est construite de la même façon que la ligne Nord-Sud, avec les 6 premiers géophones situés au nord de l'intersection avec la galerie Ouest. Le récepteur 80 est situé à côté du récepteur 39 à l'intersection de la galerie Ouest et du tunnel et les 17 récepteurs de 81 à 96 terminent la ligne vers le Sud.

6.2.3 Définition de la zone d'étude et des repères d'inversion

La zone investiguée est contenue dans un bloc 3D d'environ 400 mètres de long sur 150 mètres de large pour une profondeur d'investigation de 250 mètres. Ce bloc représenté sur la figure 6.10a n'est pas entièrement contraint par cette campagne et nous nous intéresserons

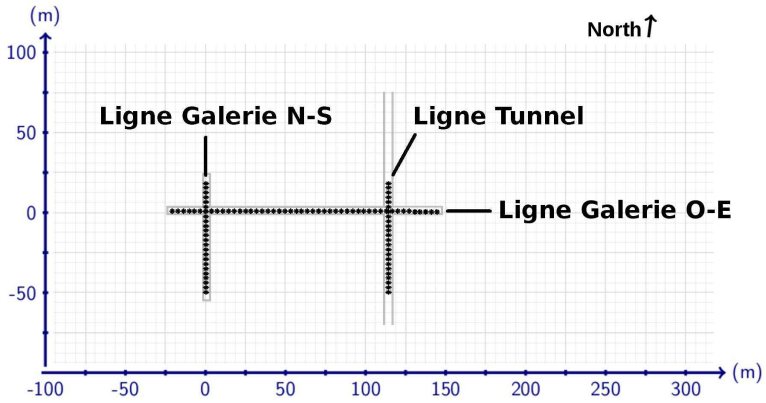
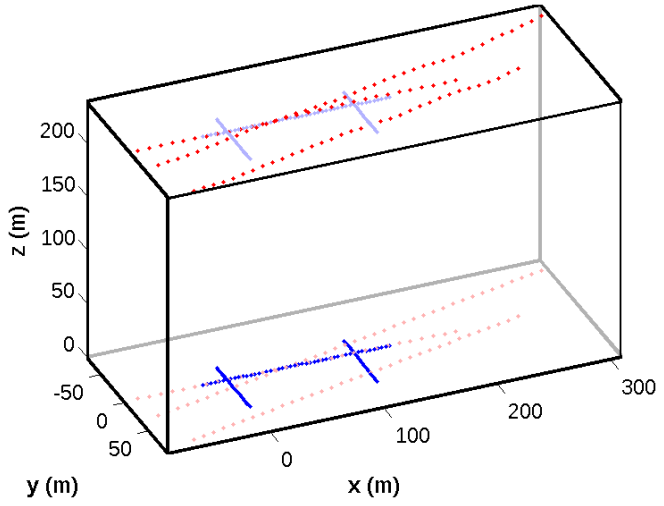


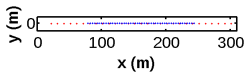
FIGURE 6.9 – Coupe schématique des ouvrages souterrains présentant les trois lignes de géophones.

plus particulièrement aux trois coupes 2D formées par les sources respectives de la ligne Centrale, Nord et Sud et par les 48 géophones situés dans les galeries Est et Ouest. Les figures 6.10b,6.10c et 6.10d représentent les 3 sous-blocs investigués par chacune de ces lignes. En effet, le traitement de ces données en considérant ces trois coupes 2D et uniquement les 48 récepteurs situés dans les galeries Est et Ouest a été réalisé dans le but de considérer une paramétrisation 2D, beaucoup mieux contrainte qu'une paramétrisation 3D. En faisant ce choix, nous devons alors considérer que les propriétés du milieu sont invariantes dans l'une des trois directions de l'espace. On considère ici le milieu homogène dans la direction $\vec{y}$ qui est la direction pour laquelle nous avons le moins d'information. On comprend alors que plus cette distance est faible, plus l'hypothèse d'invariance des propriétés du milieu peut être acceptable. Nous avons donc choisi ici, lors de l'inversion de ces coupes 2D, de ne pas considérer les récepteurs situés dans le Tunnel et dans les galeries Nord et Sud, dont les positions se distinguent uniquement par leur coordonnée sur l'axe y. Le domaine défini pour l'inversion des temps de première arrivée doit une avoir une origine en (0,0,0) et être aussi petit que possible afin de ne pas alourdir le temps de calcul. Pour ce faire, les différents blocs sont obtenus par les transformations suivantes :

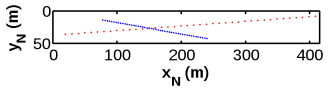
- Le bloc 2D défini par les sources de la ligne Centrale est obtenu en réalisant une translation dans une seule direction de l'espace.
- Le bloc 2D défini par les sources de la ligne Nord est obtenu en réalisant une translation dans deux directions de l'espace et une rotation.
- Le bloc 2D défini par les sources de la ligne Sud est obtenu en réalisant une translation dans deux directions de l'espace et une rotation.



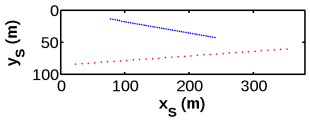
(a) Repère 3D décrivant la zone d'étude de l'acquisition Surface-Tunnel.



(b) Repère local utilisé pour l'inversion des données de la ligne Centrale.

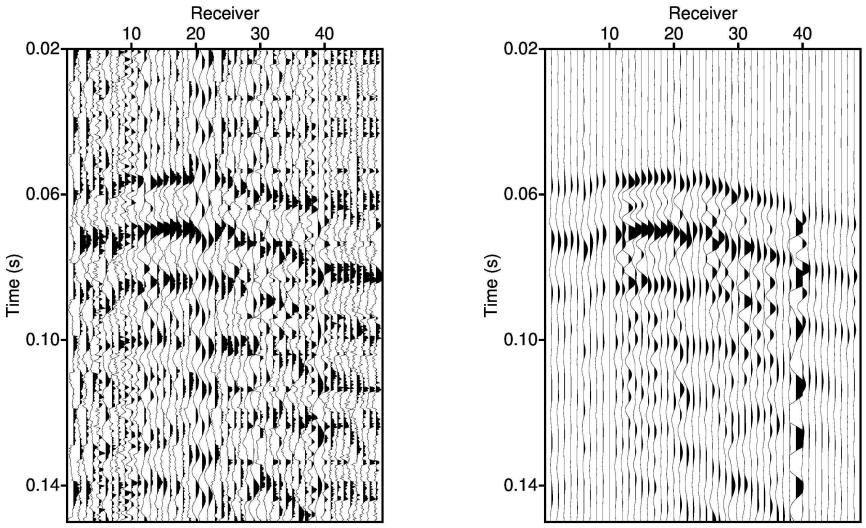


(c) Repère local utilisé pour l'inversion des données de la ligne Nord.



(d) Repère local utilisé pour l'inversion des données de la ligne Sud.

FIGURE 6.10 – Illustration des repères utilisés pour les inversions. La figure (a) représente l'intégralité de la zone d'étude dans le repère 3D. Les figures (b), (c) et (d) illustrent les repères locaux utilisés respectivement pour l'inversion de la ligne Centrale, Nord et Sud.



(a) Sismogrammes bruts (b) Sismogrammes après traitement

FIGURE 6.11 – Illustration du pré-traitement réalisé sur les sismogrammes avant pointé. La figure (a) présente les sismogrammes bruts de la source N14 enregistrés aux 48 géophones des galeries Ouest et Est. La figure (b) présente ces mêmes sismogrammes après stack et filtrage du 50Hz induit par la présence d'appareils électroniques environnants.

6.3 Première analyse des nouvelles données

6.3.1 Temps de première arrivée observés

Les données sont acquises dans le format standard SEGY. L'utilisation des fonctions du logiciel Seismic Unix nous permet de visualiser, de traiter ces données ainsi que l'enregistrement des temps de première arrivée de façon simple et précise. Avant de réaliser l'étape de pointé, les données sont stackées et le 50Hz correspondant à la fréquence du réseau d'alimentation électrique est retranché. On utilise pour ce faire la partie du signal enregistrée avant le déclenchement de la source afin de reconstruire le signal provenant du réseau électrique qui est ensuite soustrait au signal. La figure 6.11 illustre les sismogrammes de la source N14 avant et après le pré-traitement pour les 48 récepteurs situés dans les galeries Est et Ouest. Le pointé des temps de première arrivée a été réalisé par inspection visuelle. Ce choix a été possible au vu du faible nombre de données et permet ainsi la comparaison avec les temps obtenus par le pointé automatique. Les figures 6.13a, 6.13c et 6.13e illustrent en bleu les temps pointés par inspection visuelle et en rouge les pointés obtenus par l'algorithme PickFirst pour les sources 9, 14 et 21 de la ligne Centrale. Ces deux pointés semblent pointer la même arrivée néanmoins un décalage global évalué à environ 2 millisecondes est remarqué et peut être expliqué par la différence de l'amplitude pour laquelle le début du signal est considéré.

Sur la figure 6.12 les temps de première arrivée sont représentés en fonction de la position source et de la position récepteur. Les sources de la ligne Centrale sont les positions numérotées de 1 à 29, les sources de la ligne Nord sont représentées par les positions numérotées de 30 à 69 et enfin les sources de la ligne Sud sont ici représentées par les positions numérotées de 70 à 103. Certains pointés, représentés en noir sur cette figure, n'ont pas été possibles soit en raison d'une défaillance du récepteur, soit en raison d'un rapport signal sur bruit trop faible.

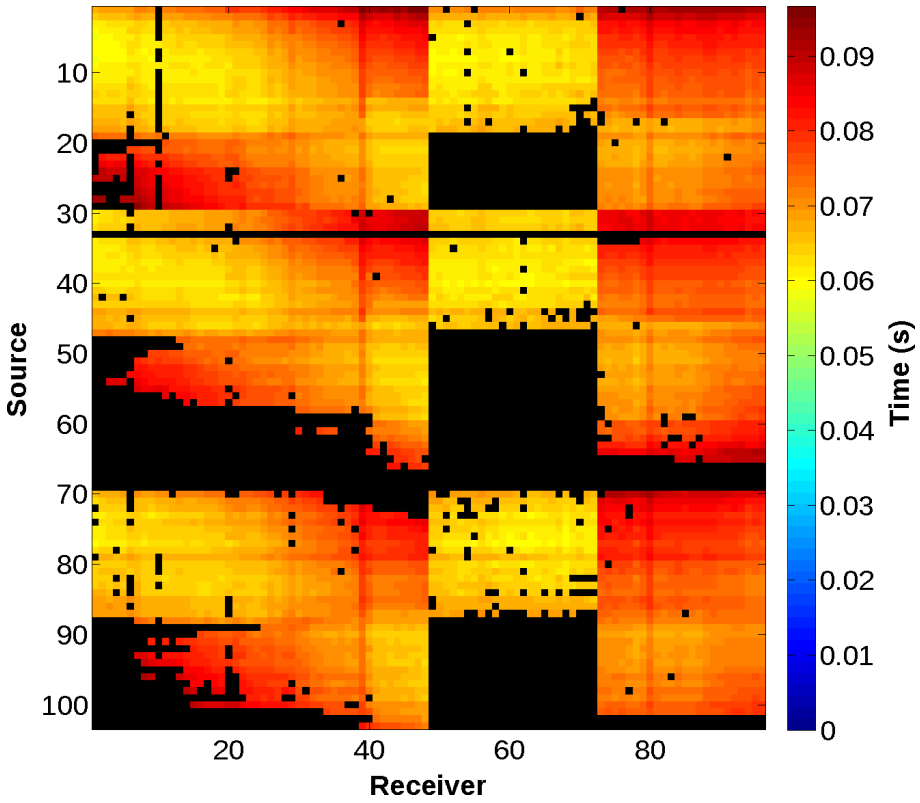
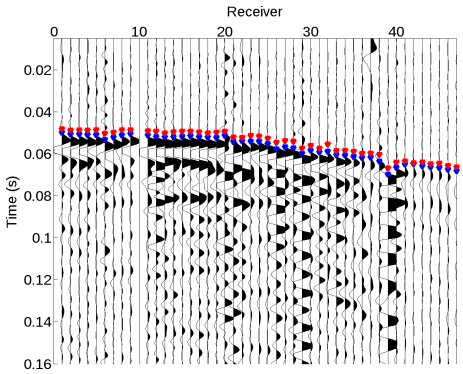


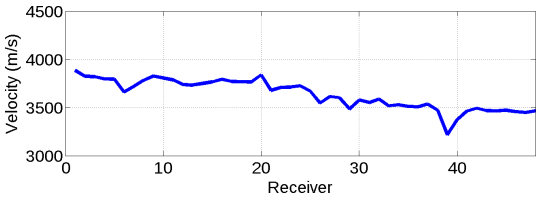
FIGURE 6.12 – Temps de première arrivée pointés pour l'ensemble des données de la campagne Surface-Tunnel

On remarque sur cette figure des décalages de temps systématiques pour certains récepteurs et certaines sources qui s'expliquent par des hétérogénéités localisées près de ces récepteurs ou sources. On pourra noter en particulier un décalage systématique pour les récepteurs 39 et 80 tous deux situés à l'intersection du Tunnel et de la galerie Ouest. Ce phénomène est également remarqué pour le récepteur 6 placé près de l'intersection entre les galeries Ouest et Sud. On pourra noter pour les récepteurs 6 et 39 ces décalages sur les coupes de vitesses apparentes représentées sur la figure 6.13.

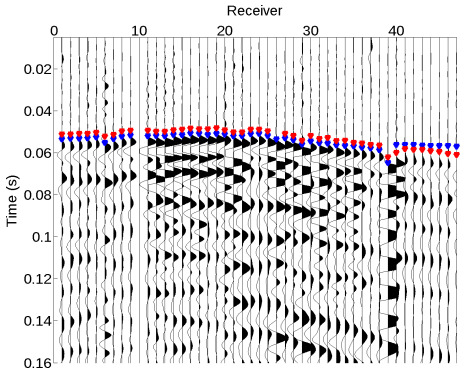
Les sources de la ligne Centrale numérotées de 19 à 29, les sources de la ligne Nord numérotées de 48 à 69 ainsi que les sources de la ligne Sud numérotées de 88 à 103 n'ont pas permis d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisant pour le pointé des sismogrammes enregistrés par les récepteurs situés dans les galeries Nord et Sud. Ceci peut être expliqué par la distance séparant ces sources et ces récepteurs mais également par la présence présumée d'une zone de failles les séparant. Dans la prochaine section, je propose une première analyse de ces données par le calcul des vitesses apparentes.



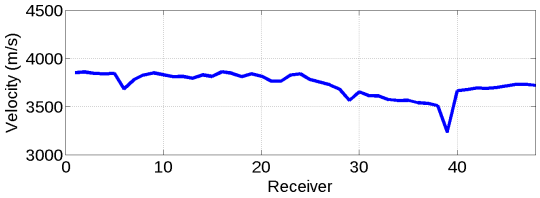
(a) Source C 9



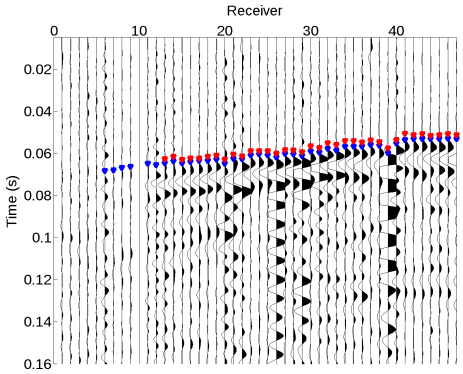
(b) Vitesses apparentes pour le tir C 9



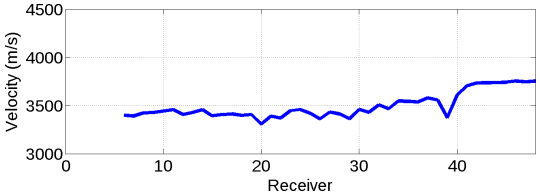
(c) Source C 14



(d) Vitesses apparentes pour le tir C 14



(e) Source C 21



(f) Vitesses apparentes pour le tir C 21

FIGURE 6.13 – Traces simisques des tirs n°9 (a) n°14 (c) et n°21 (e) de la ligne Centrale, avec en rouge les temps de première arrivée pointés par l'algorithme PickFirst et en bleu le pointé manuel. Les vitesses apparentes sont représentées sur les coupes (b), (d) et (f).

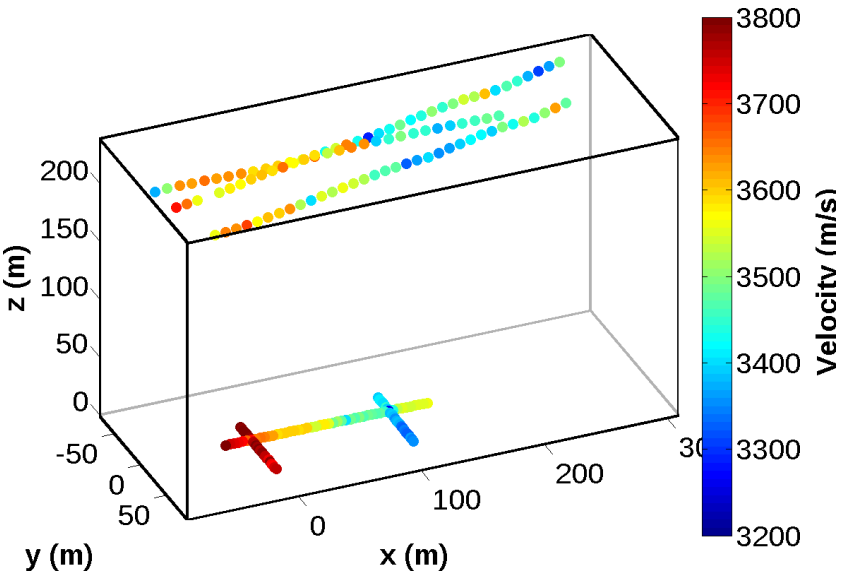


FIGURE 6.14 – Vitesses apparentes moyennes calculées pour l'ensemble des données de l'acquisition Surface-Tunnel

6.3.2 Vitesses apparentes

Les données pointées permettent d'évaluer les vitesses apparentes du milieu. Pour chaque couple source-récepteur, la vitesse apparente est obtenue en divisant la distance source-récepteur par le temps pointé. Il est alors possible d'évaluer les vitesses apparentes moyennes respectivement pour chaque source et chaque récepteur. La figure 6.14 représente ces vitesses apparentes moyennes positionnées dans le repère 3D aux positions des sources pour les moyennes réalisés sur les sources et aux positions des récepteurs pour les moyennes réalisées sur les récepteurs. Cette figure permet une première identification des hétérogénéités de vitesse du massif. On note en particulier des vitesses apparentes plus faibles au niveau de l'ancien tunnel ferroviaire ainsi que dans les premiers mètres de la galerie Ouest là où des failles ont été identifiées à partir des observations des parois des galeries. En surface des variations des vitesses apparentes sont également remarquées avec néanmoins des fluctuations plus faibles que celles observées pour les récepteurs. On pourra noter en surface des zones de plus faibles vitesses localisées à l'aplomb du tunnel ainsi que des variations localisées sur certaines sources reflétant certainement des phénomènes de subsurface.

Sur la figure 6.15 une analyse plus fine est réalisée en utilisant uniquement les temps pointés pour les sources 9, 14 et 20. Si on observe les vitesses apparentes calculées pour la source C9, trois tendances se dégagent. La première correspond à un palier pour lequel la vitesse apparente est évaluée à 3800 mètres par seconde. Le second correspond à une décroissance des vitesses apparentes pour les récepteurs numérotés de 19 à 40. Une explication possible est que les propriétés du massif varient latéralement avec une décroissance de ces propriétés de vitesse. Enfin, pour les récepteurs de 40 à 48 situés dans la galerie Est, les vitesses apparentes forment à nouveau un palier qui laisse penser que le milieu est à nouveau homogène. L'analyse des temps de première arrivée pointés pour cette source située a l'aplomb de la première zone illustrée ici en rouge est en accord avec la présence de la zone de failles localisée dans les ouvrages. Si on regarde les vitesses apparentes pour les deux autres sources C14 et C21 également illustrées sur la figure 6.15, le même scénario se dégage. Les trois tendances observées sur la coupe des vitesses apparentes de la source C9

sont à nouveau remarquées. On peut également noter que les vitesses apparentes calculées pour les récepteurs situés dans la première zone (en rouge) sont plus élevées pour la source C9 située a l'aplomb de cette zone que pour la source C21 située dans la troisième zone (en bleu). Ceci est à nouveau en accord avec la présence d'une zone de failles dans la zone ici représentée en orange. La même analyse peut également être faite pour les récepteurs numérotés de 40 à 48 avec des vitesses apparentes plus élevées pour la source C21 située à l'aplomb de ces récepteurs que pour la source C9 située de l'autre côté de la zone de failles présumée.

Avant de continuer l'analyse de ces données à l'aide du code d'inversion Tomo3D, nous avons choisi d'évaluer le potentiel de cette acquisition en considérant différents tests synthétiques. Ces tests seront également l'occasion de comprendre quelles informations a priori sont nécessaires ainsi que la façon de les prendre en compte dans l'inversion. Dans le prochain chapitre, nous considérons la géométrie d'acquisition formée par les 29 sources de la ligne Centrale et les 48 récepteurs localisés dans les galeries Est et Ouest.

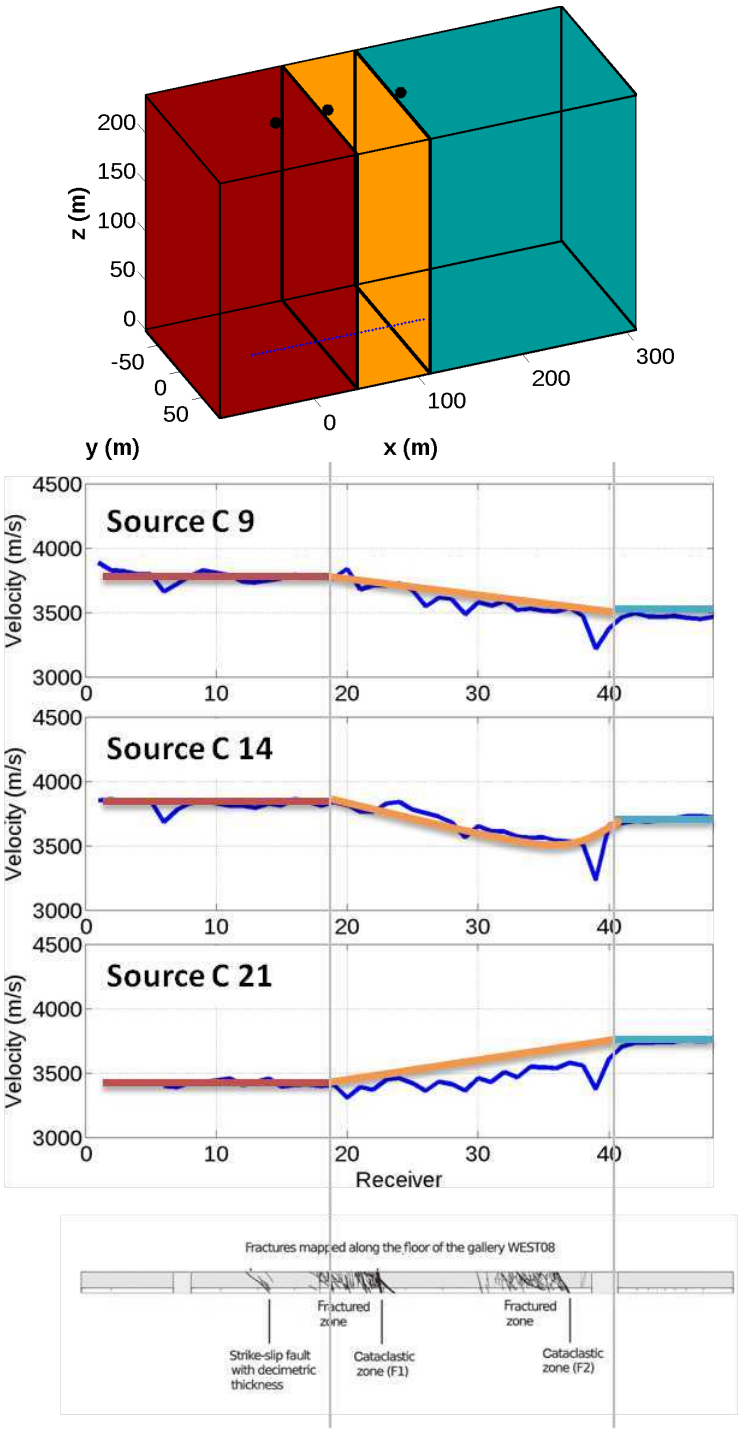


FIGURE 6.15 – Interprétation des vitesses apparentes calculées à partir des temps de première arrivée (en bleu) des sources C9, C14 et C21. Trois zones sont identifiées : La première, en rouge, située entre les récepteurs 1 à 19 pour laquelle les vitesses apparentes peuvent être approchées par une constante dont la valeur varie suivant la position de la source, la seconde, en orange, située entre les récepteurs 20 à 40 pour laquelle les vitesses apparentes sont hétérogènes, puis la dernière, en vert, située entre les récepteurs 41 à 48 pour laquelle les vitesses apparentes peuvent être également approchées par une constante. Ces différents comportements peuvent être expliqués par la présence d'une zone endommagée entre les récepteurs 20 et 40 qui correspond à la zone endommagée localisée depuis les ouvrages souterrains.

Chapitre 7

Évaluation du potentiel et des limites du dispositif

Sommaire

7.1 Considérations sur les erreurs **122**
7.2 Potentiel et sensibilité du dispositif d'acquisition **123**
7.2.1 Détection des hétérogénéités 123
7.2.2 Caractérisation des hétérogénéités 129
7.3 Imagerie et introduction d'information a priori **131**
7.3.1 Géométrie de la faille 131
7.3.2 Prise en compte de la couche argileuse 138
7.3.3 Etude d'un cas réaliste 141
7.4 Conclusions **148**

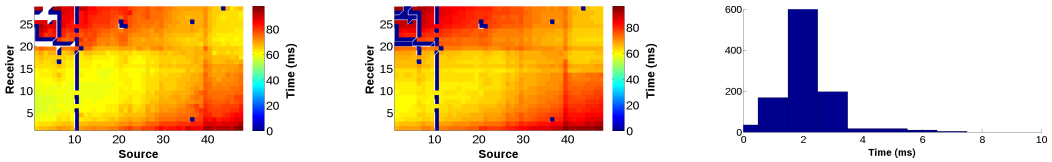
Ce chapitre a pour objectif d'évaluer le potentiel et les limites de l'utilisation de la méthode de tomographie des temps de première arrivée en considérant le dispositif d'acquisition utilisé lors de la campagne d'acquisition Surface-Tunnel présentée dans le chapitre précédent. Comme nous avons pu le voir dans la partie théorique, la précision de la reconstruction de la distribution spatiale des propriétés de vitesse du milieu est fortement dépendante de la géométrie d'acquisition. Les analyses présentées ici sont réalisées pour le sous-dispositif composé des sources de la ligne Centrale et des récepteurs situés dans les galeries Ouest et Est. Ce sous-dispositif comprend 29 sources et 48 récepteurs pouvant être contenus dans un bloc de 310x260x3 m^3. L'alignement des sources et des récepteurs dans un plan 2D est quasiment parfait (plus ou mois 1,5 mètres) ce qui nous permet de considérer lors de l'inversion un modèle de paramètres 2D. Néanmoins, une modélisation 3D est ici utilisée afin de ne pas dégrader la précision sur les positions des sources et des récepteurs. Dans une première partie, l'ordre de grandeur des erreurs est évalué en fonction des hypothèses de modélisation et des estimations liées à l'utilisation de données expérimentales. Dans une seconde partie, une analyse des informations potentiellement contenues dans les données pour ce dispositif d'acquisition est présentée. Enfin la troisième et dernière partie de ce chapitre illustre des exemples d'inversions synthétiques qui permettront de mettre en évidence le potentiel et les limites du code d'inversion Tomo3D pour l'inversion des données réelles de la campagne Surface-Tunnel. Dans cette partie, nous verrons également l'intérêt de l'introduction d'information a priori, notamment lorsque la géométrie d'acquisition ne permet pas de bien contraindre l'intégralité des paramètres comme c'est ici le cas.

7.1 Considérations sur les erreurs

En tomographie, le tomogramme représentant le mieux les propriétés de l'objet n'est pas forcément le tomogramme pour lequel les résidus des temps sont nuls. En effet, de par le caractère expérimental des mesures, des erreurs présentes dans les données ne sont pas modélisées et c'est pourquoi il est normal que ces différences persistent entre le calcul des temps théoriques et les temps pointés sur les sismogrammes acquis lors de la campagne. Dans le cadre précis qui nous concerne, on pourra noter deux types d'erreurs expérimentales. La première concerne la position des sources et des récepteurs. Cette erreur engendre une mauvaise estimation des distances qui peut impacter sur la vitesse calculée. Dans le cadre de l'acquisition Surface-Tunnel, le positionnement des récepteurs dans les ouvrages est relativement précis, car le creusement des différents ouvrages souterrains a nécessité l'intervention d'un géomètre. Ainsi, de nombreuses positions de référence y ont été répertoriées. L'erreur estimée sur la position des récepteurs dans les ouvrages est de l'ordre du décimètre. Le positionnement des sources est en revanche moins précis même si différents points de repère ont également été établis par un géomètre depuis les précédentes acquisitions réalisées sur le site. On évalue une erreur sur les positions des sources de l'ordre du mètre. Si on considère la vitesse moyenne du massif à 3500 mètres par seconde et une distance moyenne de 230 mètres, l'impact d'une erreur d'un mètre sur la distance aboutie à une variation du temps de première arrivée d'une demi-milliseconde. La seconde source d'erreur est introduite par le pointé des temps de première arrivée. On omettra ici le cas où le temps pointé n'est pas celui de la première arrivée et l'erreur sur les temps pourra être évaluée en fonction de la précision du pointé. Cette erreur peut être obtenue en comparant les temps pointés par différentes méthodes de pointé automatique ou encore par la différence entre des temps pointés par un algorithme automatique et des temps pointés manuellement. Dans notre cas les différences de pointé les plus importantes correspondent à un shift global de l'ordre de 2 millisecondes (fig. 7.1). Cette différence remarquée entre le pointé automatique et le pointé manuel affecte l'ensemble des temps et s'explique par la différence du moment pour lequel le début du signal est évalué. Autour de cette valeur des fluctuations sont évaluées de l'ordre de la milliseconde également (fig. 7.1).

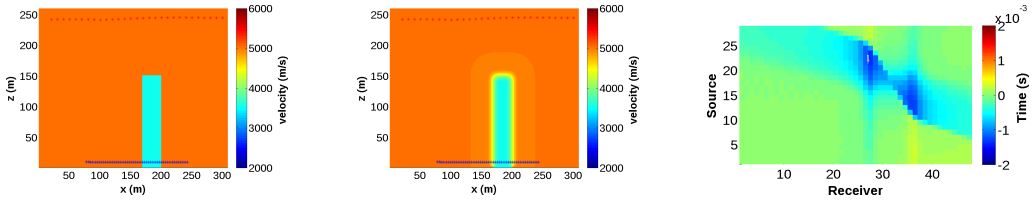
Le calcul numérique des temps de première arrivée engendre également des erreurs. Celles-ci sont liées à la résolution approchée des équations. On évalue leurs amplitudes en comparant les résultats obtenus de manière analytique à une résolution numérique (voir chapitre 3). Celles-ci sont négligeables devant les erreurs de pointé. En choisissant une représentation discrète des propriétés de l'objet, on impose également une limite de représentation des propriétés réelles de l'objet qui induit une erreur sur le calcul des temps. Cette erreur peut être quantifiée par le calcul des temps de première arrivée dans deux milieux dont les propriétés physiques sont proches. La figure 7.2 illustre la différence des temps de première arrivée obtenus sur deux modèle proches pour notre géométrie d'acquisition. Le premier représenté sur la figure 7.2a est un modèle à deux vitesses, pouvant être décrit comme un modèle homogène dont la vitesse est égale à 5000 mètres par seconde perturbé par la présence d'une anomalie dont la vitesse de propagation est égale à 3500 mètres par seconde. Le second modèle est par construction proche du premier modèle puisqu'il est défini à partir de ce premier modèle lissé avec un filtre gaussien. Les différences de temps observés entre ces deux modèles sont de l'ordre de la milliseconde.

D'après les considérations faites sur les différentes erreurs, on admettra que les propriétés définies par le tomogramme sont solutions du problème si ces propriétés permettent de calculer des temps synthétiques dont la différence avec les temps observés est inférieure aux erreurs de mesure et de modélisation caractérisées par ε et estimées pour cette acquisition à environ 2 millisecondes.



(a) Pointé automatique (b) Pointé manuel (c) Histogramme des différences

FIGURE 7.1 – Comparaison des temps pointés automatiquement et manuellement. (a) représente les temps pointés par l'algorithme PickFirst et (b) les temps pointés obtenus manuellement par inspection visuelle des sismogrammes. L'histogramme (c) représente la différence de temps pointés entre les deux méthodes.



(a) Modèle 1 (b) Modèle 2 (c) Différences des temps

FIGURE 7.2 – Comparaison des temps théoriques pour deux modèles de vitesse proches. La figure (c) représente la différence entre les temps théoriques calculés pour le modèle de vitesse 1 (a) et ceux calculés pour le modèle de vitesse 2 (b). Cette différence nous permet d'évaluer le résidu des temps pouvant être expliqué par le lissage des propriétés vraies de l'objet étudié.

7.2 Potentiel et sensibilité du dispositif d'acquisition

La présence d'une zone de failles devrait se manifester par des hétérogénéités de vitesse de propagation des ondes. La première étape de la démonstration de la présence d'une zone de failles peut donc commencer par la détection d'hétérogénéités. Dans cette section une approche utilisant une paramétrisation minimaliste des propriétés de vitesse du milieu est utilisée pour dégager le type d'hétérogénéités qui peuvent être détectées par le dispositif mis en place lors de l'acquisition Surface-Tunnel.

7.2.1 Détection des hétérogénéités

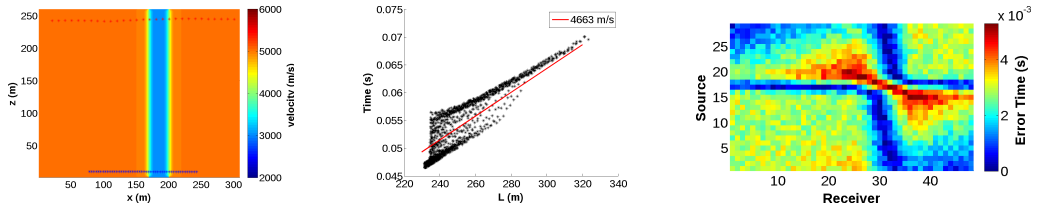
La paramétrisation la plus simple est de considérer que la vitesse du milieu est homogène. Le calcul de cette vitesse peut alors être directement obtenu par la recherche de la pente de la droite la plus proche des données observées représentées sur un graphe temps - longueur du rais (fig 7.3b, 7.4b et 7.4e). En considérant les distances euclidiennes, cette vitesse est obtenue en inversant la lenteur s^0 donnée par l'équation 7.1, avec $t^{obs} = (t_1^{obs}, t_2^{obs}, .., t_q^{obs})^t$ le vecteur contenant les temps de première arrivée et $L = (L_1, L_2, .., L_q)^t$ le vecteur contenant les longueurs des rais entre les q couples sources-récepteurs associés. En considérant un milieu homogène, ces longueurs sont équivalentes aux distances euclidiennes entre les sources et récepteurs. Le calcul est réalisé de manière directe puisqu'ici une seule inconnue doit être déterminée.

$$s^0 = \left[L^t L\right]^{-1} L^t t^{obs} \tag{7.1}$$

L'utilisation d'un seul paramètre permet d'obtenir un problème bien posé pour lequel il existe une solution unique. La confrontation des temps calculés t^{cal} en considérant une telle paramétrisation, à savoir $t^{cal} = Ls^0$, et des temps observés t^{obs} permet d'identifier si la modélisation réalisée permet d'expliquer ou non les données. On distinguera alors les deux scénarios suivants :

- **Scénario 1** : Les résidus des temps sont importants devant ε.

La figure 7.3 illustre le scénario 1. Les données synthétiques calculées sur le modèle de vitesse hétérogène présenté sur la figure 7.3a sont inversées pour une paramétrisation homogène du milieu. La meilleure approximation de la vitesse de propagation des ondes du modèle vrai est évaluée à 4663 mètres par seconde. Cette modélisation permet de calculer les temps théoriques représentés en fonction de la distance source-récepteur sur la figure 7.3b par la droite en rouge. Les données synthétiques « observées » sur le modèle vrai sont également représentées sur cette figure par les points en noir. Si l'on représente la différence entre les temps calculés pour cette paramétrisation homogène et les temps calculés sur le modèle vrai, des valeurs importantes sont observées. Ces résidus, bien supérieurs à ε, sont illustrés sur la figure 7.3c en fonction des sources et récepteurs ; ils témoignent d'une paramétrisation insuffisante et permettent de conclure que le modèle vrai est hétérogène.

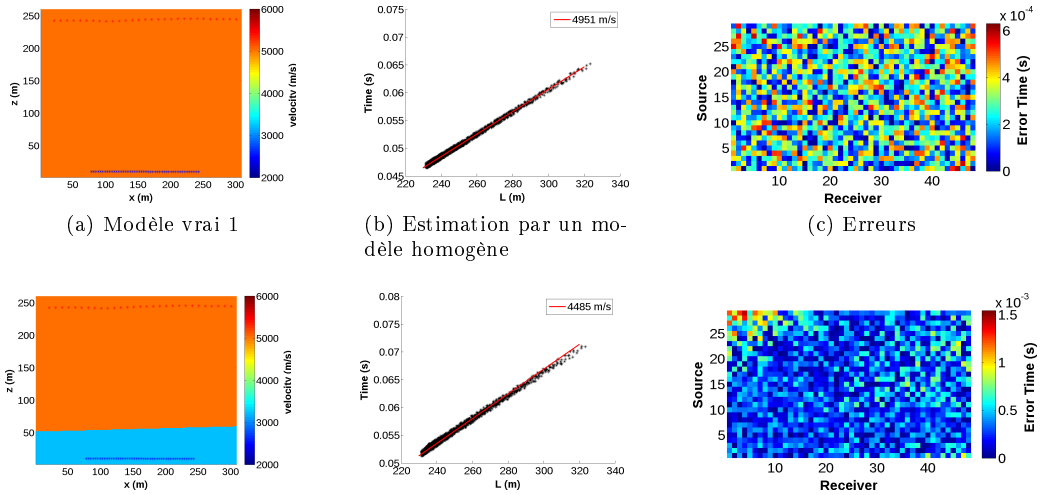


(a) Modèle vrai (b) Estimation par un modèle homogène (c) Erreurs

FIGURE 7.3 – Scénario 1 : Le problème de minimisation est bien posé et son unique solution ne permet pas d'expliquer les données observées. Ces résultats permettent de conclure sur la présence d'hétérogénéité dans le milieu ausculté.

- **Scénario 2** : Les résidus des temps sont de l'ordre de grandeur de ε.

La figure 7.4 illustre le scénario 2. Deux jeux de données synthétiques « observés » sont ici calculés sur les modèles de vitesse présentés sur les figures 7.4a et 7.4d. Ces données sont également inversées pour une paramétrisation homogène du milieu et les meilleures approximations de la vitesse de propagation des ondes sont évaluées respectivement à 4951 mètres par seconde et 4485 mètres par seconde. De la même façon, les temps théoriques sont représentés sur les figures 7.4b et 7.4e par les droites en rouge et les données synthétiques « observées » par les points en noirs. Les différences entre les temps théoriques calculés dans le modèle homogène et les temps synthétiques (fig. 7.4c et 7.4f) sont inférieures à l'ordre de grandeur des erreurs de la modélisation, évaluées à deux millisecondes. La conclusion de l'obtention de résidus faibles ne permet pas de garantir que le milieu soit homogène. Comme le montre l'exemple 2, le milieu peut être hétérogène. Il existe néanmoins un modèle homogène permettant de modéliser les temps observés avec une précision correspondant à l'erreur ε. En d'autres termes, cela signifie que si des hétérogénéités existent, la géométrie d'acquisition ne permet pas de les imager. On trouvera notamment ce cas si les perturbations des



(a) Modèle vrai 1 (b) Estimation par un modèle homogène (c) Erreurs

(d) Modèle vrai 2 (e) Estimation par un modèle homogène (f) Erreurs

FIGURE 7.4 – Scénario 2 : Le problème de minimisation est bien posé et son unique solution permet d'expliquer les données observées.

temps induites par ces hétérogénéités sont faibles ou encore si la couverture de l'acquisition est incomplète.

La détection des hétérogénéités peut être établie par l'analyse des résidus obtenus par le calcul des temps théoriques pour un modèle homogène. En effet, si les résidus sont grands devant les erreurs de modélisation et expérimentales, alors une hétérogénéité existe. En revanche, l'absence d'hétérogénéité ne peut être déduite de cette simple analyse, de faibles résidus devant l'erreur ε peuvent être expliqués par un modèle homogène mais également par un modèle contenant des hétérogénéités « invisibles » par le dispositif. Une étude de sensibilité doit alors être menée afin de rechercher les modèles pour lesquels la géométrie d'acquisition ne permettrait pas de détecter les hétérogénéités présentes.

Dans les sections suivantes je propose d'analyser la sensibilité du dispositif utilisé lors de la campagne Surface-Tunnel à la présence de variations verticales des propriétés de vitesse dans un premier temps puis latérales dans un second temps. Dans ces sections, nous proposons de considérer des trajectoires rectilignes afin d'analyser le conditionnement du problème en considérant deux paramétrisations différentes. Il ne s'agira pas dans ces prochaines sections d'inversion de données à proprement parler mais simplement d'analyse du conditionnement résultant de ces deux différentes paramétrisations.

7.2.1.1 Sensibilité aux couches horizontales

L'utilisation d'une paramétrisation minimaliste permet de garantir l'unicité de la solution. Ici, nous considérons une modélisation à deux paramètres (fig. 7.5a) afin d'évaluer la sensibilité du dispositif à la présence d'hétérogénéités verticales. On considère ici un modèle paramétré à l'aide de deux blocs horizontaux définis géométriquement par les couches 1 et 2 dont les propriétés de vitesse pourraient être inégales.

On note :

— $L_1^h = (L_{11}^h, ..., L_{i1}^h, ..., L_{q1}^h)^t$ avec L_{i1}^h le segment de rai i contenu dans la couche 1,
— $L_2^h = (L_{12}^h, ..., L_{i2}^h, ..., L_{q2}^h)^t$ avec L_{i2}^h le segment de rai i contenu dans la couche 2,
— et $t^{obs} = (t_1^{obs}, ..., t_i^{obs}, ..., t_q^{obs})^t$ avec t_i^{obs} le temps de première arrivée du rai is.

Les temps de première arrivée théoriques t_{cal}^h peuvent alors être exprimés en fonction de l'inverse des vitesses de chacune des couches respectivement notés s_1^h et s_2^h et donnés par l'équation 7.2. Les paramètres s_1^h et s_2^h minimisant l'écart aux données sont directement obtenus par le calcul de 7.3.

$$t_{cal}^h = L_1^h s_1^h + L_2^h s_2^h \tag{7.2}$$

$$\begin{bmatrix} s_1^h \\ s_2^h \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^q L_{i1}^h L_{i1}^h & \sum_{i=1}^q L_{i1}^h L_{i2}^h \\ \sum_{i=1}^q L_{i1}^h L_{i2}^h & \sum_{i=1}^q L_{i2}^h L_{i2}^h \end{bmatrix}}_{\mathcal{H}^h}^{-1} \begin{bmatrix} L_{11}^h & L_{21}^h & \dots & L_{q1}^h \\ L_{12}^h & L_{22}^h & \dots & L_{q2}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1^{obs} \\ t_2^{obs} \\ \vdots \\ t_q^{obs} \end{bmatrix} \tag{7.3}$$

Si on considère la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, il est possible de représenter les données observées en fonction des paramètres de modélisation du milieu ici définis par la valeur de la vitesse de propagation des ondes dans les couches 1 et 2. Les données sont représentées sur un graphe temps - longueur du segment de rai traversant la couche 1 - longueur du segment de rai traversant la couche 2, présenté sur la figure 7.5b. L'estimation des vitesses v_1^h et v_2^h consiste alors à retrouver les pentes du plan décrit dans cet espace minimisant la distance aux données. On comprend alors visuellement que la recherche des pentes du plan minimisant l'écart aux données est difficile. En effet les données sont quasiment alignées ce qui rend l'équation du plan fortement sensible aux erreurs de modélisation et aux erreurs associées aux bruits présents sur les données. Comme le montre cette représentation, le problème est mal conditionné. En termes mathématiques, ceci se traduit par un mauvais conditionnement de la matrice hessienne $\mathcal{H}^h$. Théoriquement, si les données sont exactes et la modélisation parfaite, le calcul des vitesses dans chacune des couches est possible. Cependant, les données expérimentales obtenues sur la station ne peuvent prétendre à une telle exactitude et ne permettent pas d'évaluer de façon précise ce plan.

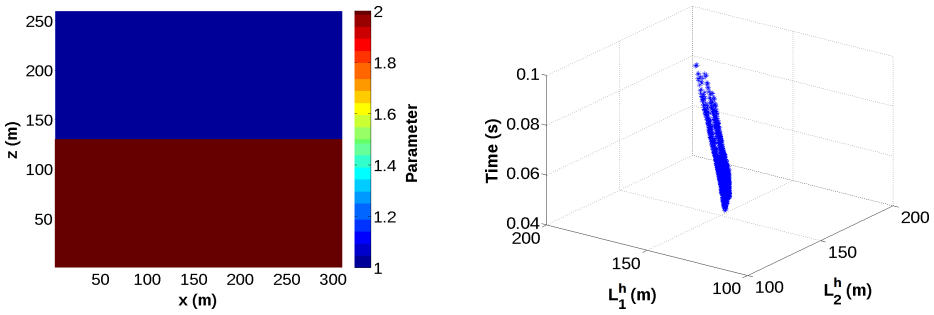
L'utilisation d'une paramétrisation par blocs homogènes horizontaux laisse place à une impossibilité de détermination des paramètres pour le dispositif d'acquisition en transmission utilisé ici. Si néanmoins une méthode de reconstruction itérative est utilisée, alors la valeur des paramètres sera fonction de la méthode choisie (voir les exemples de la section 4.2.2.1).

7.2.1.2 Sensibilité aux variations latérales des propriétés du milieu

De la même façon, il est possible d'évaluer la sensibilité du dispositif aux variations latérales. On considère ici une paramétrisation des propriétés de vitesse représentée par deux blocs verticaux représentés sur la figure 7.6a.

On note :

— $L_1^v = (L_{11}^v, ..., L_{i1}^v, ..., L_{q1}^v)^t$ avec L_{i1}^v le segment de rai i contenu dans le bloc 1,
— et $L_2^v = (L_{12}^v, ..., L_{i2}^v, ..., L_{q2}^v)^t$ avec L_{i2}^v le segment de rai i contenu dans le bloc 2.



(a) Paramétrisation à couches horizontales

(b) Représentation des données en fonction des 2 paramètres d'inversion

FIGURE 7.5 – Sensibilité des données à la présence d'une couche horizontale dans le modèle de vitesse. Le modèle mathématique est construit à partir de deux paramètres représentant la lenteur dans les couches 1 et 2 (a). En considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, les données sont représentées en fonction de la longueur respective des rais dans chacun des blocs sur la figure (b). Cette figure illustre le mauvais conditionnement de cette paramétrisation.

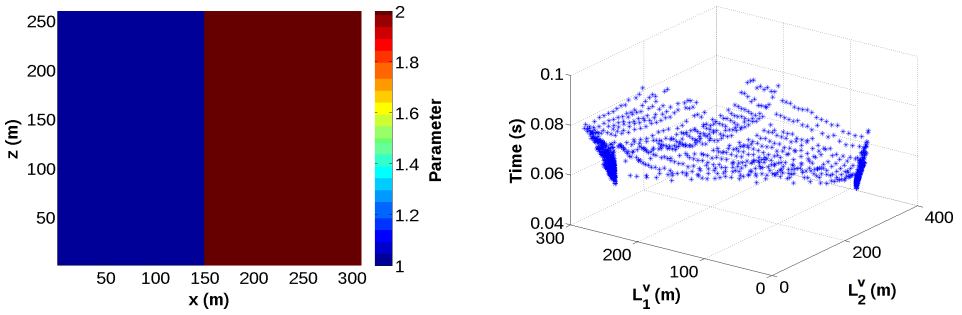
Les temps de première arrivée théoriques t^v_{cal} peuvent, tout comme dans la partie précédente, être exprimés en fonction de l'inverse des vitesses de chacune des couches respectivement notés s^v_1 et s^v_2 et donnés par l'équation 7.4. Les paramètres s^v_1 et s^v_2 minimisant l'écart aux données sont directement obtenus par le calcul de 7.5.

$$t^v_{cal} = L^v_1 s^v_1 + L^v_2 s^v_2 \tag{7.4}$$

$$\begin{bmatrix} s^v_1 \\ s^v_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^q L^v_{i1} L^v_{i1} & \sum_{i=1}^q L^v_{i1} L^v_{i2} \\ \sum_{i=1}^q L^v_{i1} L^v_{i2} & \sum_{i=1}^q L^v_{i2} L^v_{i2} \end{bmatrix}^{-1}}_{\mathcal{H}^v} \begin{bmatrix} L^h_{11} & L^v_{21} & \dots & L^v_{q1} \\ L^h_{12} & L^v_{22} & \dots & L^v_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^{obs}_1 \\ t^{obs}_2 \\ \vdots \\ t^{obs}_q \end{bmatrix} \tag{7.5}$$

Cette fois les données représentées sur un graphe temps - longueur du segment de rai traversant le bloc 1 - longueur du segment de rai traversant le bloc 2, obtenu en considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, témoignent d'un problème bien contraint. En effet les données sont dans cet espace suffisamment bien réparties pour que le problème soit bien conditionné et la recherche des pentes du plan est alors faiblement sensible aux erreurs sur les données.

Ces tests de sensibilité, réalisés en évaluant le conditionnement de ces deux paramétrisations permettent de comprendre par une approche mathématique les limites du dispositif employé. Le problème inverse est formulé comme la détermination des paramètres définis par la modélisation qui est faite du milieu et peut être bien posé ou non. Nous avons vu ici que les données de l'acquisition Surface-Tunnel ne sont pas bien réparties dans l'espace pour déterminer la présence de variations verticales illustrées par la paramétrisation par blocs horizontaux. En revanche, comme le montre l'analyse du conditionnement du problème posé par l'utilisation d'une paramétrisation par blocs verticaux, les données sont idéalement réparties pour déterminer les variations latérales des propriétés de vitesse du massif. Dans la



(a) Paramétrisation par blocs verticaux

(b) Représentation des données en fonction des 2 paramètres d'inversion

FIGURE 7.6 – Sensibilité des données à la présence de variations latérales du modèle de vitesse. Le modèle mathématique est construit à partir de deux paramètres représentant la lenteur dans les blocs 1 et 2 (a). En considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, les données sont représentées en fonction de la longueur respective des rais dans chacun des blocs sur la figure (b). Cette figure illustre le potentiel de cette acquisition pour la détection des variations latérales des propriétés de vitesse du milieu.

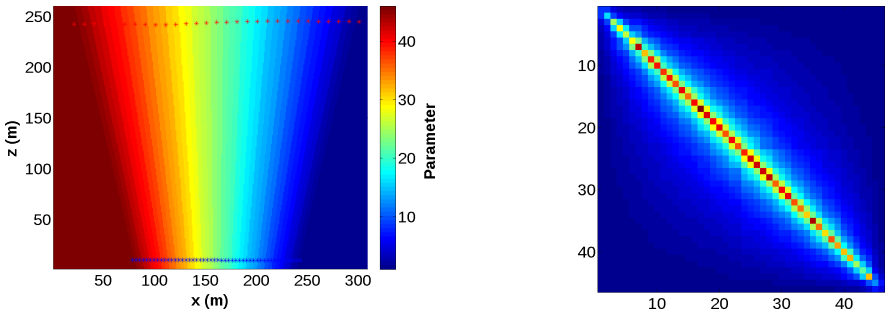
prochaine section, je propose un modèle de paramètres verticaux plus complexe pour lequel le problème est bien conditionné.

7.2.1.3 Définition d'une paramétrisation 1D adaptée

En considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel on peut construire un modèle de paramètres que nous appellerons paramétrisation 1D adaptée pour laquelle les paramètres sont bien contraints. Cette paramétrisation est représentée sur la figure 7.7a. Elle comprend 45 paramètres, ce qui est un nombre suffisamment faible, pour qu'ils soient obtenus par le calcul direct de l'inverse de la matrice hessienne. Comme le montre la figure 7.7b, cette matrice est bien conditionnée. Cependant, la géométrie de cette paramétrisation, établie non pas sur des critères géologiques mais sur des considérations mathématiques, à savoir un bon conditionnement du problème, ne permet pas de représenter la complexité de la distribution spatiale des propriétés du milieu géologique réel. Elle permettra néanmoins le calcul des vitesses moyennes permettant de décrire l'objet par un calcul direct qui de ce fait est indépendant de la méthode d'optimisation choisie.

7.2.1.4 Paramétrisation 2D classique

Dans la pratique, la distribution des propriétés de vitesse du milieu ne respecte pas les considérations mathématiques qui seraient pour nous idéales. La distribution spatiale des propriétés de vitesse sur la Station Expérimentale de Tournemire est indépendante de la géométrie de l'acquisition Surface-Tunnel et des hétérogénéités imperceptibles mais également indéterminables d'une façon unique par cette campagne peuvent exister. Dans la suite de ce chapitre, nous considérons une paramétrisation 2D classique, à savoir un modèle de blocs homogènes définis par les mailles d'une grille cartésienne régulière. Le pas de cette grille est fixé à un mètre dans les deux directions du domaine 2D. D'après les considérations faites dans les précédentes sections, nous sommes pleinement conscients que cette paramétrisation n'est pas contrainte. Néanmoins et comme nous allons le voir dans la section 7.3, il est possible d'ajouter des informations, des contraintes supplémentaires lors de l'inversion qui permettent de contourner ce problème.



(a) Paramétrisation 1D adaptée (b) Représentation du hessien

FIGURE 7.7 – Paramétrisation 1D adaptée permettant le calcul direct de 45 paramètres. (a) modèle de paramètres et (b) la matrice hessienne calculée pour des trajectoires a priori en ligne droite est inversible et bien conditionnée.

7.2.2 Caractérisation des hétérogénéités

L'utilisation d'une paramétrisation 2D n'est pas contrainte mais nous l'utilisons afin de représenter les propriétés du milieu qui, comme nous le verrons lors de l'inversion des données réelles présentées dans le dernier chapitre, ne peuvent être simplement représentées par une paramétrisation 1D adaptée. Un test de sensibilité peut alors être fait en analysant les tomogrammes obtenus pour un modèle homogène contenant une perturbation dont la position est variable. Ces exemples sont illustrés sur les figures 7.9 et 7.10. La figure 7.9 présente les modèles de vitesse vrais pour lesquels nous avons calculé des données synthétiques « observées ». Ces modèles représentent un modèle homogène perturbé par la présence d'une hétérogénéité de vitesse plus lente centrée en différentes positions. La figure 7.10 présente les tomogrammes solutions calculés en utilisant le code Tomo3D à partir du modèle initial correspondant au modèle vrai. Ces figures illustrent clairement deux problématiques. La première est que l'inversion réalisée ici n'est pas contrainte et que les modèles calculés sont des solutions particulières dans lesquelles de nombreux artefacts sont présents. Une deuxième problématique est ici illustrée, à savoir l'hétérogénéité de la couverture. On peut en effet remarquer ici que les modèles pour lesquels l'hétérogénéité de vitesse est centrée au bord du modèle sont moins bien retrouvés. Ces positions peuvent être mise en relation avec les zones pour lesquelles la densité de rais est faible. En revanche, lorsque la densité de rais est forte, la position et la taille de l'anomalie retrouvée sont plutôt satisfaisantes (fig. 7.8).

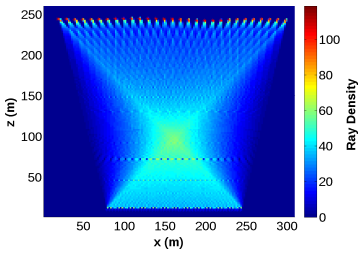


FIGURE 7.8 – Densité de rais par bloc d'un mètre carré.

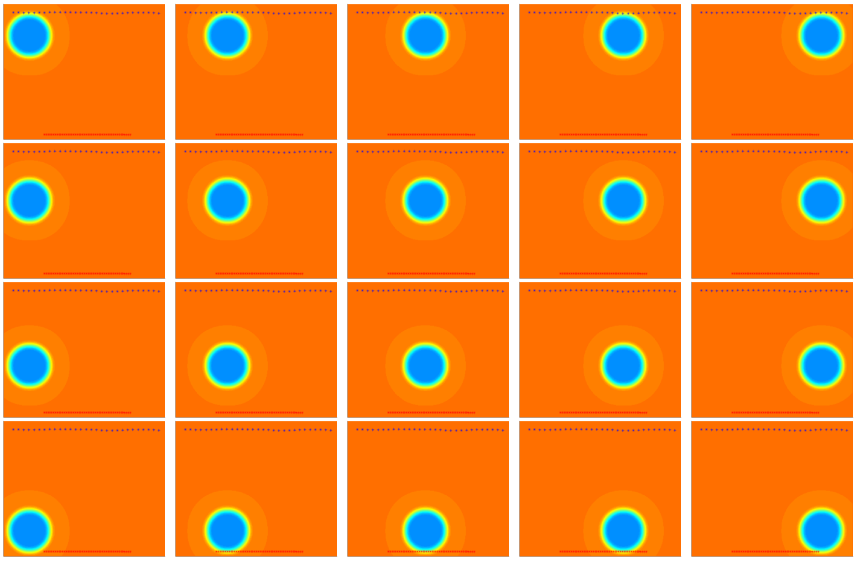


FIGURE 7.9 – Modèles de vitesse « vrais » pouvant être décrits comme un milieu homogène présentant une hétérogénéité de vitesse lente. Ces modèles se distinguent par la position de l'hétérogénéité présente.

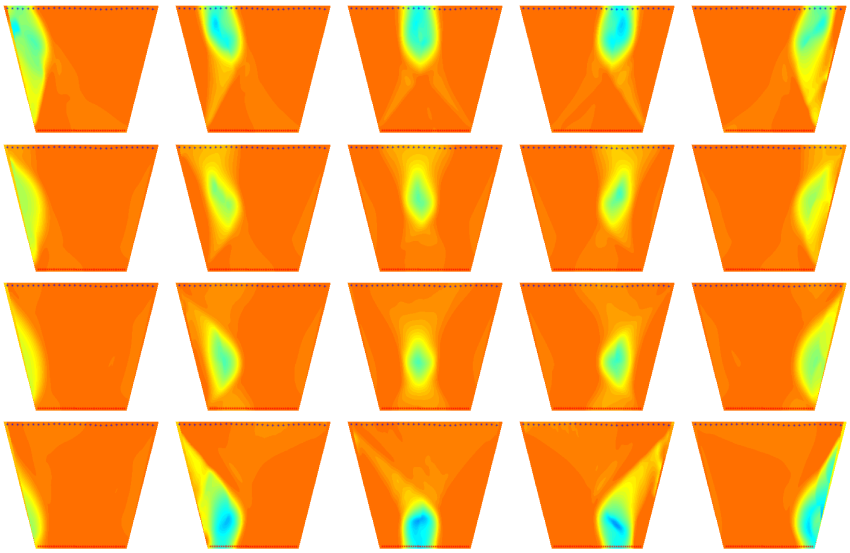
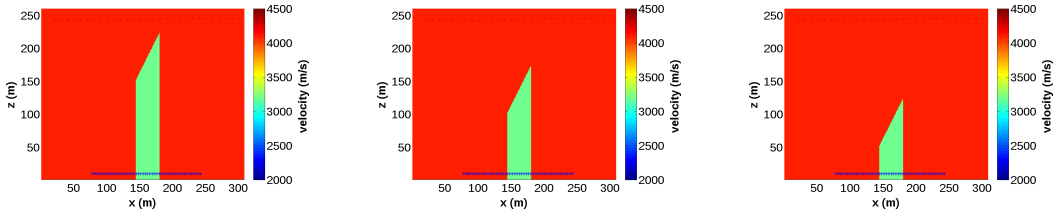


FIGURE 7.10 – Modèles de vitesse calculés par l'inversion des données synthétiques « observées » sur les modèles de vitesse « vrais » présentés sur la figure 7.9.

7.3 Imagerie et introduction d'information a priori

7.3.1 Géométrie de la faille

D'après l'analyse présentée dans la première section de ce chapitre, nous sommes conscients que la géométrie d'acquisition ne permet pas de déterminer de façon unique un modèle de paramètres 2D classique. Dans cette section je présente l'inversion de données synthétiques « observées » en utilisant l'algorithme de la méthode SIRT présenté dans le chapitre 4. On considère ici le dispositif d'acquisition utilisé lors de la campagne Surface-Tunnel pour le calcul d'un modèle de paramètres 2D classique afin d'évaluer le comportement du code de tomographie Tomo3D. L'objectif étant de savoir si le dispositif d'acquisition et la méthode de reconstruction utilisée peuvent nous permettre de déterminer la géométrie d'une zone de failles présumée. Dans cette section je propose de réaliser l'inversion des données « observées » en utilisant différentes contraintes sur les paramètres. Les données synthétiques « observées » sont générées pour des modèles représentant différentes géométries de faille. Nous considérons ici trois modèles de vitesse caractérisés par différente hauteur de la faille (fig. 7.11). Le premier modèle est présenté sur la figure 7.11a. La faille s'étend depuis les ouvrages jusqu'à 50 mètres sous la surface. Le second modèle est présenté sur la figure 7.11b. La faille remonte ici à 150 mètres au-dessus des ouvrages. Enfin le dernier modèle présenté sur la figure 7.11c illustre une faille de plus faible étendue remontant à environ 100 mètres au-dessus des ouvrages.



(a) Faille 1 (b) Faille 2 (c) Faille 3

FIGURE 7.11 – Modèles de vitesse synthétiques dont les dimensions ont été établies en considérant la géométrie d'acquisition de la ligne Centrale de la campagne Surface-Tunnel, avec en bleu la position des récepteurs.

La paramétrisation utilisée ici est une modélisation 2D (310 x 260 mètres carrés) par blocs homogènes dont la dimension est de 1x1 mètre carré. Les 80600 paramètres de l'inversion ne sont pas contraints par les données dont le nombre s'élève à 1248.

Une première inversion est réalisée avec une contrainte de lissage simple. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 5, l'utilisation d'une contrainte de lissage est ici nécessaire. Lors de la résolution du problème non linéaire, afin de respecter l'hypothèse de linéarisation, la perturbation du modèle ne peut être haute fréquence car ceci induit une modification importante de la trajectoire des rais. Cette contrainte de lissage donne à chacun des rais une influence étendue à une zone plus large que celle considérant uniquement les mailles traversées. L'influence d'un rai est alors étendue sur une gaussienne de 50 mètres de large. Les résultats d'inversion des trois jeux de données synthétiques sont présentés sur les figures 7.12a, 7.12b et 7.12c, ainsi que leurs contours sur les figures 7.12d, 7.12e et 7.12f. Une coupe du modèle de vitesse calculé est donnée pour chacun des modèles à 25 mètres, 125 mètres et 225 mètres au-dessus des ouvrages sur les figures de 7.12g à 7.12o. Sur ces coupes, le modèle calculé est représenté en bleu et le modèle vrai en rouge. Ces images mettent en évidence la non-unicité de la solution puisqu'ici l'algorithme d'inversion tend vers un

modèle solution qui n'est pas le modèle recherché. La valeur des propriétés de vitesse dans le modèle est mal évaluée et de nombreux artefacts sont présents. On remarque en effet des valeurs de vitesse pouvant atteindre plus de 4200 mètres par seconde alors que les modèles vrais sont majorés par une vitesse de 4100 mètres par seconde. Ces zones de vitesses plus élevées sont réparties de part et d'autre de la faille ainsi qu'à l'aplomb de celle-ci. On observe également des zones de plus faibles vitesses cette fois situées en surface de part et d'autre de la faille. Celles-ci permettant certainement de compenser les zones de vitesses plus élevées précédemment décrites. Ces artefacts témoignent de l'insuffisance des informations contenues dans les données pour la détermination d'une distribution 2D des propriétés de vitesse du milieu. En effet, en regardant les résidus présentés sur les figures de 7.12p à 7.12u, les modèles de paramètres calculés ici peuvent être considérés comme des modèles solutions permettant de bien expliquer les données. On comprend ainsi que plusieurs modèles de paramètres sont solutions et afin d'en réduire le nombre, des contraintes supplémentaires doivent être ajoutées. Dans l'idée d'une géométrie de la zone de failles inconnue, nous avons choisi d'ajouter une contrainte sur la valeur des paramètres.

Une seconde inversion est réalisée avec une contrainte supplémentaire. On fixe ici la valeur maximale de la vitesse de propagation des ondes sur l'ensemble du domaine à 4100 mètres par seconde. Cette valeur correspond à la vitesse maximale du modèle de vitesse vrai. Contrairement à l'inversion réalisée précédemment, dès lors qu'un paramètre atteint sa valeur limite, les résidus sont répartis sur les autres paramètres comme expliqué dans le chapitre 4. Les résultats de cette inversion sont présentés sur la figure 7.13. De la même façon les tomogrammes sont présentés sur les figures 7.13a, 7.13b et 7.13c et par leurs contours sur les figures 7.13d, 7.13e et 7.13f. Les coupes pour différentes profondeurs sont présentées sur les figures de 7.13g à 7.13o et les résidus sur les figures de 7.13p à 7.13u. L'ajout de contraintes sur les paramètres a par définition réduit l'espace des modèles solutions. Elles permettent ainsi d'augmenter la probabilité de converger vers le modèle vrai, si bien sûr, elles sont en adéquation avec ce dernier. Cependant, celles-ci sont également la cause de résidus plus grands et c'est pourquoi il ne sera pas possible de comparer, par l'unique analyse des résidus, deux résultats d'inversion si ceux-ci ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. En effet, il est clair que plus le nombre de paramètres utilisés est grand, plus il est facile de se rapprocher des données. Néanmoins, on constate ici que malgré des résidus plus importants, l'algorithme d'inversion tend cette fois vers un modèle de paramètres proche de celui recherché. Les artefacts présents dans l'inversion précédente ont disparu et la zone de failles est nettement mieux déterminée pour les trois modèles de faille étudiés.

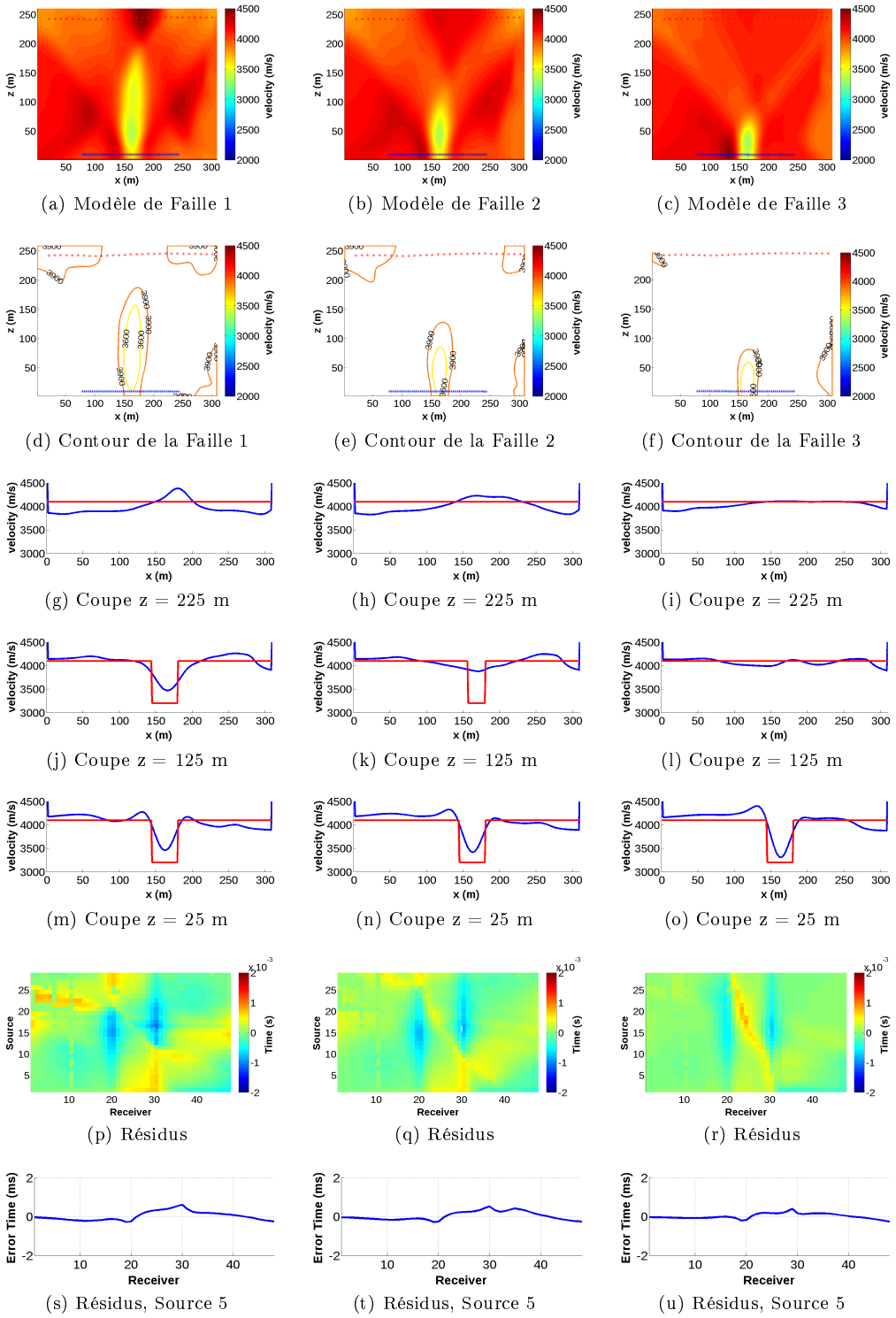
Une troisième inversion est réalisée avec le même type de contrainte que celle introduite dans la seconde inversion. On fixe cette fois la valeur maximale de la vitesse de propagation des ondes sur l'ensemble du domaine à 4000 mètres par seconde. De la même façon, les résultats de cette inversion sont présentés sur la figure 7.14. La contrainte ajoutée ici n'est pas en adéquation avec le modèle vrai et l'espace des modèles décrit par cette paramétrisation ne contient plus le modèle vrai. On voit en effet sur les figures de 7.14p à 7.14u des résidus importants ($> \varepsilon$) qui témoignent d'une contrainte trop forte sur les paramètres. On remarque ici que la majorité des résidus sont négatifs, car la contrainte imposée est une contrainte sur le maximum. De la même façon, il est possible de détecter une contrainte trop restrictive établie sur le minimum de la vitesse, celle-ci se manifestant par d'importants résidus positifs. Ici le résultat d'inversion montre clairement que les contraintes imposées sont trop fortes. Néanmoins, la zone de failles, bien que déformée, est retrouvée. On notera également l'absence d'artefacts. Dans cet exemple, nous illustrons ce qui peut arriver si les contraintes imposées ne sont pas en adéquation avec les propriétés du modèle vrai. Nous avons vu ici que l'application d'une contrainte trop forte peut être facilement détectée par l'analyse des résidus. On pourra néanmoins remarquer que les résultats obtenus en utilisant des contraintes trop fortes, permettent d'obtenir des modèles plus proches du modèle vrai,

ceux-ci ne contenant pas les artefacts qui pourraient conduire à une mauvaise interprétation sur la géologie du site étudié.

Enfin une quatrième et dernière inversion est réalisée. On choisit ici d'utiliser les mêmes contraintes que lors de la seconde inversion en relâchant cette fois les contraintes de lissage imposées au cours des itérations. La largeur de la zone influente de chaque rai est réduite au cours des itérations afin de ne pas bloquer l'inversion lorsque celle-ci tend vers le modèle solution. Les résultats de cette inversion sont présentés sur la figure 7.15. Les résidus représentés sur les figures de 7.14p à 7.14u sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus pour l'ensemble des inversions précédemment présentées. Néanmoins la présence d'artefact apparaît à nouveau dans certaines zones du modèle et notamment à proximité de certaines sources donnant encore une fois la possibilité d'une mauvaise interprétation. Les limites de la zone de faille sont mieux retrouvées mais la valeur minimum de cette zone est sous évaluée pour les trois modèles de faille présentés.

Conclusion

Une représentation 2D des propriétés du milieu laisse place à la non unicité du tomogramme permettant d'expliquer les données de l'acquisition Surface-Tunnel. L'utilisation d'une paramétrisation homogène ou encore 1D adaptée peut néanmoins nous permettre de quantifier les vitesses de propagation moyennes des ondes sur le site. Les tests réalisés ici ont montré l'intérêt de l'introduction d'information a priori apportée comme une contrainte sur la valeur des paramètres, à savoir les vitesses limites caractérisant le milieu. L'utilisation de la contrainte de lissage dont l'intérêt est présenté plus en détail dans la partie théorique a également ici été illustrée. Les résultats présentés témoignent de l'intérêt de ces contraintes. Comme nous l'avons vu ici, et au détriment de faibles résidus, elles permettent d'éliminer les artefacts systématiquement présents lorsque que les paramètres utilisés ne sont pas contraints par les données. Ce point est un point important dès lors que le risque d'une mauvaise interprétation des résultats est minimisé.



(a) Modèle de Faille 1 (b) Modèle de Faille 2 (c) Modèle de Faille 3

(d) Contour de la Faille 1 (e) Contour de la Faille 2 (f) Contour de la Faille 3

(g) Coupe z = 225 m (h) Coupe z = 225 m (i) Coupe z = 225 m

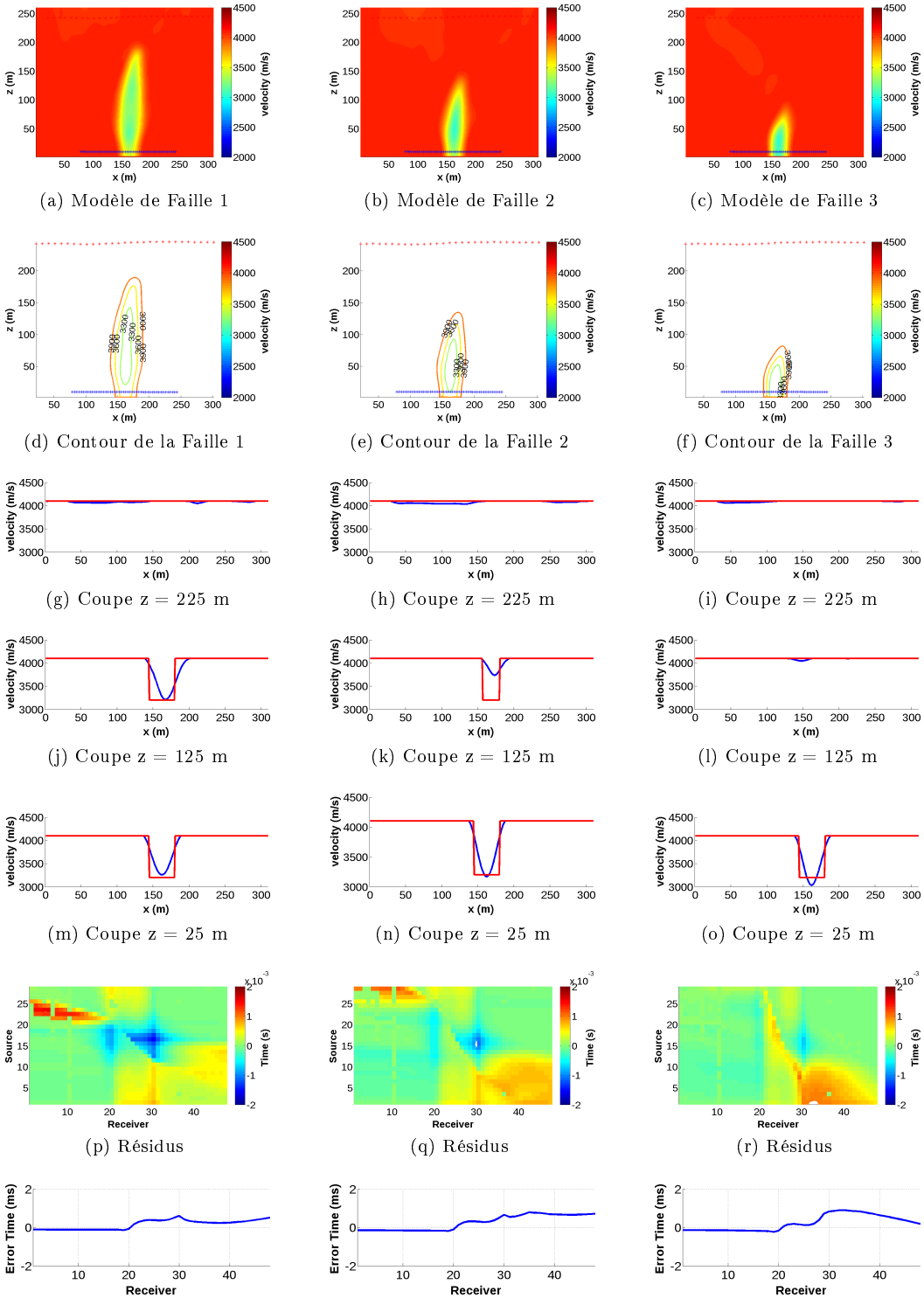
(j) Coupe z = 125 m (k) Coupe z = 125 m (l) Coupe z = 125 m

(m) Coupe z = 25 m (n) Coupe z = 25 m (o) Coupe z = 25 m

(p) Résidus (q) Résidus (r) Résidus

(s) Résidus, Source 5 (t) Résidus, Source 5 (u) Résidus, Source 5

FIGURE 7.12 – Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D, sans information a priori et avec une contrainte de lissage gaussien sur 50 mètres. Les figures (a), (b) et (c) sont respectivement les modèles de vitesse calculés pour les trois modèles de faille présentés sur la figure 7.11. Les figures (d), (e) et (f) sont les isocontours de ces modèles. Les figures (g), (h) et (i) représentent une coupe en z=225 mètres avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. De la même façon les figures (j),(k) et (l) et (m),(n) et (o) sont les coupes respectives obtenues pour z=125 et z=25 mètres. Les figures (p),(q) et (r) représentent quant à elles les résidus des temps pour l'ensemble des couples source-récepteur, alors que les figures (s),(t) et (u) présentent en particulier les résidus de la source 5.



(a) Modèle de Faille 1 (b) Modèle de Faille 2 (c) Modèle de Faille 3

(d) Contour de la Faille 1 (e) Contour de la Faille 2 (f) Contour de la Faille 3

(g) Coupe z = 225 m (h) Coupe z = 225 m (i) Coupe z = 225 m

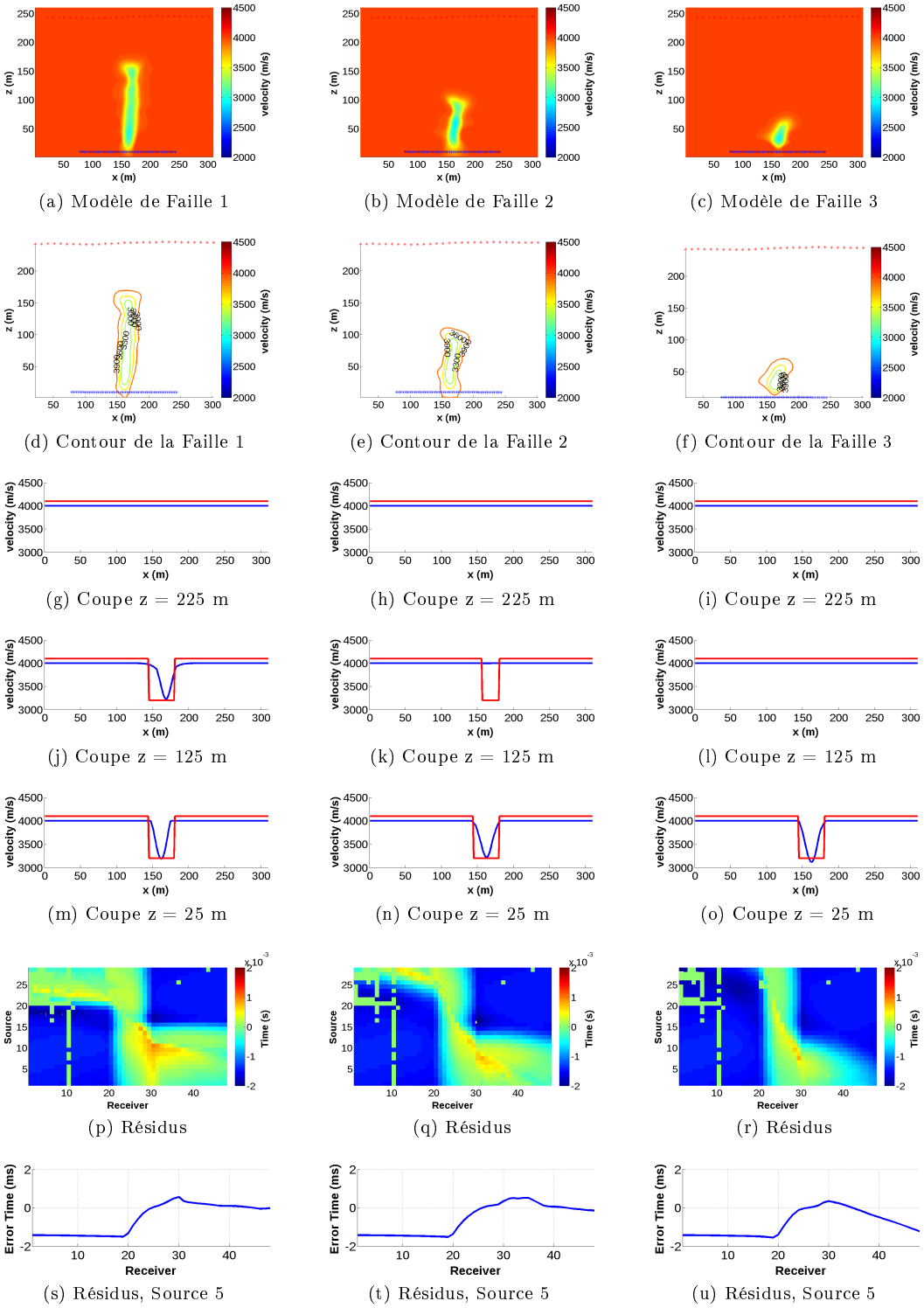
(j) Coupe z = 125 m (k) Coupe z = 125 m (l) Coupe z = 125 m

(m) Coupe z = 25 m (n) Coupe z = 25 m (o) Coupe z = 25 m

(p) Résidus (q) Résidus (r) Résidus

(s) Résidus, Source 5 (t) Résidus, Source 5 (u) Résidus, Source 5

FIGURE 7.13 – Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4100 mètres par seconde. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12.



(a) Modèle de Faille 1 (b) Modèle de Faille 2 (c) Modèle de Faille 3

(d) Contour de la Faille 1 (e) Contour de la Faille 2 (f) Contour de la Faille 3

(g) Coupe z = 225 m (h) Coupe z = 225 m (i) Coupe z = 225 m

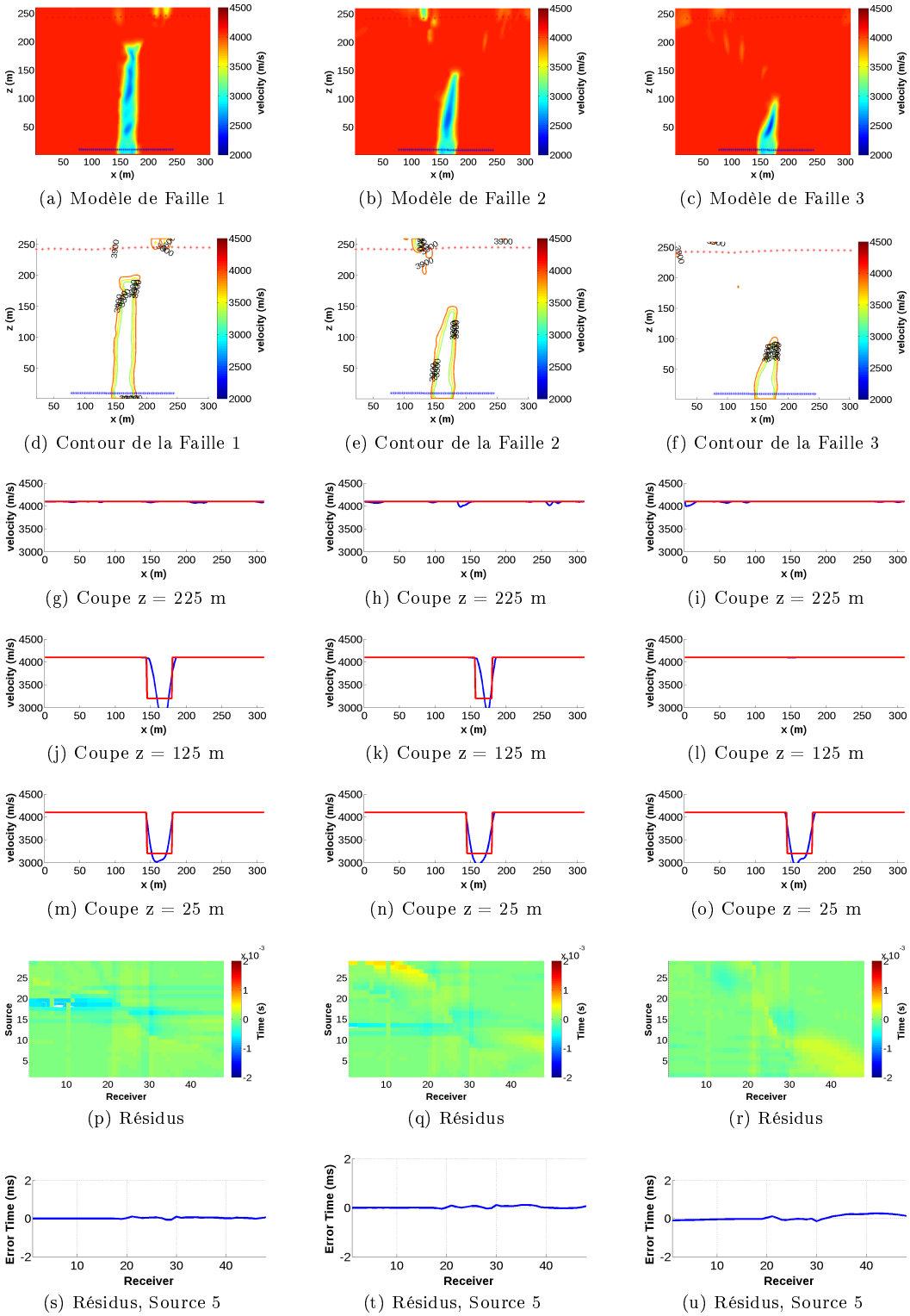
(j) Coupe z = 125 m (k) Coupe z = 125 m (l) Coupe z = 125 m

(m) Coupe z = 25 m (n) Coupe z = 25 m (o) Coupe z = 25 m

(p) Résidus (q) Résidus (r) Résidus

(s) Résidus, Source 5 (t) Résidus, Source 5 (u) Résidus, Source 5

FIGURE 7.14 – Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte trop forte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4000 mètres par seconde. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12.



(a) Modèle de Faille 1 (b) Modèle de Faille 2 (c) Modèle de Faille 3

(d) Contour de la Faille 1 (e) Contour de la Faille 2 (f) Contour de la Faille 3

(g) Coupe z = 225 m (h) Coupe z = 225 m (i) Coupe z = 225 m

(j) Coupe z = 125 m (k) Coupe z = 125 m (l) Coupe z = 125 m

(m) Coupe z = 25 m (n) Coupe z = 25 m (o) Coupe z = 25 m

(p) Résidus (q) Résidus (r) Résidus

(s) Résidus, Source 5 (t) Résidus, Source 5 (u) Résidus, Source 5

FIGURE 7.15 – Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4100 mètres par seconde et une contrainte de lissage relâchée au cours des itérations. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12.

7.3.2 Prise en compte de la couche argileuse

La présence des couches argileuse et calcaire est connue sur le site Expérimental de Tournemire. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu que l'évaluation des vitesses de propagation des ondes dans ces deux couches ne peut être faite à partir des données acquises lors de la campagne Surface-Tunnel. Cette information doit donc être ajoutée comme une information a priori dans l'inversion. Dans les exemples qui suivent, nous allons voir que cette information peut être introduite de manière efficace dans le modèle initial. Dans cette section, je propose d'évaluer l'influence du contraste argile-calcaire donné en entrée de l'inversion sur les résultats d'inversion. Un milieu synthétique présentant deux couches dont les propriétés de vitesse sont inégales et une faille est représenté sur la figure 7.16. Cette faille se caractérise par une chute des vitesses de 900 mètres par seconde dans chacune des couches. L'inversion de ces données synthétiques est ici réalisée en considérant les quatre modèles initiaux illustrés sur la figure 7.17. Le premier (fig. 7.17a) est un modèle homogène correspondant à la vitesse moyenne des deux couches du modèle vrai. Le second (fig. 7.17b) est composé des vitesses des couches du modèle recherché. Le troisième (fig. 7.17c) possède un contraste plus fort et le dernier (fig. 7.17d) un contraste plus faible que celui présent dans le modèle vrai. On utilisera encore une fois l'algorithme SIRT qui, comme nous l'avons vu dans la partie théorique, est le plus approprié dès lors que l'on ajoute des contraintes importantes dans l'inversion.

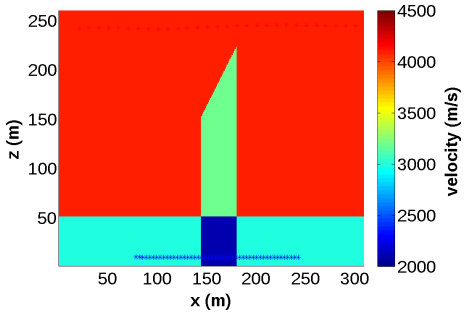
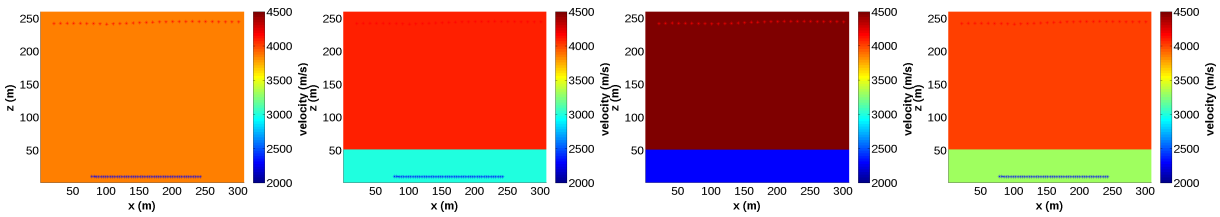


FIGURE 7.16 – Faille 4, Modèle de vitesse synthétique comprenant une couche horizontale et dont les dimensions ont été établies en considérant la géométrie d'acquisition de la ligne Centrale de la campagne Surface-Tunnel, avec en bleu la position des récepteurs.



(a) Absence de contraste (b) Contraste du modèle vrai (c) Contraste surestimé (d) Contraste sous-estimé

FIGURE 7.17 – Représentation des quatre modèles initiaux pour lesquels les résultats d'inversion sont comparés dans cette section. Ces modèles initiaux sont caractérisés par le contraste de vitesse entre les deux couches représentant ici la couche calcaire et la couche argileuse du site d'étude. Le premier modèle (a) est homogène (absence de contraste). le second (b) correspond au contraste du modèle vrai. Le troisième et la quatrième sont respectivement caractérisés par un contraste plus fort et plus faible que celui de modèle vrai.

Les quatre modèles initiaux sont tels que la vitesse moyenne horizontale est constante et est égale à celle du modèle vrai. L'inversion est réalisée avec une contrainte de lissage ainsi qu'une valeur maximale de paramètres correspondant aux valeurs du modèle initial comme présenté dans la seconde inversion de la section précédente.

L'inversion réalisée sur le premier modèle initial dont la valeur correspondant également à la vitesse maximale est de 3850 mètres par seconde. Les résultats de l'inversion des données synthétiques sont présentés sur la première colonne de la figure 7.18. La géométrie de la faille est retrouvée et la précision sur la valeur des paramètres est de l'ordre de 100 mètres par secondes. La vitesse de la zone faillée se situant dans la couche argileuse est surestimée d'environ 100 mètres par seconde alors que celle-ci est sous-estimée dans la couche calcaire.

Le second modèle initial est constitué des vitesses vraies des couches calcaire et argileuse. Les résultats sont présentés sur la deuxième colonne de la figure 7.18. Les résultats obtenus sont relativement similaires à ceux obtenus pour l'inversion de cette faille sans couche argileuse (fig. 7.12a). La géométrie de la faille ainsi que la vitesse de celle-ci sont bien évaluées (de l'ordre de la précision des mesures).

Le contraste de vitesse entre les deux couches du troisième modèle initial est plus fort que dans le modèle vrai. Les résultats d'inversion représentés sur la troisième colonne de la figure 7.18 montrent que la géométrie de la faille est à nouveau retrouvée avec cette fois la présence d'artefacts en surface. La zone de failles dans la couche argileuse se manifeste par une chute des vitesses d'environ 800 mètres par seconde alors qu'une chute d'environ 1000 mètres par seconde est remarquée dans les calcaires.

Enfin pour le quatrième et dernier modèle initial, le contraste de vitesse entre les deux couches est plus faible que dans le modèle vrai. Les résultats d'inversion représentés sur la quatrième colonne de la figure 7.18 montrent encore une fois que la géométrie de la faille est retrouvée avec également la présence d'artefacts principalement situés en surface. La zone de failles dans la couche argileuse se manifeste ici par une chute des vitesses d'environ 1300 mètres par seconde alors qu'une chute de moins de 800 mètres par seconde est remarquée dans les calcaires.

Conclusion

Les tests réalisés dans cette section montrent que la reconstruction géométrique de la zone de failles est peu perturbée par l'utilisation d'un mauvais contraste de vitesse entre les couches calcaire et argileuse. En revanche, des artefacts apparaissent en surface pour les modèles initiaux trois et quatre présentés sur les figures 7.17c et 7.17d et s'expliquent par une contrainte sur les valeurs des vitesses moins bien adaptée que celle imposée sur l'inversion utilisant le deuxième modèle initial présenté sur la figure 7.17b. Les vitesses dans la zone de failles sont relativement bien retrouvées pour l'ensemble des quatre inversions. Cependant il n'est pas possible de tirer des conclusions quant aux chutes de vitesse dans chacune des couches, celles-ci étant, d'après les tests réalisés ici, liées au contraste donné dans le modèle initial. Les résidus calculés sur les quatre tomogrammes obtenus sont très proches en termes de valeurs mais également de répartition et s'expliquent principalement par la contrainte de lissage imposée.

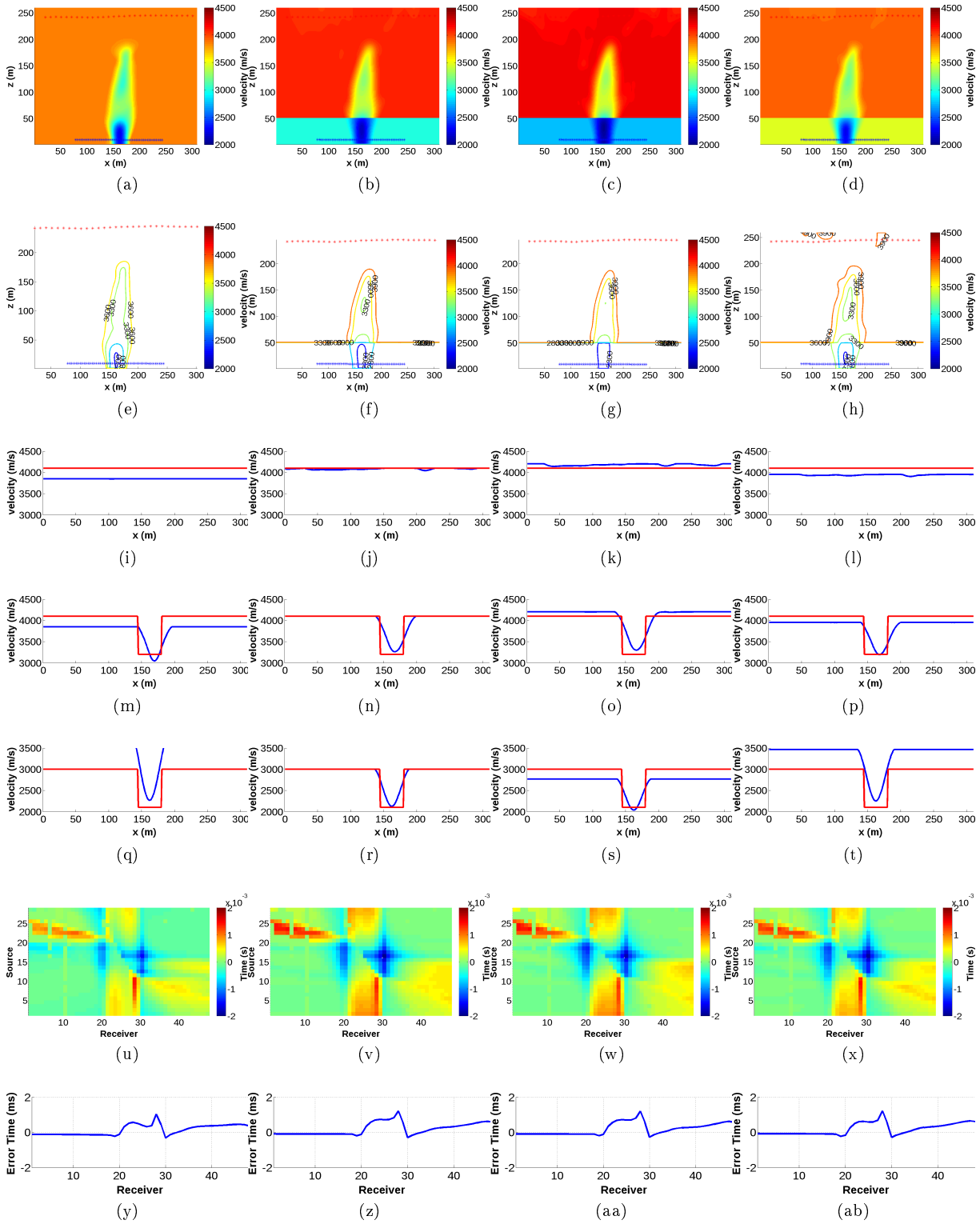


FIGURE 7.18 – Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D, sans information a priori et avec une contrainte de lissage gaussien sur 50 mètres. Les figures (a), (b), (c) et (d) sont respectivement les modèles de vitesse calculés à partir des quatre modèles initiaux présentés sur la figure 7.17. Les figures (e), (f), (g) et (h) sont les isocontours de ces modèles. Les figures (i), (j), (k) et (l) représentent une coupe en z=225 mètres avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. De la même façon les figures (m),(n), (o) et (p) et (q),(r), (s) et (t) sont les coupes respectives obtenues pour z=125 et z=25 mètres. Les figures (u),(v), (w) et (x) représentent quant à elles les résidus des temps pour l'ensemble des couples source-récepteur, alors que les figures (y),(z), (aa) et (ab) présentent en particulier les résidus de la source 5.

7.3.3 Etude d'un cas réaliste

Le dernier milieu synthétique pour lequel les données « observées » du problème sont simulées comprend deux couches géologiques dont les propriétés de vitesse sont respectivement de 3000 et 4100 mètres par seconde. Le milieu est perturbé par la présence d'une faille qui s'étend sur 30 mètres de large et 170 mètres de haut et qui se caractérise par une chute des vitesses pouvant aller jusqu'à 900 mètres par seconde (fig. 7.19). Le milieu tente d'être le plus proche du cas réel et c'est pourquoi il est également constitué de fortes hétérogénéités en surface. En effet, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de cette thèse, des hétérogénéités ont pu être détectées par les précédentes acquisitions géophysiques réalisées sur la Station. Ces hétérogénéités de surface se caractérisent dans cet exemple par un gradient de vitesse en surface dont la valeur minimale est de 500 mètres par seconde et augmente avec la profondeur jusqu'à atteindre la vitesse des calcaires ici égale à 4100 mètres par seconde. Le gradient n'est pas uniforme et sa pente varie en fonction de la position x donnant des hétérogénéités de surface pouvant aller de quelques mètres de profondeur jusqu'à 30 mètres dans certaines zones.

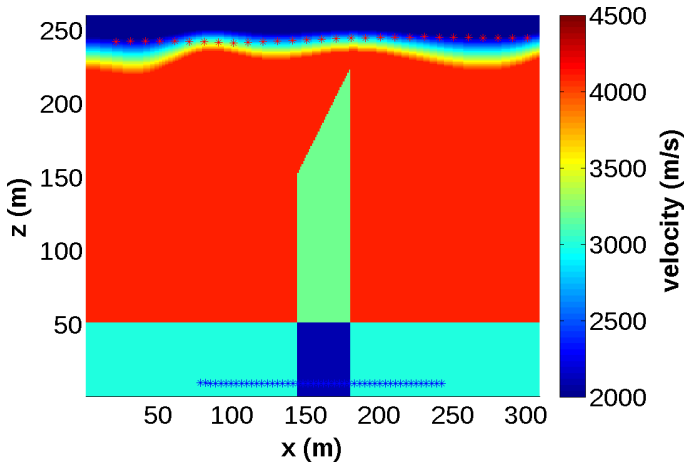


FIGURE 7.19 – Description d'un modèle de vitesse réaliste comprenant deux couches sédimentaires de vitesses inégales, des hétérogénéités de surface ainsi que la présence d'une faille.

7.3.3.1 Inversion classique

Dans cette section je propose de réaliser l'inversion des données synthétiques « observées » pour le modèle illustré sur la figure 7.19. Nous cherchons ici à déterminer les paramètres d'une représentation 2D des propriétés de vitesse. L'inversion est réalisée en utilisant la méthode SIRT et une contrainte de lissage. A partir du modèle initial présenté sur la figure 7.20a, la figure 7.20b présente les résultats de cette inversion. A nouveau, trois coupes sont représentées sur la figure 7.20c illustrant le modèle calculé en bleu et le modèle vrai en rouge pour les profondeurs $z = 225$, $z = 125$ et $z = 25$ mètres. Le résultat obtenu est clairement éloigné des propriétés de vitesse du modèle réel. On observe en effet de nombreux artefacts. Certains, dont la répartition correspond à celle que nous avions obtenue lors de l'inversion des trois modèles de faille dans la section 7.3.1, sont de la même façon liés à une définition trop lâche de l'espace des modèles solutions. A ceux-ci s'ajoutent les hétérogénéités de surface. Elles sont ici réparties dans une zone étendue pouvant atteindre une profondeur d'environ cent mètres. Les résidus des temps représentés en fonction des positions sources-récepteurs sur les figures 7.20d 7.20e et 7.20f sont néanmoins faibles et

témoignent de la non-unicité du problème de minimisation due à la paramétrisation utilisée ici. Cet exemple illustre la nécessité d'ajouter des informations dans l'inversion pour obtenir une imagerie plus fidèle de la distribution spatiale des propriétés de vitesse de l'objet.

7.3.3.2 Information a priori dans le modèle initial

Le modèle initial permet de déterminer la position de l'espace des modèles à partir de laquelle la recherche du minimum du problème de minimisation commence. L'utilisation d'une méthode de minimisation locale est donc fortement orientée par le choix de ce modèle initial. En utilisant les même données que dans l'inversion proposée dans la section précédente, je propose de réaliser dans cette section une inversion ayant pour modèle initial les hétérogénéités de surface, ainsi que la couche argileuse non perturbée par la présence de la faille du modèle réel. Ce modèle initial est présenté sur la figure 7.21a. Ici, le même processus d'inversion est utilisé, seul le modèle initial est différent. La distribution des propriétés de vitesse calculée est présentée sur la figure 7.21b, ainsi que sur les coupes présentées sur la figure 7.21c, avec encore une fois le modèle vrai en rouge et le modèle calculé en bleu. Les résultats obtenus ici sont nettement plus proches du modèle vrai que ceux obtenus dans la section précédente. Néanmoins, des artefacts subsistent de part et d'autre de la zone de failles. Comme nous avons pu le voir dans la section 7.3.1, ces artefacts peuvent être atténués par l'ajout de contraintes sur la valeur maximale des paramètres. Dans la prochaine section, nous considérons cette information supplémentaire.

7.3.3.3 Information a priori introduite par des blocs de contraintes

Il est possible que l'on puisse connaitre a priori l'ordre de grandeur de la vitesse attendue d'une formation sédimentaire. Par exemple, en s'appuyant sur des mesures en laboratoire, on peut estimer les vitesses de propagation des ondes dans les roches constituant le milieu. L'ajout de cette information a priori portant sur la vitesse maximale observable dans une région du domaine est imposée comme une contrainte sur les paramètres, celle-ci étant définie en fonction de la région du domaine considérée. Comme l'illustre la figure 7.22b, des zones de contraintes sont définies et permettent de différencier les paramètres se situant dans la couche calcaire et dans la couche argileuse. Les figures 7.22c et 7.22d illustrent les résultats de l'inversion obtenus en considérant que dans la zone 1 (calcaire), les vitesses sont comprises entre 2000 et 4100 mètres par seconde et que dans la zone 2 (argile), les vitesses sont comprises entre 1400 et 3000 mètres par seconde. Les résidus des temps sont à nouveau faibles devant les erreurs de mesure et de modélisation mais cette fois le modèle calculé possède des caractéristiques qui se rapprochent de celles du modèle réel. Comme nous l'avons vu dans la partie théorique, l'inversion réalisée ici est un peu plus complexe. Ainsi, dès lors qu'un paramètre atteint sa valeur maximale, ce paramètre est fixé et sort du processus d'inversion. Les résidus des temps sont alors répartis sur les autres paramètres afin de ne pas bloquer l'inversion. Ceci revient à considérer que ce paramètre n'est plus à inverser, on réduit ainsi le nombre d'inconnues du système. L'ajout de ces contraintes par blocs a permis, tout comme dans l'exemple proposé dans la section 7.3.1, d'éliminer les artefacts présents lorsqu'une trop grande liberté est donnée aux paramètres inversés. Encore une fois cet exemple illustre l'intérêt de réduire la taille de l'espace des modèles solutions pour ainsi optimiser la probabilité de converger vers le modèle vrai.

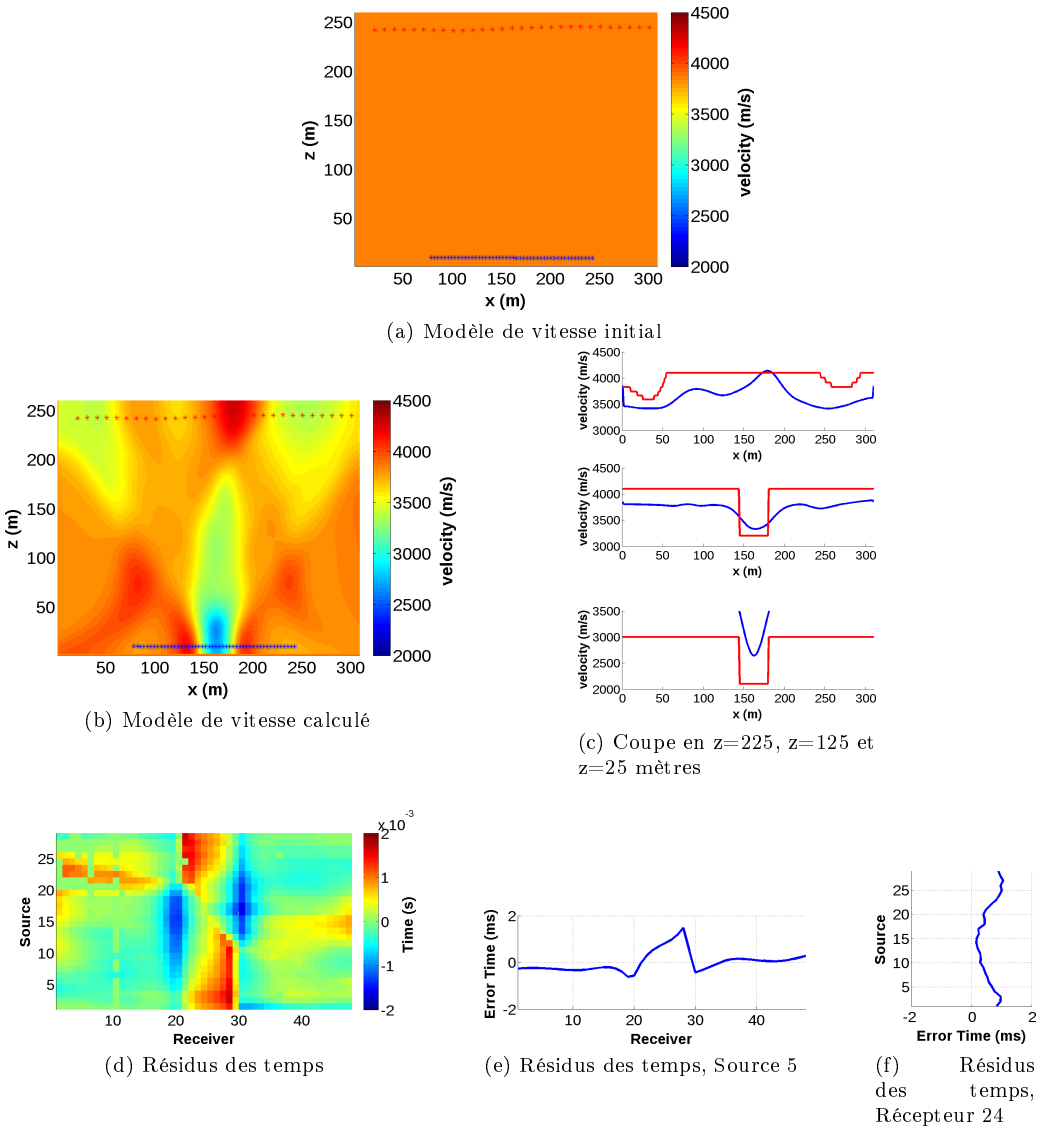
7.3.3.4 Information a priori issue de données de forage ou connaissance absolue

Un autre type d'information peut être apporté en vue d'affiner l'imagerie du milieu. Ce sont les données issues de mesures ou d'observations directes. On considèrera que ces informations sont fiables et nous ne chercherons pas à estimer ces paramètres dans l'inversion. On définit alors les zones dans lesquelles les paramètres du modèle initial sont fiables et

pour lesquelles la valeur est bloquée. Ces zones sont représentées sur la figure 7.23b, ainsi on considère les données d'un puits réalisé depuis la surface, situé à $x = 250$ mètres et d'une profondeur d'environ cent mètres. On considère également les données issues des observations dans les ouvrages nous permettant de connaître la vitesse dans les premiers mètres situés autour de ces derniers. De la même façon les vitesses introduites dans le modèle initial en surface sont considérées fiables. La distribution des propriétés de vitesse calculée est présentée sur les figures 7.23c et 7.23d. Celle-ci est proche du modèle vrai, néanmoins si on regarde la coupe en $z = 25$ mètres présentée sur la figure 7.23d, on constate que l'estimation de la vitesse dans la faille est moins bonne que celle obtenue par la précédente inversion. On explique aisément ce comportement par la contrainte de lissage imposée sur la perturbation de lenteur. La vitesse vraie étant déjà établie pour les paramètres se situant à l'aplomb de cette zone entraine des perturbations nulles pour ces positions. De ce fait, la perturbation du modèle nécessaire pour rejoindre le modèle vrai possède de forts contrastes dans ces zones, qui ne peuvent être représentés par le calcul d'une perturbation lisse. Les résidus obtenus pour cette inversion sont présentés sur les figures 7.23e, 7.23f et 7.23g et ne présentent pas de différences notables avec ceux obtenus pour les précédentes inversions.

Conclusion

Nous avons vu lors de l'étude de ce cas réaliste plusieurs façons d'intégrer de l'information a priori dans l'inversion des temps de première arrivée. Celle-ci peut être introduite dans le modèle initial, par une contrainte sur la valeur des paramètres, ou encore par le cas limite de cette dernière, à savoir la fixation de certains paramètres. Dans les inversions présentées dans cette section, nous avons pu voir que l'ajout d'information a priori ne nous a pas permis de réduire les résidus de façon notable, mais plutôt d'orienter le modèle calculé vers le modèle solution en réduisant l'espace formé par l'ensemble des combinaisons de paramètres permis par notre modélisation. L'introduction d'information a priori doit néanmoins prendre en compte les contraintes imposées dans le processus d'inversion et comme nous avons pu le voir dans le dernier exemple avec l'information introduite autour des ouvrages, celle-ci doit s'intégrer également avec la contrainte de lissage imposée. On pourra alors imaginer introduire dans le modèle initial non pas les informations de manière « brutale », mais imaginer que celles-ci peuvent être étendues autour de la zone dite fiable. Ceci bien évidemment dans les cas où ce scénario serait plus probable qu'un changement brutal des propriétés.



(a) Modèle de vitesse initial

(b) Modèle de vitesse calculé

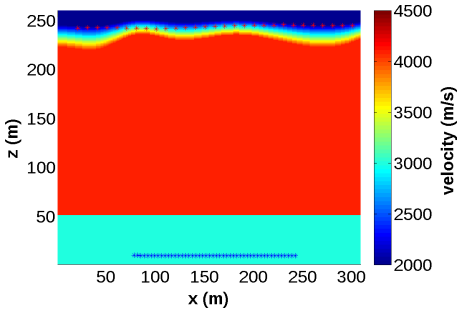
(c) Coupe en z=225, z=125 et z=25 mètres

(d) Résidus des temps

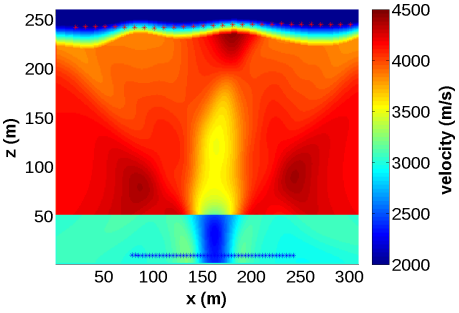
(e) Résidus des temps, Source 5

(f) Résidus des temps, Récepteur 24

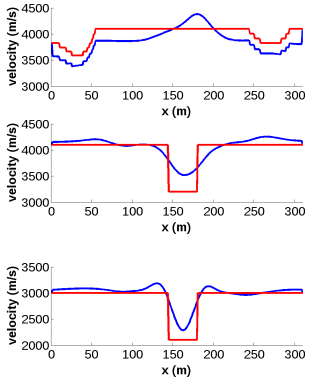
FIGURE 7.20 – **Exemple 1, inversion classique.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale ayant permis d'aboutir à la distribution de vitesse présentée sur la figure (b) en ne considérant aucune information a priori sur le milieu. (c) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (d) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (e) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (f) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources.



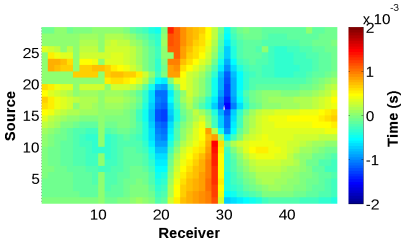
(a) Modèle de vitesse initial



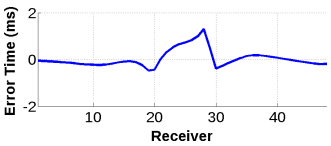
(b) Modèle de vitesse calculé



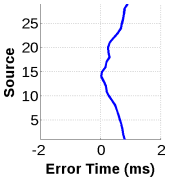
(c) Coupe en z=225, z=125 et z=25 mètres



(d) Résidus des temps

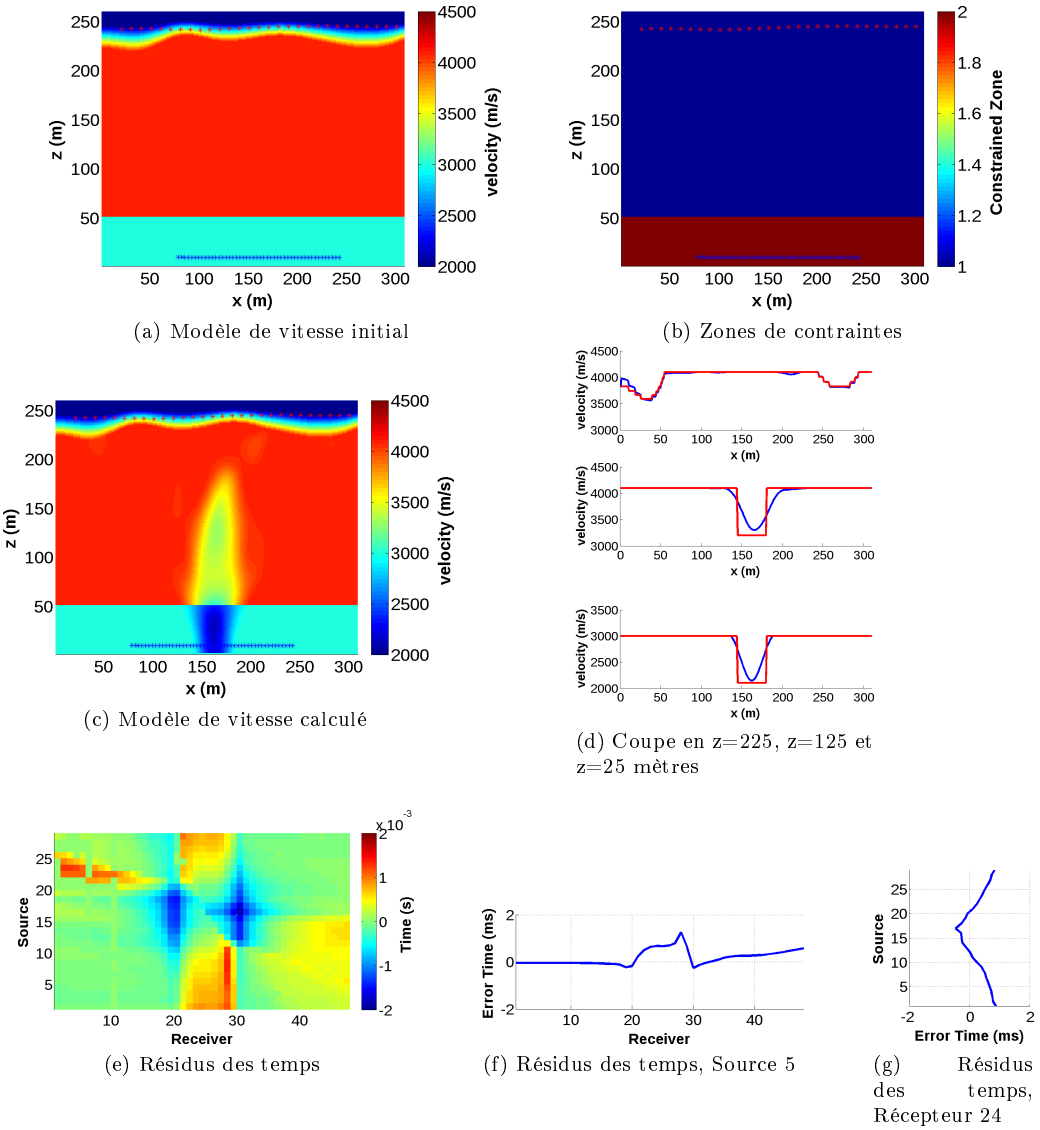


(e) Résidus des temps, Source 5



(f) Résidus des temps, Récepteur 24

FIGURE 7.21 – **Exemple 2, inversion avec information dans le modèle initial.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (b). (c) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (d) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (e) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (f) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources.



(a) Modèle de vitesse initial

(b) Zones de contraintes

(c) Modèle de vitesse calculé

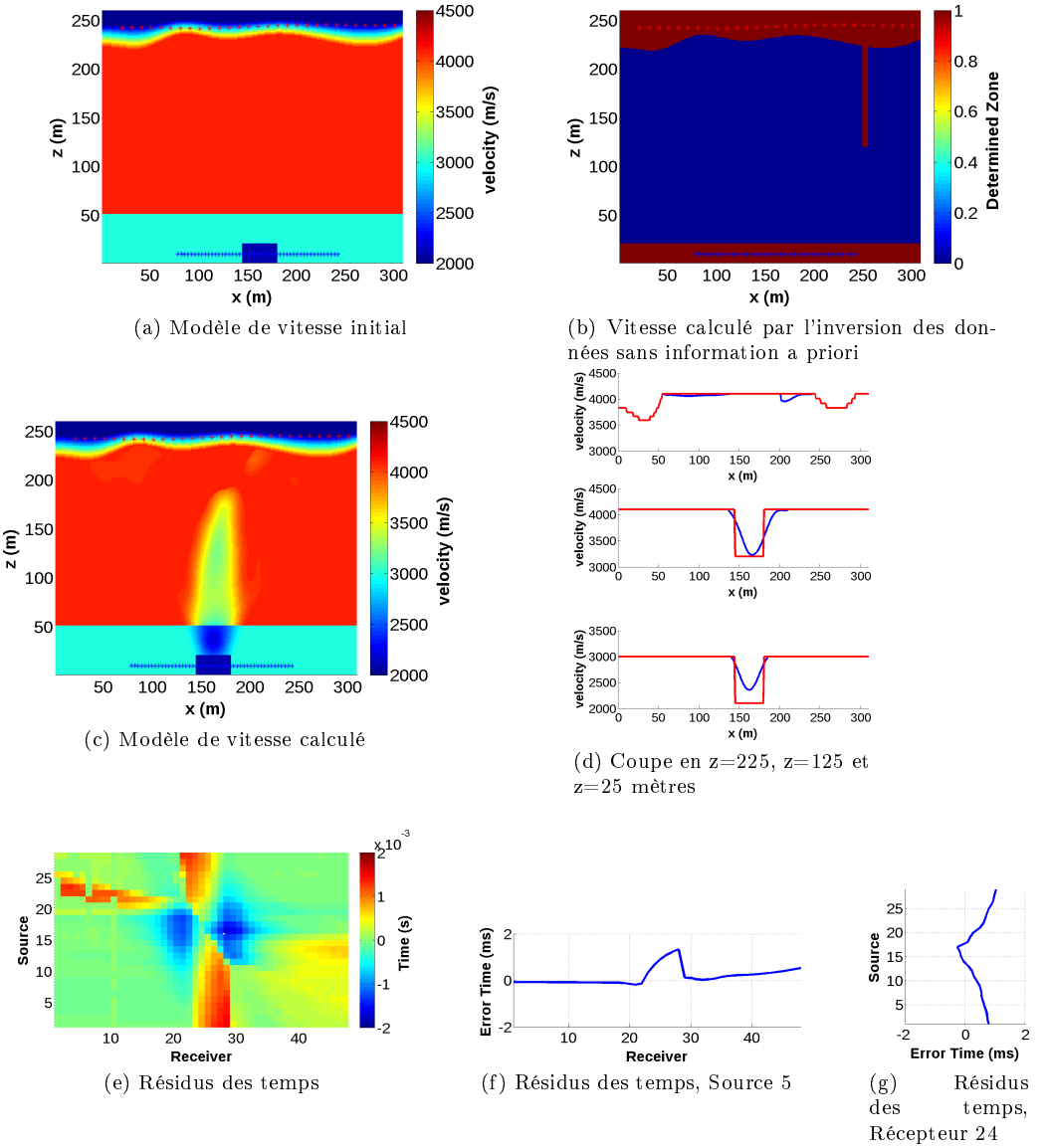
(d) Coupe en z=225, z=125 et z=25 mètres

(e) Résidus des temps

(f) Résidus des temps, Source 5

(g) Résidus des temps, Récepteur 24

FIGURE 7.22 – **Exemple 3, inversion avec zones contraintes.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. Des informations a priori sont également introduites par les blocs de contraintes présentés sur la figure (b) pour lesquels les valeurs de vitesse maximale et minimale sont définies. La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (c). (d) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (e) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (f) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (g) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources.



(a) Modèle de vitesse initial

(b) Vitesse calculé par l'inversion des données sans information a priori

(c) Modèle de vitesse calculé

(d) Coupe en z=225, z=125 et z=25 mètres

(e) Résidus des temps

(f) Résidus des temps, Source 5

(g) Résidus des temps, Récepteur 24

FIGURE 7.23 – **Exemple 4, inversion avec utilisation de données issues de mesures ou d'observations directes.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. Des informations a priori sont également introduites par les blocs de contraintes présentés sur la figure 7.22b. On ajoute ici des informations supplémentaires en considérant les valeurs des paramètres bloquées dans les zones d'informations fiables représentées en rouge sur la figure (b). La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (c). (d) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (e) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (f) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (g) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources.

7.4 Conclusions

Ce chapitre nous a permis d'évaluer le code d'inversion Tomo3D dans le cas particulier de la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel et de façon plus particulière, de la ligne formée par les 29 sources de la ligne Centrale et par les 48 récepteurs placés dans les galeries Est et Ouest. Nous avons vu ici que l'utilisation d'une inversion classique réalisée pour une paramétrisation 2D classique, à savoir une grille discrète régulière n'est pas contrainte. Nous avons également vu que l'inversion d'un modèle de paramètres non contraints amène dans de nombreux cas à converger vers un modèle qui n'est pas le modèle vrai. L'ajout de contraintes sur les paramètres nous a permis de réduire l'espace des modèles et ainsi, d'augmenter la probabilité de converger vers le modèle vrai. Les résidus des temps calculés à la fin du processus d'inversion peuvent alors être supérieurs à ceux observés lors d'une paramétrisation peu contrainte cependant, le risque de sur-interprétation est considérablement réduit.

Dans le prochain chapitre, les traitements présentés ici sont appliqués à l'inversion des données réelles des trois lignes de l'acquisition Surface-Tunnel.

Chapitre 8

Résultats d'inversion et interprétation

Sommaire

8.1 Détection des failles sur la SET 150
8.1.1 Hétérogénéités de la zone auscultée 150
8.1.2 Détection des variations latérales 150
8.1.3 Bilan 152
8.2 Imagerie de la Station Expérimentale de Tournemire 152
8.2.1 Présence de la couche argileuse 152
8.2.2 Hétérogénéités de surface 154
8.2.3 Propriétés des roches 154
8.2.4 Résultats de l'inversion 156
8.2.5 Comparaison des résultats avec les observations géologiques 157
8.2.6 Discussion sur les résultats 164

Ce chapitre est consacré à l'inversion des données réelles de la campagne d'acquisition Surface-Tunnel réalisée en juillet 2013 sur la Station Expérimentale de Tournemire (SET). D'après les tests synthétiques et les études présentées dans le chapitre précédent, nous sommes conscients que la description des propriétés de vitesse du milieu est non unique en 2 dimensions. La première section de ce chapitre est alors consacrée à la mise en évidence des hétérogénéités établie par l'utilisation d'une paramétrisation contrainte. Les données sont modélisées dans un premier temps par un modèle homogène puis par le modèle de paramètres 1D adapté à la géométrie d'acquisition définie par les positions des sources et des récepteurs. Cette étude préliminaire nous permet de garantir l'existence d'hétérogénéités caractérisées par une géométrie 2D. Une seconde partie est ensuite consacrée à l'imagerie de cette zone de failles. Dans cette partie, nous considèrerons un modèle de paramètres 2D qui est, par définition, indéterminé par les données. La prise en compte d'information supplémentaire est alors nécessaire. Nous utiliserons à cet effet les informations provenant de l'interprétation des coupes de résistivité électrique obtenues par les acquisitions géophysiques antérieures ainsi que des connaissances sur la géologie du site.

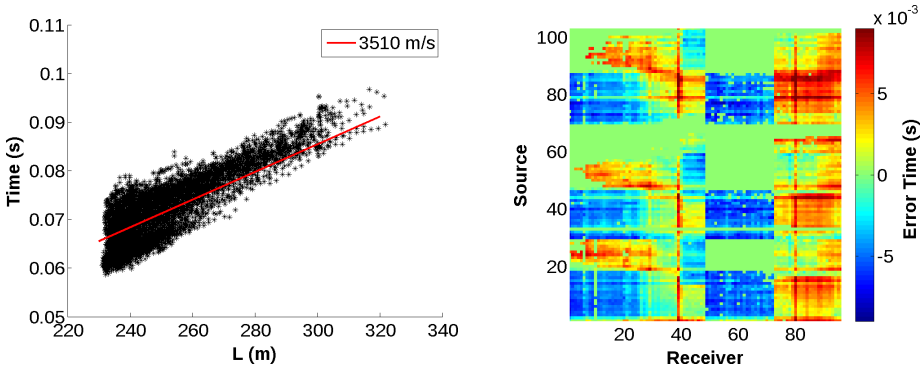
Dans ce chapitre, l'ensemble des données de la campagne est utilisé. Néanmoins, pour les raisons qui ont été exposées dans le chapitre 6, nous considérons les données des trois coupes 2D indépendamment, à savoir les coupes formées respectivement par les sources de la ligne Nord, Centrale et Sud et les 48 récepteurs situés dans les galeries Est et Ouest.

8.1 Détection des failles sur la SET

8.1.1 Hétérogénéités de la zone auscultée

La détection des hétérogénéités de vitesse est obtenue en analysant les résidus d'une inversion pour une paramétrisation homogène du site. Les temps observés pour l'intégralité des mesures (103 sources et 96 récepteurs) sont représentés sur la figure 8.1a en fonction de la distance source-récepteur. La pente de la droite en rouge représentée sur cette figure illustre la valeur du modèle homogène permettant d'ajuster au mieux les données. De la même façon, les figures 8.2a, 8.2c, et 8.2e illustrent les données considérées indépendamment pour chaque ligne source, à savoir la ligne Nord, la ligne Centrale et la ligne Sud enregistrées par les 48 récepteurs déployés dans les galeries Est et Ouest. Les vitesses moyennes sont comprises entre 3500 et 3550 mètres par seconde et nous permettent de connaître l'ordre de grandeur des vitesses sur le site. Les résidus observés (fig. 8.1b, 8.2b, 8.2d et 8.2f) pour l'ensemble de ces modélisations sont élevés. Ceux-ci sont en effet très supérieurs aux erreurs de mesures et témoignent des hétérogénéités des propriétés de vitesse du site. A noter que les résidus des temps non pointés, explicitement présentés dans le chapitre 6, sont ici représentés par une valeur nulle.

Une estimation fidèle des temps de la campagne Surface-Tunnel ne peut pas être obtenue par un modèle homogène. Nous pouvons ainsi garantir la présence d'hétérogénéités sur le site. L'imagerie de ces hétérogénéités nécessite une paramétrisation plus complexe. Dans la prochaine section, nous considérons à nouveau une paramétrisation contrainte par les données, celle-ci permettant cette fois la représentation de variations latérales des propriétés de vitesse du milieu.



(a) Temps de première arrivée et estimation de la vitesse apparente

(b) Résidus des temps calculés pour le meilleur modèle homogène

FIGURE 8.1 – Représentation de l'ensemble des données acquises durant la campagne Surface Tunnel en fonction de la distance source-récepteur. La pente de la droite représentée en rouge nous donne la meilleure évaluation de vitesse homogène permettant de représenter les données. La figure (b) présente les résidus des temps associés à cette modélisation dont les grandes valeurs témoignent des hétérogénéités présentes sur le site.

8.1.2 Détection des variations latérales

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, la paramétrisation 1D adaptée décrite dans la section 7.2.1.3 permet d'obtenir un problème bien posé pour lequel il existe une unique solution. Le calcul des vitesses de propagation des ondes dans le milieu peut

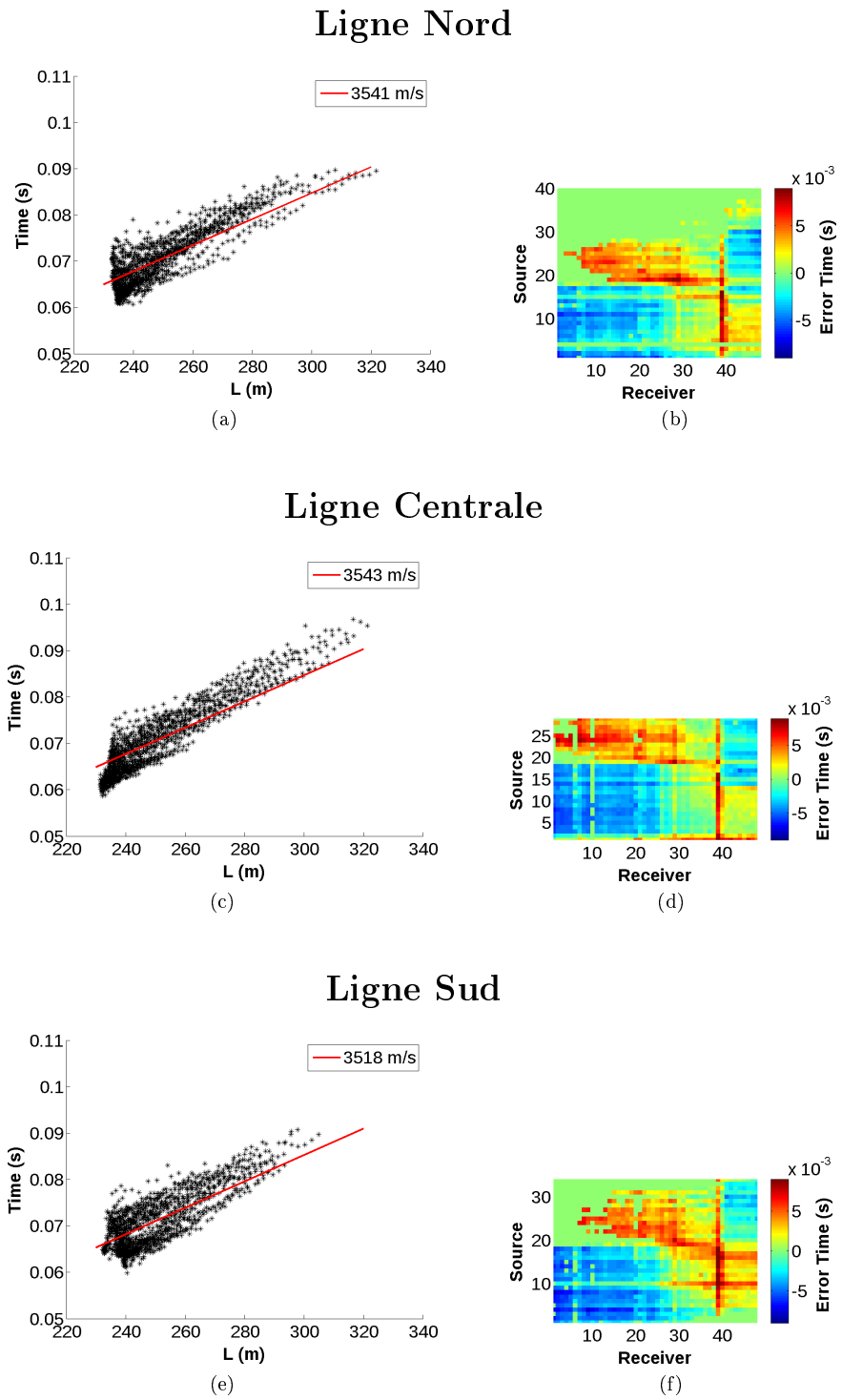


FIGURE 8.2 – Résidus des temps obtenus pour une paramétrisation homogène des propriétés de vitesse de la Station expérimentale de Tournemire pour les données des trois lignes sources respectivement représentées par les figures (a), (c) et (e). A gauche les données sont représentées en fonction de la distance source-récepteur et la meilleure estimation de la vitesse est donnée par la pente de la droite représentée en rouge. A droite les résidus associés à cette modélisation sont représentés en fonction de la source et du récepteur et témoignent des hétérogénéités présentes sur le site.

être ici réalisé en utilisant une méthode directe comme exposée dans la section 4.2.2.1. Le problème est cette fois non linéaire puisque la présence d'hétérogénéités de vitesse peut modifier la trajectoire des rais, ce qui n'était pas le cas lors de l'estimation d'un modèle homogène. Une méthode itérative est utilisée pour la résolution du problème non linéaire qui est résolu à chaque itération par une méthode directe (méthode de Newton 4.2.2.2). L'inversion des lignes Centrale, Nord et Sud réalisée pour cette paramétrisation est présentée sur les figures 8.3a, 8.3c et 8.3e. Pour chacune des lignes, une zone de plus faible vitesse est localisée à l'aplomb des récepteurs numérotés de 20 à 40. La vitesse moyenne de cette zone est évaluée à 3200 mètres par seconde. Des variations, cette fois ligne dépendante, sont également remarquées de part et d'autre de cette zone. L'inconsistance de ces hétérogénéités sur les trois tomogrammes peut être expliquée par des hétérogénéités se situant proches de la surface. Les résidus associés à cette paramétrisation sont représentés sur les figures 8.3b, 8.3d et 8.3f. Les valeurs des résidus obtenus pour cette paramétrisation sont à nouveau supérieures aux erreurs de mesure et montrent également l'insuffisance de cette paramétrisation pour décrire les propriétés de vitesse du massif.

Les temps de première arrivée observés lors de la campagne Surface-Tunnel ne peuvent être fidèlement représentés par une paramétrisation 1D adaptée. L'utilisation d'une paramétrisation plus complexe est nécessaire.

8.1.3 Bilan

Dans cette section préliminaire, nous avons choisi d'utiliser une paramétrisation simple telle que la paramétrisation en milieu homogène ou encore la paramétrisation en un milieu 1D adaptée. Ainsi, le problème est bien posé et son unique solution peut être calculée par une méthode directe. Cependant, si les propriétés vraies du milieu ne peuvent être décrites par cette paramétrisation et que des hétérogénéités existent au sein des blocs homogènes utilisés, les temps de première arrivée observés lors de la campagne ne peuvent être correctement ajustés. Cette première évaluation des données nous permet d'affirmer la présence d'hétérogénéités dans la distribution spatiale des propriétés de vitesses du massif. L'imagerie détaillée du site nécessite une paramétrisation 2D pour laquelle l'introduction d'informations ou d'hypothèses sur la distribution spatiale des propriétés de vitesse sera nécessaire. Dans la prochaine partie, je propose à partir des informations disponibles sur la Station Expérimentale de Tournemire de réaliser une imagerie plus fine de la zone auscultée par la campagne Surface-Tunnel.

8.2 Imagerie de la Station Expérimentale de Tournemire

8.2.1 Présence de la couche argileuse

D'après les tests synthétiques présentés dans le chapitre précédent, nous sommes conscients que le dispositif utilisé lors de la campagne Surface-Tunnel ne permet pas de détecter la présence d'une couche horizontale. Cependant, dans le but d'obtenir une imagerie détaillée du site, la prise en compte des variations de vitesse dans les calcaires et argiles du massif est nécessaire. Elle permettra une meilleure estimation des vitesses du massif dont la valeur calculée sans information correspondrait à la moyenne de la vitesse des argiles et des calcaires pondérée par l'épaisseur de ces deux couches. Sur ce site, l'interface entre la couche argileuse et la couche calcaire a été interceptée par un forage (PH5). La position de l'interface argiles-calcaires est évaluée à 40 mètres au dessus des ouvrages. Un léger pendage a également été remarqué et a pu être déterminé d'après les coupes stratigraphiques des falaises. La présence de cette couche argileuse est introduite dans le modèle initial de la même façon que dans les exemples proposés dans le chapitre 7 (fig. 8.5a, 8.5c et 8.5e).

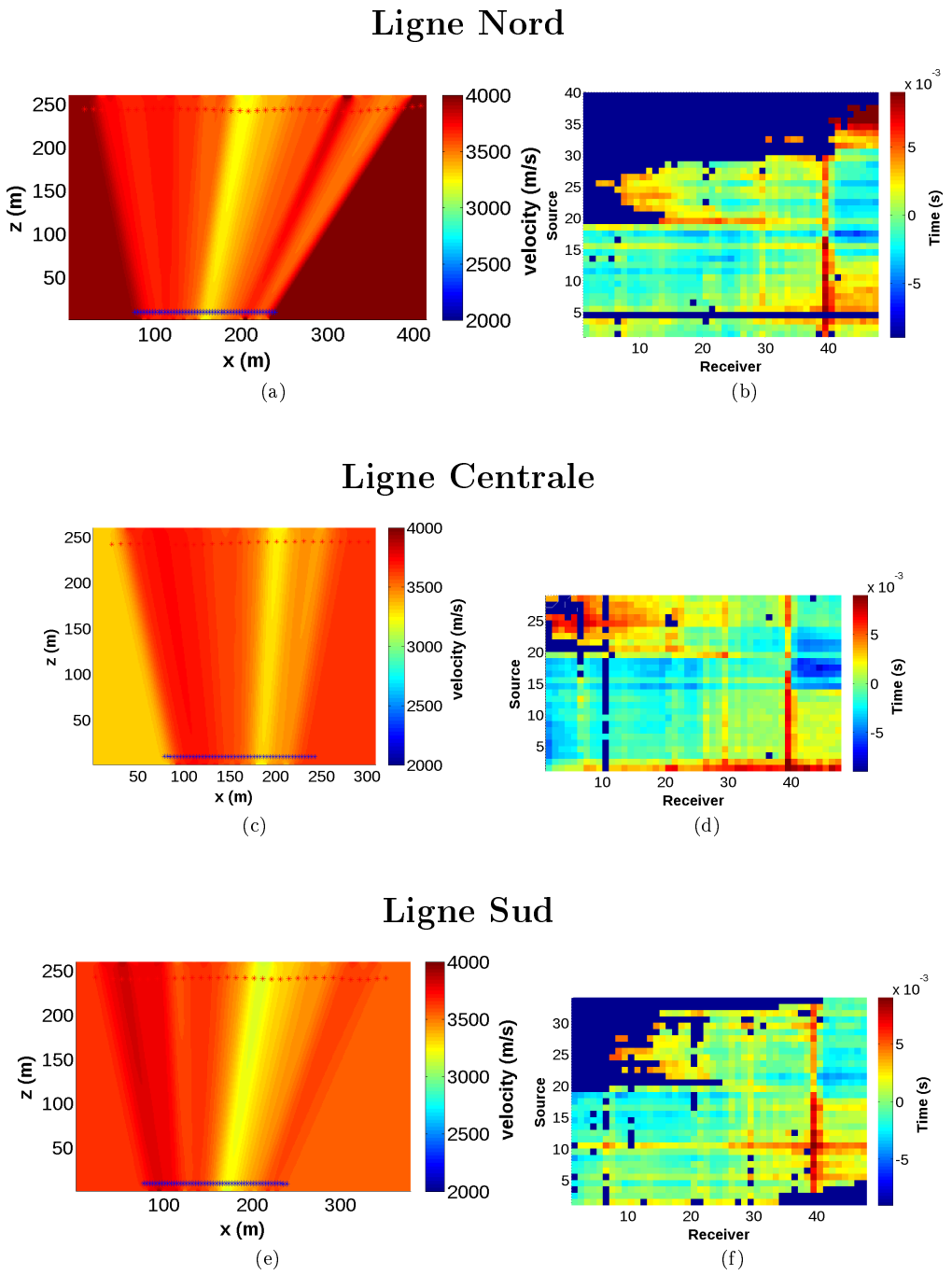


FIGURE 8.3 – Résultats d'inversion obtenus pour une paramétrisation 1D adaptée des propriétés de vitesse de la Station Expérimentale de Tournemire pour les données des trois lignes sources. A gauche les figures (a), (c) et (e) présentent les tomogrammes solutions du problème de minimisation posé par cette paramétrisation pour chacune les lignes sources Nord, Centrale et Sud. A droite les figures (b), (d) et (f) présentent les résidus associés à cette modélisation représentés en fonction de la source et du récepteur. Ceux-ci, de par leurs valeurs supérieures aux erreurs de mesure attendues, témoignent du caractère bidimensionnel des hétérogénéités présentes sur le site.

8.2.2 Hétérogénéités de surface

La subsurface est généralement une zone fortement hétérogène. La décompaction du sol dans les premiers mètres peut être importante et engendrer une variation importante des propriétés de vitesse de propagation des ondes dans le sol. D'après les résultats d'inversion des données de résistivité électrique, des hétérogénéités ont été remarquées dans les premiers mètres sous la surface. Les observations géologiques montrent également la présence de zones endommagées en surface. La prise en compte de ces hétérogénéités pouvant être associées à des zones de plus faible vitesse permettra, tout comme la prise en compte de la couche argileuse, d'obtenir avec plus de précision la valeur des vitesses dans le massif. Nous avons choisi de considérer la géométrie des hétérogénéités de surface imagées par l'acquisition de résistivité électrique de 2007 détaillée dans le chapitre I. Bien que les propriétés physiques sondées par ces deux méthodes soient différentes, elles permettent néanmoins la caractérisation spatiale de zones pour lesquelles des différences sont remarquées. La zone d'hétérogénéité de surface est ici introduite dans l'inversion dans le modèle initial en considérant un gradient de vitesse dont la valeur varie en fonction de l'épaisseur de la subsurface (fig.8.5a, 8.5c et 8.5e), qui est délimitée spatialement par le contour de la zone de faible résistivité présentée sur la figure 8.4.

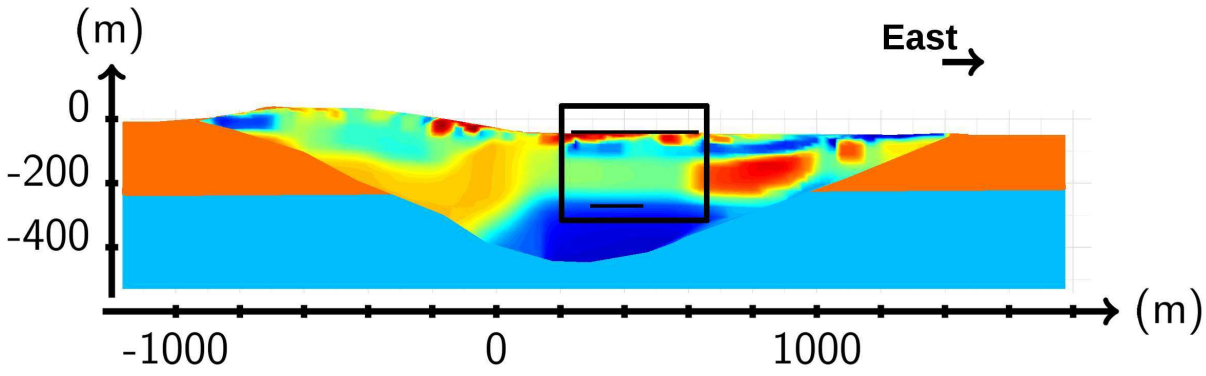


FIGURE 8.4 – Hétérogénéités des propriétés physiques de la subsurface du sous-sol établies à l'aide des résultats de l'inversion des données de résistivité électrique de la campagne de 2007.

8.2.3 Propriétés des roches

La vitesse de propagation des ondes dans les calcaires et les argilites a pu être mesurée en laboratoire mais également lors des précédentes acquisitions de données sismiques. La vitesse de propagation dans les argiles est anisotrope cependant, dans notre cas, l'incidence des ondes est essentiellement verticale et c'est pourquoi nous considérons la vitesse isotrope pour l'ensemble des rais. Celle-ci est estimée à 3200 mètres par seconde dans les argiles sains de la station d'après les travaux de Cabrera et al. (1999); Gélis et al. (2010); Zillmer et al. (2011, 2014). D'après ces mêmes travaux, la vitesse dans les calcaires est évaluée à 4100 mètres par seconde. Ces informations, prises en compte dans l'inversion, permettront

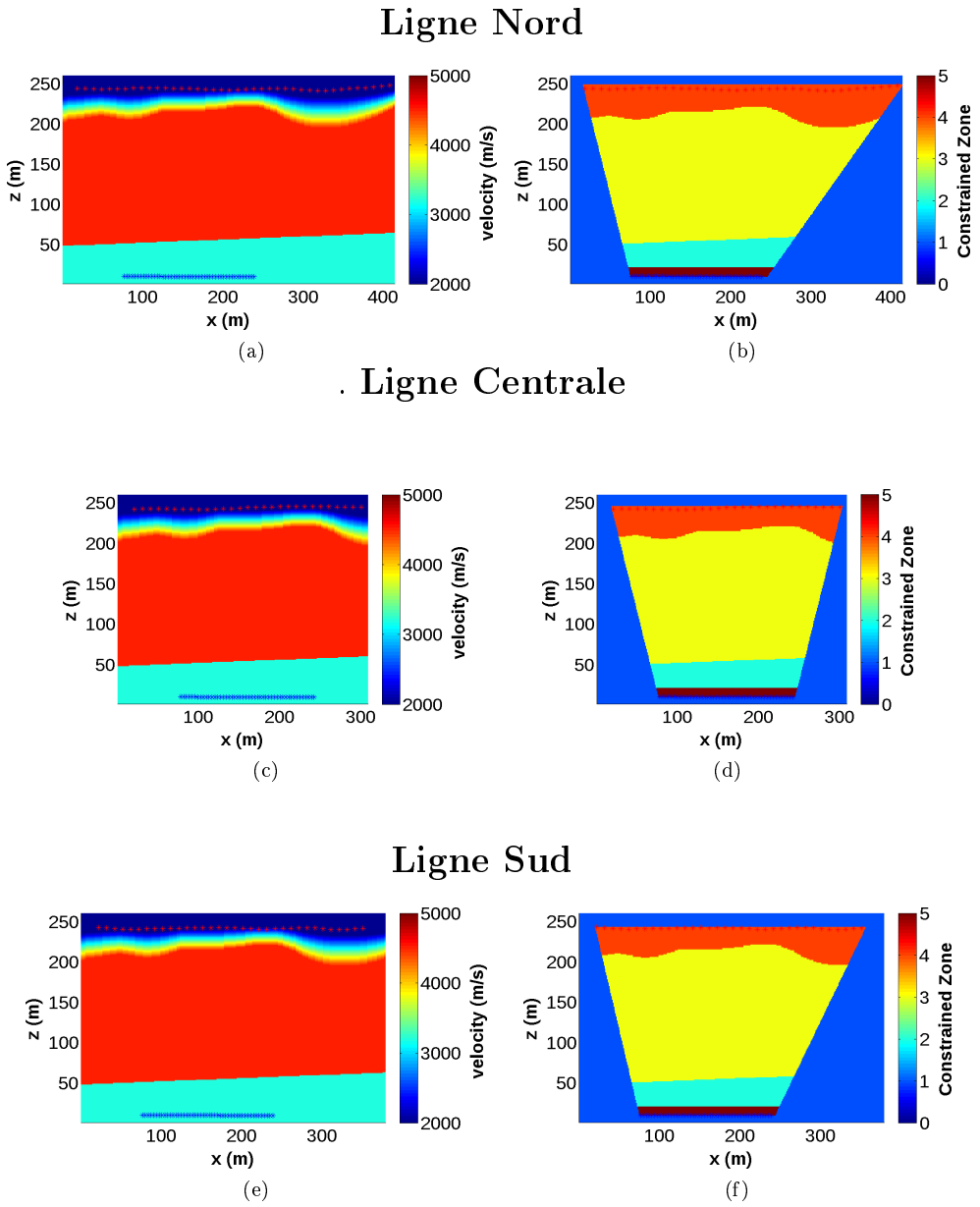


FIGURE 8.5 – Introduction de l'information a priori contenue dans le modèle initial et définition des blocs de contraintes. Les figures (a), (c) et (e) représentées à gauche illustrent les modèles initiaux établis d'après les connaissances géologiques du site et à partir des images de résistivité électrique réalisées sur cette zone. Les figures (b), (d) et (f) représentées à droite illustrent les blocs de contraintes permettant la différenciation de la subsurface (zone 4), de la couche calcaire (zone 3), de la couche argileuse (zone 2) et de la zone des ouvrages (zone 5).

de limiter l'amplitude des variations de vitesse en maximisant les vitesses dans les couches. On considère ainsi dans les zones de contrainte 2 et 3 illustrées sur les figures 8.5b, 8.5d et 8.5f, des contraintes de valeur maximale respectivement imposées à 3200 et 4100 mètres par seconde.

8.2.4 Résultats de l'inversion

Les résultats de l'inversion des données Surface-Tunnel sont présentés pour chaque ligne source sur les figures 8.6, 8.7 et 8.8. L'inversion est réalisée dans chacun des sous blocs 2D présentés dans le chapitre 6 cependant, ici, les tomogrammes illustrés par les figures 8.6a, 8.7a et 8.8a sont représentés dans le bloc 3D dont l'origine correspond à l'intersection des galeries Nord et Ouest. L'objectif étant de rendre compte du positionnement relatif de ces tomogrammes. Les figures 8.6b , 8.7b et 8.8b représentent les isocontours de ces mêmes tomogrammes.

Sur ces figures on note la présence d'une zone de plus faible vitesse dont la valeur est évaluée à 3300 mètres par seconde dans la couche calcaire et à 2800 mètres par seconde dans les argiles. Cette zone est présente sur les trois tomogrammes. On notera néanmoins certaines différences sur la géométrie de cette zone avec une largeur plus importante sur le tomogramme de la ligne Sud. Des différences sont également remarquées en surface et peuvent être expliquées par la dimension 3D des positions des sources.

Si on s'intéresse plus particulièrement aux variations de vitesse dans la couche argileuse représentées sur les coupes réalisées à $z = 45$ mètres, on remarque deux lobes de plus faibles vitesses. L'un d'entre eux situé en $x = 215$ mètres pour les repères locaux d'inversion, et en $x = 105$ mètres sur le repère 3D, peut être expliqué par la présence du tunnel. En effet, cet ancien tunnel ferroviaire, dont la dimension est supérieure à celle des galeries, est caractérisé par l'existence d'une zone endommagée due à son creusement, présente également autour des galeries dans une moindre mesure. Cette zone endommagée est caractérisée par des vitesses plus faibles qui peuvent expliquer ce premier lobe. Le second lobe, situé légèrement plus à l'ouest, peut quant à lui être expliqué par la zone de failles visible depuis les galeries. La position de ce lobe correspond en effet à la zone comprise entre les failles principale et secondaire localisées depuis les galeries.

En surface, la géométrie de cette zone de failles diffère d'une ligne à l'autre. On note en particulier sur les tomogrammes de la ligne Nord et Centrale une « rupture » de la zone de failles proche de la surface. Celle-ci peut être expliquée par le caractère discontinu de la zone de failles, caractérisée par l'alternance de zones endommagées et de zones saines, permettant ainsi une vitesse de propagation plus élevée dans certaines directions traversant la zone de failles. Ces résultats peuvent également provenir d'un artefact lié à la simplification 2D du milieu. En effet, la modélisation 2D qui est faite ici impose que les trajectoires des rais restent contenues dans le plan défini par le repère local de chaque ligne. Des artefacts peuvent alors apparaître si les trajectoires des rais ne sont en réalité pas contenues dans ce plan.

Les résidus des temps sont représentés en fonction des positions source-récepteur sur les figures 8.6d, 8.7d et 8.8d, et plus particulièrement pour la source 5 sur les figures 8.6e, 8.7e et 8.8e et pour le récepteur 24 sur les figures 8.6f, 8.7f et 8.8f. Ces résidus ne sont pas exactement nuls et ceci de par les contraintes fortes maintenues dans le processus d'inversion. D'après les tests synthétiques illustrés dans le chapitre 7, nous avons pu remarquer que la diminution des contraintes permet de diminuer les résidus mais tend à rendre la solution non unique et augmente donc le risque de surinterprétation des paramètres. Afin de minimiser

ce risque, nous présentons ici le tomogramme le plus contraint possible capable d'expliquer les données.

L'inversion de l'ensemble des données est présentée sur la figure 8.9. Cette figure présente le modèle de vitesse calculé pour les coupes horizontales $z = 180$, $z = 150$, $z = 120$, $z = 70$ et $z = 45$ mètres dans le repère d'inversion 3D pour lequel il faut ajouter 10 mètres pour connaître l'altitude par rapport aux ouvrages souterrains. Le modèle initial 3D est une extension des modèles initiaux des trois lignes présentés sur les images 8.5a, 8.5c et 8.5e. L'inversion est réalisée avec les mêmes contraintes que celles appliquées lors du traitement des lignes considérées indépendamment. La répartition éparse des sources et récepteurs de cette acquisition dans le bloc 3D rend difficile une interprétation pertinente de ces résultats. En effet, la couverture des rais est très hétérogène au sein de ce bloc 3D. Par exemple, en profondeur, celle-ci est limitée aux contours des ouvrages. La représentation du modèle de vitesse sur l'ensemble du plan $z = 45$ mètres ne peut être considérée avec une résolution homogène et c'est pourquoi les résultats sont ici représentés en transparence, celle-ci étant calculée en fonction de la densité de rais. Néanmoins ces images témoignent du caractère tridimensionnel de la zone de failles présente sur le site. On pourra alors à nouveau interpréter les « ruptures » observées à proximité de la surface sur les tomogrammes de la ligne Nord et Centrale, comme des artefacts issus de l'approximation d'un modèle 2D.

Les vitesses représentées sur les tomogrammes présentés dans ce chapitre sont, comme nous l'avons vu dans les exemples synthétiques du chapitre précédent, issues du modèle initial que nous avons choisi. L'interprétation du contraste argiles-calcaires observé sur ces tomogrammes serait absurde puisque celui-ci est donné comme une information d'entrée dans le code d'inversion.

8.2.5 Comparaison des résultats avec les observations géologiques

La géométrie d'une zone de failles présumée dans les calcaires et argiles de la station avait été établie d'après les études géologiques et les observations possibles depuis les ouvrages. Sur les figures 8.10 et 8.11, je propose une comparaison des résultats obtenus à l'aide du code Tomo3D appliqué aux données de la campagne Surface-Tunnel aux interprétations de la zone de failles présumée issues des observations de terrain.

La figure 8.10 est une coupe horizontale en $z = 60$ mètres sur laquelle sont représentés les ouvrages souterrains. Sur cette figure, la zone de failles est représentée entre les failles principale et secondaire décrites par les droites en rouge. Les résultats d'inversion, obtenus indépendamment des connaissances sur la présence de cette zone de failles, sont ici superposés avec ces observations. La zone de plus faible vitesse imagée par la méthode est en parfait accord avec la zone de failles décrite. La diminution de la largeur de la zone de failles issue des observations de terrains dans la direction Nord est en adéquation avec les variations remarquées sur les tomogrammes des différentes lignes sources.

La figure 8.11 est une coupe verticale sur laquelle est représentée en noir la zone de failles présumée dans les calcaires et argiles de la station. Les résultats d'inversion de la ligne Centrale sont ici superposés avec ces observations. La zone de plus faible vitesse imagée par la méthode est à nouveau en parfait accord avec la zone de failles décrite. Les hétérogénéités observées en surface autour des premières sources sont également caractérisées par une zone de plus faible vitesse sur le tomogramme. On remarquera également que certaines failles identifiées par les observations ne sont pas retrouvées sur le tomogramme. Ceci peut être expliqué par une plus faible étendue de ces zones, ou encore, par une perturbation plus faible des propriétés de vitesse associée à ces failles.

Ligne Nord

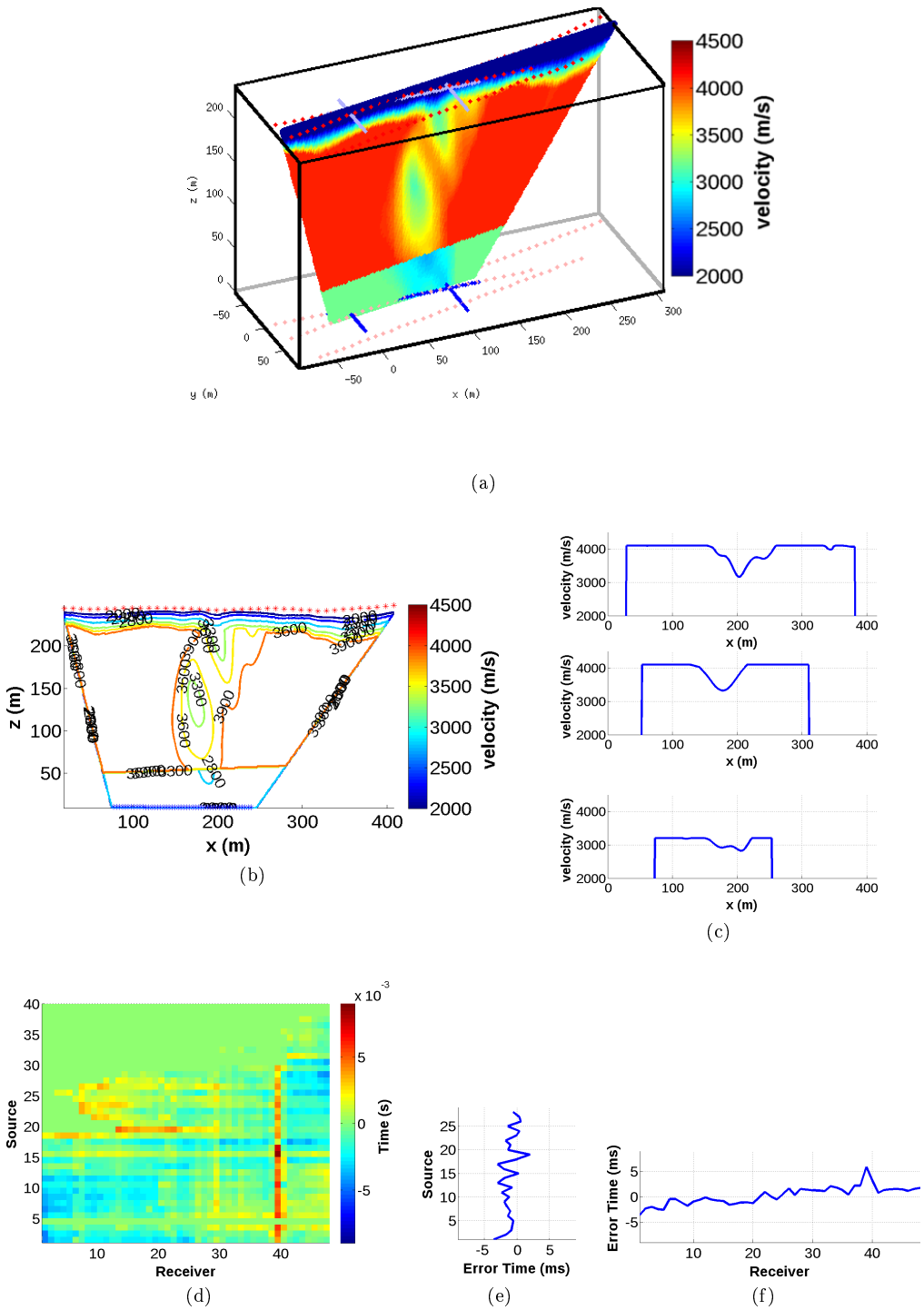


FIGURE 8.6 – Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Nord. La figure (a) présente ces résultats dans le repère commun 3D. Ces résultats sont également présentés dans le repère local d'inversion par les iso-contours (b) et pour 3 coupes en profondeur à $z = 225$, $z = 125$ et $z = 25$ mètres (c). Les résidus finaux sont représentés respectivement sur les figures (d), (e) et (f) pour l'ensemble des couples source-récepteur et en particulier pour le récepteur 24 et la source 5.

Ligne Centrale

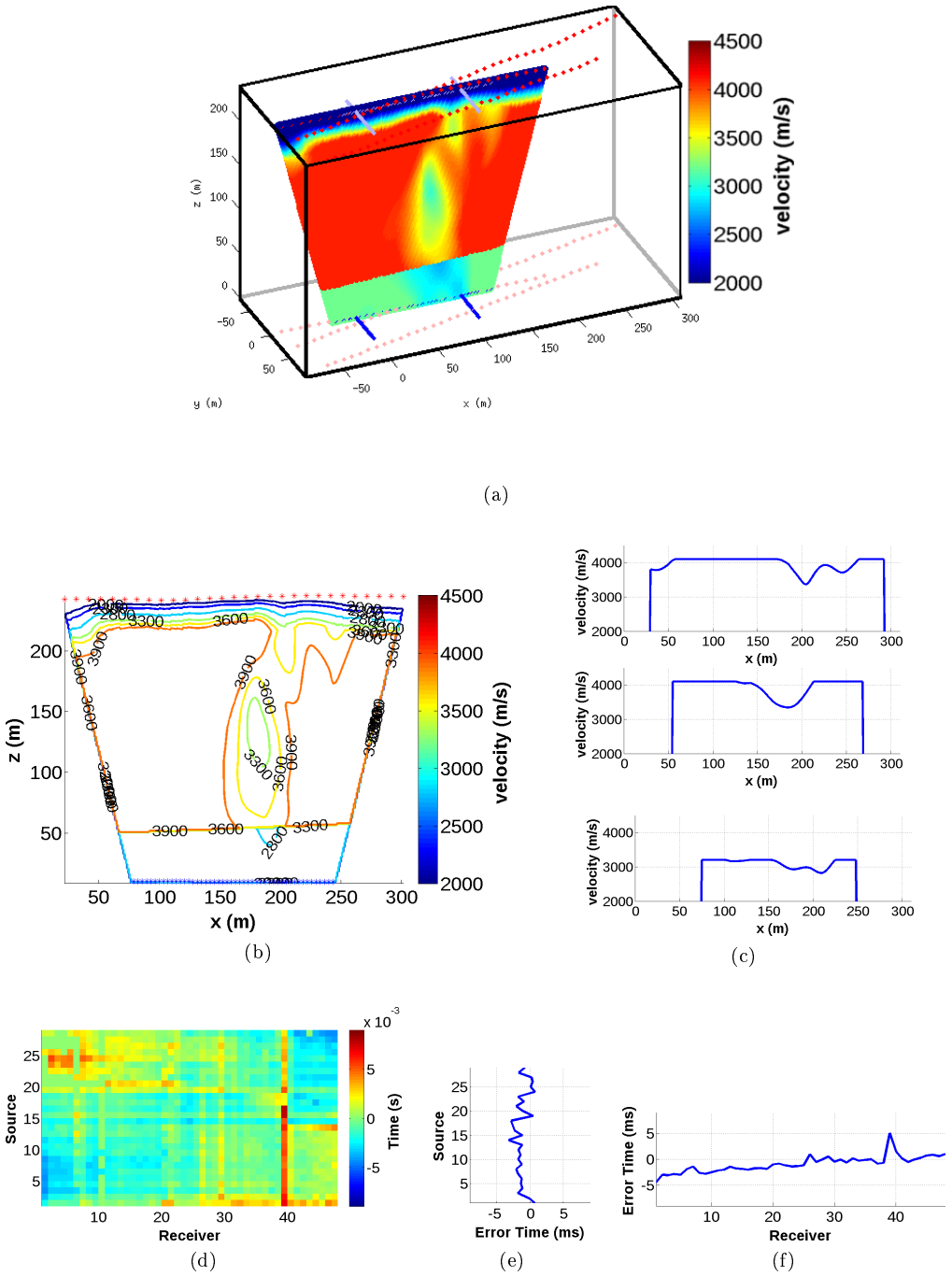


FIGURE 8.7 – Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Centrale. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée sur la figure 8.6.

Ligne Sud

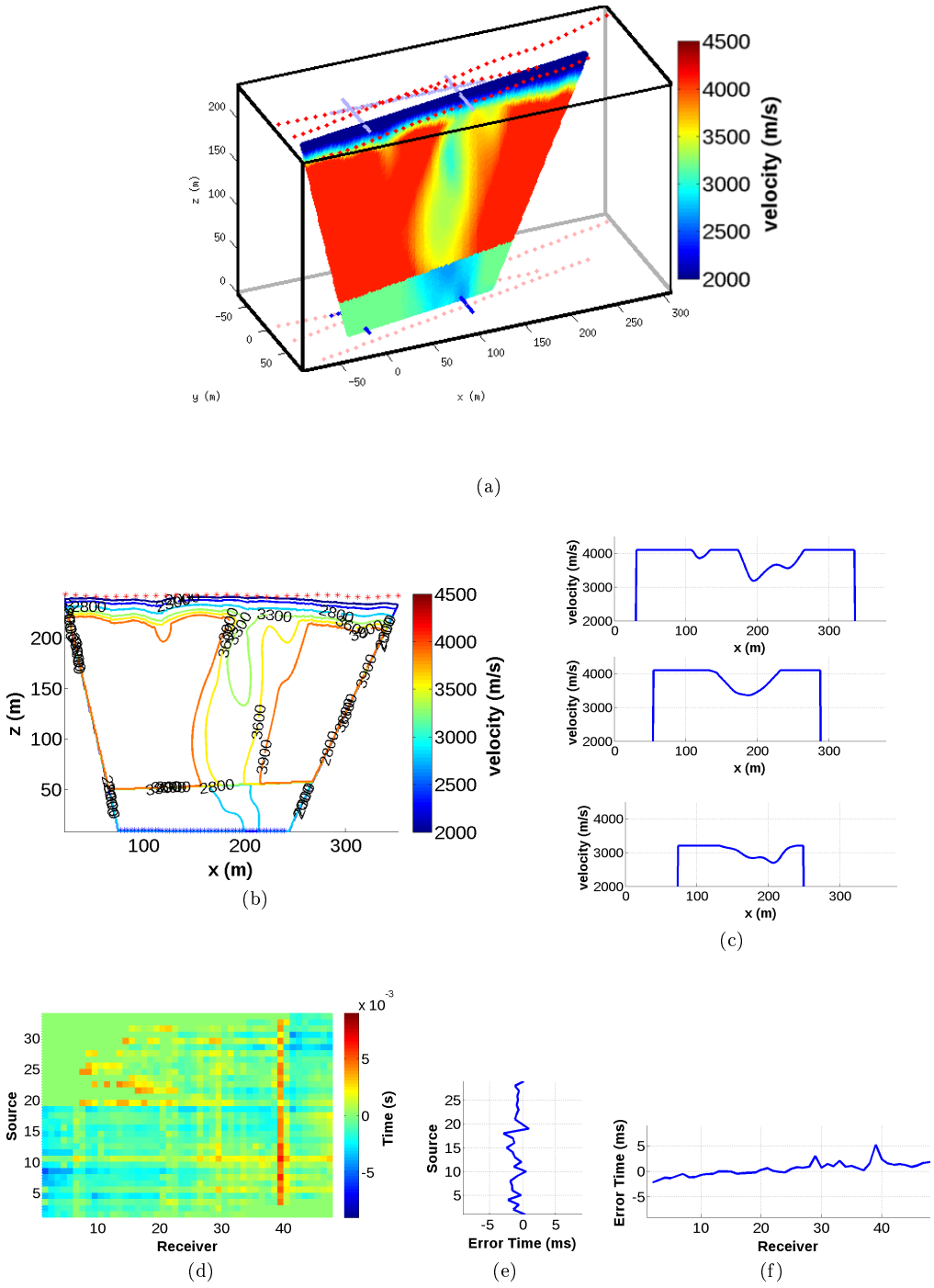


FIGURE 8.8 – Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Sud. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée sur la figure 8.6.

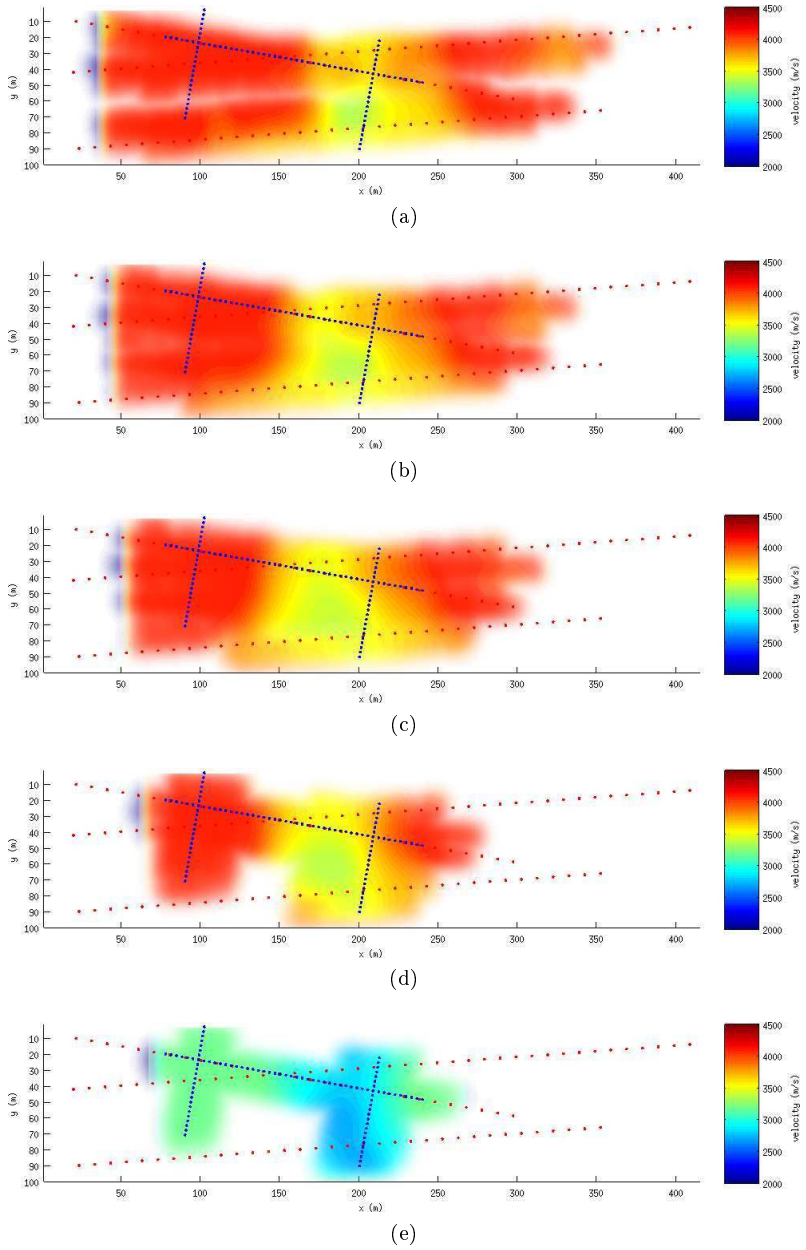


FIGURE 8.9 – Coupes horizontales pour les altitudes z=180 (a), z=150 (b), z=120 (c), z=70 (d), z=45 (e) mètres des résultats d'inversion 3D illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour l'ensemble des données de l'acquisition Surface-Tunnel.

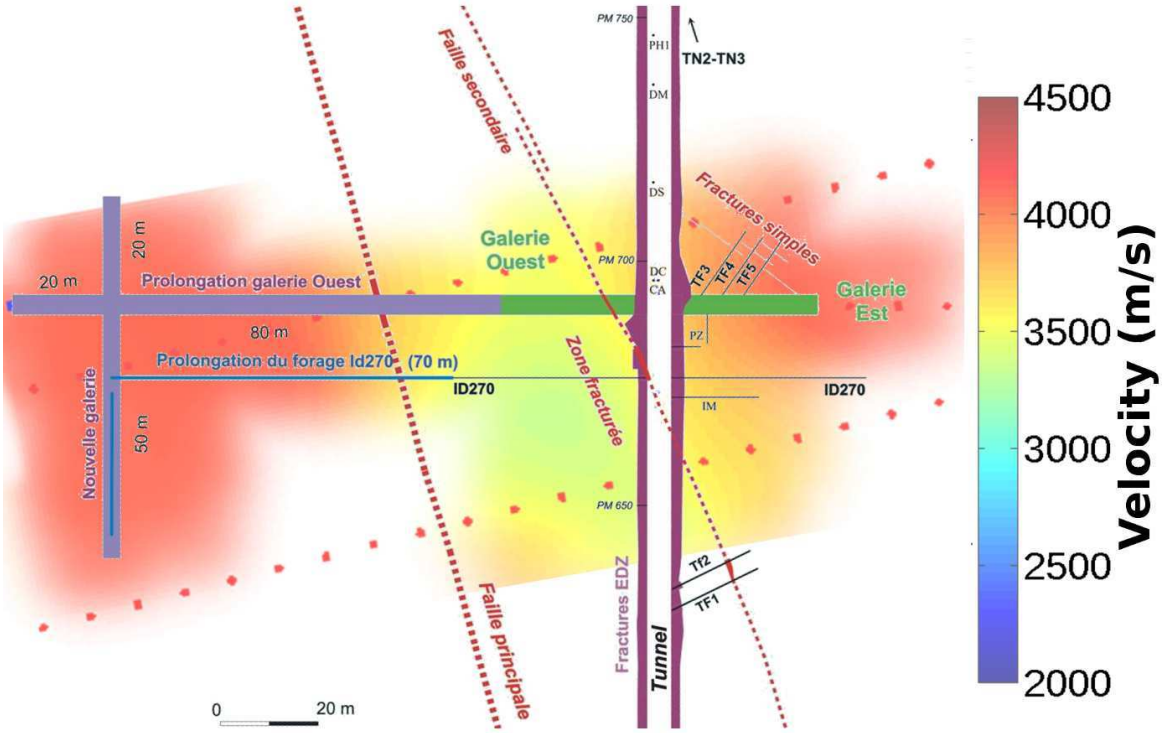


FIGURE 8.10 – Coupe horizontale réalisée à 60 mètres au-dessus des ouvrages souterrains illustrant les résultats d'inversion de l'intégralité des données acquises durant la campagne Surface-Tunnel. La distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D est en accord avec la description schématique de la zone de failles présumée (en rouge) issue des observations géologiques réalisées depuis les ouvrages souterrains.

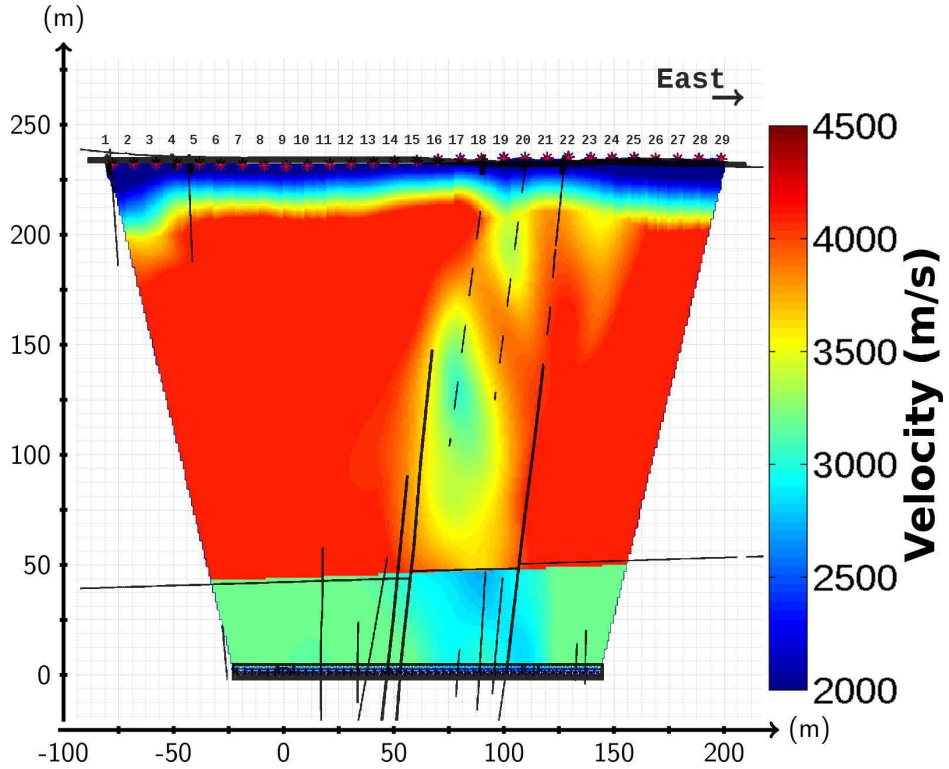
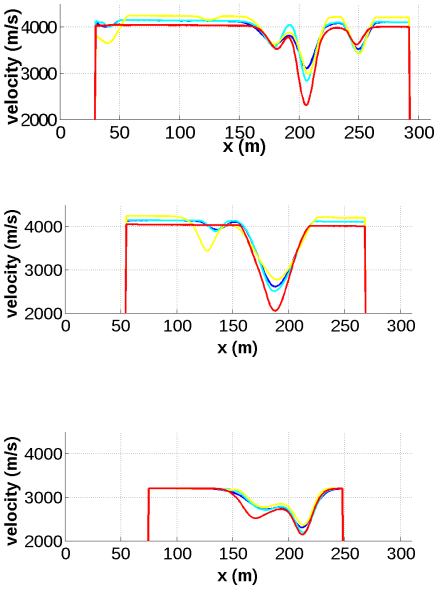


FIGURE 8.11 – Coupe Ouest-Est illustrant les résultats d'inversion des données de la ligne Centrale et interprétation géologique proposée a priori. La distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D est en accord avec la description schématique de la zone de failles présumée (en noir) issue des observations géologiques réalisées depuis les ouvrages souterrains et la surface.

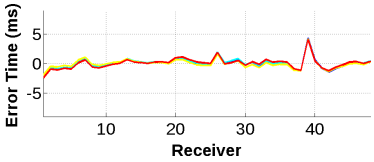
8.2.6 Discussion sur les résultats

L'interprétation des vitesses obtenues ici doit être réalisée avec précaution. En effet, comme nous avons pu le voir lors des tests synthétiques présentés dans le chapitre précédent, l'utilisation d'une paramétrisation 2D n'est pas contrainte et plusieurs tomogrammes permettent d'expliquer les données, à savoir ceux donnant des résidus de l'ordre de grandeur de l'erreur ε. En utilisant différentes contraintes sur de lissage, ou encore différentes contraintes sur la valeur maximale des vitesses au sein des couches calcaire et argileuse, des variations sont remarquées sur les vitesses obtenues dans la zone de failles. Sur la figure 8.12a, je présente les coupes de plusieurs tomogrammes, obtenus en inversant les données de la ligne Centrale. Le premier tomogramme, en bleu, est obtenu en fixant la vitesse maximale dans les calcaires à 4100 mètres par seconde. Le deuxième, en turquoise, est obtenu dans les mêmes conditions d'inversion que le premier avec une contrainte de lissage plus faible. Enfin sur les tomogrammes en jaune et en rouge, la contrainte sur le maximum de la vitesse dans les calcaires est respectivement fixée à 4200 et 4000 mètres par seconde. On remarque sur cette figure, qu'en fonction des contraintes apportées lors de l'inversion, les vitesses dans la zone de failles fluctuent, pouvant aller de 2300 mètres par seconde à 3300 mètres par seconde dans la couche calcaire. On remarque également que pour ces différents tomogrammes, les résidus des temps sont néanmoins très proches (fig. 8.12b et 8.12c). Ces résultats montrent qu'il est difficile de connaître avec précision la valeur des propriétés de vitesses dans la zone de failles. Néanmoins, sur les quatre tomogrammes présentés ici ainsi que sur l'ensemble des tests que nous avons pu réaliser, la zone de failles est systématiquement localisée. Nous pouvons estimer une valeur maximale pour cette zone de plus faible vitesse à 3300 mètres par seconde ainsi qu'une largeur de cette zone dans les calcaires à 50 mètres avec une variation de l'ordre 5 mètres suivant les contraintes d'inversion.

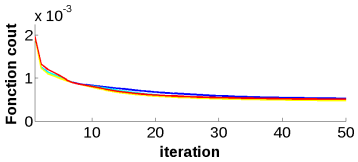
L'analyse des trajectoires des rais dans le modèle final peut également aider à l'interprétation. Sur les figures 8.13a et 8.13b, des informations sur les rais sont représentées respectivement par la densité de rais par maille et par leurs trajectoires. Sur ces figures, on peut voir que la zone de plus faible vitesse est généralement évitée par les rais néanmoins certains rais traversent cette zone. Ces rais, dont la trajectoire est restreinte au modèle quasi 2D utilisé ici, peuvent ne pas être représentatifs de la trajectoire réelle et induire des erreurs dans le calcul des vitesses.



(a) Coupes des modèles de vitesse pour z=225, z=125 et z=25 mètres

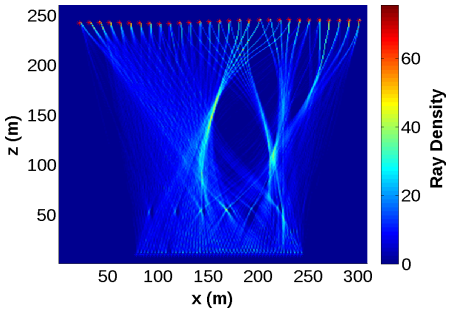


(b) Résidus, Source 5

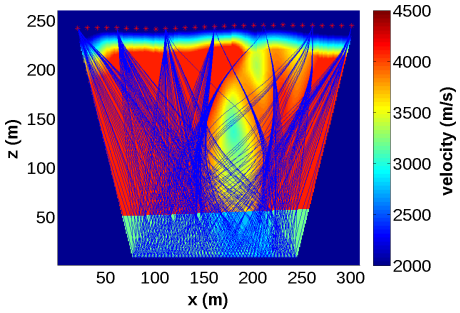


(c) Fonctions coût

FIGURE 8.12 – Coupes des vitesses calculées pour différentes contraintes d'inversion (a), et résidus associés pour la source 5 (b) et fonctions coût associées (c).



(a) Densité de rais sur le modèle de vitesse final calculé pour les données de la ligne Centrale.



(b) Trajectoires des rais pour les sources 1, 5, 10, 15, 20, 25 et 29

FIGURE 8.13 – Illustration de la couverture de l'acquisition Surface-Tunnel calculée pour les données de la ligne Centrale et pour les 48 récepteurs situés dans les galeries Ouest et Est.

Conclusion

Dans cette partie consacrée à l'application de la méthode de tomographie aux données de l'acquisition Surface-Tunnel, nous avons pu mettre en œuvre les outils développés et présentés dans la partie II de ce manuscrit.

Après avoir présenté l'acquisition et son objectif dans un premier chapitre introductif, nous avons pu, au travers de la simple analyse des vitesses apparentes, montrer le caractère hétérogène des propriétés de vitesse du site étudié.

Dans le souci d'une interprétation avisée, nous avons dans un deuxième chapitre montré, à l'aide de tests synthétiques adaptés à la problématique particulière de la campagne d'acquisition Surface-Tunnel, le potentiel de cette acquisition. La géométrie ainsi que les ordres de grandeur des vitesses des modèles synthétiques étudiés ont été choisis de façon à être proches des vitesses observées sur la Station Expérimentale de Tournemire. Ceci afin que les conclusions faites puissent être étendues au cas considéré pour l'inversion des données réelles. Nous avons également pu voir dans ce chapitre l'intérêt de l'ajout d'information a priori.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats d'inversion des données de l'acquisition Surface-Tunnel. Ceux-ci ont permis de mettre en évidence la présence de la zone de failles présumée sur le site étudié. Pour la première fois sur la Station Expérimentale de Tournemire, la zone de failles a pu être imagée dans les calcaires supérieurs et dans la partie supérieure des argiles. Les tomogrammes obtenus sont en parfait accord avec la description de la zone de failles présumée.

Ces travaux ont permis d'identifier une méthode non destructive permettant la détection des failles à faible décalage vertical dans les argiles. Nous avons dans ce dernier chapitre, par l'application sur données réelles, évalué le potentiel ainsi que les limites de l'utilisation de la tomographie des temps de première arrivée pour l'imagerie des propriétés de vitesse d'un site, à partir de mesures réalisées en transmission. La présence d'une faille à faible décalage vertical peut être détectée et imagée par cette méthode, dès lors qu'une diminution des vitesses de propagation des ondes y est associée. Ces travaux ont également permis de mettre en évidence les limites de cette méthode, qui dans le cas de la géométrie d'acquisition Surface-Tunnel, ne peut permettre d'identifier les vitesses de propagation des ondes des différentes couches horizontales. La méthode utilisée ici, à savoir la géométrie d'acquisition en transmission associée au traitement des temps de première arrivée, est sans nul doute une démarche appropriée à la caractérisation d'un site souterrain qui nécessite a fortiori le creusement d'ouvrages souterrains. Celle-ci, par laquelle nous avons pu imager la zone de faille là où d'autres méthodes parfois plus complexes se sont montrées inadaptées, est parfaitement transposable sur des sites analogues. Le succès de ces travaux est indéniablement lié au développement du code Tomo3D, nous permettant l'utilisation des derniers développements algorithmiques pour un calcul des temps de première arrivée plus précis, un tracé de rais également plus précis ainsi qu'une inversion maitrisée permettant l'ajout de contraintes sur les paramètres recherchés.

Quatrième partie

Conclusions et perspectives

Conclusion générale

Le travail réalisé au cours de cette thèse a été mené dans l'objectif général d'évaluer le potentiel des méthodes géophysiques pour la caractérisation des futurs sites de stockages des déchets nucléaires en couches géologiques profondes. Plus particulièrement ce travail s'est focalisé sur la détection des zones de failles à faible décalage vertical. Celles-ci, comme en témoignent les précédentes acquisitions géophysiques réalisées sur la Station Expérimentale de Tournemire sont difficiles à détecter par les méthodes de sismique classiques (chap. I). L'absence de mouvement vertical rend la méthode de sismique réflexion inadaptée. D'autre part, l'utilisation de la sismique réfraction ou de la tomographie des temps de première arrivée pour le traitement de données acquises à la surface ne permet pas d'atteindre la zone cible en raison des propriétés de vitesse du massif, à savoir une couche calcaire supérieure plus rapide que la couche argileuse. L'enjeu du travail réalisé ici a donc été la réalisation d'une nouvelle campagne d'acquisition de données sismiques en transmission ainsi que la réalisation d'un code de traitement pour lequel les paramètres d'inversion sont maîtrisés et l'ajout d'information a priori est possible.

Le développement des outils utilisés pour le traitement de ces données, présentés en détail dans les chapitres 2, 3, 4 et 5, nous a permis de prendre pleinement conscience des hypothèses nécessaires à la validité des théories utilisées. Depuis le pointé des temps de première arrivée jusqu'à l'obtention du tomogramme final, en passant par la modélisation des temps et le tracé de rais a posteriori, nous avons parcouru, de par ces travaux de thèse, l'intégralité du cheminement permettant de passer des sismogrammes à la réalisation d'une image permettant la description des propriétés de vitesse du sous-sol. Ainsi, l'utilisation qui a été faite de ces outils a pu l'être de façon pertinente en s'appuyant sur les points les plus fiables, de façon à minimiser les risques d'une mauvaise interprétation des résultats. L'implémentation de notre propre code nous a également donné le contrôle sur les facteurs les plus influents tels que la paramétrisation, l'élaboration du modèle initial mais surtout l'ajout de contraintes sur les paramètres inversés.

L'utilisation d'un dispositif d'acquisition en transmission présenté dans le chapitre 6, nous a permis d'atteindre la zone ciblée indépendamment de la vitesse des couches et de leur organisation. Le problème de pénétration des ondes dans le milieu, présent pour les acquisitions réalisées en surface, a ainsi été résolu. On notera de plus que la mise en place des géophones dans les ouvrages souterrains nous a permis l'enregistrement de signaux faiblement bruités mieux isolés du bruit ambiant (vent, pluie, route, etc) pour lesquels le pointé des temps de première arrivée a ainsi été facilité.

L'ensemble des tests synthétiques proposés dans le chapitre 7 illustre incontestablement les améliorations obtenues par l'ajout de contraintes sur les paramètres inversés. Celles-ci pouvant être simplement issues de connaissances générales sur les propriétés physiques des roches présentes ou encore spécifiques au site évalué. L'utilisation d'une inversion classique dans le cas où la paramétrisation n'est pas contrainte est, par définition, dépendante de la méthode d'optimisation employée alors que la recherche d'une paramétrisation contrainte et représentative des propriétés physiques du milieu est complexe. Les exemples proposés ont montré que l'ajout de contraintes dans l'inversion permet de contourner ce problème de façon simple et efficace.

Les résultats présentés dans le chapitre 8, issus du traitement des données de la campagne Surface-Tunnel sont le fruit de ces trois ans de thèse. Ils illustrent, dans une plus faible

mesure, le travail mené depuis plusieurs années par l'IRSN sur la Station Expérimentale de Tournemire mais également les efforts conduits par l'équipe de Géophysique pour le développement de méthodes théoriques appliquées à la résolution de problèmes réalistes comprenant toutes les difficultés liées au traitement de données réelles. C'est par l'union des compétences respectives de ces deux instituts que cette thèse a été l'occasion de confronter théorie et pratique, aboutissant à l'imagerie de la zone de failles présumée sur la Station Expérimentale de Tournemire là où les précédentes méthodes ont montré leurs limites.

Perspectives

Le problème soulevé par la tomographie des temps de première arrivée peut se résumer à la formulation d'un problème mathématique gouverné par les lois de la physique. L'originalité du problème inverse est néanmoins que la difficulté ne réside pas uniquement dans sa résolution, mais également dans sa formulation. Cette formulation n'est pas triviale et l'implémentation de la méthode de Tomographie des temps de première arrivée, tout comme les autres méthodes, laisse une multitude de possibilités tant du point de vue de la formulation du problème que dans sa résolution. L'unique considération des méthodes classiquement utilisées en géophysique est de mon point de vue restreinte si l'on considère cette science relativement récente, mais également l'envergure des connaissances et des concepts théoriques qu'elle sollicite. L'utilisation des développements réalisés dans d'autres disciplines spécialisées pourrait être pertinente si l'on considère l'ensemble des similitudes qu'il peut exister entre les problématiques du géophysicien et celles des chercheurs spécialisés dans le traitement d'images, ou encore celles des mathématiciens travaillant sur la topologie des espaces.

Amélioration de l'outil de pointé

On pourra en particulier considérer la première étape de pointé des temps de première arrivée comme la détection d'un contour sur la représentation de l'amplitude du signal par les pixels d'une image dont l'un des axes représente le temps et l'autre la distance source-récepteur. Les développements en imagerie sur la reconnaissance des formes et des contours (e.g. Arbelaez et al. (2011)) sont bien plus développés qu'en géophysique et certains développements pourraient être adaptés et appliqués. D'une façon plus classique, l'usage des techniques basées sur la corrélation des traces adjacentes (Peraldi & Clement, 1972) pourrait également permettre d'améliorer la détection des pointés incohérents difficilement détectés par notre algorithme.

Modélisation : prise en compte de l'anisotropie

Un autre point, cette fois plus particulier à la géophysique, concerne la modélisation des temps de première arrivée. Ici, nous ne considérons pas l'anisotropie existant de façon prononcée dans certaines roches pourtant présentes sur le site d'étude et particulièrement dans la couche argileuse (Zillmer et al., 2014) qui est la roche pour laquelle un intérêt certain est porté en vue du stockage en couches profondes. Dans le cas particulier de l'acquisition Surface-Tunnel pour laquelle les trajectoires sont principalement orientées dans une seule direction, l'impact de cette approximation peut être négligée. Néanmoins si l'objectif est la création d'un outil permettant le traitement de données acquises dans d'autres configurations, une adaptation du code pourrait alors être la prise en considération de l'anisotropie des vitesses dans les roches.

Inversion : réduction de dimension et méthode d'optimisation globale

Concernant la résolution du problème inverse, l'utilisation d'une paramétrisation réduite des inconnues mais également des données peut permettre de simplifier de façon importante le problème mais surtout de limiter le risque d'une mauvaise interprétation des tomogrammes produits, ce qui est pour l'expertise un point non négligeable. Le problème inverse, si on considère le problème linéarisé, se résume à un problème de minimisation. La topologie de l'espace des modèles est entièrement déterminée par la paramétrisation réalisée. Dès lors que celle-ci n'est pas bien contrainte, le problème est mal conditionné et le résultat

se retrouve dépendant de la méthode de résolution. En travaillant sur la paramétrisation et particulièrement sur la réduction de dimension de l'espace des modèles (e.g. Pascual-Montano et al. (2006)), le conditionnement du problème inverse peut être amélioré. Dans la même direction, l'utilisation d'approche utilisant des algorithmes de type Monte-Carlo est également envisageable en utilisant une paramétrisation réduite. L'estimation des incertitudes, difficile en utilisant une méthode d'inversion linéarisée car celle-ci est directement guidée par le modèle de départ, pourrait être mieux évaluée par l'utilisation d'approches d'échantillonnage stochastiques (e.g. Gesret et al. (2014)).

Inversion : prise en compte des attributs de l'onde et inversion conjointe

Concernant les données utilisées pour l'inversion, l'utilisation des attributs de l'onde tels que la polarisation ou encore l'amplitude permet d'ajouter des données supplémentaires dans l'inversion. Comme l'a montré Belayouni (2013), le calcul de ces attributs de l'onde tels que la polarisation et l'amplitude peuvent, de la même façon que les temps de première arrivée, être obtenus pour des modèles 3D en des temps de calcul relativement faibles. L'ajout de ces données dans l'inversion permettrait la diminution du nombre de modèles solutions et ainsi, une amélioration de l'imagerie réalisée. Dans cette direction, une nouvelle campagne d'acquisition en sismique transmission a été mise en place en juillet 2014. Cette acquisition motivée par les résultats de l'acquisition Surface-Tunnel présentés dans ce manuscrit, a été réalisée avec l'ambition cette fois de traiter des données issues de géophones trois composantes permettant de connaître la polarisation de l'onde mais également l'enregistrement des ondes S. D'autre part, ces travaux ont de façon non négligeable également motivé une nouvelle campagne électrique en transmission sur la Station Expérimentale de Tournemire. Les données de cette acquisition, dimensionnée de façon à imager la même zone que celle ciblée par la campagne Surface-Tunnel, pourraient être utilisées conjointement pour mieux contraindre le milieu ausculté.

Application : utilisation de la méthode sur un site analogue

Enfin, ces travaux dont l'objectif général était de trouver une méthode permettant la détection des failles, et particulièrement des failles à faible décalage vertical, pourraient être appliqués au traitement de données acquises sur d'autres sites afin d'évaluer le caractère général des conclusions qui ont pu être faites ici. La mission de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire étant entre autres d'évaluer le projet de stockage géologique de l'Andra à Bure en Meuse/Haute-Marne, il serait intéressant de reproduire ces travaux sur ce site déjà pourvu d'ouvrages souterrains (e.g. Jougnot (2009)). Ce site, implanté dans l'Est du bassin parisien est formé d'une alternance de couches sédimentaires calcaires, marneuses et argileuses d'une épaisseur de plusieurs centaines de mètres et au pendage faible, et est pourvu de galeries souterraines horizontales creusées dans une couche d'argilites datant du Callovo-Oxfordien d'une épaisseur de plus de cent mètres (fig 8.14). La profondeur des ouvrages creusés sur ce site est d'environ 500 mètres, soit deux fois plus que les ouvrages de la Station Expérimentale de Tournemire. A priori cette différence n'affecte pas le potentiel de la méthode utilisée ici dès lors que le pointé des temps de première arrivée est possible. Une étude préliminaire portant sur le choix de la source pourra néanmoins être réalisée afin de garantir la faisabilité de ce projet.

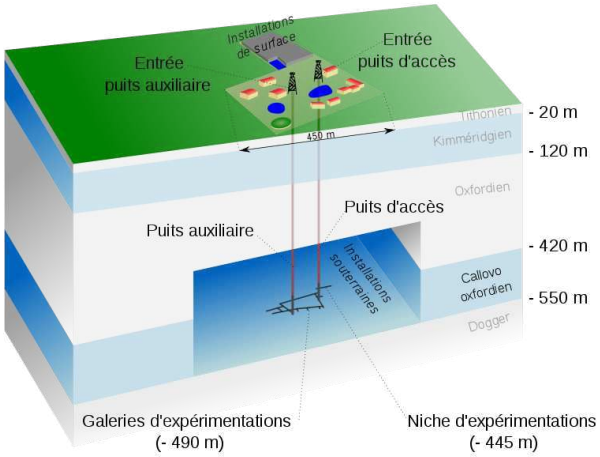


FIGURE 8.14 – Illustration 3D du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne composé d'un réseau de galeries souterraines localisé sous le territoire de la commune de Bure (Meuse) en France.

Liste des figures

1.1 Tableau résumant l'ensemble des laboratoires méthodologiques permettant de développer des connaissances et valider des méthodes et des technologies à portée relativement générale sur un type de roche donné dans le cadre des projets de stockage en couche géologique profonde (d'après Delay et al. (2014)) 9
1.2 Tableau résumant l'ensemble des laboratoires de caractérisation et de qualification dont le but est de caractériser un site spécifique et ainsi d'évaluer la faisabilité d'une installation de stockage. (D'après Delay et al. (2014)) . . . 10
1.3 Illustration des déplacements observés pour les différents types de faille : normale, inverse et décrochante. 11
1.4 Localisation de la station expérimentale de Tournemire sur la carte du relief de la France. 12
1.5 Coupe géologique générale de la station expérimentale de Tournemire . . . 13
1.6 Schéma 3D des ouvrages souterrains et des principales failles présents dans la station expérimentale de Tournemire 13
1.7 Dispositif d'acquisition de la campagne sismique de 2001 14
1.8 Interprétation des données sur une section migrée de la campagne sismique de 2001. Cette campagne a permis d'identifier la présence de la faille principale dans les calcaires inférieurs (F) se manifestant par un décalage vertical d'environ 25 mètres. La présence de la faille dans la couche argileuse et dans les calcaires supérieurs n'a cependant pas pu être identifiée. 15
1.9 Modèle de vitesse obtenu par Bretaudeau et al. (2013) avec en noir la zone de fracturation cartographié dans les ouvrages souterrains et forages. 17
1.10 Carte géologique du plateau de Tournemire montrant la position du tunnel et les profils de résistivité électrique réalisés durant la campagne 2007 (Gélis et al., 2010). 18
1.11 Premières images de tomographie de résistivité électrique résultant de l'inversion du profil Nord (a) et Sud (b) de l'acquisition de 2007 (Gélis et al., 2010). 19
1.12 Coupe interprétée des résultats d'inversion de résistivité électrique obtenue par Gélis et al. (2010) d'après la campagne électrique 2D réalisée en 2007 sur la station expérimentale de Tournemire. Cette figure permet de remarquer un contraste de résistivité entre la couche argileuse (Toarcien) et la couche calcaire supérieure. On remarque également de nombreux contrastes de résistivité dans les calcaires supérieurs qui ont motivé la réalisation d'une campagne haute résolution en mai 2011 dont l'envergure est représentée par la ligne bleue. 19
1.13 Coupe interprétée des résultats d'inversion de résistivité électrique obtenue par Gélis et al. (2012) d'après la campagne électrique 2D réalisée en 2011 sur la station expérimentale de Tournemire. Cette figure permet de remarquer une corrélation entre la distribution des propriétés de résistivité du milieu et les failles identifiées sur le site. 21

2.1 Représentation schématique du fonctionnement mécanique d'un géophone. . 30
2.2 Exemple de traces sismiques enregistrées pour un point de tir lors de la campagne sismique haute résolution 2011 sur la Station Expérimentale de Tournemire. En abscisse le numéro du récepteur, en ordonnée le temps en seconde depuis le déclenchement de la source. 31
2.3 Illustration schématique des fenêtres utilisées pour le calcul du temps de première arrivée de la méthode **Energy Ratio** proposée par Coppens (1985). 33

2.4 Exemple illustrant le pointé automatique réalisé avec la méthode **Energy Ratio** proposée par Coppens (1985). 34
2.5 Pointé automatique réalisé avec la méthode **Modified Coppens's Method** proposée par Sabbione & Velis (2010) 35
2.6 Exemple de pointé automatique réalisé en utilisant l'Entropy Method (Sabbione & Velis, 2010) 37
2.7 PickFirst : Algorithme de pointé automatique permettant l'évaluation d'un critère physique et l'analyse des attributs du signal. 38
2.8 Pointés automatique obtenus par la Modified Coppens Method illustrés par les triangles rouges sur les données réelles de la campagne Surface-Tunnel, avec en noir les temps pointés manuellement. 40
2.9 PickFirst : Première étape pour l'évaluation d'un critère physique sur le pointé. (a) La géométrie du dispositif d'acquisition est prise en compte ainsi que la trajectoire des rais dans un modèle a priori. Un intervalle de temps I_{t_p} est défini par les temps calculés dans un modèle de vitesse a priori lent (b) et un modèle de vitesse a priori rapide (c). 41
2.10 PickFirst : Pointé automatique avec en gris les limites de l'intervalle physique, en noir le pointé manuel, et en bleu les temps de première arrivée obtenus par l'algorithme PickFirst. Les temps pointés en rose correspondent aux temps pour lesquels des discontinuités fortes ont été remarquées par l'algorithme lors de l'étape de vérification. 42

3.1 Schéma de l'approximation de la dérivée des temps par différences finies pour différentes positions dans la maille 46
3.2 Schémas des 7 propagations utilisées pour l'estimation du temps t. (a) représente les trois propagations 1D calculées respectivement par les temps t_x, t_y et t_z. (b) représente les 3 faces pour lesquelles 3 propagations 2D sont calculées. Enfin (c) représente la propagation 3D calculée à l'aide de l'ensemble des points de la maille. 49
3.3 SolveEik3D : Algorithme de résolution de l'équation eikonale par différences finies. 50
3.4 Comparaison des temps calculés avec la formulation de l'équation Eikonale en perturbations pour différents rayons autour de la source. Les figures en haut représentent les isocontours de la carte des temps, et celles en bas l'erreur sur les temps calculés par rapport à la solution analytique. 52
3.5 Comparaison à la solution analytique des temps calculés pour un modèle bi-couche (a). La figure (c) représente l'erreur relative des temps calculés par l'algorithme de Podvin & Lecomte (1991), (d) l'erreur relative des temps calculés avec la formulation en perturbations sur tout le domaine, et (e) l'erreur relative des temps calculés avec la formulation en perturbations sur 10 points. 53
3.6 RayPath3D : Algorithme de tracé de rais a posteriori. 56
3.7 Représentation du gradient calculé sur les discontinuités de la carte des temps (interface et intersection des fronts d'ondes directes et réfractées). En noir le gradient des temps analytique, en rouge la solution calculée avec une méthode classique de différences finies, en bleu le gradient issu de la nouvelle méthode. 56
3.8 Situation critique du tracé de rais classique représenté ici en vert. Le tracé de rais (en rouge) réalisé par le code RayPath3D retrouve la source avec une trajectoire quasi analytique. 57
3.9 Application des algorithmes SolveEik3D et RayPath3D au modèle de vitesse Marmousi. 58

4.1 Schéma de principe du problème inverse posé en géophysique 60
4.2 Contours représentant la distance d'un point de $\mathbb{R}^2$ au centre du domaine, évaluée par les distances de Manhattan, Euclidienne et de Tchebychev, correspondant respectivement à la définition des normes $\|\cdot\|_1$, $\|\cdot\|_2$, et $\|\cdot\|_\infty$ 63
4.3 Recherche de la droite permettant d'ajuster un nuage de points en fonction des normes $\|\cdot\|_1$, $\|\cdot\|_2$ et $\|\cdot\|_\infty$ 64
4.4 Illustration de la fonction coût ϕ et de son gradient $\mathcal{G}$ pour $\mathcal{F}$ une fonction linéaire 67
4.5 Contours des fonctions coût pour quatre exemples représentant les différents cas de figure rencontrés lors de la résolution du problème inverse linéaire. La première (a), illustre un problème bien posé pour lequel la recherche du minimum peut s'effectuer par une méthode de résolution directe. La seconde (b) illustre un cas pour lequel il est également possible d'utiliser une méthode directe. L'utilisation d'une méthode itérative permettra sur cet exemple de retrouver dans un premier temps le paramètre le plus influent, à savoir m_2, puis m_1. L'exemple (c) illustre la fonction coût d'un problème mal posé pour lequel une infinité de paramètres sont solutions. Le paramètre m_2 n'est pas contraint et peut alors prendre une valeur quelconque. Si on choisit une méthode de gradient, sa valeur sera fonction du modèle initial. Enfin (d) illustre le cas où aucun paramètre n'est véritablement déterminé. Leurs valeurs seront alors fonctions du modèle initial choisi. 70
4.6 Illustration de la fonction coût ϕ et de son gradient $\mathcal{G}$ pour $\mathcal{F}$ une fonction non linéaire 71
4.7 Méthode de Newton : Le zero de la courbe représenté en bleu est obtenu en calculant itérativement le zéro de la droite tangente à cette courbe (en noir) à partir d'un modèle m initial. 71
4.8 Illustration de l'opérateur Laplacien pour une paramétrisation 2D 77
4.9 Redéfinitions des paramètres d'inversion 78
4.10 Décomposition du calcul de la perturbation du modèle de lenteur par la méthode SIRT pour le rai i 80

5.1 Vitesse « vraie » de l'objet synthétique. 81
5.2 Présentation du **dispositif d'acquisition n°1** (a) et de la matrice Hessienne (b). Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c). 84
5.3 Présentation du **dispositif d'acquisition n°2** (a) et de sa matrice Hessienne(b). Cette acquisition ne permet pas de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème n'est pas unique et ne peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien. 84
5.4 Acquisition n°1 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché. 85
5.5 Acquisition n°1 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché. 86
5.6 Acquisition n°2 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché. 87
5.7 Acquisition n°2 : paramètres calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché. 88

5.8 Utilisation d'une paramétrisation réduite pour le dispositif d'acquisition n°2 (a). (b) représente la matrice Hessienne. Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c). 89
5.9 Acquisition n°2 : paramètres calculés pour une paramétrisation réduite à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché. 90
5.10 Acquisition n°2 : paramètres calculés pour une paramétrisation réduite à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché. 91
5.11 Utilisation de contraintes sur les paramètres du modèle pour le dispositif d'acquisition n°2 (a). (b) représente la matrice Hessienne. Cette acquisition permet de contraindre l'intégralité des paramètres du problème inverse et c'est pourquoi la solution du problème est unique et peut être calculée par une méthode directe d'inversion du Hessien (c). 92
5.12 Acquisition n°2 : paramètres contraints calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché. 93
5.13 Acquisition n°2 : paramètres contraints calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché. 94
5.14 Acquisition n°2 : paramètres avec contraintes relâchées calculés à partir d'un modèle initial proche du modèle recherché 95
5.15 Acquisition n°2 : paramètres avec contraintes relâchées calculés à partir d'un modèle initial éloigné du modèle recherché. 96

6.1 Positionnement des campagnes électriques 2007 et 2011 dans un repère commun. (a) représente l'envergure de la zone explorée par la campagne d'acquisition de 2007 (Gélis et al., 2010) et (b) celle de l'acquisition réalisée en 2011 (Gélis et al., 2012). 107
6.2 Positionnement de la campagne 2D Haute Résolution. 107
6.3 Position présumée de la zone de failles (a) et positionnement de la nouvelle campagne d'acquisition (b). 108
6.4 Schéma présentant le déclenchement de l'acquisition par WIFI 109
6.5 Coupe géologique simplifiée du massif de Tournemire. La zone d'investigation de cette acquisition comprenant la couche calcaire supérieure et une partie de la couche argileuse est représentée par le carré noir. 110
6.6 Photo de la source : chute de masse accélérée. La mobilité du système d'émission wifi est rendue possible par l'utilisation d'un quad permettant le transport de l'émetteur wifi et de la batterie. 111
6.7 Vue aérienne du plateau de Tournemire présentant les trois lignes sources. . 111
6.8 Photo de l'installation des géophones dans les ouvrages souterrains, avec (a) les géophones situés dans le tunnel, (b) les géophones dans la galerie Ouest, et (c) les géophones placés directement dans la couche argileuse de la galerie Est. 112
6.9 Coupe schématique des ouvrages souterrains présentant les trois lignes de géophones. 113
6.10 Illustration des repères utilisés pour les inversions. La figure (a) représente l'intégralité de la zone d'étude dans le repère 3D. Les figures (b), (c) et (d) illustrent les repères locaux utilisés respectivement pour l'inversion de la ligne Centrale, Nord et Sud. 114

6.11 Illustration du pré-traitement réalisé sur les sismogrammes avant pointé. La figure (a) présente les sismogrammes bruts de la source N14 enregistrés aux 48 géophones des galeries Ouest et Est. La figure (b) présente ces mêmes sismogrammes après stack et filtrage du 50Hz induit par la présence d'appareils électroniques environnants. 115
6.12 Temps de première arrivée pointés pour l'ensemble des données de la campagne Surface-Tunnel 116
6.13 Traces simisques des tirs n°9 (a) n°14 (c) et n°21 (e) de la ligne Centrale, avec en rouge les temps de première arrivée pointés par l'algorithme PickFirst et en bleu le pointé manuel. Les vitesses apparentes sont représentées sur les coupes (b), (d) et (f). 117
6.14 Vitesses apparentes moyennes calculées pour l'ensemble des données de l'acquisition Surface-Tunnel 118
6.15 Interprétation des vitesses apparentes calculées à partir des temps de première arrivée (en bleu) des sources C9, C14 et C21. Trois zones sont identifiées : La première, en rouge, située entre les récepteurs 1 à 19 pour laquelle les vitesses apparentes peuvent être approchées par une constante dont la valeur varie suivant la position de la source, la seconde, en orange, située entre les récepteurs 20 à 40 pour laquelle les vitesses apparentes sont hétérogènes, puis la dernière, en vert, située entre les récepteurs 41 à 48 pour laquelle les vitesses apparentes peuvent être également approchées par une constante. Ces différents comportements peuvent être expliqués par la présence d'une zone endommagée entre les récepteurs 20 et 40 qui correspond à la zone endommagée localisée depuis les ouvrages souterrains. 120

7.1 Comparaison des temps pointés automatiquement et manuellement. (a) représente les temps pointés par l'algorithme PickFirst et (b) les temps pointés obtenus manuellement par inspection visuelle des sismogrammes. L'histogramme (c) représente la différence de temps pointés entre les deux méthodes. 123
7.2 Comparaison des temps théoriques pour deux modèles de vitesse proches. La figure (c) représente la différence entre les temps théoriques calculés pour le modèle de vitesse 1 (a) et ceux calculés pour le modèle de vitesse 2 (b). Cette différence nous permet d'évaluer le résidu des temps pouvant être expliqué par le lissage des propriétés vraies de l'objet étudié. 123
7.3 Scénario 1 : Le problème de minimisation est bien posé et son unique solution ne permet pas d'expliquer les données observées. Ces résultats permettent de conclure sur la présence d'hétérogénéité dans le milieu ausculté. 124
7.4 Scénario 2 : Le problème de minimisation est bien posé et son unique solution permet d'expliquer les données observées. 125
7.5 Sensibilité des données à la présence d'une couche horizontale dans le modèle de vitesse. Le modèle mathématique est construit à partir de deux paramètres représentant la lenteur dans les couches 1 et 2 (a). En considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, les données sont représentées en fonction de la longueur respective des rais dans chacun des blocs sur la figure (b). Cette figure illustre le mauvais conditionnement de cette paramétrisation. 127
7.6 Sensibilité des données à la présence de variations latérales du modèle de vitesse. Le modèle mathématique est construit à partir de deux paramètres représentant la lenteur dans les blocs 1 et 2 (a). En considérant la géométrie d'acquisition de la campagne Surface-Tunnel, les données sont représentées en fonction de la longueur respective des rais dans chacun des blocs sur la figure (b). Cette figure illustre le potentiel de cette acquisition pour la détection des variations latérales des propriétés de vitesse du milieu. 128

7.7 Paramétrisation 1D adaptée permettant le calcul direct de 45 paramètres. (a) modèle de paramètres et (b) la matrice hessienne calculée pour des trajectoires a priori en ligne droite est inversible et bien conditionnée. 129
7.8 Densité de rais par bloc d'un mètre carré. 129
7.9 Modèles de vitesse « vrais » pouvant être décrits comme un milieu homogène présentant une hétérogénéité de vitesse lente. Ces modèles se distinguent par la position de l'hétérogénéité présente. 130
7.10 Modèles de vitesse calculés par l'inversion des données synthétiques « observées » sur les modèles de vitesse « vrais » présentés sur la figure 7.9. 130
7.11 Modèles de vitesse synthétiques dont les dimensions ont été établies en considérant la géométrie d'acquisition de la ligne Centrale de la campagne Surface-Tunnel, avec en bleu la position des récepteurs. 131
7.12 Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D, sans information a priori et avec une contrainte de lissage gaussien sur 50 mètres. Les figures (a), (b) et (c) sont respectivement les modèles de vitesse calculés pour les trois modèles de faille présentés sur la figure 7.11. Les figures (d), (e) et (f) sont les isocontours de ces modèles. Les figures (g), (h) et (i) représentent une coupe en z=225 mètres avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. De la même façon les figures (j),(k) et (l) et (m),(n) et (o) sont les coupes respectives obtenues pour z=125 et z=25 mètres. Les figures (p),(q) et (r) représentent quant à elles les résidus des temps pour l'ensemble des couples source-récepteur, alors que les figures (s),(t) et (u) présentent en particulier les résidus de la source 5. 134
7.13 Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4100 mètres par seconde. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12. 135
7.14 Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte trop forte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4000 mètres par seconde. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12. 136
7.15 Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D avec une contrainte sur la valeur maximale des paramètres définie a priori à 4100 mètres par seconde et une contrainte de lissage relâchée au cours des itérations. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée pour la figure 7.12. 137
7.16 Faille 4, Modèle de vitesse synthétique comprenant une couche horizontale et dont les dimensions ont été établies en considérant la géométrie d'acquisition de la ligne Centrale de la campagne Surface-Tunnel, avec en bleu la position des récepteurs. 138
7.17 Représentation des quatre modèles initiaux pour lesquels les résultats d'inversion sont comparés dans cette section. Ces modèles initiaux sont caractérisés par le contraste de vitesse entre les deux couches représentant ici la couche calcaire et la couche argileuse du site d'étude. Le premier modèle (a) est homogène (absence de contraste). le second (b) correspond au contraste du modèle vrai. Le troisième et la quatrième sont respectivement caractérisés par un contraste plus fort et plus faible que celui de modèle vrai. 138

7.18 Résultats d'inversion obtenus avec le code Tomo3D, sans information a priori et avec une contrainte de lissage gaussien sur 50 mètres. Les figures (a), (b), (c) et (d) sont respectivement les modèles de vitesse calculés à partir des quatre modèles initiaux présentés sur la figure 7.17. Les figures (e), (f), (g) et (h) sont les isocontours de ces modèles. Les figures (i), (j), (k) et (l) représentent une coupe en z=225 mètres avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. De la même façon les figures (m),(n), (o) et (p) et (q),(r), (s) et (t) sont les coupes respectives obtenues pour z=125 et z=25 mètres. Les figures (u),(v), (w) et (x) représentent quant à elles les résidus des temps pour l'ensemble des couples source-récepteur, alors que les figures (y),(z), (aa) et (ab) présentent en particulier les résidus de la source 5. . . . 140

7.19 Description d'un modèle de vitesse réaliste comprenant deux couches sédimentaires de vitesses inégales, des hétérogénéités de surface ainsi que la présence d'une faille. 141

7.20 **Exemple 1, inversion classique.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale ayant permis d'aboutir à la distribution de vitesse présentée sur la figure (b) en ne considérant aucune information a priori sur le milieu. (c) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (d) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (e) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (f) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources. 144

7.21 **Exemple 2, inversion avec information dans le modèle initial.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (b). (c) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (d) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (e) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (f) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources. 145

7.22 **Exemple 3, inversion avec zones contraintes.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. Des informations a priori sont également introduites par les blocs de contraintes présentés sur la figure (b) pour lesquels les valeurs de vitesse maximale et minimale sont définies. La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (c). (d) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (e) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (f) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (g) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources. 146

7.23 **Exemple 4, inversion avec utilisation de données issues de mesures ou d'observations directes.** La figure (a) représente la distribution des propriétés de vitesse initiale dans laquelle des informations a priori sont introduites. Des informations a priori sont également introduites par les blocs de contraintes présentés sur la figure 7.22b. On ajoute ici des informations supplémentaires en considérant les valeurs des paramètres bloquées dans les zones d'informations fiables représentées en rouge sur la figure (b). La distribution de vitesse calculée est présentée sur la figure (c). (d) représente les coupes respectivement obtenues pour les altitudes $z = 225$, $z = 125$ et 25 mètres, avec en rouge le modèle vrai et en bleu le modèle calculé. Les résidus des temps pour ce modèle sont représentés sur la figure (e) en fonction des positions sources-récepteurs. Une coupe de cette figure est présentée sur la figure (f) représentant en particulier les résidus de la source 5 en fonction des positions de récepteurs. De la même façon la figure (g) présente les résidus du récepteur 24 en fonction des positions de sources. 147

8.1 Représentation de l'ensemble des données acquises durant la campagne Surface Tunnel en fonction de la distance source-récepteur. La pente de la droite représentée en rouge nous donne la meilleure évaluation de vitesse homogène permettant de représenter les données. La figure (b) présente les résidus des temps associés à cette modélisation dont les grandes valeurs témoignent des hétérogénéités présentes sur le site. 150

8.2 Résidus des temps obtenus pour une paramétrisation homogène des propriétés de vitesse de la Station expérimentale de Tournemire pour les données des trois lignes sources respectivement représentées par les figures (a), (c) et (e). A gauche les données sont représentées en fonction de la distance source-récepteur et la meilleure estimation de la vitesse est donnée par la pente de la droite représentée en rouge. A droite les résidus associés à cette modélisation sont représentés en fonction de la source et du récepteur et témoignent des hétérogénéités présentes sur le site. 151

8.3 Résultats d'inversion obtenus pour une paramétrisation 1D adaptée des propriétés de vitesse de la Station Expérimentale de Tournemire pour les données des trois lignes sources. A gauche les figures (a), (c) et (e) présentent les tomogrammes solutions du problème de minimisation posé par cette paramétrisation pour chacune les lignes sources Nord, Centrale et Sud. A droite les figures (b), (d) et (f) présentent les résidus associés à cette modélisation représentés en fonction de la source et du récepteur. Ceux-ci, de par leurs valeurs supérieures aux erreurs de mesure attendues, témoignent du caractère bidimensionnel des hétérogénéités présentes sur le site. 153

8.4 Hétérogénéités des propriétés physiques de la subsurface du sous-sol établies à l'aide des résultats de l'inversion des données de résistivité électrique de la campagne de 2007. 154

8.5 Introduction de l'information a priori contenue dans le modèle initial et définition des blocs de contraintes. Les figures (a), (c) et (e) représentées à gauche illustrent les modèles initiaux établis d'après les connaissances géologiques du site et à partir des images de résistivité électrique réalisées sur cette zone. Les figures (b), (d) et (f) représentées à droite illustrent les blocs de contraintes permettant la différenciation de la subsurface (zone 4), de la couche calcaire (zone 3), de la couche argileuse (zone 2) et de la zone des ouvrages (zone 5). 155

8.6 Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Nord. La figure (a) présente ces résultats dans le repère commun 3D. Ces résultats sont également présentés dans le repère local d'inversion par les iso-contours (b) et pour 3 coupes en profondeur à $z = 225$, $z = 125$ et $z = 25$ mètres (c). Les résidus finaux sont représentés respectivement sur les figures (d), (e) et (f) pour l'ensemble des couples source-récepteur et en particulier pour le récepteur 24 et la source 5. 158
8.7 Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Centrale. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée sur la figure 8.6. 159
8.8 Résultats d'inversion illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour les données de la ligne Sud. La légende détaillée de cette figure correspond à celle utilisée sur la figure 8.6. 160
8.9 Coupes horizontales pour les altitudes z=180 (a), z=150 (b), z=120 (c), z=70 (d), z=45 (e) mètres des résultats d'inversion 3D illustrant la distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D pour l'ensemble des données de l'acquisition Surface-Tunnel. 161
8.10 Coupe horizontale réalisée à 60 mètres au-dessus des ouvrages souterrains illustrant les résultats d'inversion de l'intégralité des données acquises durant la campagne Surface-Tunnel. La distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D est en accord avec la description schématique de la zone de failles présumée (en rouge) issue des observations géologiques réalisées depuis les ouvrages souterrains. 162
8.11 Coupe Ouest-Est illustrant les résultats d'inversion des données de la ligne Centrale et interprétation géologique proposée a priori. La distribution des propriétés de vitesse du milieu calculée par le code de tomographie de temps de première arrivée Tomo3D est en accord avec la description schématique de la zone de failles présumée (en noir) issue des observations géologiques réalisées depuis les ouvrages souterrains et la surface. 163
8.12 Coupes des vitesses calculées pour différentes contraintes d'inversion (a), et résidus associés pour la source 5 (b) et fonctions coût associées (c). 165
8.13 Illustration de la couverture de l'acquisition Surface-Tunnel calculée pour les données de la ligne Centrale et pour les 48 récepteurs situés dans les galeries Ouest et Est. 165
8.14 Illustration 3D du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne composé d'un réseau de galeries souterraines localisé sous le territoire de la commune de Bure (Meuse) en France. 175

Bibliographie

Aki, K., Christoffersson, A., & Husebye, E. S., 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere, *Journal of Geophysical Research*, **82**(2), 277–296.

Altinier, M. V., 2006. *Etude de la composition isotopique des eaux porales de l'argilite de Tournemire : inter-comparaison des méthodes de mesure et relations avec les paramètres pétrophysiques*, Ph.D. thesis, Paris 11.

Arbelaez, P., Maire, M., Fowlkes, C., & Malik, J., 2011. Contour detection and hierarchical image segmentation, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **33**(5), 898–916.

Asad, A. M., Pullammanappallil, S. K., Anooshehpoor, A., & Louie, J. N., 1999. Inversion of travel-time data for earthquake locations and three-dimensional velocity structure in the eureka valley area, eastern california, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(3), 796–810.

Atlas, S. W., 2009. *Magnetic resonance imaging of the brain and spine*, vol. 1, Lippincott Williams & Wilkins.

Barry, K. M., Cavers, D. A., & Kneale, C. W., 1975. Recommended standards for digital tape formats, *Geophysics*, **40**(2), 344–352.

Belayouni, N., 2013. *Nouveaux algorithmes efficaces de modélisation 2D et 3D : Temps des premières arrivées, angles à la source et amplitudes*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Bennett, D. & Gens, R., 2008. Overview of european concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion, *Journal of Nuclear Materials*, **379**(1), 1–8.

Berry, M., Ivezić, Ž., Sesar, B., Jurić, M., Schlafly, E. F., Bellovary, J., Finkbeiner, D., Vrbanec, D., Beers, T. C., Brooks, K. J., et al., 2012. The milky way tomography with sloan digital sky survey. iv. dissecting dust, *The Astrophysical Journal*, **757**(2), 166.

Berryman, J. G., 1991. Lecture notes on nonlinear inversion and tomography : 1, borehole seismic tomography, Tech. rep., Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).

Boadu, F. K., 1997. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties : Analytical studies, *Journal of Applied Geophysics*, **37**(1), 1–19.

Boadu, F. K., 2000. Predicting the transport properties of fractured rocks from seismic information : numerical experiments, *Journal of Applied Geophysics*, **44**(2–3), 103–113.

Boadu, F. K. & Long, L. T., 1994. The fractal character of fracture spacing and RQD, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **31**(2), 127–134.

Bodvarsson, G., Boyle, W., Patterson, R., & Williams, D., 1999. Overview of scientific investigations at yucca mountain—the potential repository for high-level nuclear waste, *Journal of Contaminant Hydrology*, **38**(1), 3–24.

Bois, P., La Porte, M., Lavergne, M., & Thomas, G., 1972. Well-to-well seismic measurements, *Geophysics*, **37**(3), 471–480.

Boisson, J.-Y., Cabrera, J., Bertrand, L., & Heitz, J.-F., 1998. Mesures de tres faibles permeabilities in-situ et en laboratoire sur les argilites de tournemire (aveyron) ; methodologies comparees et effet d'echelle, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, **169**(4), 595–604.

Boisson, J.-Y., Bertrand, L., Heitz, J.-F., & Golvan, Y., 2001. In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, tournemire tunnel, southern france, *Hydrogeology Journal*, **9**, 108–123.

Bonin, B., 1998. Deep geological disposal in argillaceous formations : studies at the tournemire test site, *Journal of Contaminant Hydrology*, **35**(1), 315–330.

Boschetti, F., Dentith, M. C., & List, R. D., 1996a. Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms, *Geophysics*, **61**(6), 1715–1727.

Boschetti, F., Dentith, M. D., & List, R. D., 1996b. A fractal based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces, *Geophysics*, **61**(4), 1095–1102.

Boué, M. & Dupuis, P., 1999. Markov chain approximations for deterministic control problems with affine dynamics and quadratic cost in the control, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **36**(3), 667–695.

Bretaudeau, F., Gélis, C., Leparoux, D., Cabrera, J., & Côte, P., 2011. Strike-slip faults imaging from galleries with seismic waveform imaging methods, in *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 1, p. 2298.

Bretaudeau, F., Gélis, C., Leparoux, D., Brossier, R., Cabrera, J., & Côte, P., 2013. High-resolution quantitative seismic imaging of a strike-slip fault with small vertical offset in clay rocks from underground galleries : Experimental platform of tournemire, france, *Geophysics*, **79**(1), B1–B18.

Bühnemann, J. & Holliger, K., 1998. Comparison of high-frequency seismic sources at the grimsel test site, central alps, switzerland, *Geophysics*, **63**(4), 1363–1370.

Cabrera, J., 1991. Etude structurale dans le milieu argileux : lemi du tunnel de tournemire.

Cabrera, J., 2003. Evaluation de la méthode sismique 3d haute résolution sur le site de tournemire autour de la station expérimentale de l'irsn, *Note technique n°03-20*.

Cabrera, J., Volant, P., Baker, C., Pettitt, W., Young, R., et al., 1999. Structural and geophysical investigations of the edz (excavation disturbed zone) in indurated argillaceous media : the tunnel and the galleries of the ipsn tournemire site (france), *Vail Rocks*, **99**.

Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L., Genty, A., Ramabasoa, N., Rejeb, A., Saboye, S., & Volant, P., 2001. Le projet tournemire : synthèse des programmes de recherches 1995-1999, *IPSN, DPRE/SERGD*, p. 01–19.

Cañamón, I., Ababou, R., & Elorza, F. J., 2014. Optimal reconstruction of 3d fracture networks (febex field test, grimsel site, swiss alps), in *Mathematics of Planet Earth*, pp. 463–466, Springer.

Cerveny, V., 2005. *Seismic ray theory*, Cambridge University Press.

Červený, V. & Hron, F., 1980. The ray series method and dynamic ray tracing system for three-dimensional inhomogeneous media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **70**(1), 47–77.

Chabert, J., 1989. Gauss et la méthode des moindres carrés, *Revue d'histoire des sciences*, **42**(1), 5–26.

Chapman, C., 1985. Ray theory and its extensions wkbj and maslov seismograms, *J. Geophys.*, **58**, 27–43.

Cho, W.-J., Kwon, S., & Park, J.-H., 2008. Kurt, a small-scale underground research laboratory for the research on a high-level waste disposal, *Annals of Nuclear Energy*, **35**(1), 132–140.

Clearbout, J., 1985. Imaging the earth's interior., *Imaging the Earth's interior.. JF Clearbout. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. 414 pp. Price£ 42.00 (1985).*, **1**.

Constantin, J., Vergély, P., & Cabrera, J., 2002. Tectonique et fracturation associée dans le bassin des causses : le cas des argilites de tournemire (aveyron, france), *Bulletin of the Geological Society of France*, **173**(3), 229–243.

Coppens, F., 1985. First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static corrections, *Geophysical prospecting*, **33**(8), 1212–1231.

Cormack, A. M., 1963. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications, *Journal of Applied Physics*, **34**(9), 2722–2727.

Côte, P., 1988. *Tomographies sismiques en génie civil*, Ph.D. thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

Culioli, J.-C., 1994. *Introduction à l'optimisation*, vol. 66, Ellipses.

de Ridder, S. & Dellinger, J., 2011. Ambient seismic noise eikonal tomography for near-surface imaging at valhall, *The Leading Edge*, **30**(5), 506–512.

Dehandschutter, B., Sintubin, M., Vandenberghe, N., Vandycke, S., Gaviglio, P., & Wouters, L., 2002. Fracture analysis in the boom clay (urf, mol, belgium), *Aardkundige Mededelingen*, **12**, 245–248.

Delay, J., Bossart, P., Ling, L. X., Blechschmidt, I., Ohlsson, M., Vinsot, A., Nussbaum, C., & Maes, N., 2014. Three decades of underground research laboratories : what have we learned ?, *Geological Society, London, Special Publications*, **400**, SP400–1.

Denis, A. & Crémoux, F., 2002. Using the entropy of curves to segment a time or spatial series, *Mathematical Geology*, **34**(8), 899–914.

Dou, L.-M., He, J., Gong, S.-Y., Song, Y.-F., & Liu, H., 2012. A case study of microseismic monitoring : Goaf water-inrush dynamic hazards, *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao(Journal of China University of Mining & Technology)*, **41**(1), 20–25.

Duvaut, G., 1998. *Mécanique des milieux continus*, Dunod.

Eberhart-Phillips, D., 1986. Three-dimensional velocity structure in northern california coast ranges from inversion of local earthquake arrival times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **76**(4), 1025–1052.

Feroci, M., Orlando, L., Balia, R., Bosman, C., Cardarelli, E., & Deidda, G., 2000. Some considerations on shallow seismic reflection surveys, *Journal of Applied Geophysics*, **45**(2), 127–139.

Fomel, S., Luo, S., & Zhao, H., 2009. Fast sweeping method for the factored eikonal equation, *Journal of Computational Physics*, **228**(17), 6440–6455.

Gauss, C. F., 1809. *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium.*

Gauss, C. F., 1855. *Méthode des moindres carrés : mémoires sur la combinaison des observations*, Mallet-Bachelier.

Gauss, C. F., 1857. *Theory of the motion of the heavenly bodies moving about the sun in conic sections : a translation of Carl Frdr. Gauss" Theoria motus" : With an appendix. By Ch. H. Davis*, Little, Brown and Comp.

Gélis, C., Revil, A., Cushing, M., Jougnot, D., Lemeille, F., Cabrera, J., De Hoyos, A., & Rocher, M., 2010. Potential of electrical resistivity tomography to detect fault zones in limestone and argillaceous formations in the experimental platform of tournemire, france, *Pure and Applied Geophysics*, **167**(11), 1405–1418.

Gélis, C., Noble, M., Cabrera, J., Chauris, H., Penz, S., Desveaux, P., et al., 2012. Potential of high resolution electrical resistivity tomography to detect fractured zones in limestone and dolomites formations in the near subsurface at the tournemire experimental platform, france, *100 Years of Electrical Imaging*, pp. 45–49.

Gesret, A., Noble, M. S., Desassis, N., Romary, T., et al., 2011. Microseismic monitoring : Consequences of velocity model uncertainties on location uncertainties, in *Proceedings of the Third Passive Seismic Workshop, Eur. Ass. of Geoscientists and Engineers, Athens-Greece (2011).*

Gesret, A., Noble, M., Desassis, N., & Romary, T., 2013. A new bayesian approach of tomography and seismic event location dedicated to the estimation of the true uncertainties, in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 15, p. 7614.

Gesret, A., Desassis, N., Noble, M., & Romary, T., 2014. Propagation of the velocity model uncertainties to the seismic event location, *accepted in Geophys. J. Int.*.

Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H., 1981. Practical optimization.

Giusti, L., 2009. A review of waste management practices and their impact on human health, *Waste Management*, **29**(8), 2227–2239.

Godard, O., Lochard, J., et al., 2005. L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution.

Gordon, R., Bender, R., & Herman, G. T., 1970. Algebraic reconstruction techniques (art) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography, *Journal of theoretical Biology*, **29**(3), 471–481.

Grand, S. P., van der Hilst, R. D., & Widiyantoro, S., 1997. Global seismic tomography : A snapshot of convection in the earth, *GSA today*, **7**(4), 1–7.

Gélis, C., Cabrera, J., & Barnichon, J., 2010. Caractérisation de l'edz par méthodes sismiques et ultra- soniques, *5éme Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Grenoble.*

Gélis, C., Noble, M., Cabrera, J., Chauris, H., Penz, S., & Desveaux, P., 2012. High resolution electrical resistivity tomography in superficial limestones at tournemire site, france, in *Near Surface Geoscience 2012–18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.*

Hadamard, J., 1902. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique, *Princeton university bulletin*, **13**(49-52), 28.

Hauer, G., Bertram, M., Lawton, D., Stewart, R., & Hons, M., 2008. Field data comparison : 3C-2D data acquisition with geophones and accelerometers, in *2008 SEG Annual Meeting*.

Hemes, S., Desbois, G., Urai, J. L., De Craen, M., & Honty, M., 2011. Comparative study on porosity in fine-and coarse-grained boom clay samples (mol-dessel reference site, belgium), *Belgian Nuclear Research Centre, Mol, Belgium*.

Herbst, R., Kapp, I., Krummel, H., & Lück, E., 1998. Seismic sources for shallow investigations : A field comparison from northern germany, *Journal of Applied Geophysics*, **38**(4), 301–317.

Herbulot, A., 2007. *Mesures statistiques non-paramétriques pour la segmentation d'images et de vidéos et minimisation par contours actifs*, Ph.D. thesis, Université Nice Sophia Antipolis.

Hole, J. & Zelt, B., 1995. 3-d finite-difference reflection traveltimes, *Geophysical Journal International*, **121**(2), 427–434.

Humphreys, E. & Clayton, R. W., 1988. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, **93**(B2), 1073–1085.

Hunsche, U. & Hampel, A., 1999. Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository, *Engineering geology*, **52**(3), 271–291.

Improta, L., Zollo, A., Herrero, A., Frattini, R., Virieux, J., & Dell'Aversana, P., 2002. Seismic imaging of complex structures by non-linear traveltime inversion of dense wide-angle data : application to a thrust belt, *Geophysical Journal International*, **151**, 264–278.

Jeffreys, H. & Bullen, K. E., 1940. Seismological tables, british association for the advancement of science, *Burlington House, London*.

Jeong, J.-H. & Kim, J.-H., 2012. Comparison of signal powers generated with different shapes of hammer plates, *Journal of the Korean earth science society*, **33**(5), 395–400.

Jiao, L. & Moon, W. M., 2000. Detection of seismic refraction signals using a variance fractal dimension technique, *Geophysics*, **65**(1), 286–292.

Jin, S. & Madariaga, R., 1993. Background velocity inversion with a genetic algorithm, *Geophysical research letters*, **20**(2), 93–96.

Jougnot, D., 2009. *Étude géophysique des phénomènes de transfert dans les argilites du Callovo-Oxfordien partiellement saturées en eau : application à l'EDZ du site de Bure*, Ph.D. thesis, Université de Savoie.

Julian, B. & Gubbins, D., 1977. Three-dimensional seismic ray tracing, *J. Geophys*, **43**(1), 95–114.

Kao, C. Y., Osher, S., & Qian, J., 2004. Lax–friedrichs sweeping scheme for static hamilton–jacobi equations, *Journal of Computational Physics*, **196**(1), 367–391.

Kao, C.-Y., Osher, S., & Tsai, Y.-H., 2005. Fast sweeping methods for static hamilton–jacobi equations, *SIAM journal on numerical analysis*, **42**(6), 2612–2632.

Kelley, C. T., 1999. *Iterative methods for optimization*, vol. 18, Siam.

Kern, M., 2002. Problèmes inverses : aspects numériques.

Kim, H.-S. & Keehm, Y.-S., 2011. A comparison study on near-surface high-resolution seismic data by different source and geophone types, *Journal of the Korean earth science society*, **32**(6), 674–686.

Kim, S., 2002. 3-d eikonal solvers : First-arrival traveltimes, *Geophysics*, **67**(4), 1225–1231.

Kim, S. & Cook, R., 1999. 3-d traveltime computation using second-order eno scheme, *Geophysics*, **64**(6), 1867–1876.

Koketsu, K. et al., 2000. Finite difference traveltime calculation for head waves travelling along an irregular interface, *Geophysical Journal International*, **143**(3), 729–734.

Kristiansen, T. G., Barkved, O., & Pattillo, P., 2000. Use of passive seismic monitoring in well and casing design in the compacting and subsiding valhall field, north sea, in *EUROPEC : European petroleum conference*, pp. 231–241.

Kuhl, D. E. & Edwards, R. Q., 1963. Image separation radioisotope scanning, *Radiology*, **80**(4), 653–662.

Kunimaru, T., Nishio, K., Tsuruta, T., Matsuoka, T., Ishibashi, M., Kuboshima, K., Takeuchi, R., Sato, T., Sanada, H., Tanno, T., Hikima, R., Yuguchi, T., Sasao, E., Ogata, N., Hama, K., Koide, K., Shimada, A., Ito, H., Sugihara, K., Mikake, S., Ikeda, K., Yamamoto, M., Mizuno, T., & Matsui, H., 2012. Mizunami underground research laboratory project. plan for fiscal year 2012, Tech. rep., Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki (Japan).

Kwon, S., Lee, C., Cho, S., Jeon, S., & Cho, W., 2009. An investigation of the excavation damaged zone at the kaeri underground research tunnel, *Tunnelling and Underground space technology*, **24**(1), 1–13.

Lanz, E., Maurer, H., & Green, A. G., 1998. Refraction tomography over a buried waste disposal site, *Geophysics*, **63**(4), 1414–1433.

Le Dars, A., 2004. *Pour une gestion durable des déchets nucléaires : quelles décisions ?*, Presses Universitaires de France.

Legendre, A. M., 1805. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des cometes*, F. Didot.

Leroy, P., Revil, A., Altmann, S., & Tournassat, C., 2007. Modeling the composition of the pore water in a clay-rock geological formation (callovo-oxfordian, france), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**(5), 1087–1097.

Leucci, G. & De Giorgi, L., 2006. Experimental studies on the effects of fracture on the p and s wave velocity propagation in sedimentary rock ("Calcarenite del salento"), *Engineering Geology*, **84**(3–4), 130–142.

Loke, M. & Barker, R., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-newton method1, *Geophysical prospecting*, **44**(1), 131–152.

Luo, S. & Qian, J., 2011. Factored singularities and high-order lax–friedrichs sweeping schemes for point-source traveltimes and amplitudes, *Journal of Computational Physics*, **230**(12), 4742–4755.

Luo, S., Qian, J., & Zhao, H., 2012. Higher-order schemes for 3d first-arrival traveltimes and amplitudes, *Geophysics*, **77**(2), T47–T56.

Luo, Y., Marhoon, M., Al Dossary, S., & Alfaraj, M., 2002. Edge-preserving smoothing and applications, *The leading edge*, **21**(2), 136–158.

Magnin, O., 2010. Projet de recherche pour la detection des failles a faible decalage vertical dans les milieux argileux : Caracterisation de revolution des vitesses sismiques au passage de la faille principale, *Technical repport TERRASEIS-IRSN*, **report RD-SIS-10-30**.

Marelli, S., Manukyan, E., Maurer, H., Greenhalgh, S. A., & Green, A. G., 2010. Appraisal of waveform repeatability for crosshole and hole-to-tunnel seismic monitoring of radioactive waste repositories, *Geophysics*, **75**(5), Q21–Q34.

Marschall, P., Horseman, S., & Gimmi, T., 2005. Characterisation of gas transport properties of the opalinus clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal, *Oil & gas science and technology*, **60**(1), 121–139.

Masri, M., Sibai, M., Shao, J., & Mainguy, M., 2014. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of tournemire shale, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **70**, 185–191.

Matray, J. M., Savoye, S., & Cabrera, J., 2007. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted tournemire's argillite (aveyron, france), *Engineering Geology*, **90**(1), 1–16.

Matsuoka, T. & Ezaka, T., 1992. Ray tracing using reciprocity, *Geophysics*, **57**(2), 326–333.

Menke, W., 1989. *Geophysical data analysis : discrete inverse theory*, vol. 45, Access Online via Elsevier.

Miller, R. D., Pullan, S. E., Waldner, J. S., & Haeni, F. P., 1986. Field comparison of shallow seismic sources, *Geophysics*, **51**(11), 2067–2092.

Miller, R. D., Pullan, S. E., Steeples, D. W., & Hunter, J. A., 1992. Field comparison of shallow seismic sources near chino, california, *Geophysics*, **57**(5), 693–709.

Miller, R. D., Pullan, S. E., Steeples, D. W., & Hunter, J. A., 1994. Field comparison of shallow p-wave seismic sources near houston, texas, *Geophysics*, **59**(11), 1713–1728.

Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, J. C., & Smellie, J., 2000. *Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues*, vol. 2, Elsevier.

Mohorovičić, A., 1992. Earthquake of 8 october 1909, *Geofizika*, **9**(1), 3–55.

Molinero-Huguet, J., SAMPER-CALVETE, F., Zhang, G., Changbing, Y., et al., 2004. Biogeochemical reactive transport model of the redox zone experiment of the äspö hard rock laboratory in sweden, *Nuclear Technology*, **148**(2), 151–165.

Monfared, M., Sulem, J., Delage, P., & Mohajerani, M., 2012. On the thm behaviour of a sheared boom clay sample : application to the behaviour and sealing properties of the edz, *Engineering Geology*, **124**, 47–58.

Mosegaard, K. & Sambridge, M., 2002. Monte carlo analysis of, *Inverse Problems*, **18**(3), R29.

Noble, M., Gesret, A., & Belayouni, N., 2014. Accurate 3-d finite difference computation of traveltimes in strongly heterogeneous media, *Geophysical Journal International*, **199**(3), 1572–1585.

Oldendorf, W., 1961. Isolated flying spot detection of radiodensity dis-continuities-displaying the internal structural pattern of a complex object, *Bio-Medical Electronics, IRE Transactions on*, **8**(1), 68–72.

Oncescu, M., Burlacu, V., Anghel, M., & Smalbergher, V., 1984. Three-dimensional p-wave velocity image under the carpathian arc, *Tectonophysics*, **106**(3), 305–319.

Onishi, C. T. & Shimizu, I., 2005. Microcrack networks in granite affected by a fault zone : Visualization by confocal laser scanning microscopy, *Journal of structural geology*, **27**(12), 2268–2280.

Pascual-Montano, A., Carazo, J. M., Kochi, K., Lehmann, D., & Pascual-Marqui, R. D., 2006. Nonsmooth nonnegative matrix factorization (nsnmf), *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **28**(3), 403–415.

Paulamäki, S., Paananen, M., & Elo, S., 2002. Structure and geological evolution of the bedrock at southern satakunta, sw finland.

Peraldi, R. & Clement, A., 1972. Digital processing of refraction data study of first arrivals, *Geophysical Prospecting*, **20**(3), 529–548.

Perroud, H., Rousset, D., Malik, D., Cabrera, J., & Gélis, C., 2009. Retraitement à base de crs des données 3d de tournemire, *Action 2008-2DE*.

Podvin, P. & Lecomte, I., 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models : a massively parallel approach and its associated tools, *Geophysical Journal International*, **105**(1), 271–284.

Pullammanappallil, S. K. & Louie, J. N., 1993. Inversion of seismic reflection traveltimes using a nonlinear optimization scheme, *Geophysics*, **58**(11), 1607–1620.

Pullan, S. & MacAulay, H., 1987. An in-hole shotgun source for engineering seismic surveys, *Geophysics*, **52**(7), 985–996.

Pusch, R., 2009. *Geological storage of highly radioactive waste : current concepts and plans for radioactive waste disposal*, Springer.

Qian, J. & Symes, W. W., 2002. An adaptive finite-difference method for traveltimes and amplitudes, *Geophysics*, **67**(1), 167–176.

Qian, J., Zhang, Y.-T., & Zhao, H.-K., 2007a. A fast sweeping method for static convex hamilton–jacobi equations, *Journal of Scientific Computing*, **31**(1), 237–271.

Qian, J., Zhang, Y.-T., & Zhao, H.-K., 2007b. Fast sweeping methods for eikonal equations on triangular meshes, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **45**(1), 83–107.

Rawlinson, N., Reading, A., & Kennett, B., 2006. Lithospheric structure of tasmania from a novel form of teleseismic tomography, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, **111**(B2).

Rawlinson, N., Pozgay, S., & Fishwick, S., 2010. Seismic tomography : A window into deep earth, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **178**(3), 101–135.

Reshef, M. & Kosloff, D., 1986. Migration of common-shot gathers, *Geophysics*, **51**(2), 324–331.

Sabbione, J. I. & Velis, D., 2010. Automatic first-breaks picking : New strategies and algorithms, *Geophysics*, **75**(4), V67–V76.

Saltzer, R. L. & Humphreys, E. D., 1997. Upper mantle p wave velocity structure of the eastern snake river plain and its relationship to geodynamic models of the region, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, **102**(B6), 11829–11841.

Sen, M. K. & Stoffa, P. L., 1991. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing, *Geophysics*, **56**(10), 1624–1638.

Sens-Schönfelder, C. & Wegler, U., 2011. Passive image interferometry for monitoring crustal changes with ambient seismic noise, *Comptes Rendus Geoscience*, **343**(8), 639–651.

Sheriff, R. & Geldart, L., 1982. Theory of seismic waves, *Exploration seismology*, pp. 1–624.

Shibutani, T., Sambridge, M., & Kennett, B., 1996. Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath eastern australia, *Geophysical Research Letters*, **23**(14), 1829–1832.

Stepanik, T. M., McIlwain, H., Edworthy, J., Alam, S., Man, A., Martino, J., & Taylor, P., 2011. Pre-project activities related to the remediation of fissionable materials contained in standpipes at atomic energy of canada limited's whiteshell laboratories.

Stockwell Jr, J. W., 1997. Free software in education : A case study of CWP/SU : seismic unix, *The Leading Edge*, **16**(7), 1045–1050.

Stotter, C., Angerer, E., & Herndler, E., 2008. Comparison of single sensor 3C MEMS and conventional geophone arrays for deep target exploration, in *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008*, p. 173–177, Society of Exploration Geophysicists.

Tarantola, A., 2002. *Inverse problem theory : Methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier Science.

Tarantola, A., 2005. *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*, siam.

Thurber, C. H., 1983. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the coyote lake area, central california, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, **88**(B10), 8226–8236.

Thury, M. & Bossart, P., 1999. The mont terri rock laboratory, a new international research project in a mesozoic shale formation, in switzerland, *Engineering Geology*, **52**(3), 347–359.

Tibuleac, I. M., Herrin, E. T., Britton, J. M., Shumway, R., & Rosca, A. C., 2003. Automatic determination of secondary seismic phase arrival times using wavelet transforms, *Seismological Research Letters*, **74**(6), 884–892.

Tokiwa, T., Tsusaka, K., Matsubara, M., & Ishikawa, T., 2014. Fracture characterization around a gallery in soft sedimentary rock in horonobe url of japan, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **65**, 1–7.

Trouiller, A., 2006. The callovo-oxfordian of the paris basin : From its geological context to the modelling of its properties-foreword, *Comptes Rendus Geoscience*, **338**, 815–823.

Um, J. & Thurber, C., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**(3), 972–986.

Valès, F., Nguyen Minh, D., Gharbi, H., & Rejeb, A., 2004. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in tournemire shale (france), *Applied clay science*, **26**(1), 197–207.

Van der Sluis, A. & Van der Vorst, H., 1987. Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems, in *Seismic tomography*, pp. 49–83, Springer.

van Trier, J. & Symes, W. W., 1991. Upwind finite-difference calculation of traveltimes, *Geophysics*, **56**(6), 812–821.

Vi Nhu Ba, E., Noble, M., Gélis, C., Gesret, A., & Cabrera, J., 2013. Geophysical imaging of near subsurface layers to detect fault and fractured zones in the tournemire experimental platform, france., in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 15, p. 7783.

Vidale, J., 1988. Finite-difference calculation of travel times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**(6), 2062–2076.

Vidale, J. E., 1990. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions, *Geophysics*, **55**(5), 521–526.

Vogel, C. R., 2002. *Computational methods for inverse problems*, vol. 10, Siam.

Wallin, B. & Peterman, Z., 2014. Compilation and review of 87sr/86sr and stable isotopes from groundwater, calcite fracture fillings, mineral, and whole-rock sampling at äspö, sweden, *Groundwater*.

Wang, J., XU, G.-q., ZHENG, H.-l., FAN, X.-h., WANG, C.-z., & FAN, Z.-w., 2005. Geological disposal of high level radioactive waste in china : Progress during 1985˜ 2004 [j], *World Nuclear Geoscience*, **1**, 002.

Wersin, P., Leupin, O., Mettler, S., Gaucher, E. C., Mäder, U., De Cannière, P., Vinsot, A., Gäbler, H., Kunimaro, T., Kiho, K., et al., 2011. Biogeochemical processes in a clay formation< i> in situ</i> experiment : Part a–overview, experimental design and water data of an experiment in the opalinus clay at the mont terri underground research laboratory, switzerland, *Applied Geochemistry*, **26**(6), 931–953.

Yilmaz, O., 2001. *Seismic data analysis : processing, inversion, and interpretation of seismic data*, no. 10, SEG Books.

Yung, S. K. & Ikelle, L. T., 1997. An example of seismic time picking by third-order bicoherence, *Geophysics*, **62**(6), 1947–1952.

Yven, B., Sammartino, S., Géraud, Y., Homand, F., & Villiéras, F., 2007. Mineralogy, texture and porosity of callovo-oxfordian argillites of the meuse/haute-marne region (eastern paris basin), *Mémoires de la Société géologique de France*, **178**, 73–90.

Zhang, L., Rector, J. W., & Hoversten, G. M., 2005. Eikonal solver in the celerity domain, *Geophysical Journal International*, **162**(1), 1–8.

Zhang, Y.-T., Zhao, H.-K., Chen, S., et al., 2006a. Fixed-point iterative sweeping methods for static hamilton-jacobi equations, *Methods and Applications of Analysis*, **13**(3), 299–320.

Zhang, Y.-T., Zhao, H.-K., & Qian, J., 2006b. High order fast sweeping methods for static hamilton–jacobi equations, *Journal of Scientific Computing*, **29**(1), 25–56.

Zhao, D., Hasegawa, A., & Horiuchi, S., 1992. Tomographic imaging of p and s wave velocity structure beneath northeastern japan, *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, **97**(B13), 19909–19928.

Zhao, H., 2005. A fast sweeping method for eikonal equations, *Mathematics of computation*, **74**(250), 603–627.

Zhao, H.-K., Osher, S., Merriman, B., & Kang, M., 2000. Implicit and nonparametric shape reconstruction from unorganized data using a variational level set method, *Computer Vision and Image Understanding*, **80**(3), 295–314.

Zillmer, M., Marthelot, J., Colonge, J., Gélis, C., Cabrera, J., & Druivenga, G., 2011. Multicomponent seismic profiles in galleries excavated in a clay layer at tournemire (france), in *73rd EAGE Conference & Exhibition*.

Zillmer, M., Marthelot, J.-M., Gélis, C., Cabrera, J., & Druivenga, G., 2014. In situ seismic measurements in claystone at tournemire (france), *Geophysical Journal International*, **199**(3), 1798–1807.

Détection des zones de failles par tomographie en transmission
- Application à la Station Expérimentale de Tournemire -

RESUME : Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans le cadre général de l'expertise des projets de stockage de déchets radioactifs en couche argileuse. La présence de failles dans ces roches peut modifier ses propriétés de perméabilité ; la détection des failles constitue donc un enjeu majeur. Depuis de nombreuses années, l'IRSN mène des travaux de recherche dans la station expérimentale de Tournemire où des failles à faible décalage vertical sont interceptées dans le milieu argileux depuis des ouvrages souterrains. Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé une nouvelle géométrie d'acquisition sismique en transmission (sources en surface-récepteurs dans les ouvrages souterrains). Pour traiter ces données, un code de tomographie a été développé afin de maîtriser parfaitement les paramètres d'inversion et aussi d'introduire de l'information a priori. L'application de ce code de tomographie aux données en transmission nouvellement acquises permet de mettre en évidence pour la première fois une discontinuité latérale des vitesses sismiques dans les calcaires et les argilites de la Station Expérimentale de Tournemire. Cette anomalie de vitesse est localisée à l'aplomb de la zone de failles visible depuis les ouvrages souterrains et est aussi en accord avec les observations de surface. Ces travaux mettent en avant le potentiel des méthodes sismiques pour imager des zones de failles dans des milieux fortement hétérogènes. Cette thèse a été financée par MINES ParisTech et par l'IRSN

Mots clés : Tomographie en transmission, modélisation, optimisation, détection des failles, Station Expérimentale de Tournemire

Fault detection using transmission tomography
- Evaluation on the Experimental platform of Tournemire -

Abstract : Deep argillaceous formations have physical properties adapted to the radioactive waste disposal but their permeability properties can be modified by the presence of fractured zones; detection of these faulted zones are thus of primary importance. Several experiments have been led by IRSN in the Experimental Platform of Tournemire where faults with small vertical offsets in the deep argillaceous formation have been identified from underground works.
We here propose a new seismic transmission acquisition geometry where seismic sources are deployed at the surface and receivers are installed in the underground works. In the aim to process these data, a new tomography algorithm has been developed in order to control the inversion parameters and also to introduce a priori information. A lateral discontinuity of the seismic velocities in the limestones and clay-rocks of the Tournemire Platform is evidenced for the first time by applying the algorithm to the data recently acquired. This low velocity anomaly is located just above the fracture zone visible from the underground works and its location is also consistent with observations from the surface. This study shows the potential of seismic methods to image fractured zones in a complex medium. This study was funded by MINES ParisTech and IRSN.

Keywords : Transmission tomography, modeling, optimization, fault detection, Experimental Platform of Tournemire

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY