

# Applications tomographique

Nous présentons dans ce chapitre quelques exemples d'application de l'algorithme de tomographie des temps de première arrivée défini au chapitre précédent. La formulation de ce nouvel algorithme repose sur un changement de méthode pour la minimisation de la fonction coût associée au problème de tomographie. Ce changement de méthode ne modifie cependant pas la nature du problème à résoudre, à savoir un problème non-linéaire et mal posé<sup>1</sup>. En effet, la fonction coût à minimiser n'est généralement pas quadratique, l'algorithme de tomographie peut alors converger vers un minimum secondaire, et l'existence et l'unicité de la solution ne sont pas assurées. Toutes ces contraintes font de la paramétrisation du schéma d'inversion l'étape clé dans l'application d'un algorithme de tomographie des temps de première arrivée. Cette paramétrisation dépend à la fois de la nature des données, du type d'acquisition, du contexte de l'étude, de l'algorithme utilisé mais surtout de l'expérience et du savoir-faire du géophysicien. Pour pouvoir obtenir les résultats de tomographie présentés dans ce chapitre, nous avons dû définir et acquérir notre propre savoir-faire tomographique. L'acquisition de ce savoir-faire a nécessité de nombreuses simulations pour des jeux de données et de paramétrisation différents. La réalisation d'un grand nombre de simulations a été rendue possible par la rapidité d'exécution de l'algorithme de tomographie, typiquement de l'ordre de quelques minutes pour les simulations en 2-D présentées dans ce chapitre. Dans le cadre de ce travail, nous choisissons de présenter tout d'abord des résultats de tomographie en réfraction obtenus sur des jeux de données synthétiques en 2-D et 3-D qui nous permettent de valider le nouveau schéma d'inversion. Nous présentons enfin un exemple d'application sur un jeu de données réelles qui nous permet d'illustrer les propriétés du nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée.

## 4.1 Un savoir-faire tomographique

Un algorithme de tomographie des temps de première arrivée est un outil qui permet de déterminer un modèle de vitesse le plus vraisemblablement à l'origine des temps de première arrivée mesurés à la surface. Le modèle obtenu dépend donc des temps de première arrivée observés mais surtout de la paramétrisation du schéma d'inversion définie par l'utilisateur, laquelle doit assurer la convergence du schéma itératif vers le minimum de la fonction coût. Les paramètres du schéma d'inversion sont le modèle de vitesse initial, le préconditionnement et la valeur du

---

1. "A change in mathematical method does not change the nature of physical difficulties to be solved, but may only provide more efficient tools", d'après [Podvin and Lecomte, 1991].

pas appliqués au gradient de la fonction coût à chaque itération et le critère d'arrêt. Le savoir-faire tomographique consiste à déterminer la meilleure paramétrisation du schéma d'inversion pour obtenir le meilleur modèle de vitesse possible.

#### 4.1.1 Le modèle de vitesse initial

L'utilisation d'un schéma itératif local pour la minimisation de la fonction coût associée au problème de tomographie des temps de première arrivée implique de définir un modèle de vitesse initial. Le modèle de vitesse obtenu après inversion dépend directement du choix de ce modèle de vitesse initial. Le problème de la tomographie des temps de première arrivée est un problème non-linéaire, la fonction coût à minimiser peut alors posséder des minimums secondaires. C'est la raison pour laquelle, on cherche généralement à définir un modèle de vitesse initial le plus proche possible du modèle recherché. Dans le cadre de travail, nous construisons le modèle de vitesse initial avec pour seule contrainte que celui-ci soit plus rapide que le modèle de vitesse recherché, c'est-à-dire que les résidus initiaux des temps de première arrivée ( $t_{obs} - t$ ) sont positifs. Nous justifions ce choix, en partie, par le fait qu'un modèle de vitesse initial plus lent serait à l'origine de perturbations de vitesse positives localisées proches de la surface qui ne permettraient pas ensuite d'expliquer le modèle en profondeur. Cette "recette" est valable pour des applications de tomographie en réfraction, mais elle ne s'applique pas nécessairement à tous les types d'acquisition. Par exemple, Baina [1998] montre qu'un modèle de vitesse initial plus lent que le modèle recherché est préférable pour des applications de tomographie entre puits.

#### 4.1.2 Le préconditionnement

A chaque itération de la méthode de plus grande descente, nous choisissons d'appliquer un opérateur de préconditionnement [Cruse et al., 1990], [Fomel and Claerbout, 2003] au gradient de la fonction coût. Ce préconditionnement a pour objectif d'ajuster les disparités causées par la géométrie d'acquisition et ainsi d'améliorer la rapidité de convergence du schéma d'inversion et la qualité de la solution obtenue. Dans le cadre de ce travail, le préconditionnement appliqué au gradient de la fonction coût consiste essentiellement en un filtrage gaussien. Nous choisissons de faire varier la longueur du filtrage appliqué au gradient de la fonction coût en deux étapes. Pour les premières itérations du schéma d'inversion, le gradient de la fonction coût est fortement lissé, de façon à répartir globalement la perturbation de vitesse appliquée au modèle. Ensuite, dans un second temps le filtrage est relâché, de façon à pouvoir déterminer des perturbations locales du modèle de vitesse.

#### 4.1.3 La valeur maximale du pas

La valeur du pas appliqué à chaque itération au gradient de la fonction coût a pour objectif principal d'assurer la minimisation de la fonction coût le long de la direction donnée par le gradient. Théoriquement, le schéma itératif de la méthode de plus grande descente est optimal pour des valeurs de pas infiniment petites. En pratique, la valeur du pas est définie comme le minimum d'une parabole interpolée à partir de plusieurs valeurs de la fonction coût calculées pour différentes valeurs de ce pas [Tarantola, 1987a]. Dans le cadre de ce travail, nous choisissons de contraindre le schéma d'inversion en définissant une valeur maximale de pas à appliquer

au gradient. L'utilisation d'une valeur maximale permet de stabiliser l'inversion en contraignant l'algorithme à faire à chaque itération un petit pas dans la direction de descente. Cette contrainte peut aussi avoir pour conséquence d'augmenter le nombre d'itérations nécessaires à la convergence de l'algorithme.

#### 4.1.4 Le critère d'arrêt

La définition du critère d'arrêt du schéma itératif d'inversion est directement liée à la définition de la qualité du modèle de vitesse obtenu. Le critère d'arrêt dépend alors essentiellement de l'expérience de l'utilisateur qui décide d'arrêter le processus itératif quand le modèle de vitesse obtenu lui semble satisfaisant. Dans la pratique, le critère d'arrêt peut être défini à partir de plusieurs valeurs : une valeur maximale d'itérations à réaliser, une valeur minimale de fonction coût à atteindre, une valeur minimale du pas appliqué au gradient de la fonction coût. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas défini de critère d'arrêt préférentiel, nous utilisons un des critères définis ci-dessus en fonction de l'application considérée.

## 4.2 Données synthétiques 2-D

Dans cette partie, nous utilisons le modèle de vitesse synthétique 2-D BP EAGE [Billette and Brandsberg-Dahl, 2005]. A partir de ce jeu de données, nous avons réalisé un grand nombre de simulations qui nous ont permis d'acquérir un savoir-faire indispensable à l'application d'un algorithme de tomographie des temps de première arrivée.

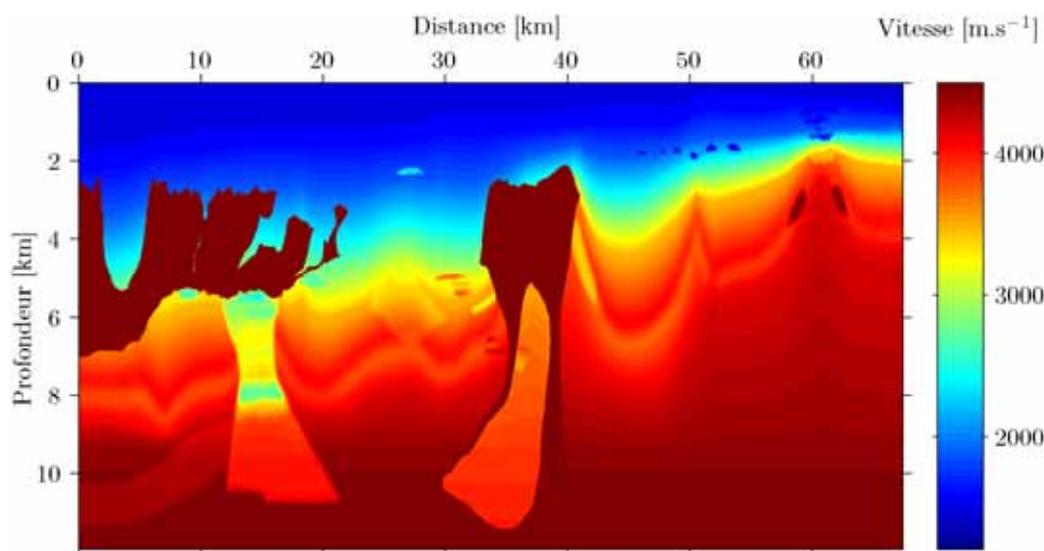


Fig. 4.1 – *Modèle de vitesse BP EAGE utilisé pour la génération de sismogrammes synthétiques, [Billette & Brandsberg-Dahl, 2005].*

Le modèle de vitesse BP EAGE défini par Billette et Brandsberg-Dahl [2005] mesure environ 67 km en longueur et 12 km en profondeur (Fig. 4.1). La discrétisation du modèle avec une maille carrée de 12.5 m donne une grille de taille  $[956 \times 5395]$ , soit environ 5.2 millions de mailles.

### 4.2.1 Modèle de vitesse observé et données synthétiques

Billette et Brandsberg-Dahl [2005] décrivent les principales étapes de construction du modèle de vitesse

- générer une couche d'eau avec une vitesse constante de  $1485 \text{ m.s}^{-1}$ ,
- construire des couches de sédiments compactes et lisser les interfaces entre ces sédiments,
- construire et insérer des corps de sel dans le modèle, avec une vitesse constante de  $4510 \text{ m.s}^{-1}$  pour le corps de sel situé à gauche et de  $4790 \text{ m.s}^{-1}$  pour le corps de sel situé à droite (Fig. 4.1),
- définir manuellement un certain nombre d'anomalies et les insérer de manière lisse dans le modèle de vitesse,
- définir des valeurs de réflectivité à partir de données réelles et les appliquer à la densité du modèle.

La partie gauche du modèle est composée essentiellement d'un corps de sel complexe rugueux avec des inclusions de vitesse lentes se trouvant sous la structure saline. Cette partie du modèle est représentative de la géologie que l'on peut rencontrer en eaux profondes dans le Golfe du Mexique. La partie centrale du modèle est construite autour d'un dôme de sel profondément enraciné dans le milieu. Cette partie du modèle est aussi représentative du Golfe de Mexique et de l'Afrique de l'Ouest. La partie droite du modèle est presque exclusivement sans structure saline. La géologie de cette partie du modèle est commune à des zones telles que la Mer Caspienne et la Mer du Nord. Le champ de vitesse possède des variations significatives dans sa composante grande longueur d'onde et plusieurs petites anomalies de vitesse. La taille, la forme et la vitesse des anomalies sont variables.

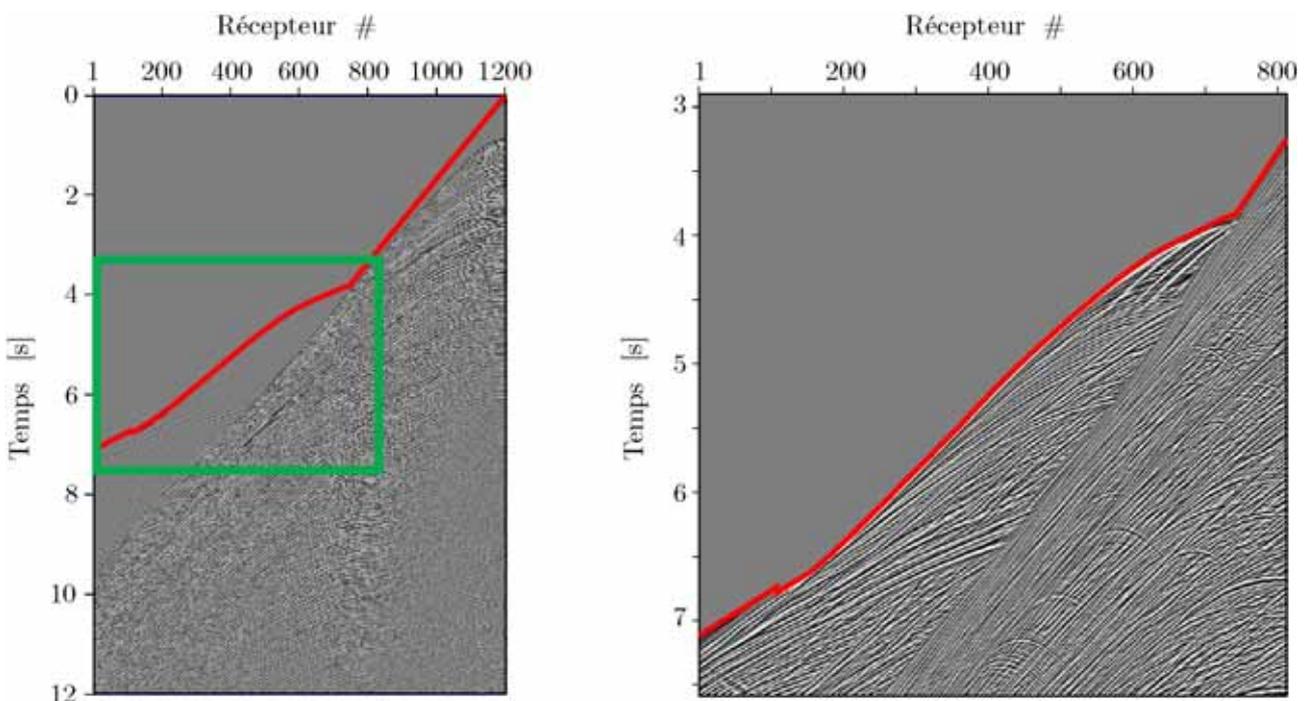


Fig. 4.2 – a) Sismogramme synthétique généré par un algorithme de modélisation par différences finies acoustique temps à partir du modèle BP EAGE. La ligne rouge représente les temps de première arrivée pointés automatiquement à partir du premier mouvement, b) un zoom sur le sismogramme qui correspond au rectangle vert.

Des sismogrammes synthétiques (Fig. 4.2) ont été générés à partir du modèle de vitesse BP EAGE par un algorithme de modélisation par différences finies acoustique temps. Ces sismogrammes simulent les enregistrements d'une acquisition marine, de type *streamer*, de 15 km de long avec un intervalle de 12.5 m entre récepteurs et de 50 m entre sources. Les récepteurs sont situés à gauche de la source, à une profondeur de 12.5 m. La première colonne à gauche du modèle de vitesse a été dupliquée pour permettre la génération des données synthétiques sur l'ensemble du modèle. 1348 points de tir ont ainsi été générés, chacun avec 1201 récepteurs.

#### 4.2.2 Les temps de première arrivée

Nous utilisons un outil de pointé automatique, basé sur la détection du premier mouvement, pour déterminer la valeur des temps de première arrivée sur les sismogrammes (Fig. 4.2). Les sismogrammes ne sont pas bruités, ce qui facilite le pointé et donc la qualité de l'estimation des temps de première arrivée.

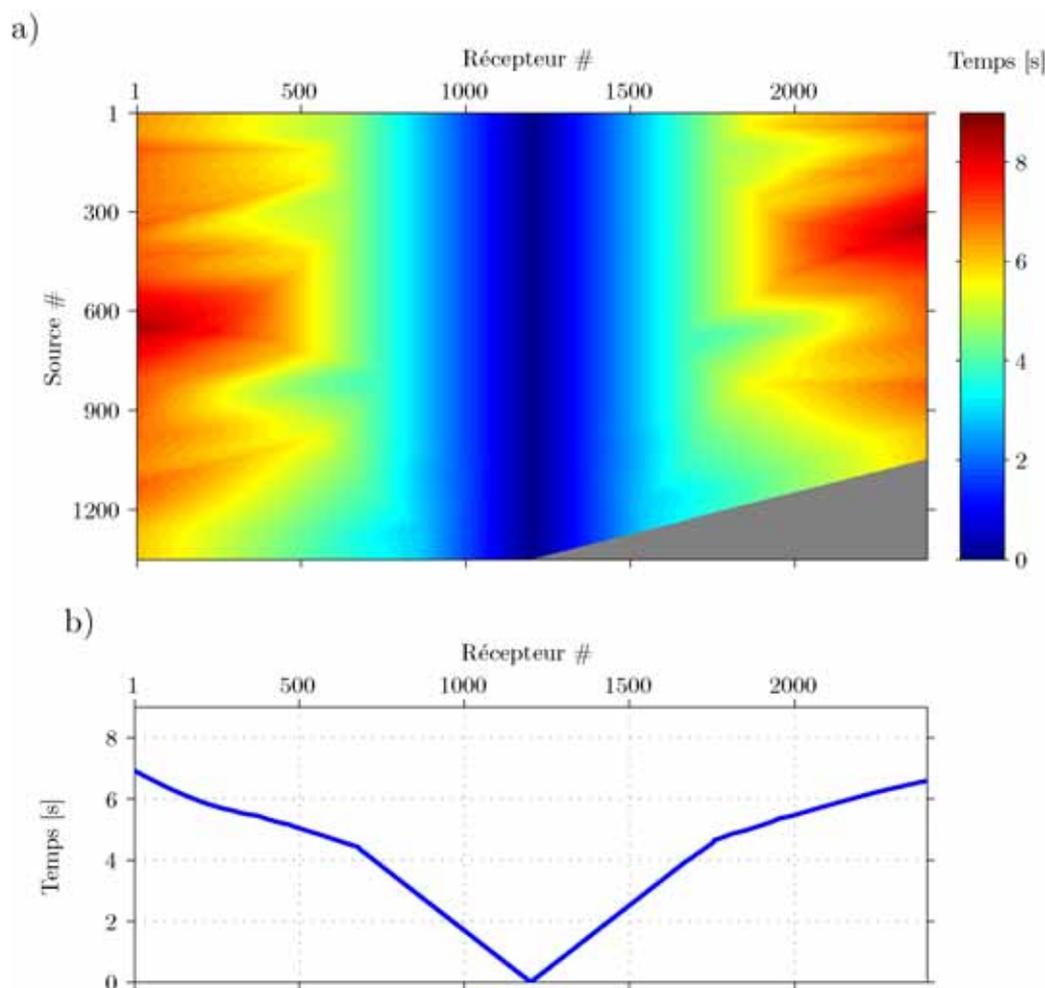


Fig. 4.3 – a) Carte des temps de première arrivée observés pour 1348 sources et 2401 récepteurs. La partie grisée correspond aux acquisitions contenant seulement 1201 récepteurs placés à gauche de la source, b) les temps de première arrivée observés pour une source située en (12.5 m, 60 km) et tous les récepteurs.

Pour étudier la capacité de l'algorithme de tomographie à gérer un grand nombre de données observées, nous choisissons d'augmenter artificiellement le nombre de récepteurs. Pour cela, nous appliquons le principe de réciprocité [Arntsen and Carcione, 2000] qui permet de déterminer les temps de première arrivée pour une acquisition symétrique de récepteurs positionnés à droite de la source. Le nombre total de données observées par point de tir est alors de 2401, et le nombre total de données observées est d'environ 3.2 millions. La figure (Fig 4.3 a) représente la carte des temps de première arrivées observés pour toutes les sources et tous les récepteurs. Les temps de première arrivées pour une source de coordonnées (12.5 m, 60 km) et 2401 récepteurs sont représentés (Fig 4.3 b). Les coordonnées des sources et des récepteurs correspondent respectivement à la profondeur et à la distance.

### 4.2.3 Paramétrisation du schéma d'inversion

Nous choisissons pour modèle de vitesse initial (Fig. 4.4), un modèle possédant une loi de vitesse linéaire, de  $3000 \text{ m.s}^{-1}$  à  $6000 \text{ m.s}^{-1}$ , en fonction de la profondeur, de 0 km à 12 km. Le calcul des temps de première arrivées à partir de ce modèle initial, en utilisant le solveur eikonal défini par Podvin et Lecomte [1991], permet de déterminer la carte des résidus initiaux entre les temps observés et calculés pour toutes les positions de sources et de récepteurs (Fig. 4.5). La valeur de la racine carrée de la moyenne des carrés des résidus des temps, aussi appelée valeur *Root Mean Square* (RMS), est environ de 1.99 s.

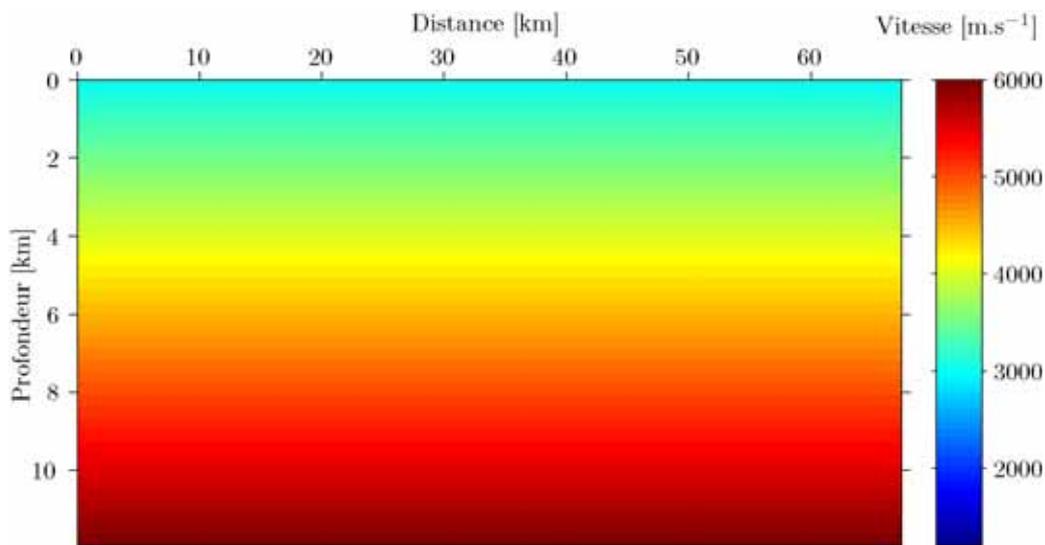


Fig. 4.4 – *Modèle de vitesse initial choisi pour le processus de minimisation.*

Le préconditionnement appliqué au gradient de la fonction coût consiste essentiellement en un filtrage gaussien. La longueur du filtrage appliqué au gradient de la fonction coût varie en deux étapes. Pour les premières itérations du schéma d'inversion, la longueur du filtre est de 6 km horizontalement et verticalement. Pour les dernières itérations, la longueur du filtre est de 6 km en longueur et de 1 km en profondeur. Pour assurer la stabilité et la convergence de l'algorithme, nous choisissons une valeur maximale du pas appliqué au gradient de la fonction

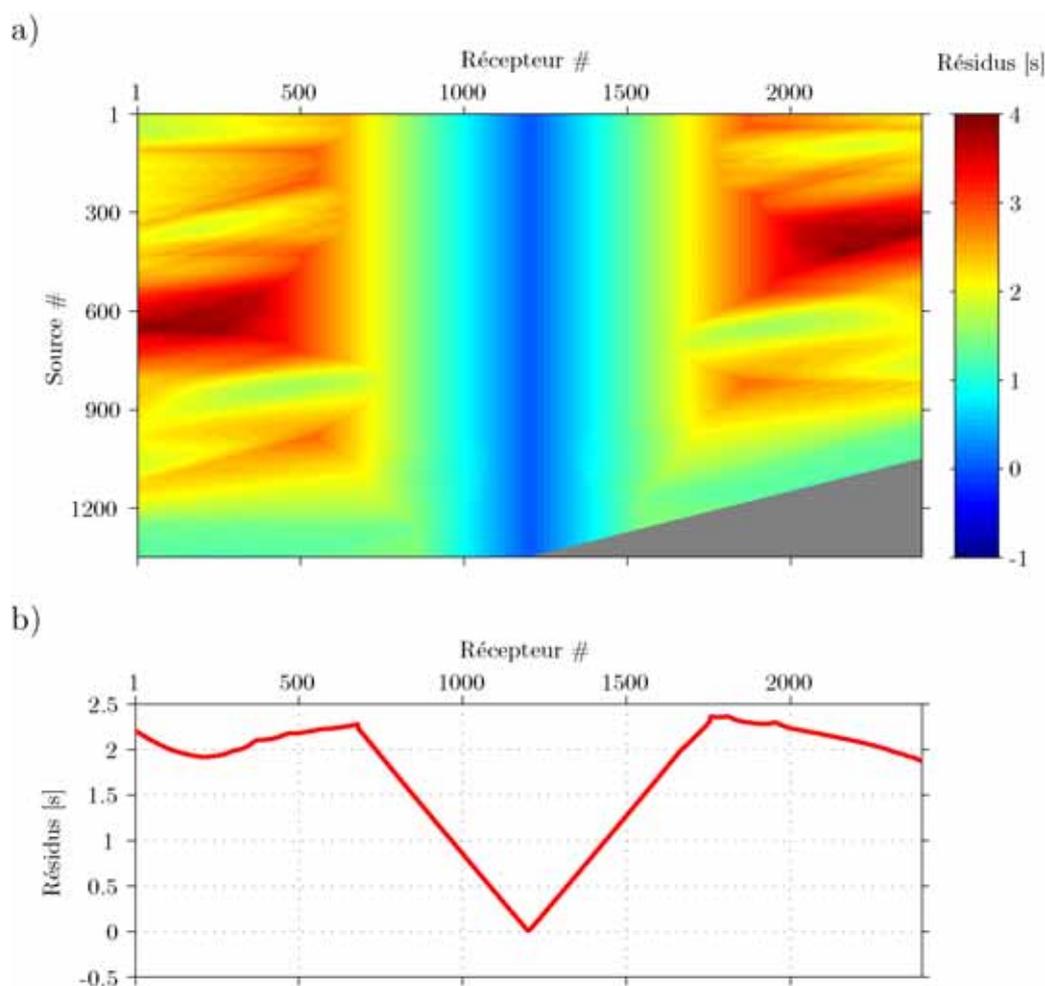


Fig. 4.5 – a) Carte des résidus initiaux en temps pour toutes les positions de sources et de récepteurs. La partie grisée correspond aux acquisitions contenant seulement 1201 récepteurs placés à gauche de la source, b) les résidus initiaux en temps pour une source située en (12.5 m, 60 km) et tous les récepteurs.

coût égale à  $200 \text{ m.s}^{-1}$ . Le schéma itératif est arrêté lorsque la valeur du pas calculée à chaque itération est nulle, i.e. lorsque l'algorithme de tomographie ne modifie plus le modèle courant.

#### 4.2.4 Résultats de tomographie

Avant de présenter les résultats obtenus par le nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée sur ce jeu de données, nous définissons les notions de limite de couverture des rais et de modèle vrai lissé. Un tracé de rais *a posteriori* réalisé à partir du modèle de vitesse BP EAGE (Fig. 4.6 a) pour plusieurs positions de sources et de récepteurs permet de définir une zone grisée, pour laquelle les rais, et donc les temps de première arrivée, ne contiennent aucune information. On ne peut donc pas espérer retrouver cette partie du modèle avec un algorithme de tomographie des temps de première arrivée, c'est ce que nous appelons la limite de couverture des rais. Le modèle de vitesse BP EAGE possède des structures et des

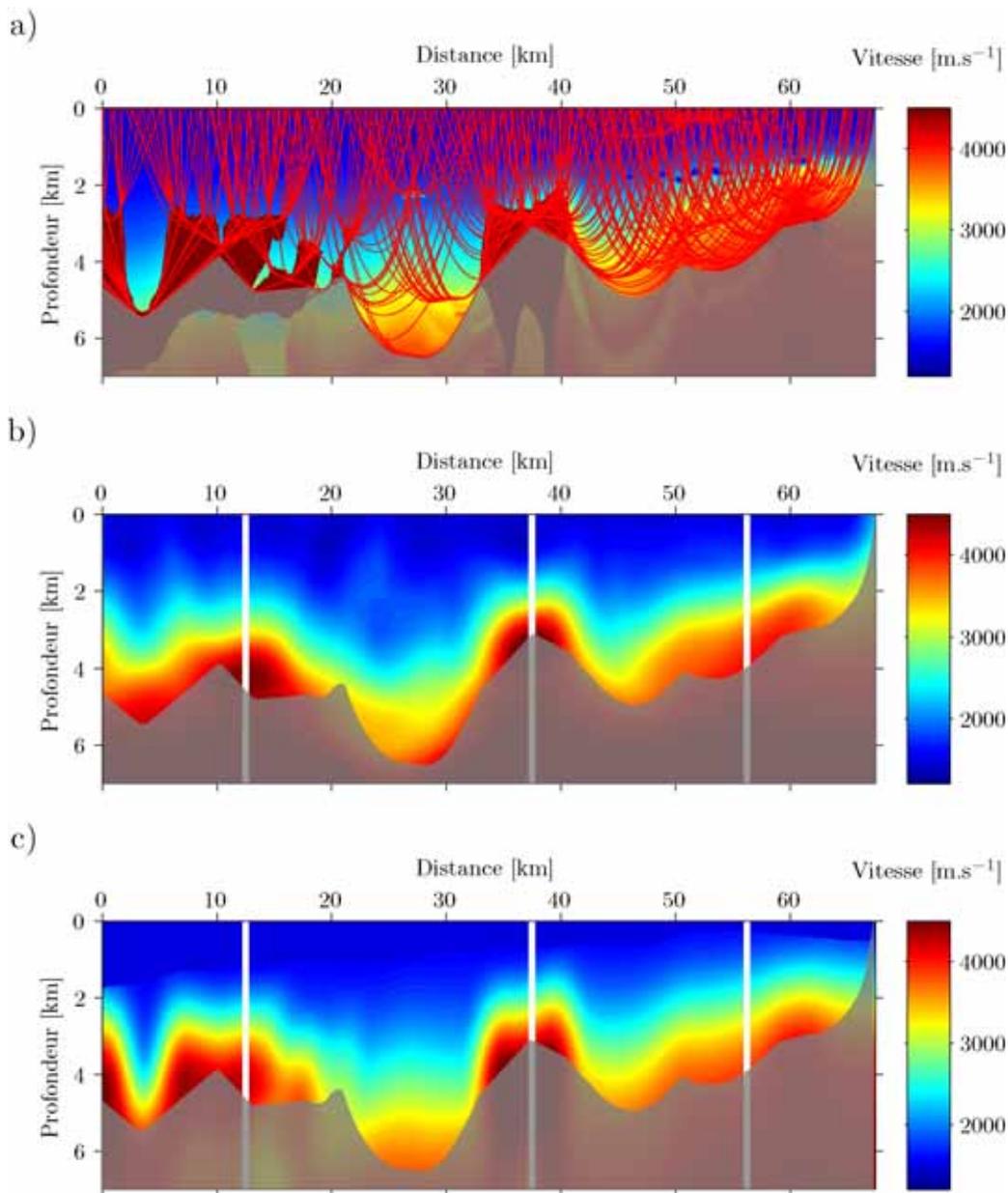


Fig. 4.6 – a) Tracé de rais *a posteriori* réalisé à partir du modèle observé pour définir une zone grisée pour laquelle les rais ne contiennent pas d'information, b) modèle de vitesse obtenu par l'algorithme de tomographie des temps de première arrivée, c) modèle vrai lissé pour obtenir un contenu spectral équivalent au modèle obtenu après inversion. Les lignes verticales blanches marquent la position des profils 1-D représentés (Fig. 4.7).

éléments de nature haute fréquence qu'un algorithme de tomographie des temps de première arrivée peut difficilement retrouver. Afin de pouvoir valider le résultat obtenu, nous choisissons de lisser le modèle de vitesse BP EAGE avec un filtre gaussien de longueurs horizontale et verticale d'environ 3 km, le résultat obtenu est appelé modèle vrai lissé (Fig. 4.6 c). Ce modèle vrai lissé possède approximativement le même contenu spectral que le modèle obtenu par le schéma d'inversion (Fig. 4.6 b). Le modèle inversé présenté ici est obtenu après 55 itérations

du schéma itératif de plus grande descente. Pour donner un ordre de grandeur, cela représente un temps de calcul d'environ 5 minutes en utilisant 512 cœurs sur le supercalculateur défini à la partie (3.4.3). La valeur finale de la racine de la moyenne des carrés des résidus en temps est environ de 0.06 s, la valeur initiale est de l'ordre de 1.99 s. On constate que les modèles inversé et vrai lissé ont une apparence très proche. On peut noter l'influence prépondérante de la couverture des rais dans le modèle observé (Fig. 4.6 a). En effet, sur la partie gauche du modèle, la couverture des rais est faible et ne permet pas une estimation correcte du modèle de vitesse par l'algorithme de tomographie des temps de première arrivée.

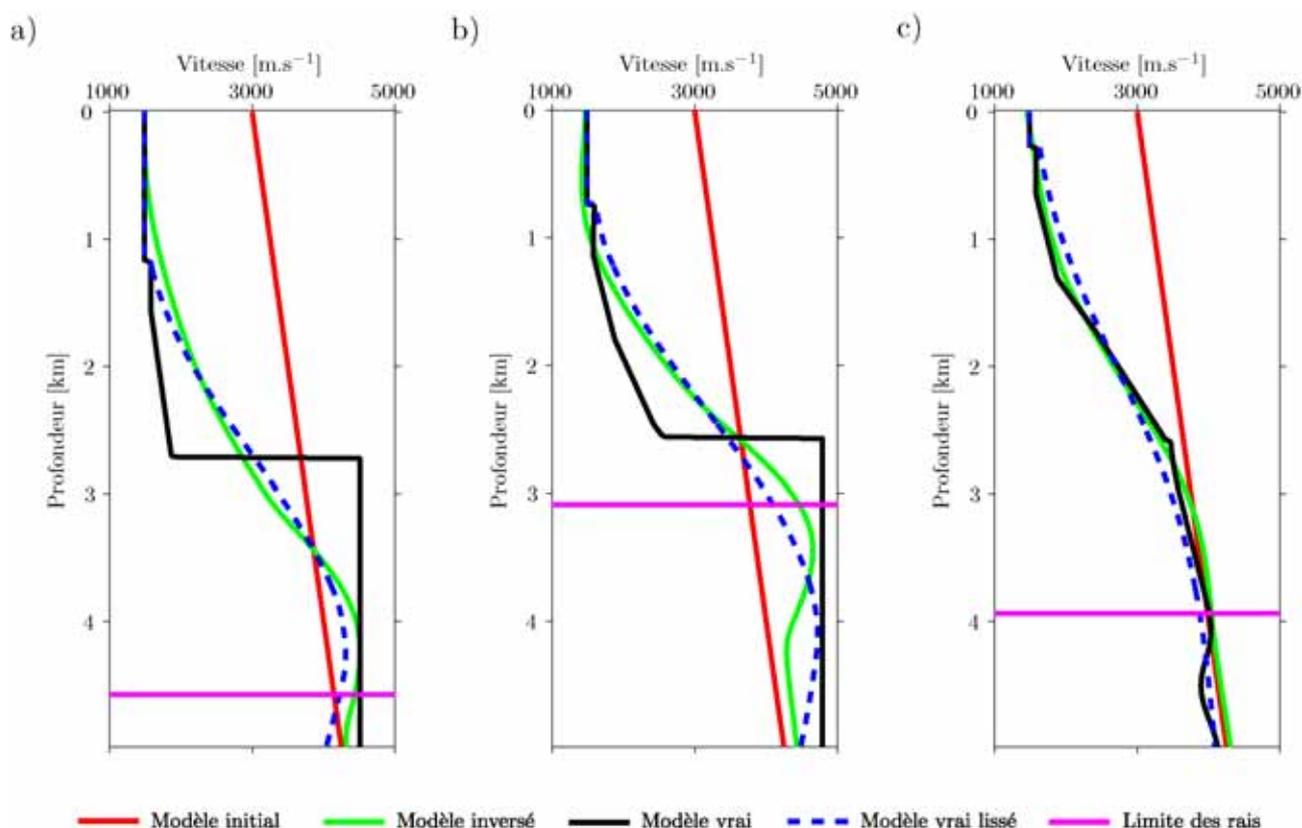


Fig. 4.7 – Profils de vitesse 1-D à différentes positions dans les modèles de vitesse a) 12.5 km, b) 37.5 km, c) 56.25 km. La courbe rouge correspond au modèle initial, la courbe verte au modèle inversé, la courbe noire au modèle vrai, la courbe bleue au modèle vrai lissé et la courbe rose à la limite de la couverture des rais.

Les profils de vitesse 1-D représentés à différentes positions, 12.5 km, 37.5 km et 56.25 km, dans les modèles (Fig. 4.7) permettent de valider le fait que les modèles de vitesse inversé et vrai lissé sont proches à condition que la couverture des rais soit suffisante. Le modèle inversé a été obtenu sans fixer préalablement le fond de l'eau. Les résidus finaux définis entre les temps observés et les temps calculés à partir du modèle inversé (Fig. 4.8) permettent de vérifier les temps de première arrivée observés sont bien expliqués par le modèle de vitesse inversé.

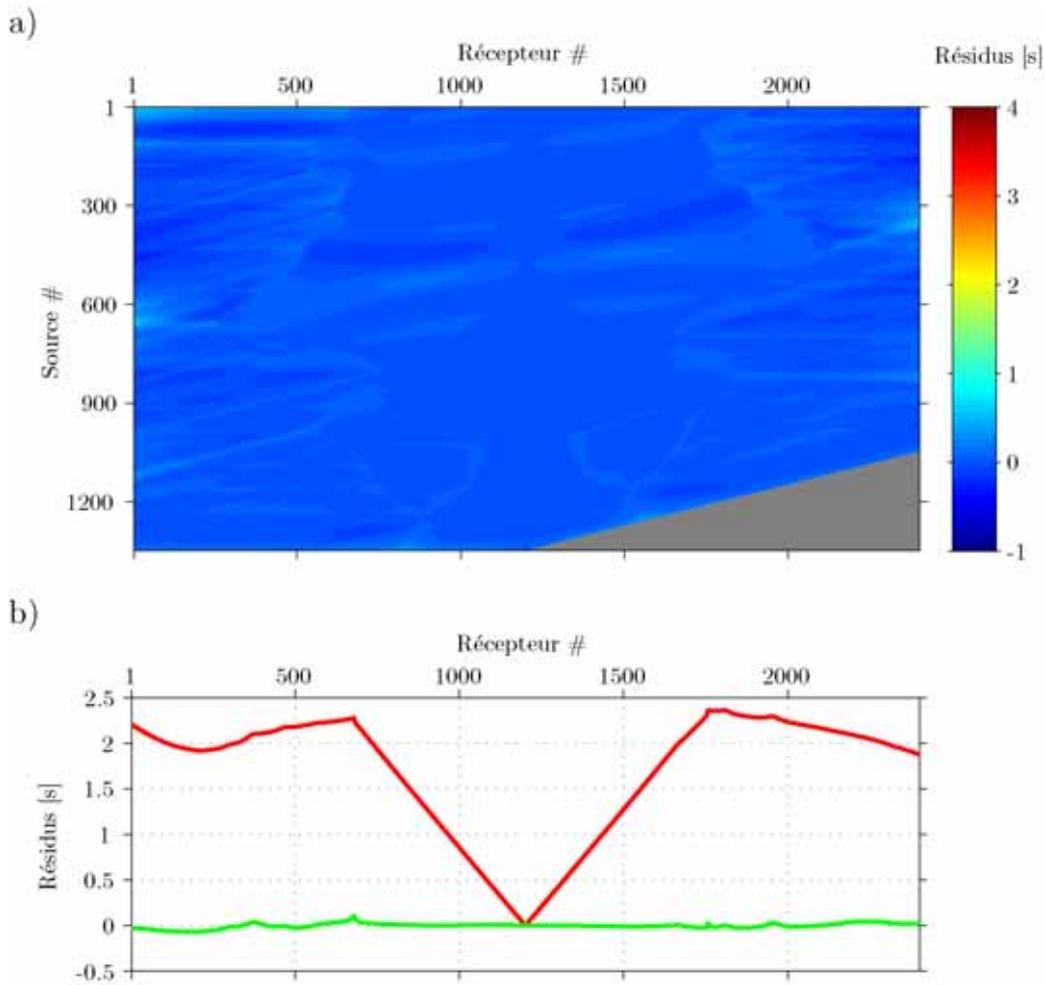


Fig. 4.8 – a) Carte des résidus fins en temps pour toutes les positions de sources et de récepteurs. La partie grisée correspond aux acquisitions contenant seulement 1201 récepteurs placés à gauche de la source, b) comparaison des résidus initiaux (en rouge) et des résidus fins (en vert) en temps pour une source située en (12.5 m, 60 km) et tous les récepteurs.

### 4.3 Données synthétiques 3-D

Dans cette partie, nous utilisons une version modifiée du modèle de vitesse synthétique 3-D Overthrust [Aminzadeh et al., 1997]. L'objectif de cette partie est de montrer que le nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée peut gérer des modèles de grande dimension et des grandes quantités de données observées. Les résultats présentés ici ont été obtenus grâce au savoir-faire acquis pour les applications en 2-D.

#### 4.3.1 Modèle de vitesse observé

Le modèle de vitesse Overthrust défini par Aminzadeh et al. [1997] mesure 20 km en longueur et en largeur et environ 4.5 km en profondeur (Fig. 4.9 a). La discrétisation du modèle avec une maille cubique de 50 m donne une grille de taille  $[94 \times 401 \times 401]$ , soit environ 15.1 millions

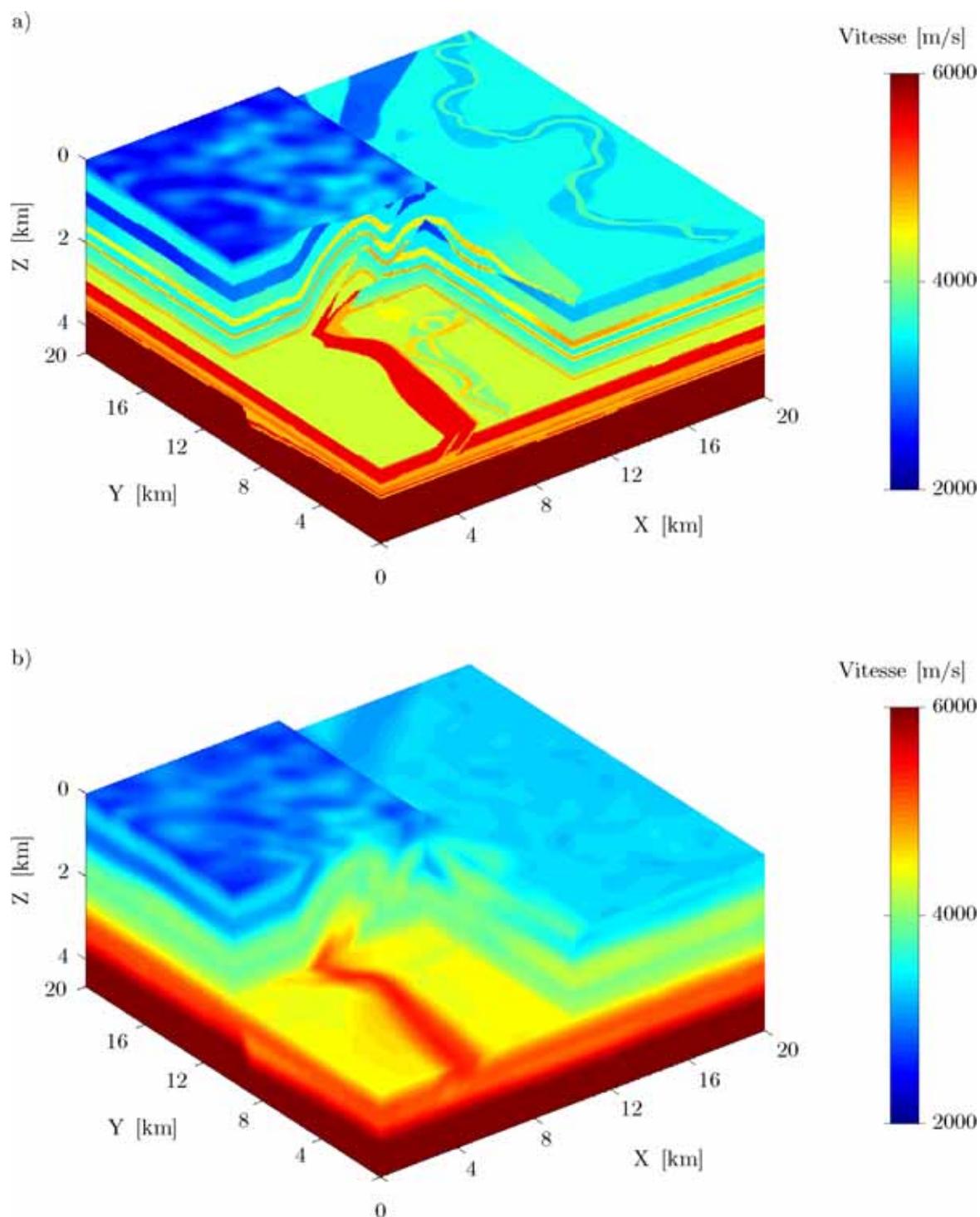


Fig. 4.9 – a) *Modèle de vitesse Overthrust original [Aminzadeh et al., 1995], b) modèle de vitesse Overthrust lissé défini pour l'application de tomographie des temps de première arrivée.*

de mailles. Aminzadeh et al. [1997] décrivent les principales caractéristiques du modèle de vitesse. Le modèle est défini à partir de 17 couches géologiques de complexités différentes et avec des vitesses allant de  $2500 \text{ m.s}^{-1}$  à  $6000 \text{ m.s}^{-1}$ . Le modèle présente deux chevauchements plus un chevauchement qui disparaît latéralement. La partie haute du modèle représente une

zone érodée avec des variations de vitesse importantes. De par sa construction en couches géologiques, le modèle de vitesse possède une structure haute fréquence avec des sauts de vitesse très importants. Cette structure haute fréquence affecte la précision numérique du solveur eikonal et crée une couverture des rais peu favorable à l'application d'un code de tomographie des temps de première arrivée. C'est la raison pour laquelle, nous choisissons de lisser le modèle Overthrust original avec un filtre gaussien de 800 m dans les trois dimensions (Fig. 4.9 b).

### 4.3.2 Les temps de première arrivée

A partir du modèle lissé, nous simulons une acquisition sismique en réfraction avec 400 sources spatialement réparties à la surface du modèle, chaque source possède 401  $\times$  401 récepteurs à la surface. L'*offset* maximal en longueur et en largeur est de 20 km. Les données observées (Fig. 4.10) sont calculées par le solveur eikonal défini par Podvin et Lecomte [1991]. Le nombre total de données observées est d'environ 64.3 millions. Les coordonnées des sources et des récepteurs correspondent respectivement aux dimensions Z, X et Y.

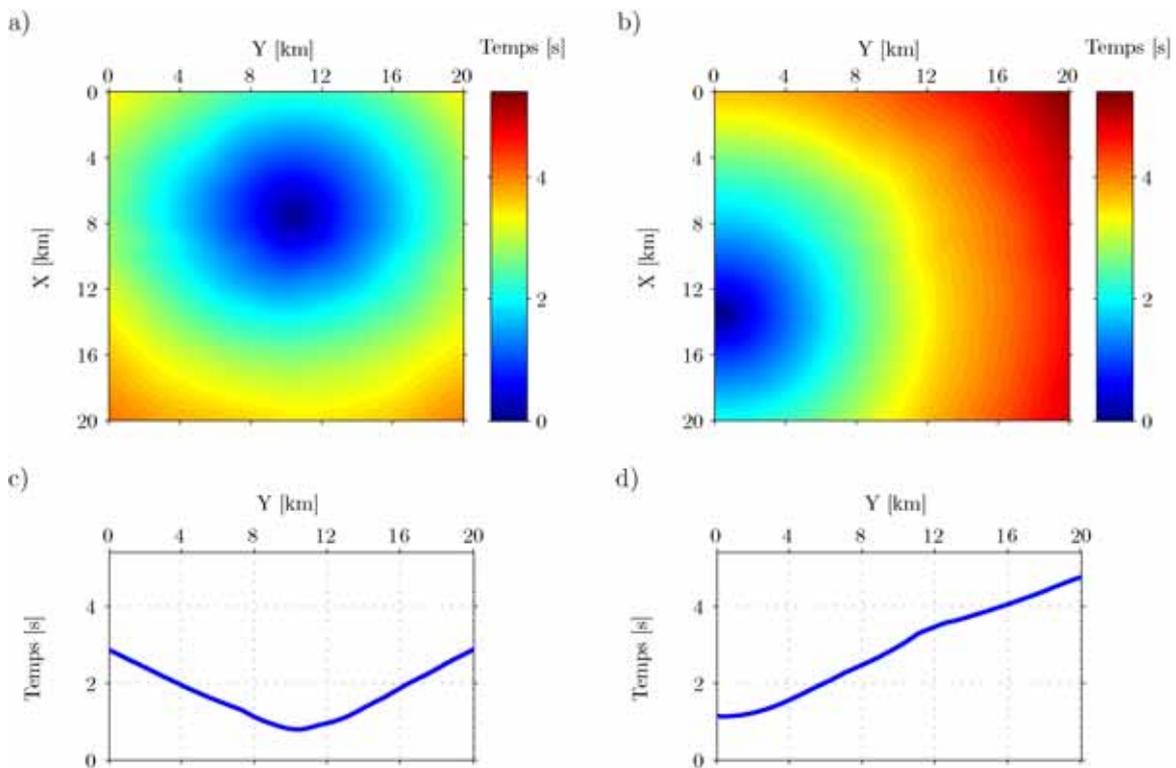


Fig. 4.10 – Cartes des temps de première arrivée calculés pour une source située en (0 km, 7.4 km, 10.4 km) a) et en (0 km, 13.4 km, 0.4 km) b). Les temps de première arrivée observés pour un récepteur situé en (0 km, 10 km) et une source située en (0 km, 7.4 km, 10.4 km) c) et en (0 km, 7.4 km, 10.4 km) d).

### 4.3.3 Paramétrisation du schéma d'inversion

Nous choisissons pour modèle de vitesse initial (Fig. 4.11), un modèle possédant une loi de vitesse linéaire, de  $5000 \text{ m.s}^{-1}$  à  $6000 \text{ m.s}^{-1}$ , en fonction de la profondeur, de 0 km à 4.5 km. Le calcul des temps de première arrivée à partir de ce modèle initial, en utilisant le solveur eikonal défini par Podvin et Lecomte [1991], permet de déterminer la carte des résidus initiaux entre les temps observés et calculés pour toutes les positions de sources et de récepteurs (Fig. 4.12). La valeur de la racine carrée de la moyenne des carrés des résidus des temps (RMS) est environ de 722.2 ms.

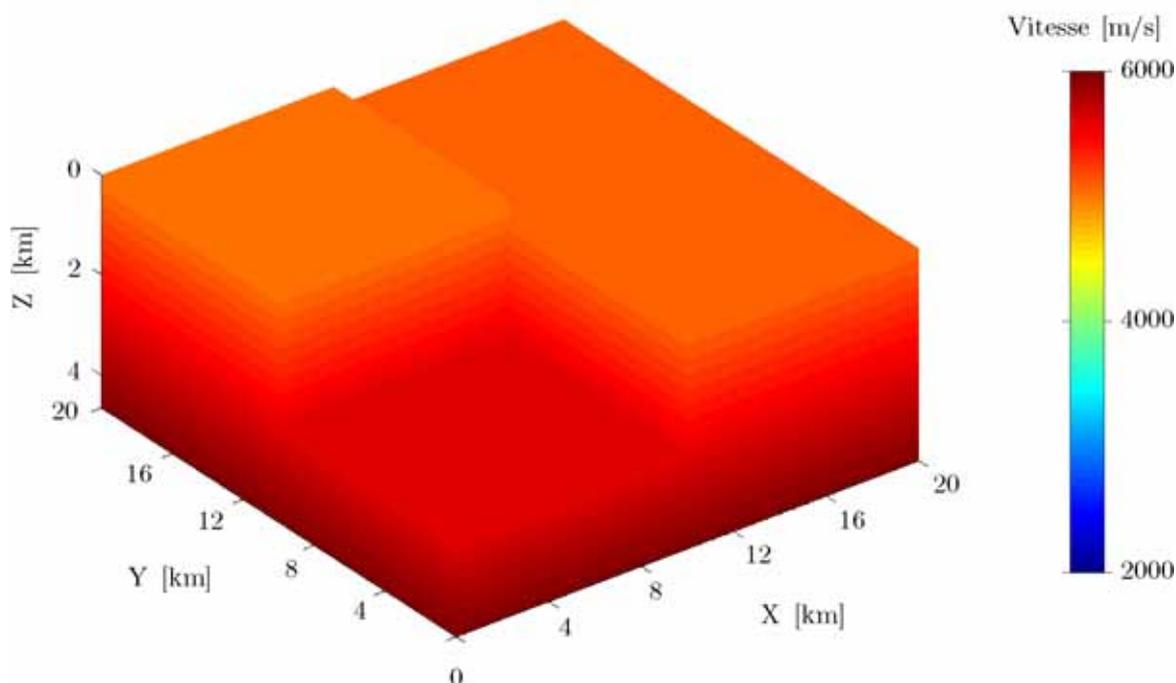


Fig. 4.11 – *Modèle de vitesse initial choisi pour le processus de minimisation.*

Le préconditionnement appliqué au gradient de la fonction coût consiste essentiellement en un filtrage gaussien. La longueur du filtrage appliqué au gradient de la fonction coût varie en deux étapes. Pour les premières itérations du schéma d'inversion, la longueur du filtre est de 6 km en longueur et en largeur et de 2 km en profondeur. Pour les dernières itérations, la longueur du filtre est de 2 km en longueur et en largeur et de 0.4 km en profondeur. Pour assurer la stabilité et la convergence de l'algorithme, nous choisissons une valeur maximale du pas appliqué au gradient de la fonction coût égale à  $200 \text{ m.s}^{-1}$ . Le schéma itératif est arrêté lorsque la valeur du pas calculée à chaque itération est nulle, i.e. lorsque l'algorithme de tomographie ne modifie plus le modèle courant.

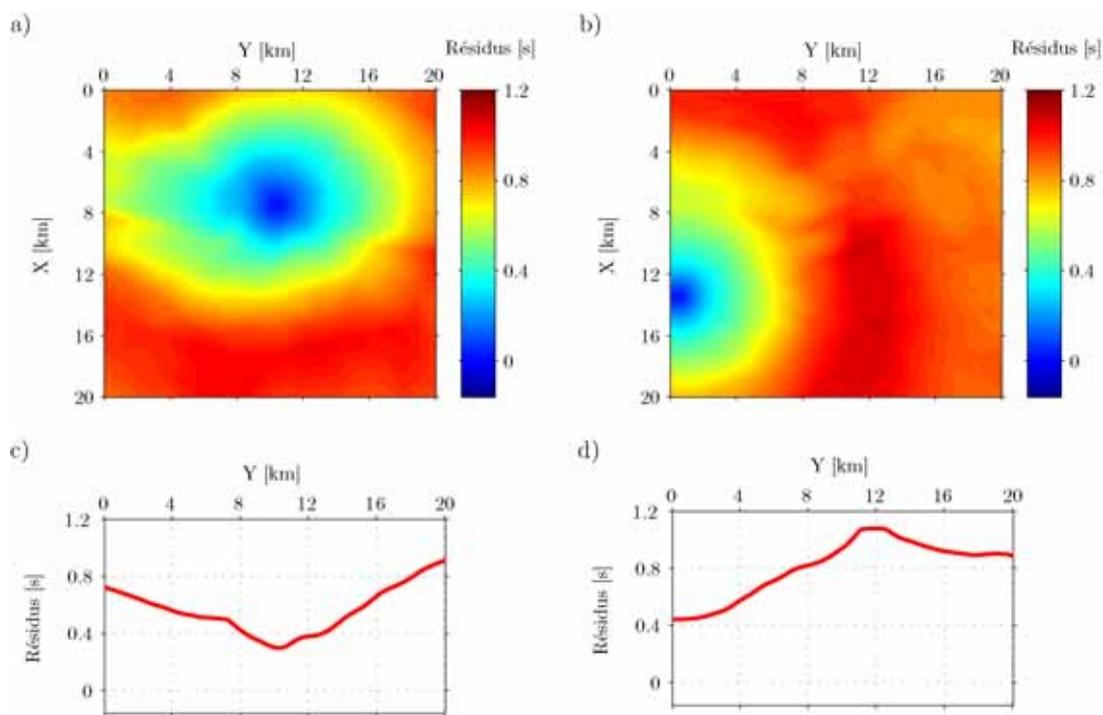


Fig. 4.12 – Cartes des résidus initiaux en temps calculés pour une source située en  $(0 \text{ km}, 7.4 \text{ km}, 10.4 \text{ km})$  a) et en  $(0 \text{ km}, 13.4 \text{ km}, 0.4 \text{ km})$  b). Les résidus initiaux en temps pour un récepteur situé en  $(0 \text{ km}, 10 \text{ km})$  et une source située en  $(0 \text{ km}, 7.4 \text{ km}, 10.4 \text{ km})$  c) et en  $(0 \text{ km}, 6.7 \text{ km}, 0.2 \text{ km})$  d).

#### 4.3.4 Résultats de tomographie

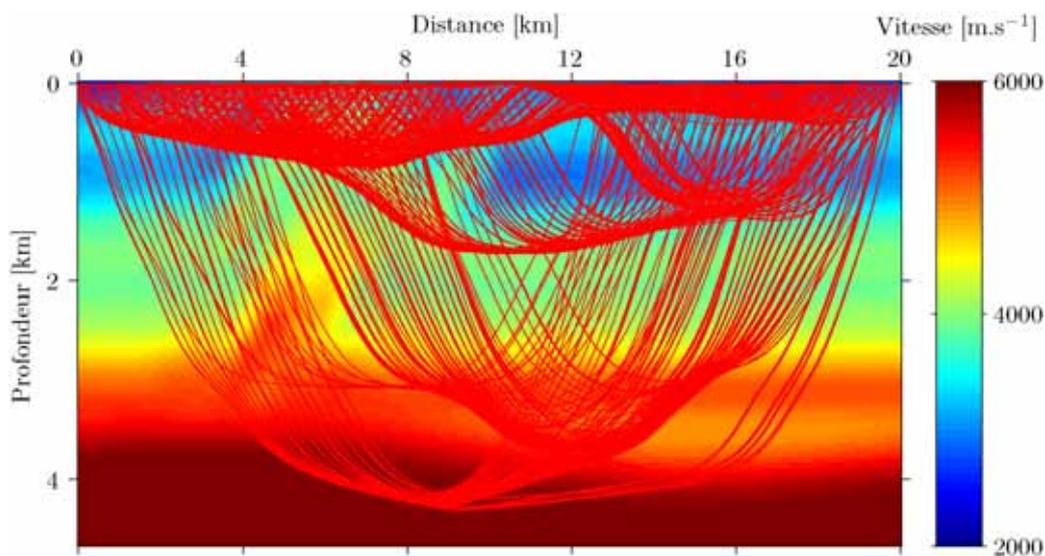


Fig. 4.13 – Tracé de rais *a posteriori* réalisé à partir d'une coupe 2-D du modèle observé en  $Y = 10 \text{ km}$  pour plusieurs positions de sources et de récepteurs positionnés à la surface.

La figure (Fig. 4.13) représente un tracé de rais a posteriori réalisé à partir d'une coupe 2-D du modèle observé en  $Y = 10$  km pour plusieurs positions de sources et de récepteurs positionnés à la surface. On peut noter la couverture inhomogène des rais sur une grande partie du modèle et la présence de nombreux rais subverticaux. Cette couverture inhomogène des rais est principalement due à la présence dans le modèle de structures à valeur de vitesse très élevée mais aussi à la présence de structures possédant des inversions de vitesse. Ces conditions rendent difficile l'estimation du modèle de vitesse à partir des temps de première arrivée. Nous choisissons de présenter les résultats de tomographie essentiellement sur la partie supérieure, de 0 km à 1 km environ, du modèle de vitesse où la couverture des rais est relativement homogène.

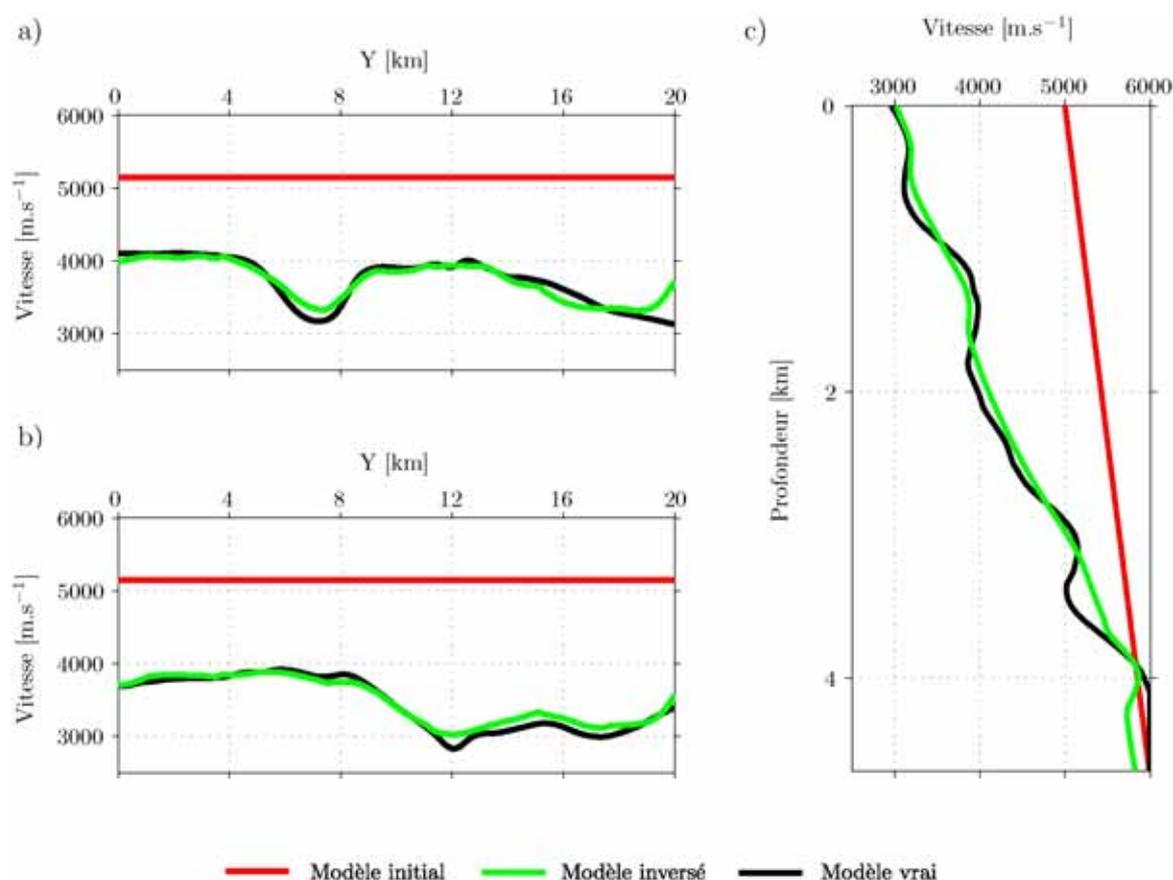


Fig. 4.14 – Profils de vitesse horizontaux 1-D à une profondeur constante de  $Z = 700$  m et à différentes positions dans les modèles de vitesse a)  $X = 10$  km et b)  $X = 15$  km, c) profil de vitesse vertical 1-D à  $X = 15$  km et  $Y = 10$  km. La courbe rouge correspond au modèle initial, la courbe verte au modèle inversé et la courbe noire au modèle recherché.

Le modèle inversé (Fig. 4.15 a) est obtenu après 60 itérations du schéma itératif de plus grande descente. Pour donner un ordre de grandeur, cela représente un temps de calcul d'environ 1 heure en utilisant 400 cœurs sur le supercalculateur défini à la partie (3.4.3). La valeur finale de la racine de la moyenne des carrés des résidus en temps est environ de 0.4 ms, la valeur initiale est de l'ordre de 722.2 ms. Les modèles inversé et recherché (Fig. 4.15 b) ont une apparence très proche, cette tendance est confirmée par des profils de vitesse 1-D à différentes positions

à travers les modèles (Fig. 4.14). Les résidus finaux définis entre les temps de première arrivée observés et ceux calculés à partir du modèle inversé (Fig. 4.16) permettent de confirmer que l'algorithme de tomographie a bien expliqué les temps de première arrivée observés.

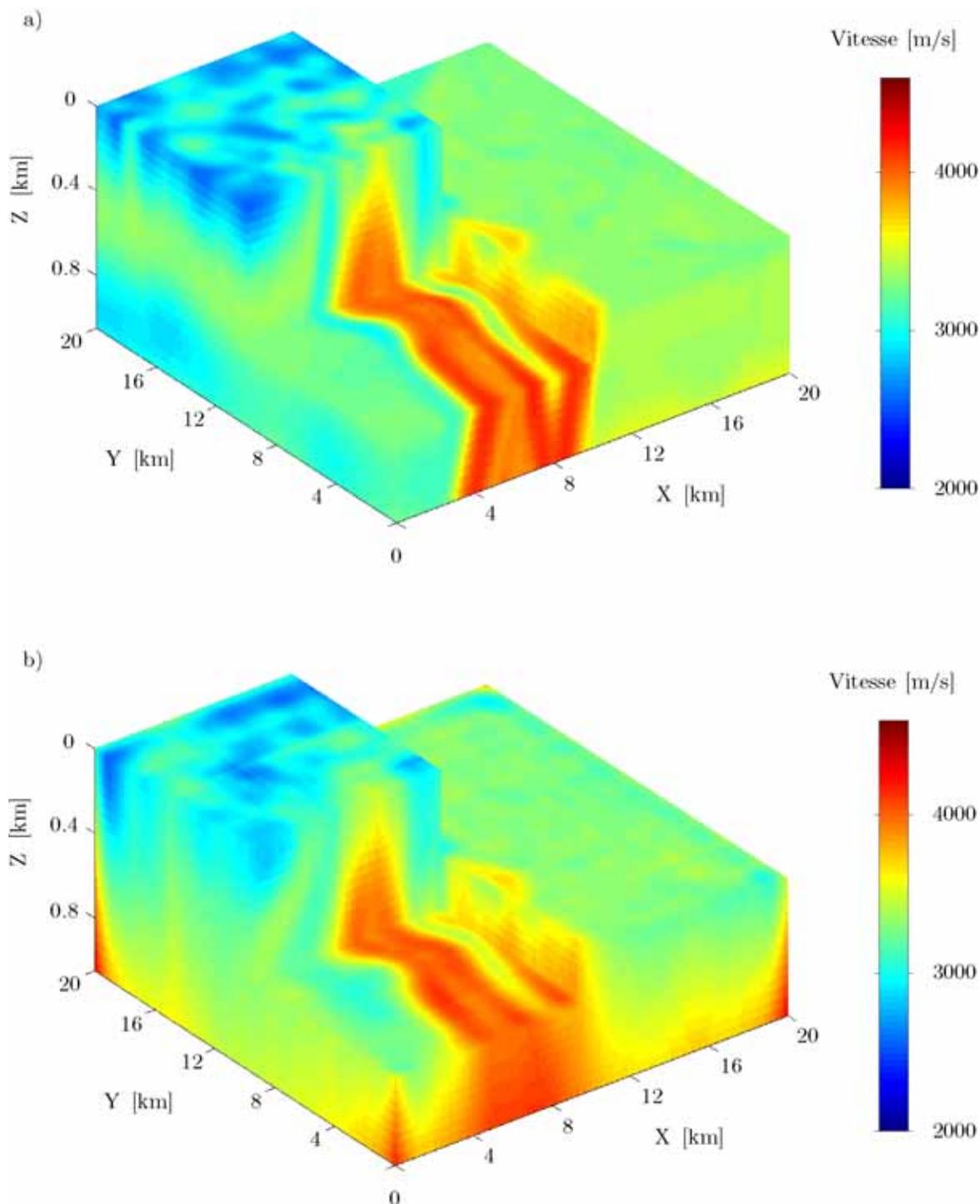


Fig. 4.15 – a) Modèle de vitesse obtenu par l'algorithme de tomographie des temps de première arrivée, b) modèle de vitesse que l'on cherche à déterminer. Les modèles de vitesse sont représentés pour une profondeur maximale de 1 km.

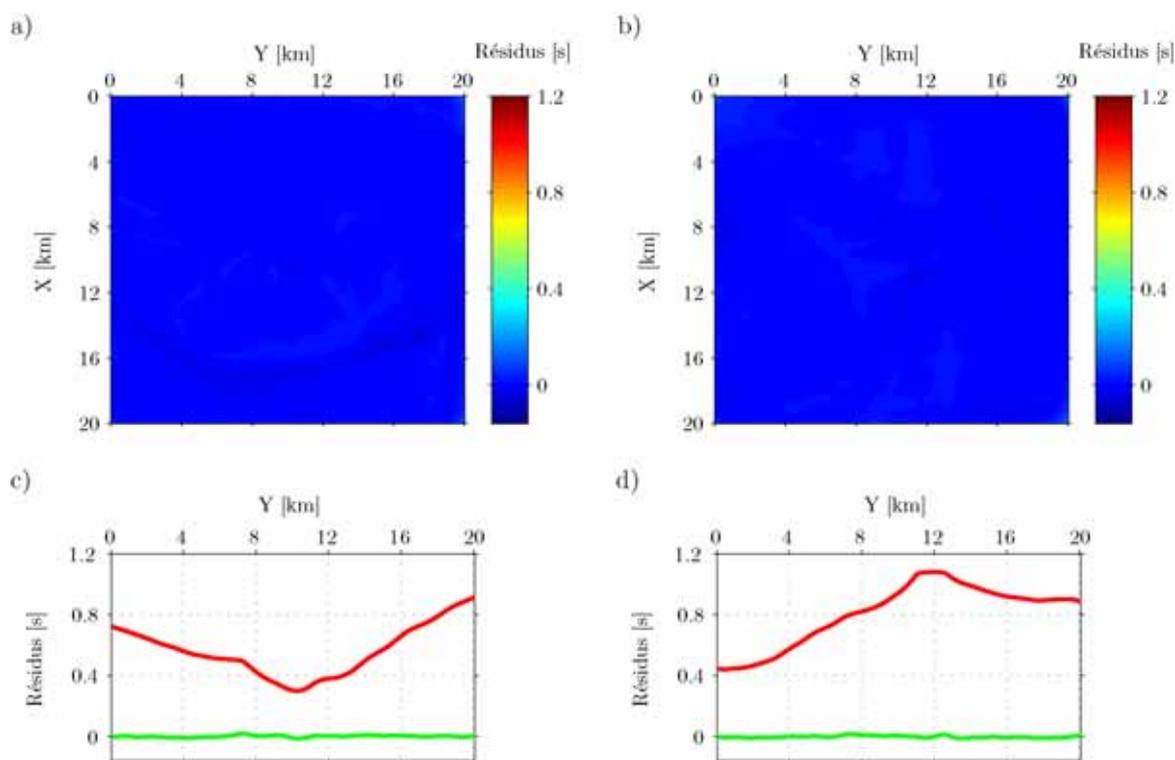


Fig. 4.16 – Cartes des résidus finaux en temps calculés pour une source située en  $(0 \text{ km}, 7.4 \text{ km}, 10.4 \text{ km})$  a) et en  $(0 \text{ km}, 13.4 \text{ km}, 0.4 \text{ km})$  b). Les résidus finaux en temps pour un récepteur situé en  $(0 \text{ km}, 10 \text{ km})$  et une source située en  $(0 \text{ km}, 7.4 \text{ km}, 10.4 \text{ km})$  c) et en  $(0 \text{ km}, 13.4 \text{ km}, 0.4 \text{ km})$  d).

## 4.4 Données réelles 2-D

Nous présentons ici un exemple d'application du nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée à un jeu de données réelles. Les objectifs de cette partie sont multiples. Tout d'abord nous voulons montrer que le savoir-faire acquis à partir de données synthétiques est transposable à des données réelles. Ensuite nous voulons étudier la stabilité du nouveau schéma d'inversion sur des données réelles bruitées, c'est à dire par exemple avec des erreurs de pointés, et du bruit ambiant. Enfin, nous voulons illustrer le fait que l'algorithme et la méthodologie mis en œuvre permettent d'utiliser un modèle de vitesse initial défini sans aucune connaissance *a priori*. Les temps de première arrivée pointés et les modèles de vitesse que nous utilisons pour valider les résultats que nous avons obtenus nous ont été fournis par Stéphane Operto et Jean-Xavier Dessa de l'Unité Mixte de Recherche Géosciences Azur.

### 4.4.1 L'acquisition des données

Les données utilisées dans cette partie ont été acquises pendant la campagne d'acquisition sismique KY0106 réalisée par l'*Institute for Frontier Research on Earth Evolution* (IFREE) à bord du R/V Kaiyo et avec pour maître d'œuvre le *Japan Marine Science and Technology* (JAM-

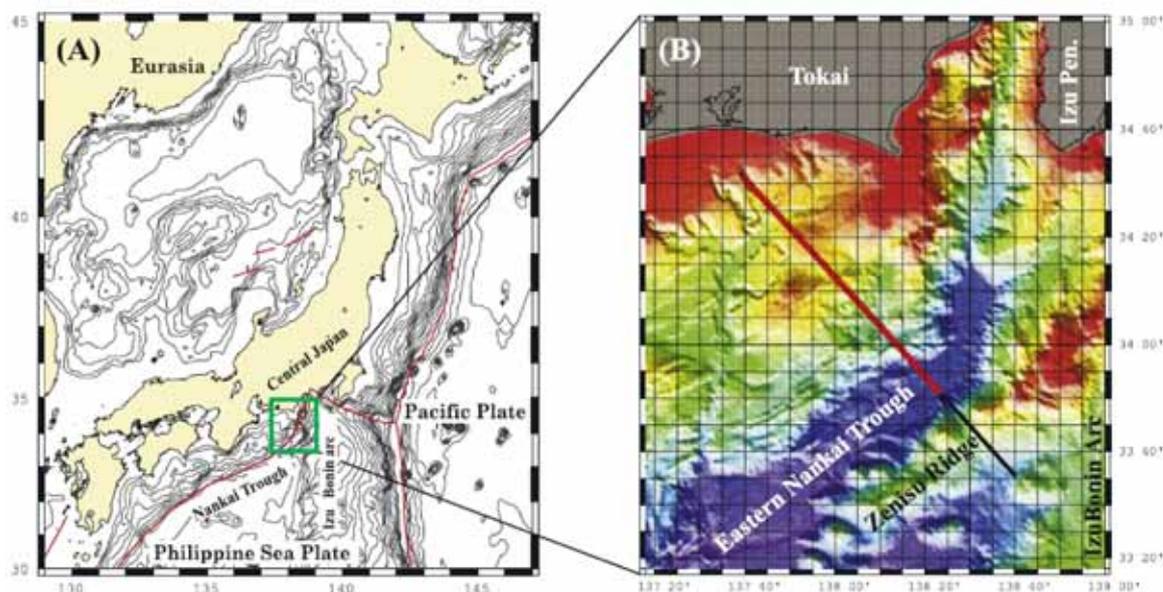


Fig. 4.17 – a) Contexte géodynamique général autour de la fosse de Nankai, b) zoom sur le rectangle vert avec les principales structures de la zone étudiée. La ligne noire correspond à la position des points de tir et la ligne rouge coïncidente à la position des sismomètres sous-marins, extrait de [Operto et al., 2006].

STEC). Cette campagne d'acquisition s'inscrivait dans le cadre du projet franco-japonais *Seize France Japan* (SFJ) dont un des objectifs était d'obtenir une image structurale du segment de Tokai situé à l'Est de la fosse de Nankai (Fig. 4.17). La fosse de Nankai, située au Sud-Ouest des côtes du Japon, correspond à la subduction de la plaque Philippine sous la plaque Eurasie. Le segment de Tokai est l'unique segment de la fosse de Nankai à ne pas avoir rompu lors des derniers tremblements de terre. Un séisme de forte amplitude est donc attendu dans les prochaines années dans cette zone qui est devenue l'objet de très nombreuses études. Une description détaillée de la zone étudiée est réalisée dans [Dessa et al., 2004] et [Operto et al., 2006]. Un dispositif dense de 100 sismomètres sous-marins, *Ocean Bottom Seismometer* (OBS), espacés de 1 km, a été déployé au fond de l'eau suivant une direction perpendiculaire aux structures de subduction (Fig. 4.17). Une acquisition de 140 km de long, avec un espacement de 100 m entre les points de tir a été effectuée.

### 4.4.2 Les temps de première arrivée observés

Les temps de première arrivée ont été pointés à partir des enregistrements des sismomètres (Fig. 4.18) avec un traitement semi-automatique réalisé et décrit par Dessa et al. [2004]. Parmi tous les enregistrements effectués, 91 sismomètres ont fourni des données exploitables. Les temps de première arrivée qui n'ont pu être pointés avec une précision suffisante ne sont pas considérés.

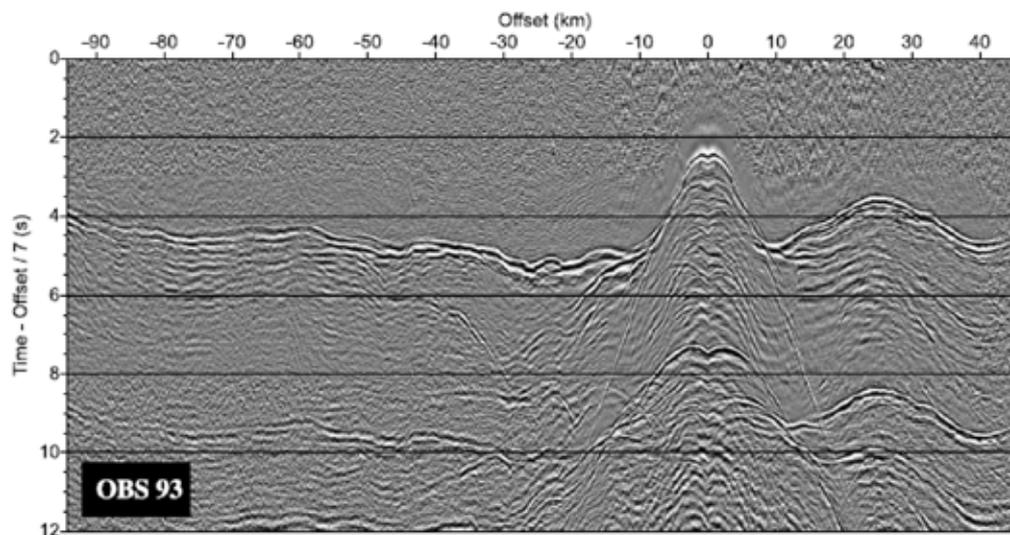


Fig. 4.18 – *Un exemple d'enregistrement réalisé par un sismomètre sous-marin, extrait de [Dessa et al., 2004].*

Le temps d'exécution du nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée dépend du nombre de points de tir considérés. En vertu du principe de réciprocité, on interchange alors *virtuellement* les sources et les récepteurs [Arntsen and Carcione, 2000]. Ainsi, le nombre de sources est de 91 et le nombre maximal de récepteurs est de 1398. Les sources sont considérées comme étant situées sur le fond de l'eau et les récepteurs à 10 m de profondeur. Le nombre total de données observées considérés pour l'application de l'algorithme de tomographie des temps de première arrivée est environ de 100 000 (Fig. 4.19). Les coordonnées des sources et des récepteurs correspondent respectivement à la profondeur et à la distance.

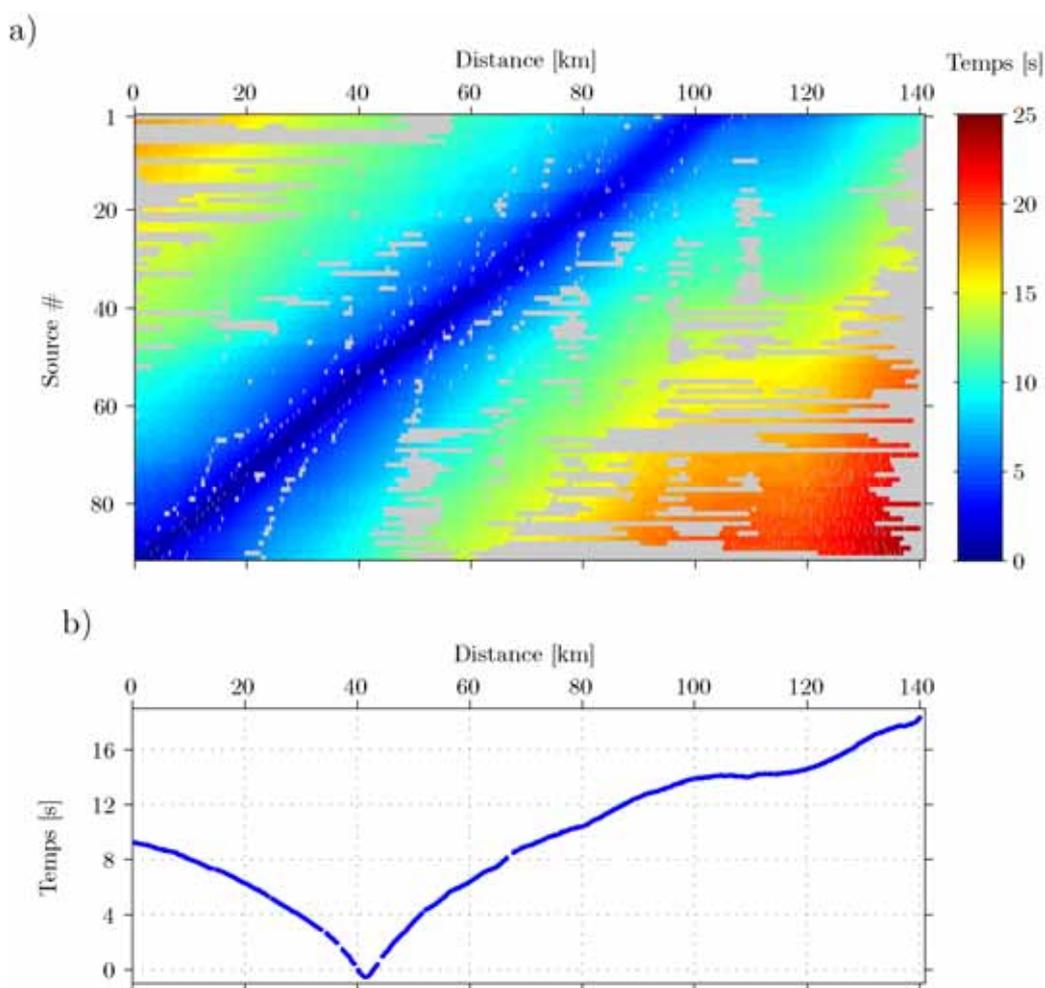


Fig. 4.19 – a) Carte des temps de première arrivée observés obtenus pour toutes les sources et les récepteurs disponibles. Les parties grisées correspondent aux temps de première arrivée qui n'ont pu être pointés avec une précision suffisante. b) Les temps de première arrivée observés pour une source située en (0.75 km, 41.5 km) et tous les récepteurs disponibles.

### 4.4.3 Paramétrisation du schéma d'inversion

Nous choisissons pour modèle de vitesse initial (Fig. 4.20), un modèle possédant une loi de vitesse linéaire, de  $8000 \text{ m.s}^{-1}$  à  $9000 \text{ m.s}^{-1}$ , en fonction de la profondeur, de 0 km à 40 km. La taille du modèle considéré est de 141 km en longueur et de 40 km en profondeur. La discrétisation du modèle avec une maille carrée de 25 m donne une grille de taille  $[1601 \times 5641]$ , soit environ 9 millions de mailles. Le calcul des temps de première arrivée à partir de ce modèle initial, en utilisant le solveur eikonal défini par Podvin et Lecomte [1991], permet de déterminer la carte des résidus initiaux entre les temps observés et calculés pour toutes les positions de sources et de récepteurs disponibles (Fig. 4.21). La valeur de la racine carrée de la moyenne des carrés des résidus des temps (RMS) est environ de 5.35 s.

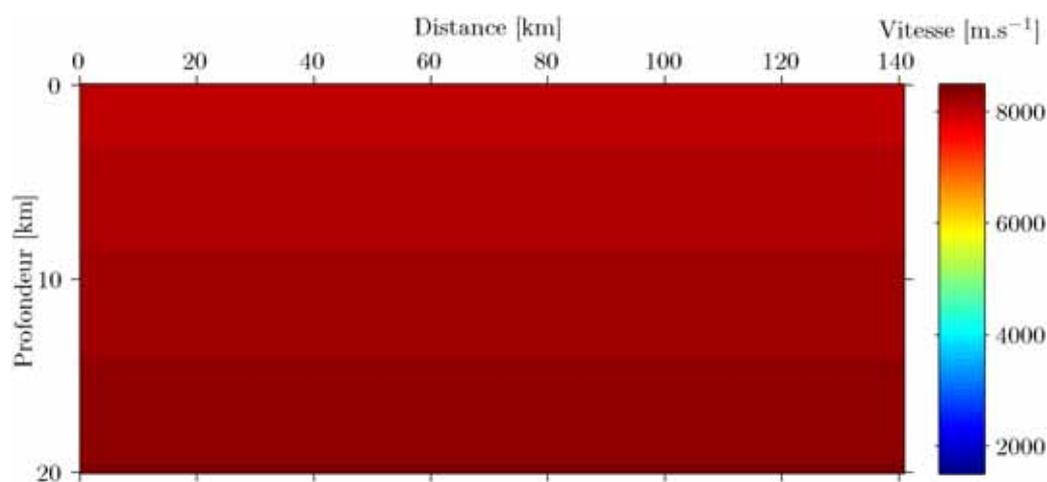


Fig. 4.20 – *Modèle de vitesse initial choisi pour le processus de minimisation, représenté pour une profondeur allant de 0 km à 20 km.*

Le préconditionnement appliqué au gradient de la fonction coût consiste essentiellement en un filtrage gaussien. La longueur du filtrage appliqué au gradient de la fonction coût varie en deux étapes. Pour les premières itérations du schéma d'inversion, la longueur du filtre est de 48 km en longueur et de 22 km en profondeur. Pour les dernières itérations, la longueur du filtre est de 18 km en longueur et de 6 km en profondeur. Pour assurer la stabilité et la convergence de l'algorithme, nous choisissons une valeur maximale du pas appliqué au gradient de la fonction coût égale à  $200 \text{ m.s}^{-1}$ . Le schéma itératif est arrêté lorsque la valeur du pas calculée à chaque itération est nulle, i.e. lorsque l'algorithme de tomographie ne modifie plus le modèle courant.

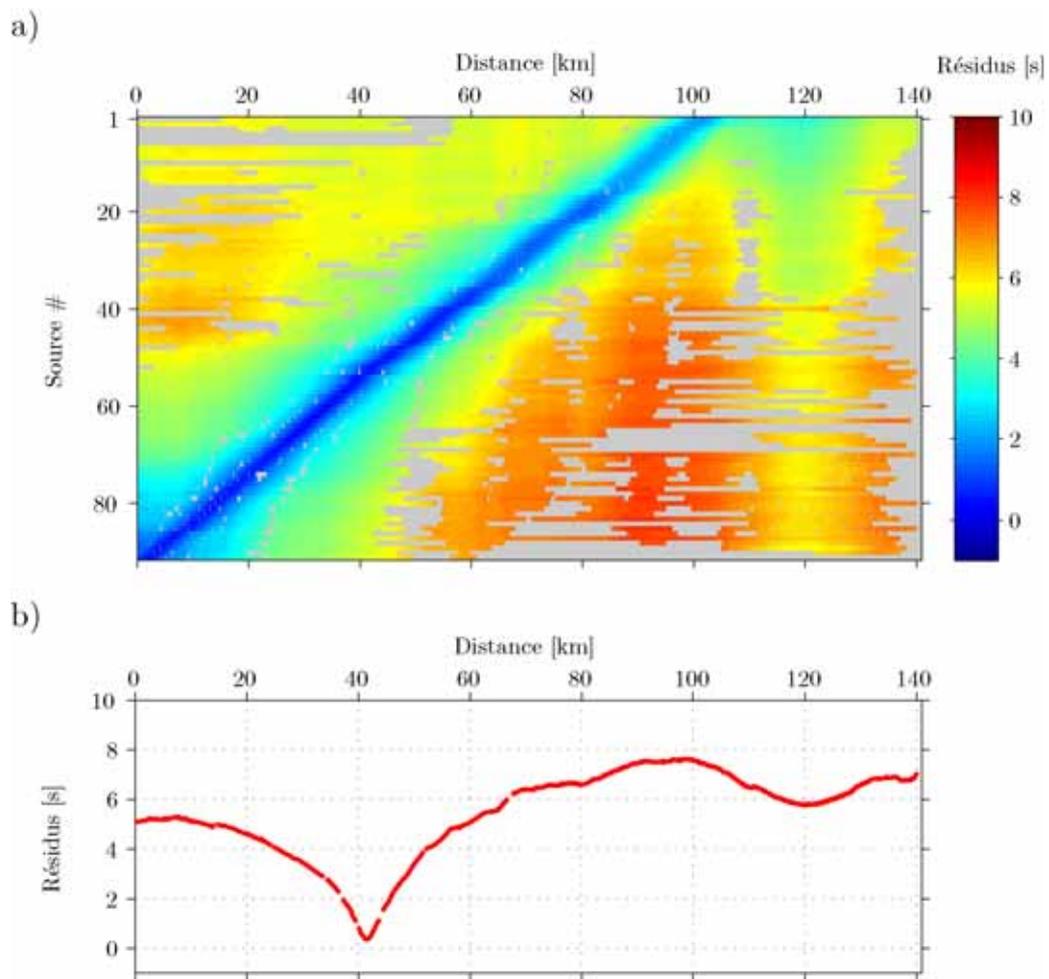


Fig. 4.21 – a) Carte des résidus initiaux en temps pour toutes les positions de sources et de récepteurs disponibles. Les parties grisées correspondent aux temps de première arrivée qui n'ont pu être pointés avec une précision suffisante. b) Les résidus initiaux en temps pour une source située en (0.75 km, 41.5 km) et tous les récepteurs disponibles.

#### 4.4.4 Résultats de tomographie

Le modèle de vitesse inversé par le nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée est obtenu après environ 100 itérations du schéma itératif de plus grande descente. Pour donner un ordre de grandeur, cela représente un temps de calcul d'environ 10 minutes en utilisant 91 cœurs sur le supercalculateur défini à la partie (3.4.3). Un tracé de rais *a posteriori* réalisé à partir de ce modèle inversé (Fig. 4.22) permet d'illustrer la couverture inhomogène des rais, particulièrement entre 0 km et 10 km et entre 100 km et 140 km avec la présence de nombreux rais subverticaux. Cette couverture inhomogène des rais est essentiellement due aux caractéristiques du dispositif d'acquisition. La détermination du modèle de vitesse en utilisant la tomographie des temps de première arrivée est une tâche difficile dans ces zones mal contraintes.

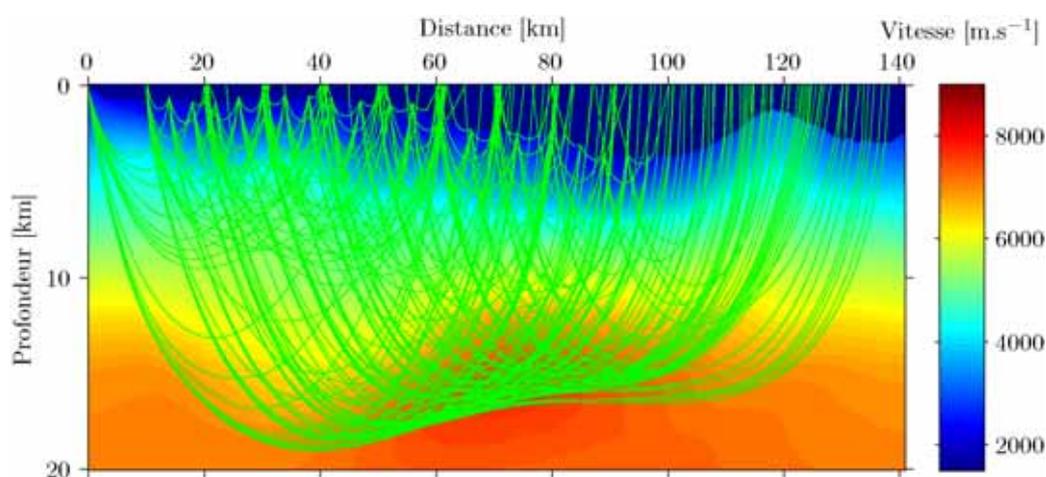


Fig. 4.22 – Tracé de rais *a posteriori* réalisé à partir du modèle inversé qui permet d'illustrer la couverture inhomogène des rais, entre 0 km et 10 km et entre 100 km et 140 km, avec la présence de nombreux rais subverticaux.

Nous choisissons alors de présenter le modèle de vitesse obtenu après inversion de 0 km à 105 km (Fig. 4.23 a). La partie grisée correspond à la partie du modèle de vitesse inversé qui n'est pas traversée par les rais. Nous choisissons de valider le modèle de vitesse obtenu par le nouveau schéma d'inversion en le comparant au modèle de vitesse obtenu à partir du même jeu de données par Dessa et al. [2004] (Fig. 4.23 b). Leur algorithme de tomographie des temps de première arrivée est défini à partir d'une méthode de projection. Le modèle de vitesse inversé qu'ils ont obtenu a permis de réaliser une interprétation structurale du segment Est de la fosse de Nankai. Il a aussi été utilisé comme modèle de vitesse initial pour réaliser une inversion de forme d'onde [Operto et al., 2006]. Ce modèle de vitesse inversé nous sert donc de référence pour valider notre résultat. On peut noter que les deux modèles de vitesse possèdent une structure et des valeurs de vitesse similaires.

Ce résultat est confirmé par des profils de vitesse 1-D à différentes positions à travers les modèles (Fig. 4.24). Nous représentons sur ces profils de vitesse le modèle de vitesse initial que nous avons utilisé pour l'inversion et le modèle de vitesse initial utilisé par Dessa et al. [2004]. Ce modèle initial a été défini à partir d'information géologique *a priori*. On peut noter que malgré un modèle de vitesse initial très "éloigné", le nouveau schéma d'inversion parvient à converger vers le modèle de vitesse de référence. Par ailleurs, le modèle inversé a été obtenu sans fixer

préalablement le fond de l'eau.

Les résidus définis entre les temps de première arrivée observés et ceux calculés à partir du modèle inversé (Fig. 4.16) permettent de confirmer que l'algorithme de tomographie a bien expliqué les temps de première arrivée observés. La valeur finale de la racine de la moyenne des carrés des résidus en temps est d'environ 0.16 s, la valeur initiale est de l'ordre de 5.35 s.

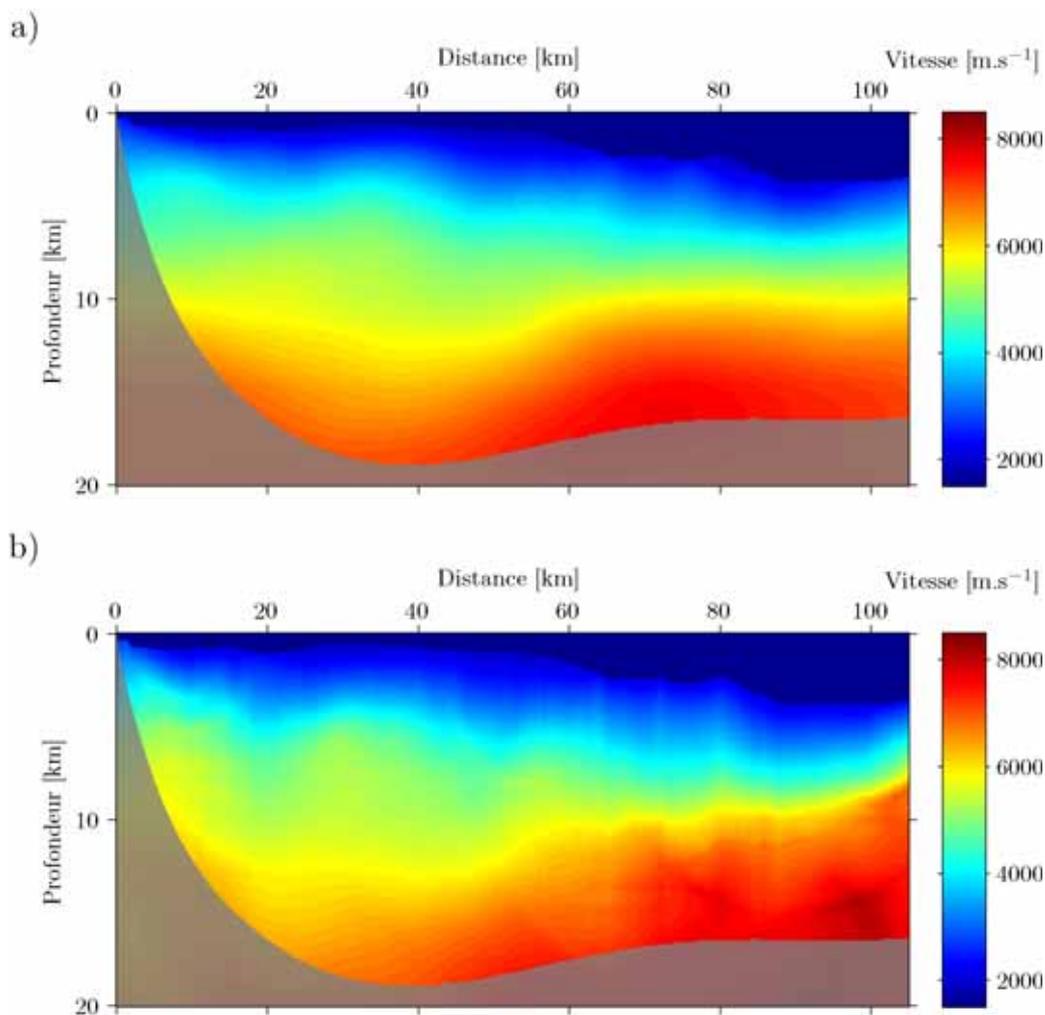


Fig. 4.23 – a) Modèle de vitesse inversé obtenu en utilisant le nouvel algorithme de tomographie des temps de première arrivée, b) modèle de vitesse inversé obtenu par Dessa et al. [2004].

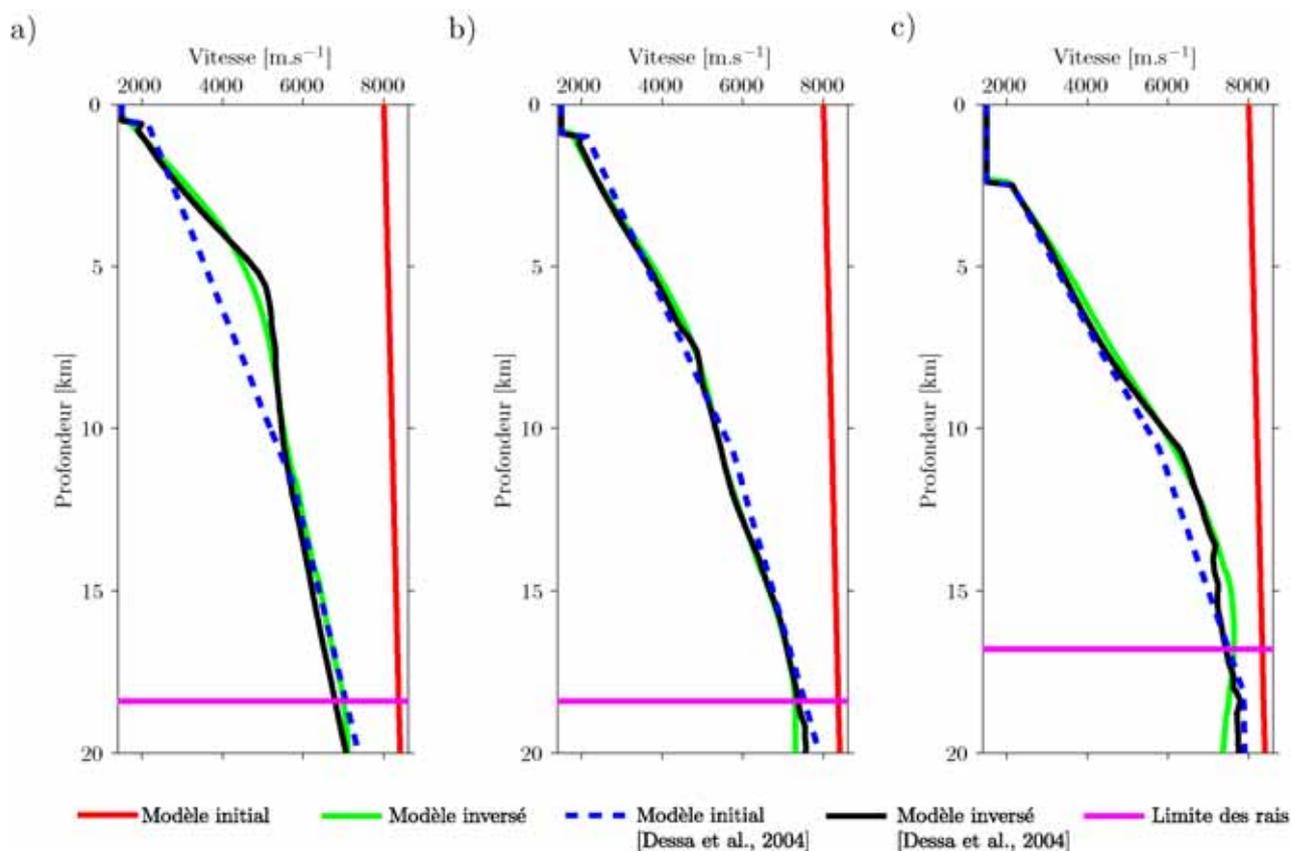


Fig. 4.24 – Profils de vitesse 1-D à différentes positions dans les modèles de vitesse a) 30 km, b) 50 km, c) 70 km. La courbe rouge correspond au modèle initial, la courbe verte au modèle inversé, la courbe bleue au modèle initial utilisé par Dessa et al. [2004], la courbe noire à leur modèle inversé, et la courbe rose à la limite de la couverture des rais.

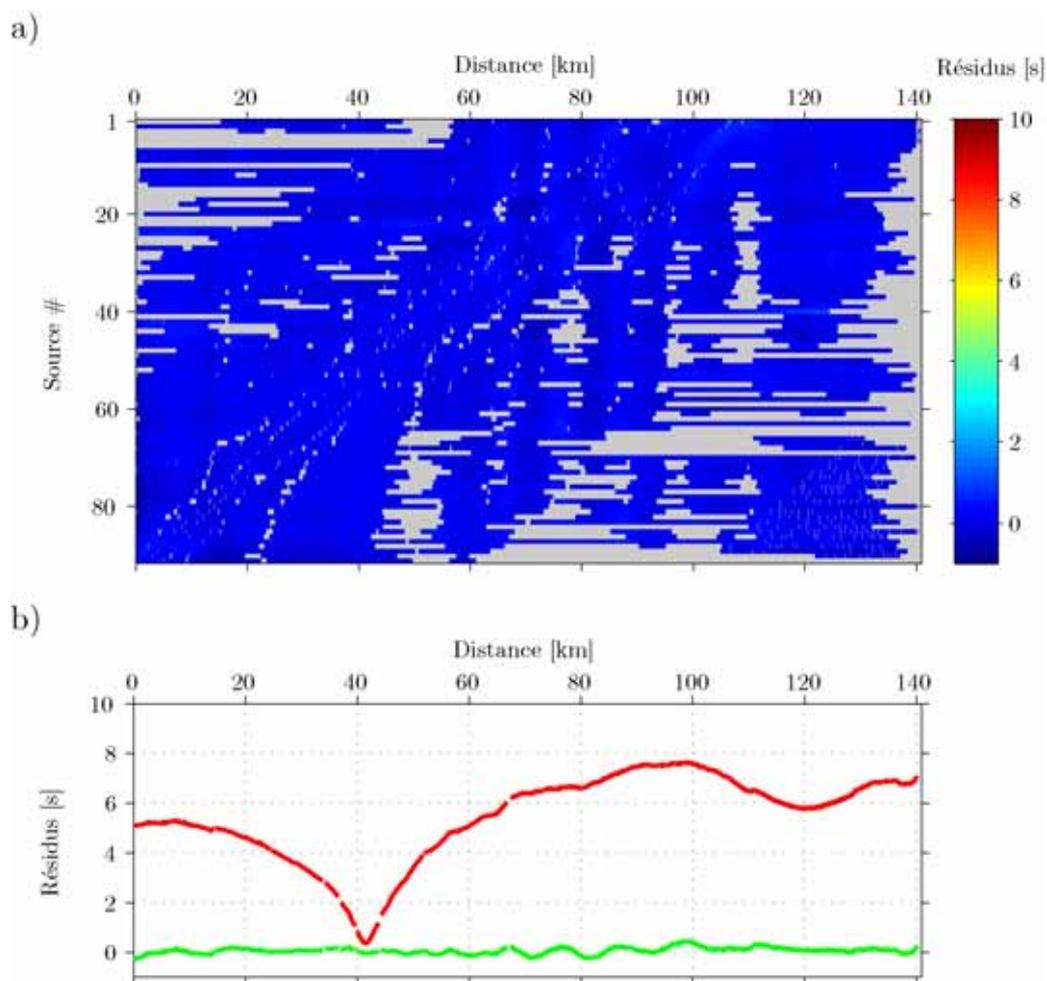


Fig. 4.25 – a) Carte des résidus finaux en temps pour toutes les positions de sources et de récepteurs disponibles. Les parties grisées correspondent aux temps de première arrivée qui n'ont pu être pointés avec une précision suffisante. b) Comparaison des résidus initiaux (en rouge) et des résidus finaux (en vert) en temps pour une source située en (0.75 km, 41.5 km) et tous les récepteurs disponibles.