



Document public

Valorisation des données de sismique réflexion et de puits, des années 80, pour de l'interprétation quantitative, sur le réservoir géothermique du Dogger dans le Bassin parisien

Rapport final

BRGM/RP-70726-FR

Mars 2021



Document public

Valorisation des données de sismique réflexion et de puits, des années 80, pour de l'interprétation quantitative, sur le réservoir géothermique du Dogger dans le Bassin parisien

Rapport final

BRGM/RP-70726-FR

Mars 2021

Étude réalisée dans le cadre des actions d'appui aux politiques publiques du BRGM relatives à la convention ADEME-BRGM 2005C0030

L. Capar, M. Darnet, B. Issautier, S. Marc, A. Stopin

Vérificateur :

Nom : Adnand Bitri

Fonction : Expert Géophysicien

Date : 24/04/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : Mikaël Philippe

Fonction : Responsable d'unité DGR/GSE

Date : 04/05/2021

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Sismique Réflexion, Forage, Puits, Interprétation quantitative, Géothermie, Dogger, Bassin parisien

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Capar L., Darnet M., Issautier B., Marc S. et Stopin A. (2021) - Valorisation des données de sismique réflexion et de puits, des années 80, pour de l'interprétation quantitative, sur le réservoir géothermique du Dogger dans le Bassin parisien. Rapport final. BRGM/RP-70726-FR, 69 p., 44 fig., 2 tab., 2 ann.

Synthèse

Dans le cadre de la convention numéro 2005C0030 entre l'ADEME et le BRGM, pour l'année 2020, une interprétation quantitative sur le Dogger du Bassin parisien, à partir des données de sismique réflexion acquises dans les années 80 et de puits existants, a été réalisée.

L'objectif de cette étude est d'établir une méthodologie et d'énoncer des recommandations sur l'utilisation des données de sismique réflexion et de puits existants, afin de réduire le risque géologique avant forages et d'apporter de nouvelles informations entre les puits sur les caractéristiques pétrophysiques du réservoir étudié.

Pour cela une interprétation quantitative a été testée à partir de deux méthodes suivantes : une première méthode classique par inversion sismique acoustique et une seconde méthode expérimentale par intelligence artificielle, en utilisant l'entraînement par réseau de neurones. L'interprétation quantitative permet à partir des amplitudes des données de sismique réflexion d'obtenir des informations sur la porosité, la perméabilité, le volume d'argile, voire la transmissivité du réservoir étudié.

Ce travail a nécessité le retraitement de 5 lignes de sismique réflexion acquises dans les années 80, l'utilisation des données de diagraphies de 32 puits et un modèle géologique 3D réalisé antérieurement par le BRGM.

Un important travail préliminaire de mise en forme des données de sismique réflexion et de puits a été nécessaire, dans l'objectif de minimiser les incertitudes.

Si l'interprétation quantitative s'avère prometteuse pour l'exploration de réservoirs, elle ne saura être déconnectée d'une étude géologique qui permettra d'interpréter conjointement les résultats avec des géophysiciens et d'en assurer ensemble une certaine cohérence.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Les données de sismique réflexion et de puits.....	11
2.1. LES DONNÉES DE SISMIQUE REFLEXION	11
2.1.1. Déstockage des données sismiques brutes	12
2.1.2. Retraitement des données sismiques	14
2.1.3. Séquence de traitement	14
2.1.4. La résolution sismique	20
2.2. LES DONNÉES DE PUIITS	21
3. Analyse des données pour l'interprétation quantitative.....	23
3.1. LES DONNÉES DE SISMIQUE REFLEXION	23
3.1.1. Informations et paramètres sur les données de sismique réflexion pour l'interprétation quantitative du Dogger du Bassin parisien	23
3.2. LES DONNÉES DE PUIITS	30
3.3. LES CALAGES TEMPS-PROFONDEUR (PUIITS-SISMIQUE).....	33
3.4. INCERTITUDES SUR LES DONNÉES	34
3.5. CONCLUSIONS SUR LES DONNÉES EXISTANTES POUR L'INTERPRÉTATION QUANTITATIVE.....	34
3.6. RECOMMANDATIONS SUR LES DONNÉES	35
4. Interprétation Quantitative.....	37
4.1. DÉFINITION	37
4.1.1. Principe.....	37
4.2. ANALYSE PÉTROPHYSIQUE.....	39
4.2.1. Création du modèle pétrophysique	39
4.2.2. Création du modèle d'impédance initial.....	40
4.3. APPROCHE CLASSIQUE PAR INVERSION.....	41
4.3.1. Principe.....	41
4.3.2. Inversion des données.....	41
4.3.3. Résultats.....	41
4.3.4. Incertitudes à prendre en compte dans les résultats d'inversions.....	42

4.4. APPROCHE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES.....	45
4.4.1.Principe	45
4.4.2.Entrainement des réseaux de neurones	45
4.4.3.Étude de faisabilité sur données sismiques simulées	46
4.4.4.Application sur les données réelles	48
4.4.5.Estimation de la perméabilité.....	50
4.4.6.Incertitudes à prendre en compte dans les résultats.....	51
5. Apport de l'interprétation quantitative à la compréhension de la qualité des réservoirs géothermiques.....	53
5.1. INTRODUCTION : COMMENT DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS RÉSERVOIRS	53
5.2. PASSER DE L'ESTIMATION 1D DES PROPRIÉTÉS RÉSERVOIRS À UNE INTERPRÉTATION 2D.....	53
6. Recommandations et Conclusion.....	59
6.1. RECOMMANDATIONS	59
6.2. MÉTHODOLOGIE	59
6.3. COÛTS / BÉNÉFICES.....	59
6.4. CONCLUSION.....	60
7. Bibliographie.....	61

Liste des figures

Figure 1 : Plan de position de la zone d'étude.....	12
Figure 2 : Illustration des données sismiques brutes : tir sismique et documents terrain.....	13
Figure 3 : Exemple de CMP sur la ligne 88PIF13.....	15
Figure 4 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après mise à jour de la géométrie.....	16
Figure 5 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après éliminations des traces invalides et bruitées.....	17
Figure 6 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après corrections de la topographie et des variations de vitesses dans la proche surface.....	18
Figure 7 : Exemple de la remise en place de structures à leur position réelle après migration. 7a) avant migration ; 7b) après migration.....	19
Figure 8 : Image finale de la ligne sismique 88PIF13 après migration et addition.....	19
Figure 9 : Exemple de diagraphies sur les puits pétroliers.....	21
Figure 10 : Convention de polarité normale et polarité des lignes sismiques du projet.....	24
Figure 11 : Les différentes phases pour une ondelette sismique.....	24
Figure 12 : Exemple de pointé des horizons de la Dalle Nacrée et du Bajocien Moyen – Ligne sismique 86PIF03.....	25
Figure 13 : Exemple de basses fréquences 5 – 15 Hz sur la ligne 86PIF22.....	25
Figure 14 : Exemple de hautes fréquences 85 – 125 Hz sur la ligne 86PIF22.....	26
Figure 15 : Spectre d'amplitudes sur la ligne sismique 86PIF22. En bleu entre 400 et 1 500 ms TWT, en rouge entre 700 et 1 300 ms TWT.....	26
Figure 16 : Ligne 86PIF22 avec application du filtrage final, éliminant la fréquence à 8 Hz.....	26
Figure 17 : Illustration du bruit sur les CMP de la ligne 86PIF03 indiqué par la flèche bleue sur un CMP.....	27
Figure 18 : Illustration de l'absence de bruit sur la ligne 86PIF03 dans les encadrés noirs.....	27
Figure 19 : Exemple de CMP sur la ligne 86PIF01 montrant des événements sismiques pas parfaitement alignés.....	28
Figure 20 : Ligne 86PIF01 montrant des panneaux latéraux et verticaux de faibles et fortes amplitudes.....	28
Figure 21 : Ligne 86PIF01 après corrections des panneaux de fortes et de faibles amplitudes.....	28
Figure 22 : Contrôle des diagraphies Sonic-P/Neutron des puits CBG-1D (rouge), CSM-1 (Bleu), MTR-1D (vert).....	30
Figure 23 : Contrôle des diagraphies Gamma Ray/Densité/Neutron/Sonic-P pour les puits de géothermie.....	31
Figure 24 : Résultats après corrections et éditions de la diagraphie Sonic- P/Neutron des puits MTR-1D en vert. CBG-1D (rouge), CSM-1 (Bleu).....	31
Figure 25 : Résultats après normalisation et corrections des diagraphies Gamma Ray/Densité/Neutron/Sonic-P pour les puits de géothermie.....	32
Figure 26 : Exemple d'ambiguïté de calage en temps pour le puits MTR-1D.....	33
Figure 27 : Illustration simplifiée de la réflexion et de la transmission d'une onde sismique dans le sous-sol.. L'interprétation quantitative consiste à partir de la trace sismique à droite afin de retrouver les propriétés du sous-sol, à gauche.....	37
Figure 28 : Graphe I_p -Phit à partir des diagraphies des puits pétroliers, coloré par le Gamma-Ray (en API). Deux tendances sont discriminées (Dogger et argiles au-dessus et en-dessous), modélisées par deux équations $Phit = f(I_p)$ différentes (courbes noire et rouge).....	39

Figure 29 : Illustration du remplissage du modèle initiale Basse Fréquence d'impédance acoustique sur la ligne 88PIF13.	40
Figure 30 : Impédance acoustique absolue obtenue par inversion sur la ligne sismique 86PIF01. Ellipses noires indiquant les zones potentielles de correction de l'interprétation sismique.	41
Figure 31 : Processus d'inversion sismique acoustique et porosité prédite (d) à partir des données sismiques (a) et de l'impédance acoustique inversée (b) avec les équations variables (c) par intervalle sur la ligne sismique 86PIF01. Corps oolithiques poreux identifiés (flèches noires).	42
Figure 32 : Illustration de l'impact des incertitudes du modèle initial (basses fréquences) (gauche) sur l'inversion (Impédance) (milieu) et la prédiction de porosité (droite) le long de la ligne sismique 86PIF18.	43
Figure 33 : Apprentissage supervisé pour reproduire une diaggraphie donnée à partir d'un ensemble d'attributs sismiques.	45
Figure 34 : Schéma montrant la faisabilité de l'inversion sismique acoustique sur des données sismiques simulées.	46
Figure 35: Résultat des tests de la méthode des réseaux de neurones sur les données sismiques simulées. À gauche le modèle exacte (en haut l'impédance, en bas la porosité). À droite le modèle prédit (en haut l'impédance, en bas la porosité). Les détails retrouvés dans l'impédance et la porosité sont en accord avec le modèle initial.	47
Figure 36 : Impédance acoustique prédite par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.	48
Figure 37 : Porosité totale prédite par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.	49
Figure 38 : Volume d'argile prédit par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.	49
Figure 39 : Porosité effective calculée à partir de la porosité totale et du volume d'argile prédits pour la ligne sismique 86PIF01.	50
Figure 40 : Perméabilité absolue dérivée de la loi porosité-perméabilité moyenne à partir de la porosité effective prédite pour la ligne sismique 86PIF01.	51
Figure 41 : Profil de corrélations diaggraphiques dans le Dogger du Bassin parisien.	54
Figure 42 : Extraction d'un modèle faciès (gauche) et de porosité (droite) construit au BRGM. On y voit la géométrie des corps oolithiques en jaune issue d'une simulation de faciès basée sur une analyse géostatistique.	55
Figure 43 : Profil sismique 86PIF22. L'image montre le résultat obtenu par la méthode d'apprentissage par réseaux de neurones conduisant à obtenir la porosité effective, ici exprimée en %.	56
Figure 44 : Profil 86PIF01. Profil de porosité effective (exprimée en %) issue de l'entraînement par réseaux de neurones.	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des lignes sismiques retraitées dans le projet.	14
Tableau 2 : Tableau indicatif des limites de résolutions latérales des données de sismique réflexion des années 1980.	20

Liste des annexes

Annexe 1 : Liste des puits.	63
Annexe 2 : Abréviations.	67

1. Introduction

Dans le cadre de la convention numéro 2005C0030 entre l'ADEME et le BRGM, pour l'année 2020, un nouveau projet sur la valorisation des données publiques de sismique réflexion et de puits, issues principalement de l'exploration pétrolière (les données « MINERGIES »), a été mené pour l'exploration géothermique dans le Bassin parisien. Ce projet consiste à utiliser ces données afin d'en extraire des propriétés pétrophysiques, comme la porosité, la perméabilité, voire la transmissivité, sur le ou les réservoirs géothermiques étudiés. Cette étude expérimentale, basée sur l'étude du réservoir du Dogger du Bassin parisien, s'est appuyée sur l'existence d'un modèle géologique 3D, afin de vérifier la validité des résultats obtenus.

Depuis les années 50, sur l'ensemble des bassins sédimentaires français, de nombreux opérateurs principalement pétroliers, ont acquis plus de 350 000 kilomètres linéaires de données de sismique réflexion et ont foré plus de 6 000 puits. Les progrès technologiques de l'acquisition sismique et des algorithmes de traitement du signal, couplés avec une meilleure connaissance des variations lithologiques de la proche surface, ont permis d'appréhender la structure globale des bassins (e.g. profondeur du toit et base des grands ensembles géologiques, failles). Cependant il reste toujours difficile de prédire avec précision la productivité des niveaux réservoirs.

Cette limite est principalement due à une faible connaissance des propriétés du réservoir (niveaux producteurs et imperméables) entre les puits existants productifs. En effet, le réservoir peut être composé de zones plus ou moins productives et plus ou moins imperméables. Afin d'améliorer cette connaissance des réservoirs, des techniques modernes basées sur l'analyse des amplitudes du signal sismique et sur les données enregistrées lors des forages ont été utilisées dans ce projet. Une de ces techniques est nommée : « l'interprétation quantitative ». Pour cela, le traitement de la donnée sismique a été réalisé avec pour objectif de préserver les amplitudes, afin que celles-ci reflètent au mieux la nature du sous-sol. Calibrées aux puits existants, ces amplitudes sismiques ont été modélisées en impédances acoustiques, puis des relations mathématiques ont été établies entre l'impédance acoustique et la porosité totale, afin de prédire la porosité totale dans le réservoir du Dogger du Bassin parisien. Une seconde approche, expérimentale, basée sur l'intelligence artificielle et la méthode de l'entraînement d'un réseau neuronal (DFNN : Deep Feed Neural Network) a permis d'illustrer si à partir de données sismiques, le réseau neuronal était capable de retrouver les propriétés pétrophysiques du réservoir étudié, le Dogger du Bassin parisien.

L'interprétation quantitative est traditionnellement utilisée en exploration pétrolière pour identifier sur la sismique la présence de couches réservoirs. Certains opérateurs de géothermie, commencent déjà à retraiter de façon systématique la sismique existante avant l'implantation d'un doublet géothermique. Son interprétation reste qualitative et gagnerait à être plus quantitative, afin d'en diminuer les risques.

Ce projet consiste, à travers l'étude du réservoir géothermique du Dogger au nord-est du Bassin parisien, à établir une méthodologie et des recommandations sur l'utilisation des données existantes de sismique réflexion et de puits pour l'interprétation quantitative. Les nouvelles informations apportées entre les puits sur les caractéristiques pétrophysiques du réservoir ont pour objectif, de réduire le risque géologique avant forage.

Ce rapport se divise en quatre parties. La première partie, comprenant les chapitres 2 et 3, est consacrée aux données de sismique réflexion et de puits avec les recommandations nécessaires pour l'utilisation de ces données. La seconde partie (chapitre 4) concerne l'inversion sismique acoustique des données sismiques pour l'interprétation quantitative, ainsi que la méthode expérimentale de l'entraînement par réseau de neurones pour prédire les propriétés pétrophysiques. La troisième partie (chapitre 5) fait une analyse des résultats de l'inversion sismique acoustique pour une interprétation en termes d'informations réservoirs des données de sismique réflexion. La quatrième partie (chapitre 6) résume les recommandations et conclusions sur l'utilisation des données de sismique réflexion et de puits pour leur utilisation en interprétation quantitative. L'annexe 1 contient la liste des puits utilisés dans ce projet, et l'annexe 2, la liste des abréviations employées dans ce rapport.

2. Les données de sismique réflexion et de puits

Afin d'aider les différents acteurs de la géothermie à appréhender au mieux le potentiel géothermique d'un secteur, une connaissance approfondie du sous-sol, ainsi que les propriétés pétrophysiques des réservoirs cibles (au moins ponctuellement) sont des prérequis.

Il existe deux méthodes d'investigation, pour avoir une information sur le sous-sol, une directe qui est le forage et une indirecte, la sismique réflexion. Les données obtenues à partir des forages donnent une information en un point de la géologie du sous-sol et des propriétés pétrophysiques. La sismique réflexion, méthode géophysique (non destructive) de prospection, permet d'une part de repérer la géométrie et la disposition des structures géologiques sous la surface et d'obtenir une information sur leur épaisseur et d'autre part, par inversion sismique acoustique, d'obtenir des informations sur les propriétés pétrophysiques des réservoirs, comme la porosité, la perméabilité, le volume d'argile, voir la transmissivité.

L'inversion sismique acoustique est le procédé qui permet à partir des amplitudes des données de sismique réflexion, d'obtenir des données de porosité, de perméabilité, de volume d'argile, voir la transmissivité, dans un ou plusieurs réservoirs géologiques ciblés.

2.1. LES DONNÉES DE SISMIQUE REFLEXION

Dans cette étude, cinq lignes 2D de sismique réflexion, totalisant environ 75 kilomètres, ont été retraitées, dans le nord-est du Bassin parisien (Figure 1).

Ces cinq lignes sismiques ont été acquises entre 1986 et 1988. Leur retraitement sismique a été effectué avec pour objectif de préserver les amplitudes, attribut nécessaire à l'obtention d'informations sur les propriétés pétrophysiques des réservoirs géologiques. Ce retraitement a aussi permis d'identifier et d'obtenir la géométrie du réservoir du Dogger dans cette région du Bassin parisien, prérequis pour l'interprétation quantitative.

En France, les données de sismique réflexion proviennent principalement des opérateurs pétroliers, qui ont acquis de nombreuses données depuis les années 50 sur leurs titres miniers. D'après le Code minier français, une copie des données sismiques brutes sont transmises à l'Administration française. Elles sont du domaine public et disponibles après un laps de temps de 10 ans après leur obtention. La première étape du projet est de récupérer ces données sismiques brutes auprès de cette Administration, ou directement auprès des compagnies qui les ont enregistrées. C'est la phase de déstockage.

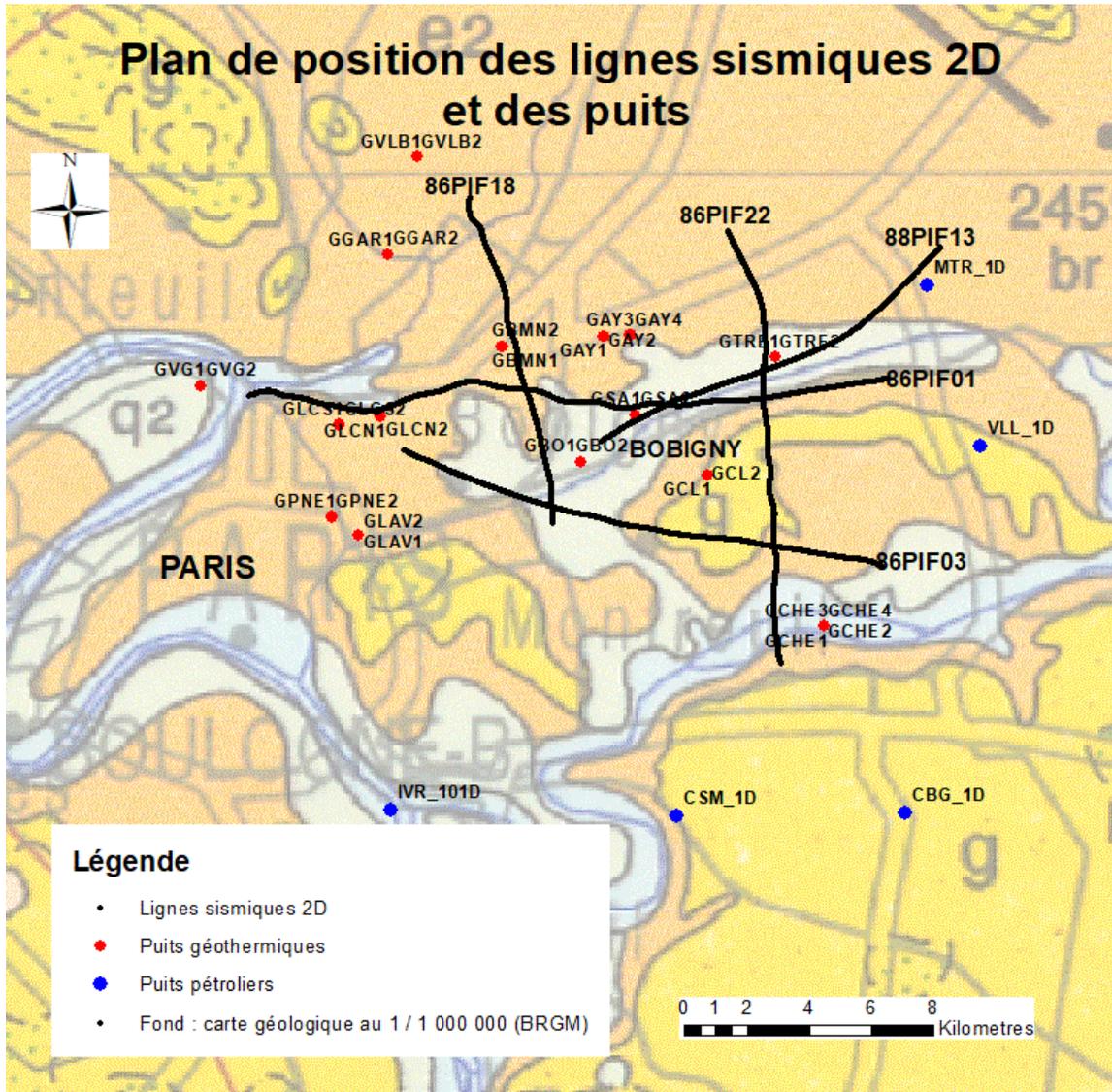


Figure 1 : Plan de position de la zone d'étude.

2.1.1. Déstockage des données sismiques brutes

Les données sismiques brutes (Figure 2) comprennent (1) le signal sismique (tir sismique) enregistré sur des supports analogiques ou magnétiques, (2) des informations sur les paramètres d'enregistrement et du déploiement du dispositif d'acquisition (rapport d'enregistrement), (3) les coordonnées des positions de tous les récepteurs (géophones) et de toutes les sources d'ondes (ou sources sismiques), issues de chutes de poids, de camions vibrateurs ou d'explosifs, par exemple. Les sources sismiques des 5 lignes sismiques de ce projet sont des camions vibrateurs.

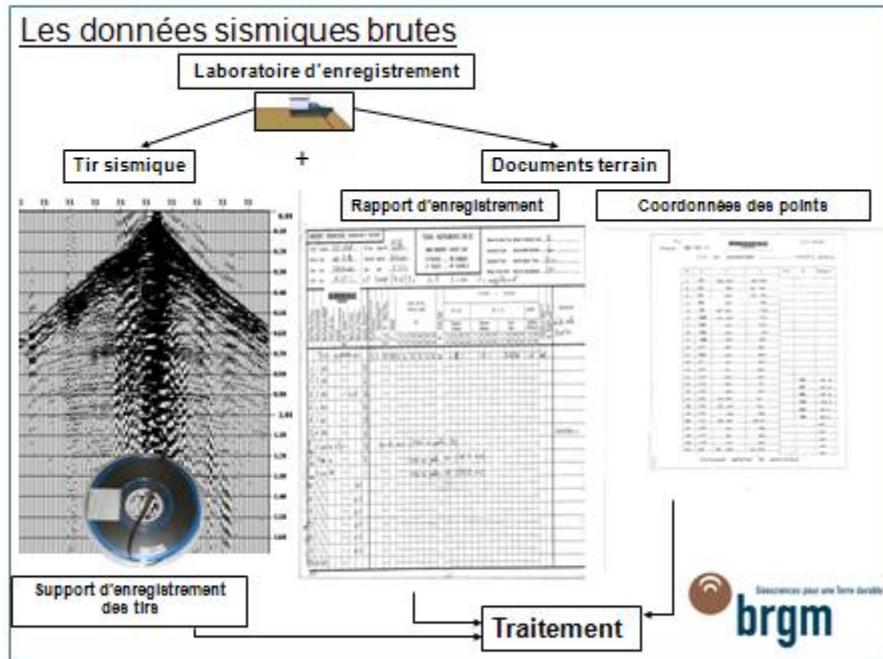


Figure 2 : Illustration des données sismiques brutes : tir sismique et documents terrain.

Le déstockage des données sismiques brutes comprend :

- la demande des données auprès des compagnies ayant acquis ces données ;
- la réception et le contrôle des données et des documents reçus ;
- la transcription des tirs sismiques au format des logiciels informatiques de traitement sismique ;
- la transcription des coordonnées des positions des sources sismiques et des récepteurs du format papier au format numérique le cas échéant.

Ces données sont gérées :

- soit par les opérateurs privés toujours présents en France ;
- soit pour la sismique acquise sur des titres miniers, par le Bureau des Ressources Énergétiques du Sous-Sol (BRESS), bureau de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), sous le Ministère de la Transition écologique et solidaire (elles sont actuellement en gestion au BRGM par délégation via une convention, et gérées dans le projet BRGM appelé « MINERGIES »).

L'interrogation de la base de données du BRESS, contenant les informations relatives à la position et aux métadonnées de l'ensemble des lignes sismiques enregistrées sur le territoire métropolitain a permis d'identifier le type de données qui seraient disponibles ainsi que les potentiels détenteurs des données brutes. La demande a été faite aux détenteurs des données sismiques brutes pour les obtenir.

À leur réception, un premier travail de contrôle sur les données brutes a été effectué afin de vérifier si l'ensemble des informations nécessaires étaient cohérentes et complètes. Ensuite, les données de sismique réflexion pour ces cinq lignes, ont été envoyées au centre de traitement pour effectuer un retraitement sismique préservant les amplitudes.

2.1.2. Retraitement des données sismiques

L'objectif du retraitement des données de sismique réflexion est d'obtenir :

- d'une part une image du sous-sol, pour en faire une interprétation structurale et géométrique : présence ou non de failles, géométrie, épaisseur des différentes couches géologiques. Cette interprétation géologique permettra d'élaborer un modèle géologique en trois dimensions, et d'améliorer la connaissance de la géométrie des potentiels réservoirs géothermiques, un des prérequis pour ensuite effectuer les différents travaux de simulation de circulation des fluides, etc. ;
- d'autre part, des amplitudes sismiques directement reliées à la nature du sous-sol.

Le traitement sismique n'est pas univoque, il nécessite la mise au point et la supervision d'une séquence de traitement du signal spécifique, comportant plusieurs étapes, avant d'obtenir l'image finale interprétable (appelée aussi la donnée traitée ou la donnée retraitée) et les amplitudes les plus proches de la réalité.

Dans le cadre de ce projet, cinq lignes sismiques ont été retraitées et sont listées dans le Tableau 1.

Nom de la ligne	Premier CMP	Dernier CMP	Distance entre CMP (m)	Premier Point de tir	Dernier Point de tir	Longueur de la ligne (en CMP) (m)
86PIF01	166	1218	20	82	641	21 060
86PIF03	212	1008	20	105	518	15 940
86PIF18 (partie nord)	969	1521	20	515	790	11 060
86PIF22 (partie nord)	773	1491	20	417	758	14 380
88PIF13	202	843	20	101	429	12 840
Total:						75 280

Tableau 1 : Liste des lignes sismiques retraitées dans le projet.

2.1.3. Séquence de traitement

Les données, de sismique réflexion, utilisées dans ce projet, ont été acquises entre 1986 et 1988. La séquence et les paramètres de traitement ont été choisis dans l'objectif d'obtenir des données traitées reflétant au mieux la géométrie du sous-sol ainsi que la conservation des amplitudes réelles, au plus proche de la réalité, appelé « traitement en amplitude préservée »

La séquence de traitement comporte de très nombreuses étapes, et se décompose en quatre grandes phases :

- positionnement des sources sismiques et des récepteurs avec leurs coordonnées : nommé « mise à jour de la géométrie » ;
- édition/atténuation des traces invalides et/ou bruitées pour garder les traces et les signaux sismiques valides ;

- correction du signal sismique pour compenser des effets de la topographie et des variations des vitesses de propagation des ondes sismiques dans la proche surface ;
- remise à leur place réelle des objets géologiques : nommée « la Migration » et addition des traces pour former l'image finale.

a) Positionnement des sources sismiques et des récepteurs

Les camions vibrateurs vont impulser des ondes dans le sous-sol, grâce à des plaques vibrantes situées sous les camions. Les ondes émises sont en partie réfléchies par les structures géologiques (interfaces de couches géologiques différentes, plans de failles). Ces réflexions vont être enregistrées sous forme d'un signal sismique (Figure 2: tir sismique) par les géophones implantés à espace régulier dans le sol et transmises au laboratoire d'enregistrement (Figure 2). Chaque couple « source sismique »-« récepteur » va générer une trace sismique dite élémentaire et imager un point en profondeur. Grâce à la densité de sources et de récepteurs utilisée lors de l'acquisition, un nombre fini de couples « source sismique »-« récepteur » vont imager le même point en profondeur. Un même point en profondeur sera donc imagé par plusieurs traces élémentaires (principe de la couverture multiple). L'ensemble des traces élémentaires, imageant un même point en profondeur, est appelé « Point Milieu Commun » ou « Common Middle Point » (CMP) (Figure 3).

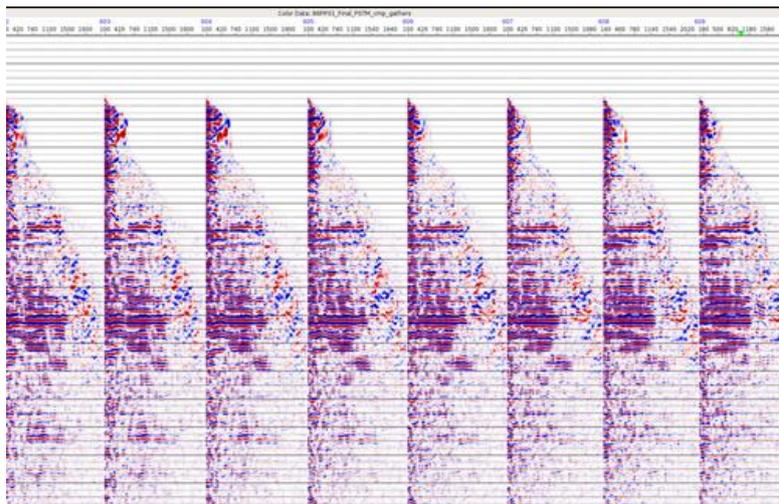


Figure 3 : Exemple de CMP sur la ligne 88PIF13.

La création du fichier, des positions des sources sismiques et des récepteurs utilisables par un logiciel de traitement des données sismiques, est nommée « mise à jour de la géométrie d'acquisition ». Cette étape permet de positionner chaque trace élémentaire. Cette mise à jour de la géométrie a été effectuée à partir des rapports d'enregistrement contenant la description du dispositif d'acquisition sur le terrain (emplacement des sources sismiques et des récepteurs) et a permis d'établir une première image de contrôle (Figure 4).

À partir des coordonnées des sources sismiques et des récepteurs, les coordonnées de chaque CMP ont été calculées dans les systèmes de projection Lambert 2 étendu et Lambert 93.

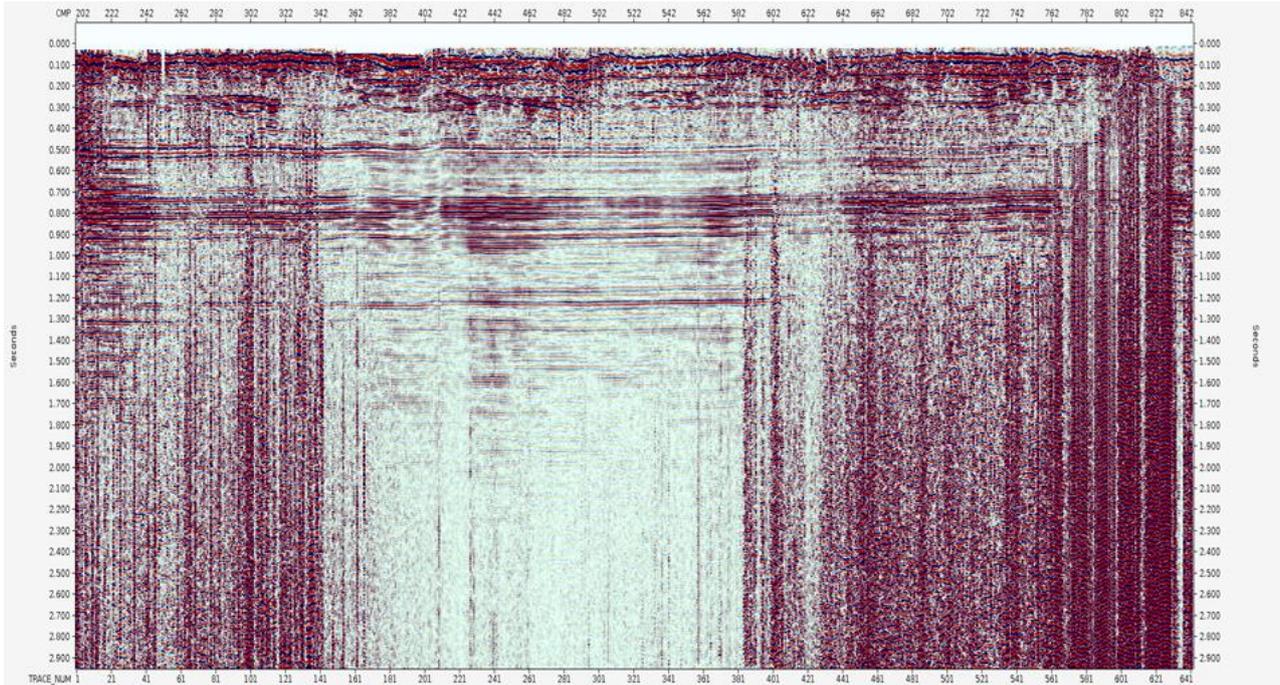


Figure 4 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après mise à jour de la géométrie.

b) Édition/atténuation des traces invalides ou bruitées

Lors de l'acquisition, des bruits, qui ne sont pas du signal cohérent issu d'un marqueur géologique ou d'une structure géologique, sont aussi enregistrés. Des traces invalides, dues en général à une défaillance d'un géophone ou une mauvaise connectique, peuvent aussi être enregistrées. Ces traces bruitées et invalides ne contenant pas de signal issu d'un objet géologique, et perturbant le signal réel, doivent être éliminées dans les premières étapes du traitement. Ce procédé permet de garder uniquement la partie cohérente du signal sismique, représentatif des objets géologiques. Ainsi les traces invalides et/ou bruitées sont éliminées par l'utilisation d'un algorithme qui élimine les amplitudes anormales (Figure 5). À ce stade du traitement sismique, seules les traces contenant un signal cohérent, et donc une information géologique, sont gardées. À l'élimination des traces invalides et/ou bruitées, il est nécessaire, aussi, d'atténuer voire d'éliminer, si cela est possible sans affecter les amplitudes et le signal sismique, les artéfacts liés à la réverbération des ondes sismiques dans le sous-sol. Des processus spécifiques d'atténuation voire d'élimination des artéfacts sont appliqués.

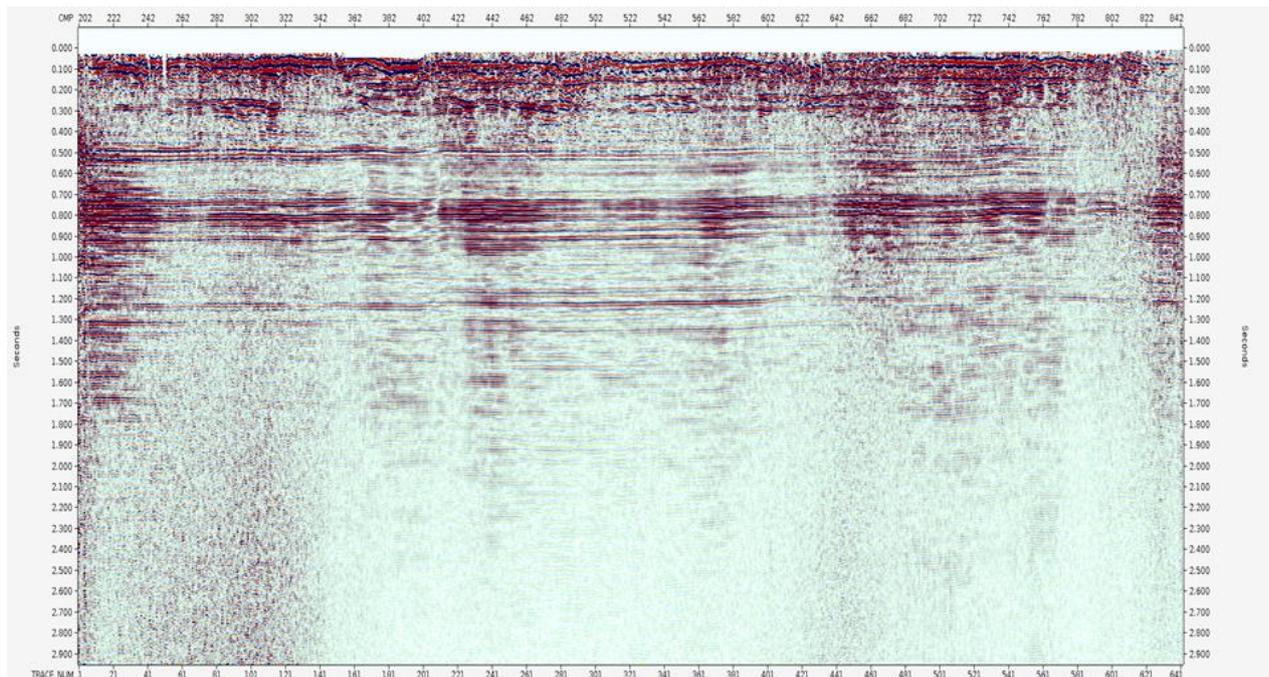


Figure 5 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après éliminations des traces invalides et bruitées.

c) Corrections de la topographie et des variations des vitesses de propagation des ondes sismiques dans la proche surface

Les ondes sismiques sont émises et réceptionnées à la surface terrestre. Cette surface n'est pas plane, les altitudes des sources sismiques et des récepteurs n'étant pas toutes identiques. Elles dépendent de la morphologie du terrain où se déroule l'acquisition sismique. D'autre part, les 20 premiers mètres sous la surface subissent une altération due aux conditions météorologiques, et présentent de fortes hétérogénéités latérales. Ces variations (morphologie et hétérogénéité du sous-sol) entraînent des variations des vitesses de propagation des ondes sismiques dans le sol, pouvant déformer voire fortement altérer l'image sismique du sous-sol.

Il est nécessaire de corriger ces variations par des traitements adaptés. Une image corrigée est ainsi obtenue (Figure 6).

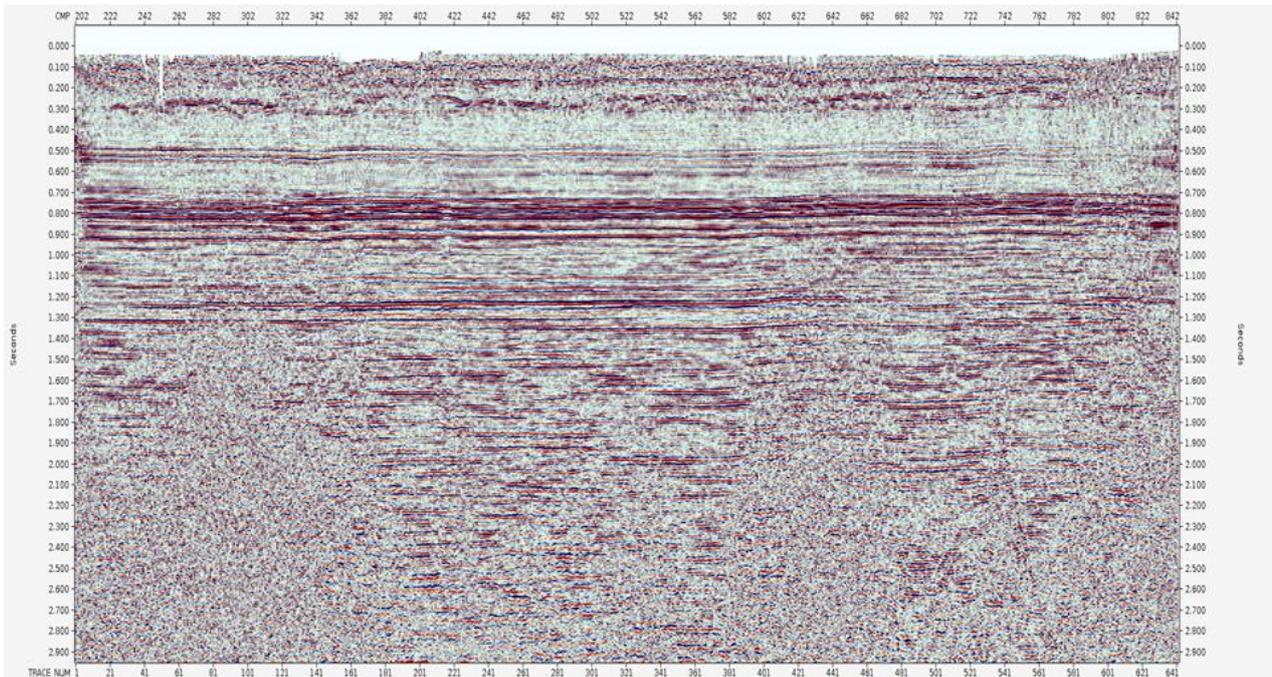


Figure 6 : Image de la ligne sismique 88PIF13 après corrections de la topographie et des variations de vitesses dans la proche surface.

d) L'addition des traces sismiques et la migration

Les données sismiques sont un ensemble de traces élémentaires qui peuvent être rangées de différentes façons : soit en point de tir, comme lors de l'acquisition (Figure 2 : tir sismique), soit par exemple en CMP (Figure 3) lors du traitement. Cependant lors du traitement, les traces élémentaires suivant le traitement qui leur sera appliqué pourront être rangées dans un autre ordre.

L'image finale (Figure 8) s'obtient par l'addition de toutes les traces élémentaires constituant chaque CMP. Avant cette addition, il faut que les événements sismiques correspondant à un horizon géologique, soient d'une part remis à leur position réelle, processus de « migration » et d'autre part soient tous alignés à l'intérieur d'un même CMP, avant le processus « d'addition des traces sismiques ».

Dans le sous-sol, où les couches géologiques ou bien tout objet géologique (exemple : failles) sont très pentés, leur position sur l'image sismique, à ce stade du traitement, est éloignée de leur position réelle. Le procédé qui permet la remise en place des événements à leur position réelle, appelé « migration », est alors appliqué. Sur la Figure 7a, les structures concaves avant migration dans les ellipses rouges et bleues, sont migrées à leur position réelle dans les ellipses de même couleur sur la Figure 7b.

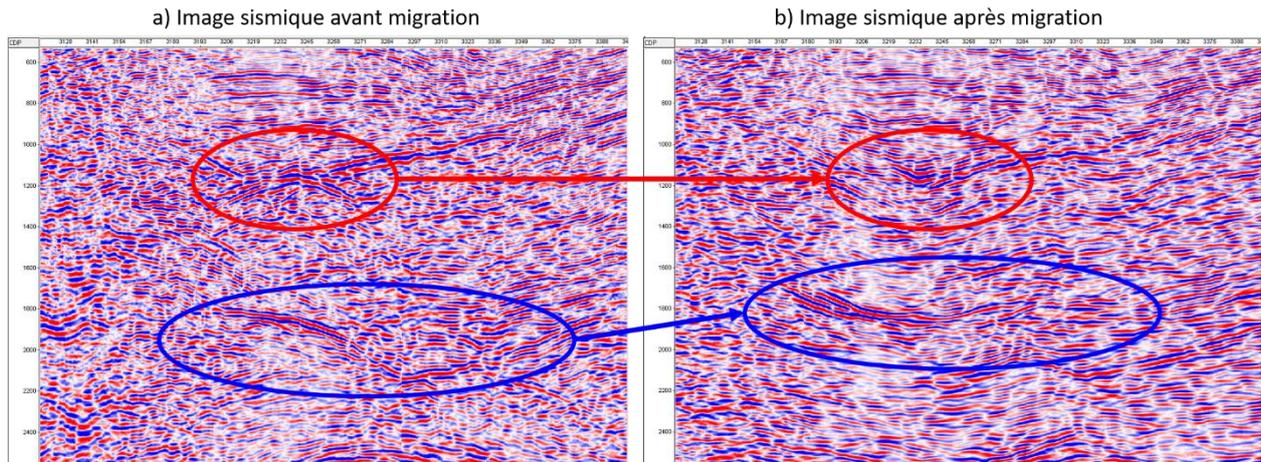


Figure 7 : Exemple de la remise en place de structures à leur position réelle après migration.
7a) avant migration ; 7b) après migration.

Le processus dit de « migration » permet de mieux restituer la géométrie des couches du sous-sol. Une migration, en temps, avant addition des traces a été effectuée.

Quand les traces élémentaires ont été migrées, l'image finale (Figure 8) est obtenue par l'addition de toutes les traces imageant un même point en profondeur pour n'obtenir qu'une seule trace imageant ce point. Cependant avant l'addition des traces élémentaires, il est nécessaire que tous les évènements sismiques correspondant à un horizon géologique soient tous alignés. C'est la correction « Normal Move Out » (NMO). Ainsi le signal cohérent s'additionne et image les horizons géologiques. Il peut arriver, que les évènements sismiques ne soient pas tous parfaitement alignés. Il en résulte que l'addition de ces évènements sismiques induit un mélange d'amplitudes non représentatif de la réalité.

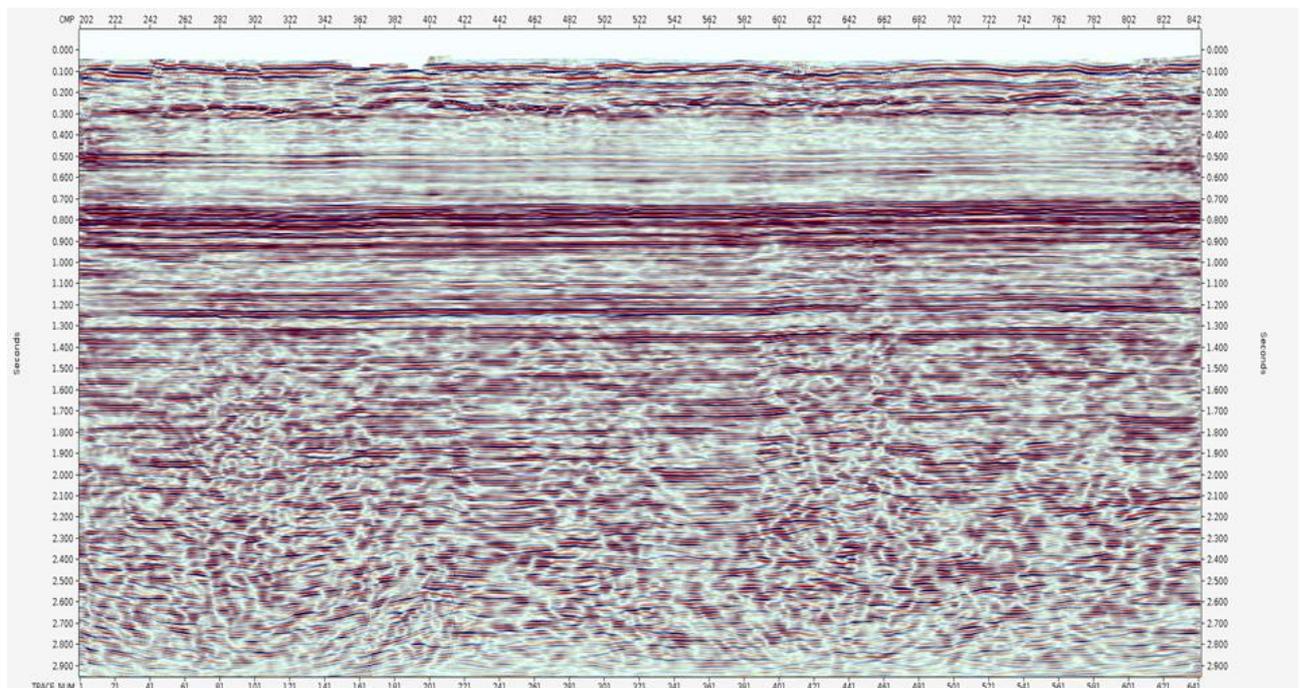


Figure 8 : Image finale de la ligne sismique 88PIF13 après migration et addition.

2.1.4. La résolution sismique

a) La résolution latérale

La résolution latérale est dépendante de la zone de Fresnel, qui est la distance entre la source sismique et le récepteur.

C'est le rayon (r) de la zone de Fresnel qui va permettre d'estimer la résolution latérale. Il dépend de la fréquence (f) et de la vitesse de propagation des ondes (V) au-dessous du réflecteur à imager, ainsi que du temps de propagation de l'onde (t).

$$r \approx \frac{V}{2} * \sqrt{t/f}$$

Le Tableau 2 donne à titre indicatif des limites de résolution latérale.

t (ms)	V (m/s)	F (Hz)	R (m)
1 000	3 000	45	220
1 300	3 500	45	300

Tableau 2 : Tableau indicatif des limites de résolutions latérales des données de sismique réflexion des années 1980.

Le Dogger du Bassin parisien, se situe entre 1 500 mètres et 2 300 mètres de profondeur. La résolution latérale des données enregistrées à la fin des années 1980 est de l'ordre de 250 mètres, ce qui implique que tout objet géologique de moins de 250 mètres de long, ne pourra être correctement identifiable.

b) La résolution verticale

La résolution verticale est reliée à la longueur d'onde du signal sismique (λ). λ est fonction de la fréquence dominante (f) du signal sismique et de la vitesse de propagation de l'onde (V) dans le sous-sol.

D'où : $\lambda = V/f$, et la résolution verticale minimale est égale à $\lambda/4$.

L'épaisseur minimale d'une couche dont on peut distinguer séparément le toit et le mur est la limite de cette résolution.

Dans ce projet, la fréquence dominante est d'environ 40 Hz et la vitesse de propagation moyenne de 2 500 m/s dans les 2 premières secondes de l'enregistrement. La résolution verticale minimale dans les 2 premières secondes est d'environ 15 mètres. En dessous de 2 secondes d'enregistrement, la fréquence dominante est d'environ 30 Hz et la vitesse de propagation moyenne de 3 500 m/s, soit une résolution verticale minimale d'environ 30 mètres.

2.2. LES DONNÉES DE PUIITS

Afin de réaliser l'interprétation quantitative, il est nécessaire de s'appuyer sur un ensemble de paramètres physiques mesurés dans les puits, permettant de connaître ponctuellement les propriétés pétrophysiques des couches. Ce jeu de paramètres se compose au minimum des diagraphies suivantes :

- des mesures de la radioactivité naturelle (enregistrées par la diagraphie « Gamma Ray » (ou GR)) ;
- des mesures de vitesse de propagation des ondes sismiques de compression (ondes P) dans le sous-sol (enregistrées par la diagraphie « Sonic P ») ;
- des mesures de densité (enregistrées par la diagraphie « RhoB ») et/ou des mesures de la radioactivité provoquée (enregistrées par la diagraphie « Neutron » ou « NPHI »).

Cependant d'autres paramètres peuvent aussi être enregistrés dans les puits et utilisés pour l'interprétation quantitative afin d'affiner les résultats, notamment des mesures de vitesse de propagation des ondes sismiques de cisaillement (vitesses des ondes S ou Vs).

L'ensemble de ces paramètres est enregistré lors des forages, en descendant les outils de mesures adéquats dans les puits. Les données obtenues, sont des diagraphies (Figure 9).

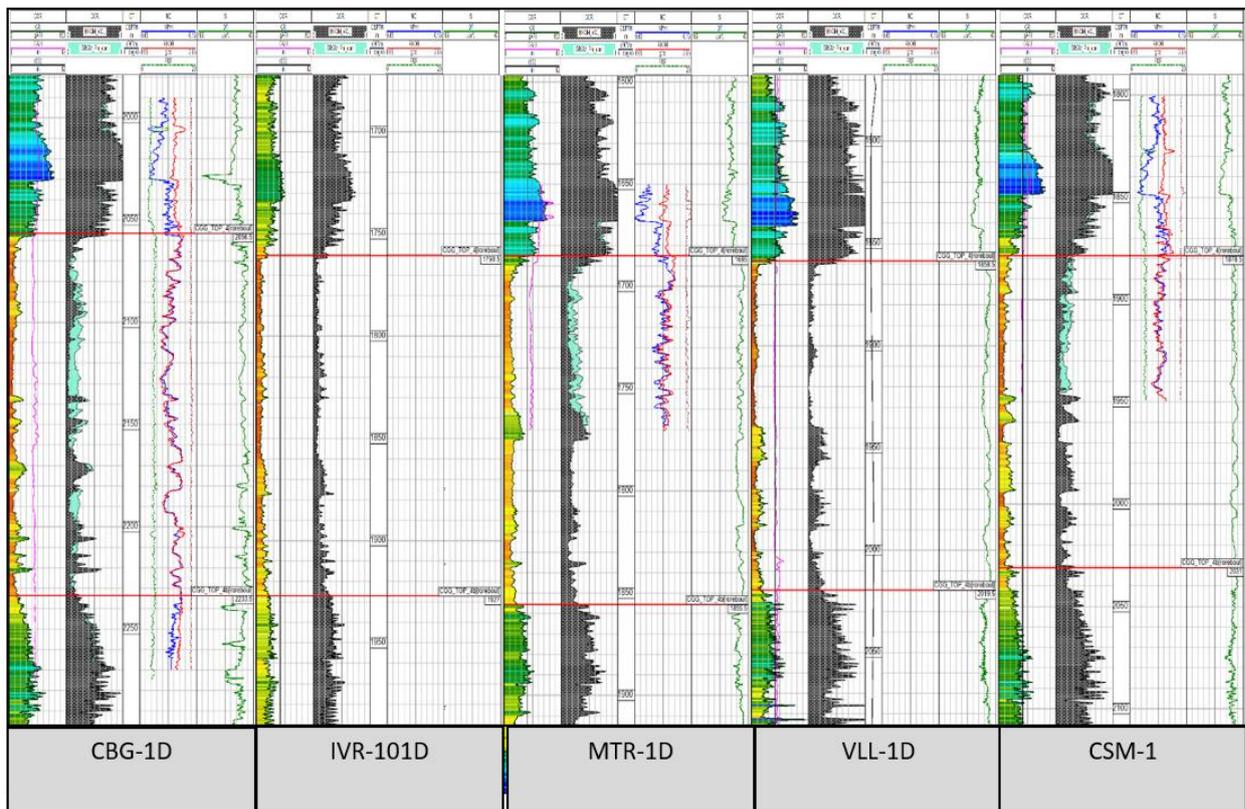


Figure 9 : Exemple de diagraphies sur les puits pétroliers

Dans la zone d'étude, 27 puits géothermiques sont présents à proximité des cinq lignes sismiques ainsi que 5 puits pétroliers dans un rayon de plusieurs kilomètres (Figure 1) (la liste des puits est fournie en Annexe 1). Les puits géothermiques, ont tous une diagraphie « Gamma Ray » et soit une diagraphie « Sonic-P » soit une diagraphie « RhoB », ou les deux. Cinq puits pétroliers (GBG-1D, MTR-1D, CSM-1, VLL-1D, IVR-101D) (Annexe 1) ont été utilisés pour les données de diagraphies Gamma Ray, Sonic-P, Densité et Neutron, celles-ci traversant entièrement le réservoir du Dogger.

3. Analyse des données pour l'interprétation quantitative

3.1. LES DONNÉES DE SISMIQUE REFLEXION

Les données retraitées de sismique réflexion, ont été utilisées pour effectuer l'interprétation structurale et quantitative du Dogger du Bassin parisien.

Avant d'effectuer l'interprétation quantitative, plusieurs informations et paramètres sur les données de sismique réflexion sont nécessaires :

- l'information sur la polarité des données de sismique réflexion et sur leur phase issue du traitement (Yilmaz, 1987) ;
- la résolution verticale des données de sismique réflexion doit être suffisante pour pouvoir distinguer le réservoir cible ;
- un contenu fréquentiel des données de sismique réflexion, assez large et contenant des basses et hautes fréquences (Yilmaz, 1987) ;
- il est possible que du bruit dans les données sismiques puisse localement être encore présent sur les traces individuelles, mais non visible sur l'image finale. Si le bruit affecte le réservoir cible, il est important de l'atténuer voir de l'éliminer, en utilisant des traitements adaptés, toujours en amplitude préservée ;
- les évènements dans le CMP bien alignés ;
- des données sismiques issues d'un traitement en amplitude préservée et dont les variations d'amplitudes sont principalement dues à la géologie.

3.1.1. Informations et paramètres sur les données de sismique réflexion pour l'interprétation quantitative du Dogger du Bassin parisien

Chaque réservoir cible a ses propres caractéristiques pétrophysiques. Afin de focaliser l'interprétation quantitative dans le Dogger, un pointé des horizons géologiques du toit et de la base du réservoir du Dogger a été effectué sur les cinq lignes sismiques.

Pour cela, il est important de connaître la polarité et la phase des données sismiques retraitées, afin de déterminer le signal sismique représentant l'horizon géologique à interpréter. D'un point de vue international, le comité des normes techniques de la « Society of Exploration Geophysicists » (SEG) définit les spécifications techniques (notamment la polarité) pour les données sismiques. Lors de l'acquisition, la convention pour la polarité est en général indiquée dans les documents (conforme aux normes « SEG », ou l'inverse). La phase est contrôlée lors du traitement sismique.

Dans cette étude, aucune information sur la convention de polarité n'est disponible dans les documents. Une étude à partir des sismogrammes synthétiques, issus des données de puits, indique que la polarité des données sismiques pourrait être normale ou inverse. Aux vues des analyses effectuées et de précédentes études sur la région (Thinon 2007, Beccaletto *et al.* 2007) la polarité normale a été choisie (Figure 10). Le contrôle de la phase, indique un signal zéro-phase (Figure 11).

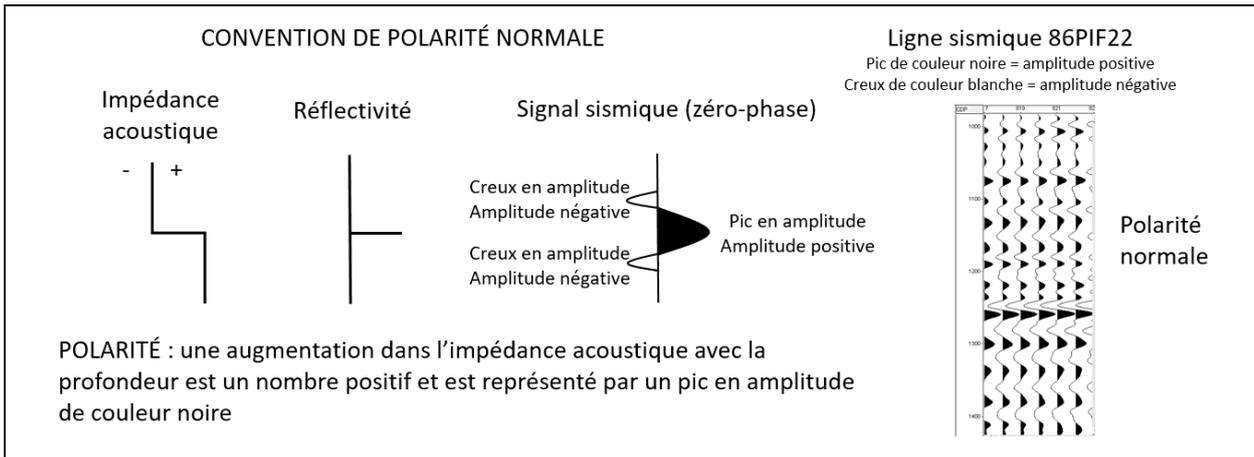


Figure 10 : Convention de polarité normale et polarité des lignes sismiques du projet.

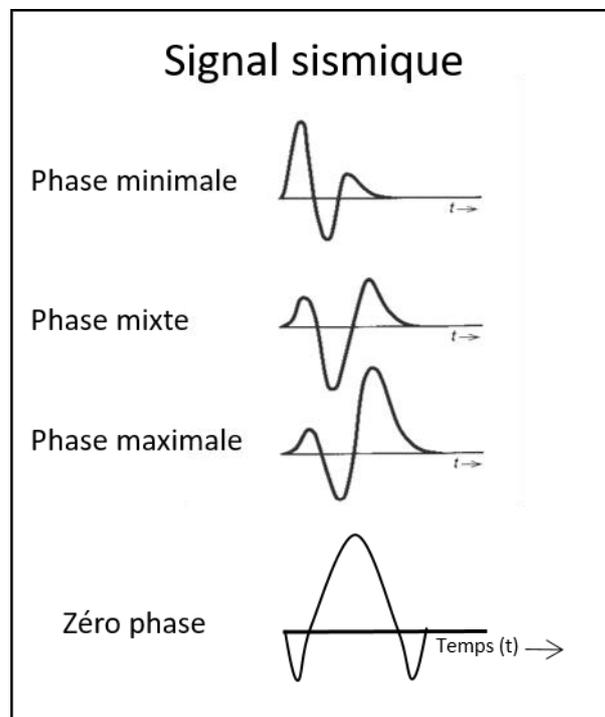


Figure 11 : Les différentes phases pour une ondelette sismique.

Sur les cinq lignes sismiques du projet, le toit du Dogger, correspondant au Toit de la Dalle Nacrée, correspond à un pic en amplitude, soit une amplitude positive (Figure 12). La base du Dogger, dans cette étude, le Bajocien moyen, correspond à un creux en amplitude, soit une amplitude négative (Figure 12). Sous le Bajocien Moyen se trouve les Marnes à Ostrea acuminata.

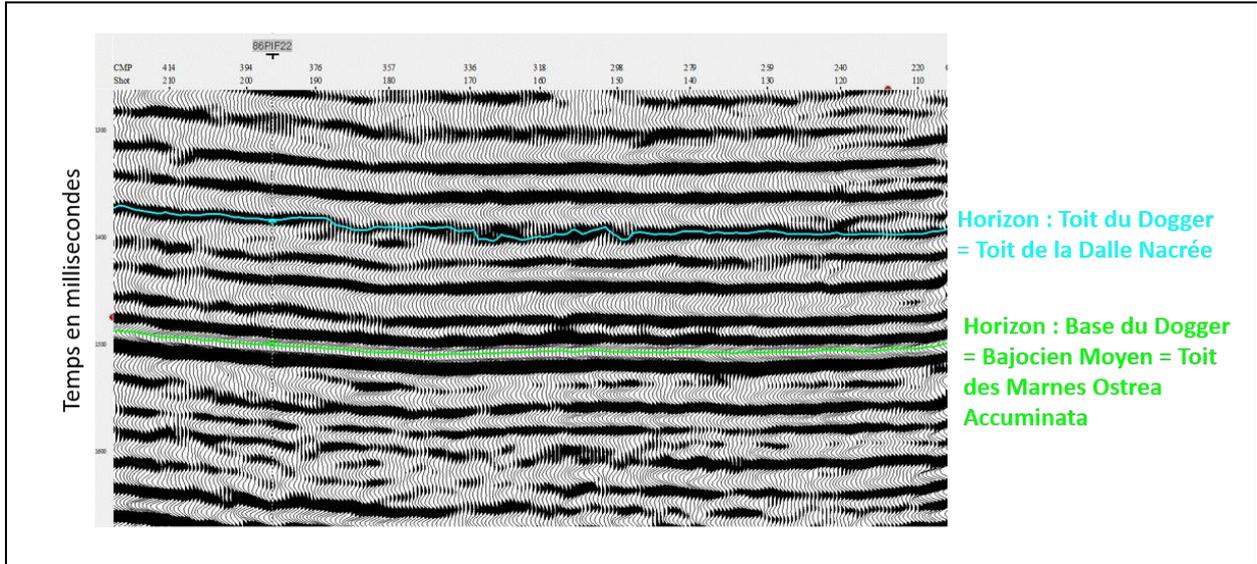


Figure 12 : Exemple de pointé des horizons de la Dalle Nacrée et du Bajocien Moyen – Ligne sismique 86PIF03.

La résolution verticale des cinq lignes sismiques est de l'ordre de 20 mètres. Le Dogger faisant environ 150 mètres d'épaisseur, le toit et la base ainsi que diverses réflexions sismiques à l'intérieur du Dogger sont visibles et identifiables.

Le contenu fréquentiel des cinq lignes sismiques retraitées est homogène entre les différentes lignes et va des basses fréquences (5 Hz – 15 Hz environ – Figure 13) aux hautes fréquences (85 Hz – 125 Hz environ - Figure 14). La fréquence dominante est de 45 Hz. La présence d'un pic de fréquence vers 8 Hz dans le spectre d'amplitude (Figure 15) ne correspond pas au contenu fréquentiel original : 15 Hz- 85 Hz. Il provient d'un traitement sur les données sismiques et a été enlevé par l'application d'un filtre fréquentiel 5-15 Hz/85-125 Hz (Figure 16).

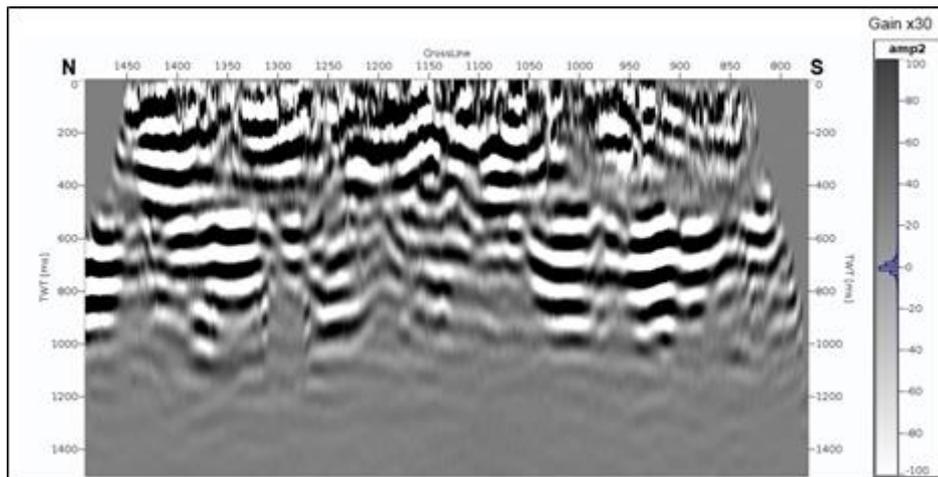


Figure 13 : Exemple de basses fréquences 5 – 15 Hz sur la ligne 86PIF22.

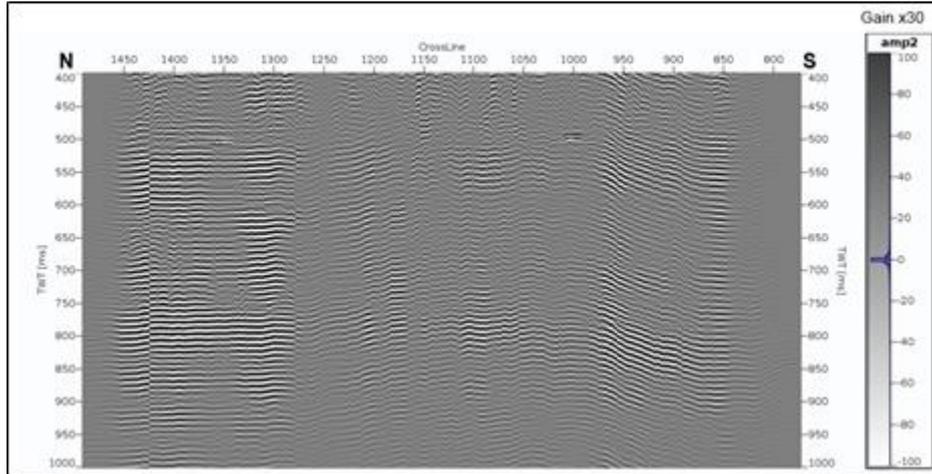


Figure 14 : Exemple de hautes fréquences 85 – 125 Hz sur la ligne 86PIF22.

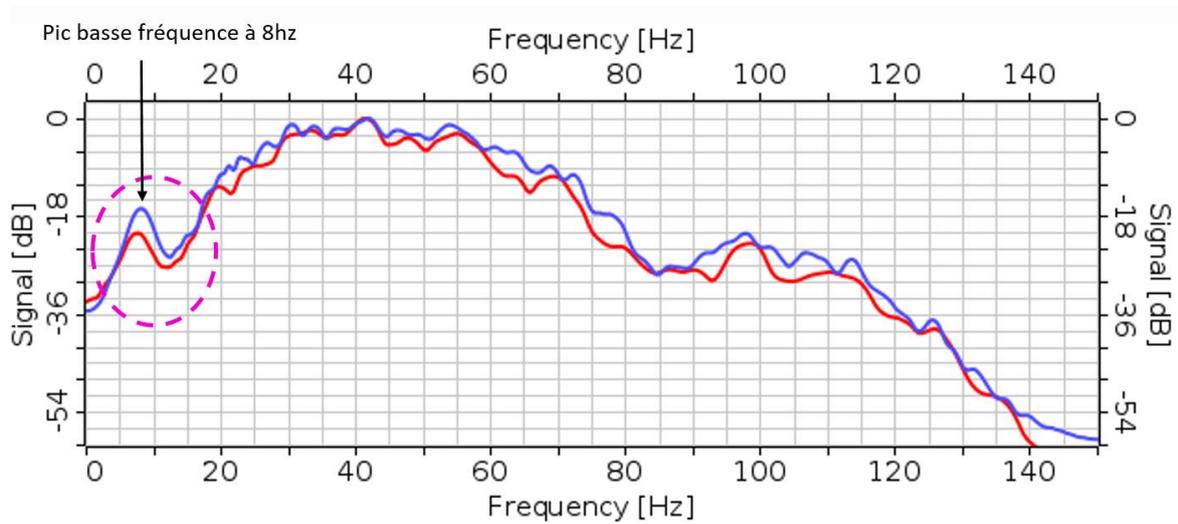


Figure 15 : Spectre d'amplitudes sur la ligne sismique 86PIF22. En bleu entre 400 et 1 500 ms TWT, en rouge entre 700 et 1 300 ms TWT.

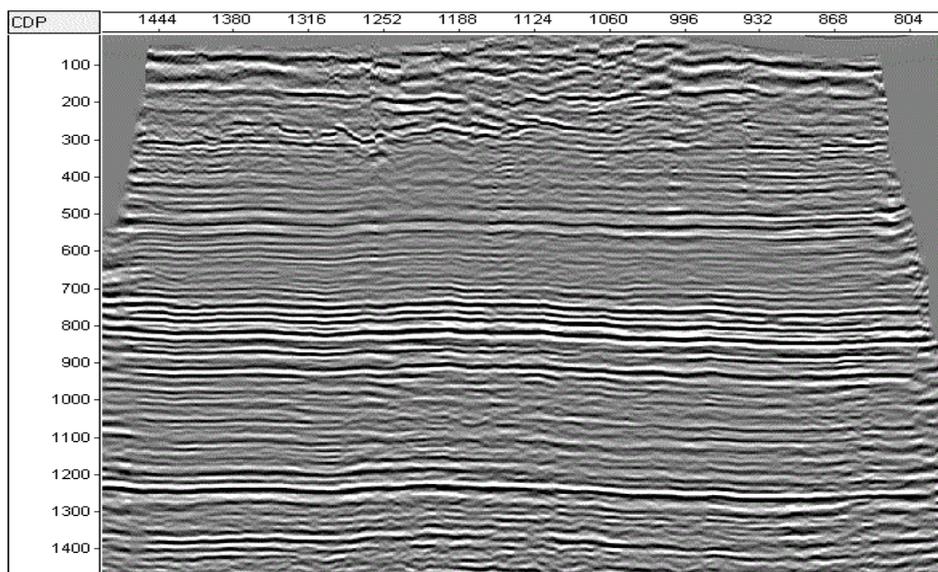


Figure 16 : Ligne 86PIF22 avec application du filtrage final, éliminant la fréquence à 8 Hz.

Sur les lignes sismiques, 86PIF03 et 88PIF13, du bruit est présent sur quelques zones, au-dessus du réservoir cible du Dogger et est visible sur les traces unitaires en CMP (Figure 17). Ce bruit sur les points de tir n'a pas un caractère linéaire cohérent. Il est difficile de l'atténuer voir de l'éliminer avec les processus de traitement et il est dans les mêmes fréquences que le signal sismique. Ce bruit provient très certainement d'ondes de surface et des interférences avec les ondes acoustiques des vibrateurs. Ce bruit est moins visible sur l'image sismique finale (Figure 18). Il n'a pas été corrigé dans ce projet, car il n'affecte pas le réservoir du Dogger. L'analyse générale des lignes sismiques a montré un bon rapport signal/bruit entre 15 Hz et 60 Hz.

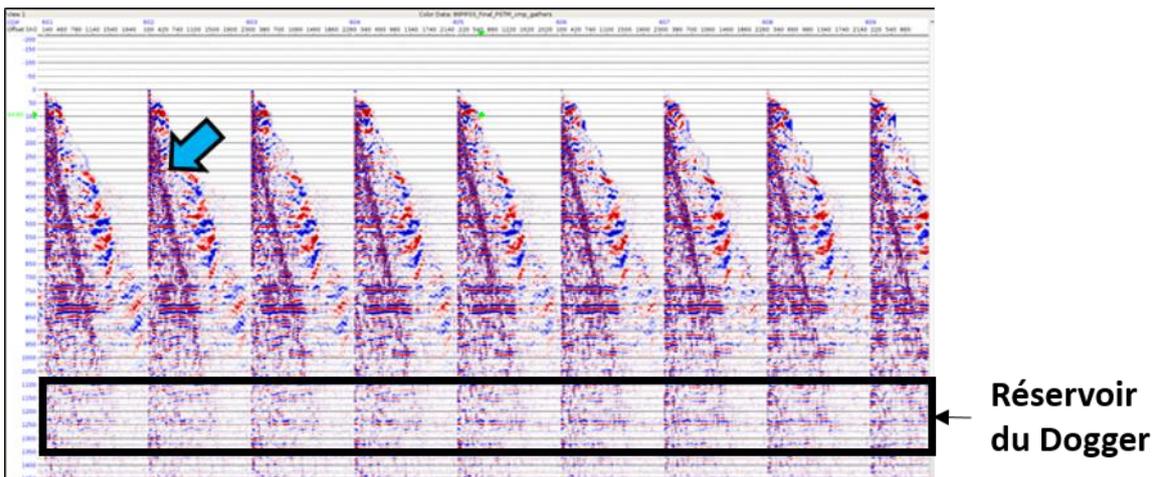


Figure 17 : Illustration du bruit sur les CMP de la ligne 86PIF03 indiqué par la flèche bleue sur un CMP.

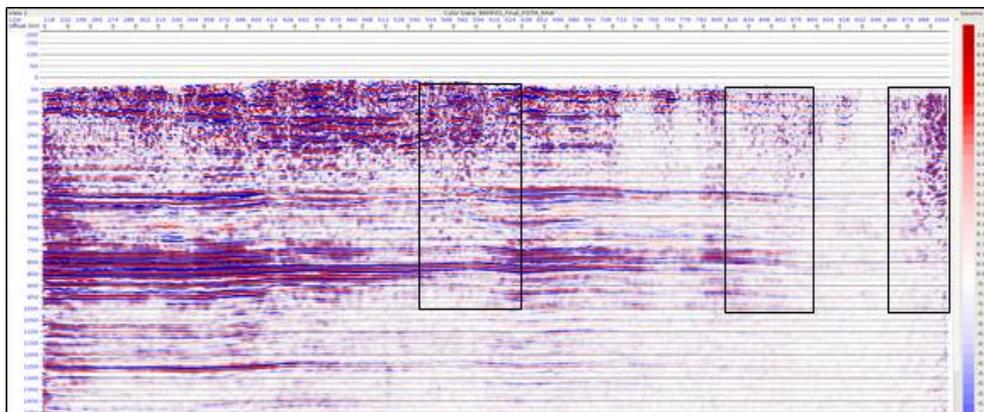


Figure 18 : Illustration de l'absence de bruit sur la ligne 86PIF03 dans les encadrés noirs.

L'analyse des CMP a montré qu'à certains endroits, les événements sismiques n'étaient pas parfaitement alignés (Figure 19). Ceci peut avoir un impact sur les résultats de l'interprétation quantitative. Dans le cas d'un mauvais alignement du signal sismique pour un événement donné, il y a un mélange d'amplitude. Ceci peut être corrigé, en modifiant les vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol dans la séquence de traitement sismique, si les milieux traversés ne présentent pas trop d'hétérogénéités.

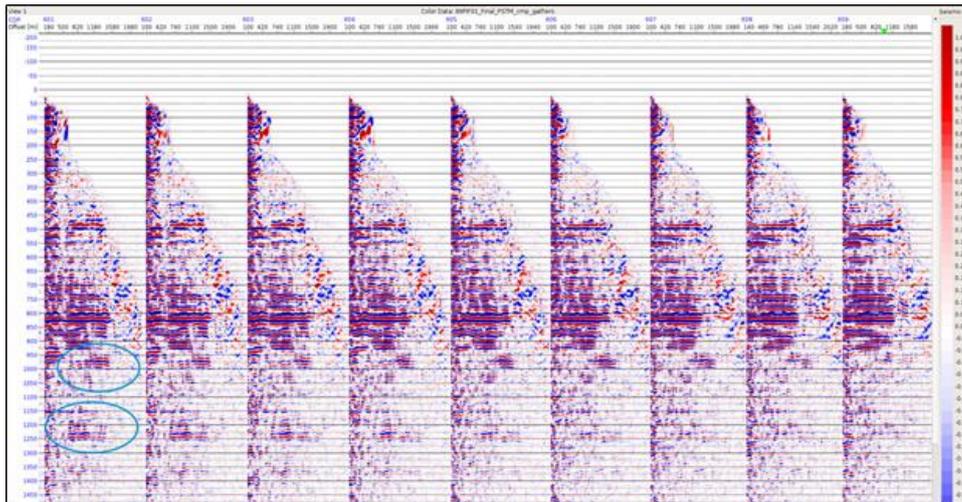


Figure 19 : Exemple de CMP sur la ligne 86PIF01 montrant des événements sismiques pas parfaitement alignés.

Les données de sismique réflexion ont été retraitées en amplitude préservée. Lors de l'analyse des amplitudes, il est apparu des variations latérales et verticales d'amplitude, avec des panneaux de fortes et de faibles amplitudes (Figure 21). Ces panneaux latéraux et verticaux, de grandes longueurs d'ondes ne sont pas dus à la géologie. Ils ont été corrigés (Figure 21).

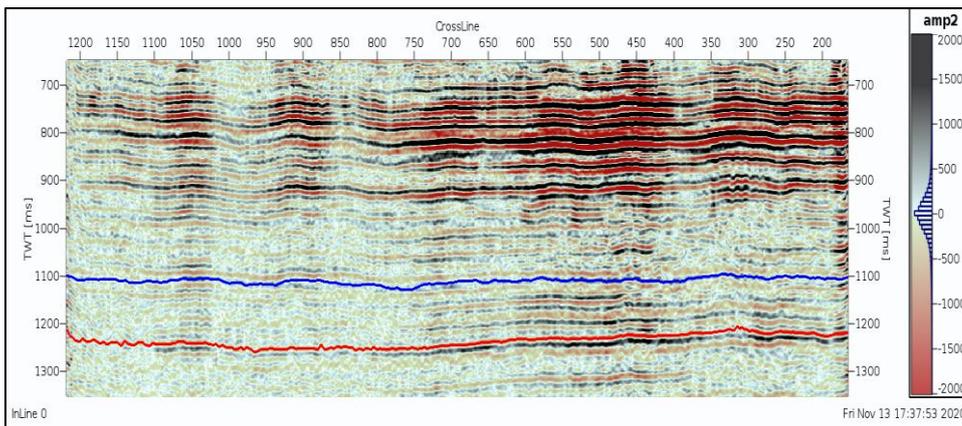


Figure 20 : Ligne 86PIF01 montrant des panneaux latéraux et verticaux de faibles et fortes amplitudes.

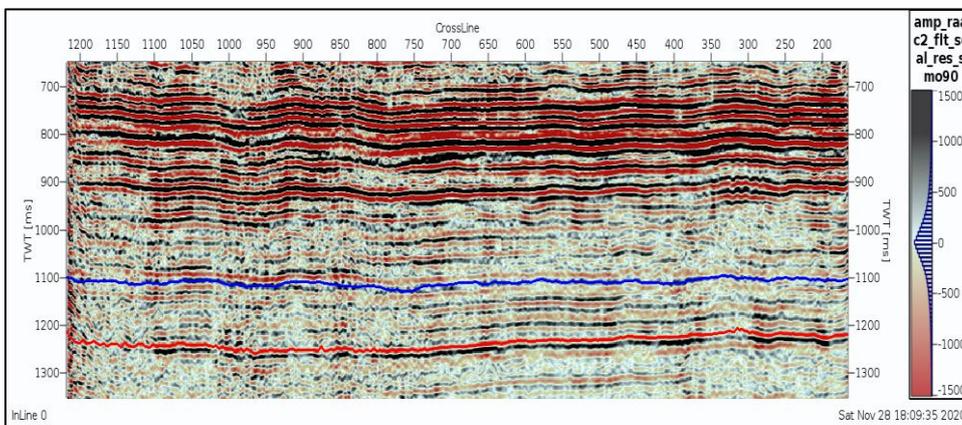


Figure 21 : Ligne 86PIF01 après corrections des panneaux de fortes et de faibles amplitudes.

Le contrôle des lignes sismiques aux croisements montre des corrélations élevées, notamment au niveau du Dogger. Après corrections, les amplitudes sont globalement homogènes et comparables, dans le Dogger, entre les différentes lignes.

L'ensemble de ces contrôles permet de vérifier la stationnarité, la cohérence du signal sismique, sa résolution et la qualité des amplitudes sismiques qui doivent être principalement reliés à la nature du sous-sol, hypothèses sur lesquelles l'inversion sismique acoustique est basée.

3.2. LES DONNÉES DE PUIITS

L'analyse des puits géothermiques montre qu'ils s'arrêtent au milieu du Dogger, dans le Bathonien et que les diagraphies nécessaires à l'interprétation quantitative ne sont pas toutes disponibles. Ce manque d'informations a nécessité la recherche de puits ayant des informations sur l'ensemble du Dogger et le jeu de diagraphies nécessaires. Cinq puits pétroliers, CBG-1D, IVR-101D, MTR-1D, VLL-1D et CSM-1, situés à quelques kilomètres des lignes sismiques ont été utilisés dans cette étude.

Le contrôle des diagraphies des puits pétroliers, par une représentation graphique, Sonic-P/Neutron (Figure 22) montre par exemple, que les diagraphies de Sonic-P et de Neutron pour le puits de MTR-1D doivent être éditées. Les puits pétroliers IVR-101D et VLL-1D n'ont pas de diagraphies de Neutron dans le Dogger. C'est pour cette raison qu'ils n'apparaissent pas sur le contrôle des diagraphies Sonic-P/Neutron (Figure 22).

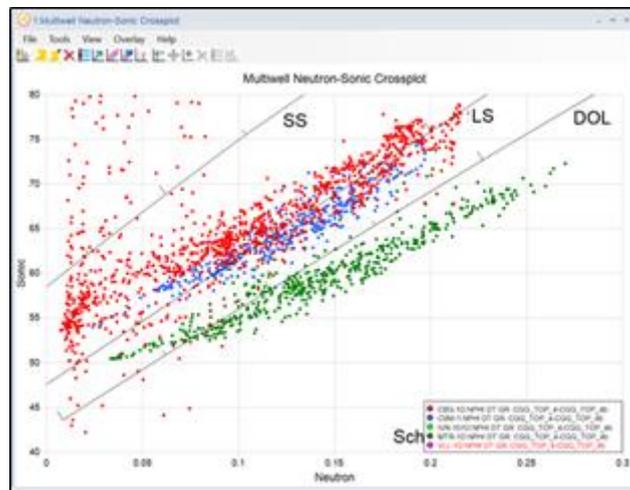


Figure 22 : Contrôle des diagraphies Sonic-P/Neutron des puits CBG-1D (rouge), CSM-1 (Bleu), MTR-1D (vert).

Les points en vert sur la Figure 22 ne sont pas alignés sur la tendance générale des deux autres puits (points rouges et bleus). On observe une légère dispersion pour le puits CBG-1D qui devra être corrigée.

L'analyse des diagraphies des puits géothermiques (Figure 23) a permis de mettre en avant le besoin essentiel d'un travail d'édition sur les diagraphies de Gamma Ray, Sonic-P, Densité ou Neutron.

Par exemple, la diagraphie de Densité du puits géothermique GTRE-1 est anormale par rapport aux diagraphies de Densité des autres puits géothermiques. Pour le puits GCHE-1, il y a une légère augmentation des valeurs de Neutron et la diagraphie de Sonic-P du puits GVG-1 a des valeurs faibles (Figure 23).

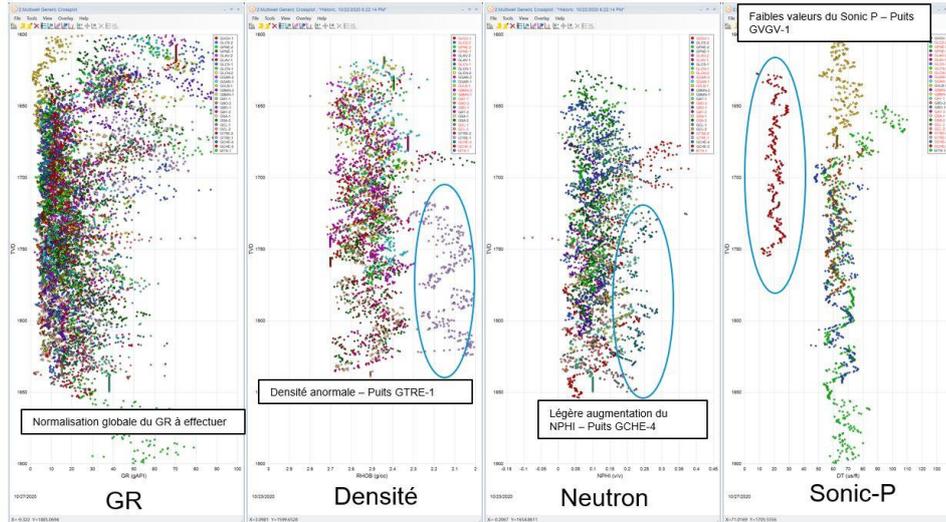


Figure 23 : Contrôle des diagraphies Gamma Ray/Densité/Neutron/Sonic-P pour les puits de géothermie.

Une normalisation globale, des diagraphies de Gamma Ray, a été effectuée. Cette normalisation des diagraphies de Gamma Ray est classique et corrige des différences de valeurs dues à l'utilisation de différents outils et calibrations utilisés lors des différents forages. Les corrections apportées aux autres diagraphies (Sonic-P, Densité ou Neutron) ont corrigé des erreurs de mesures. Les éditions et normalisations des données de diagraphies dans le Dogger montrent une grande cohérence des diagraphies, à la fois au niveau des diagraphies de Gamma Ray (donc des grandes variations lithologiques) mais également au niveau des diagraphies de Sonic-P, Densité et Neutron, montrant une forte cohérence entre chaque diagraphie (Figure 24 et Figure 25).

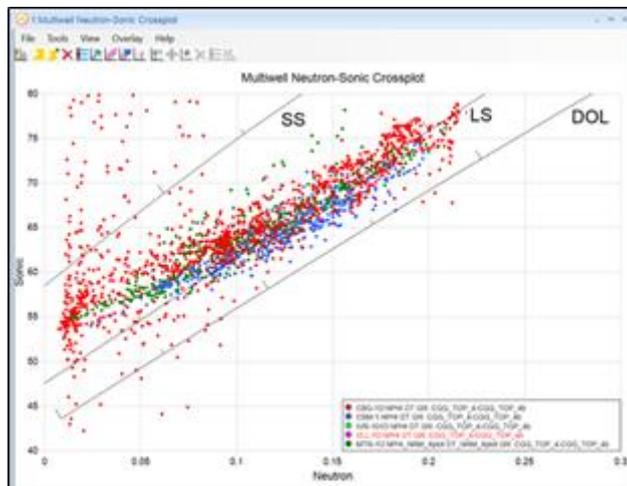


Figure 24 : Résultats après corrections et éditions de la diagraphie Sonic-P/Neutron des puits MTR-1D en vert. CBG-1D (rouge), CSM-1 (Bleu).

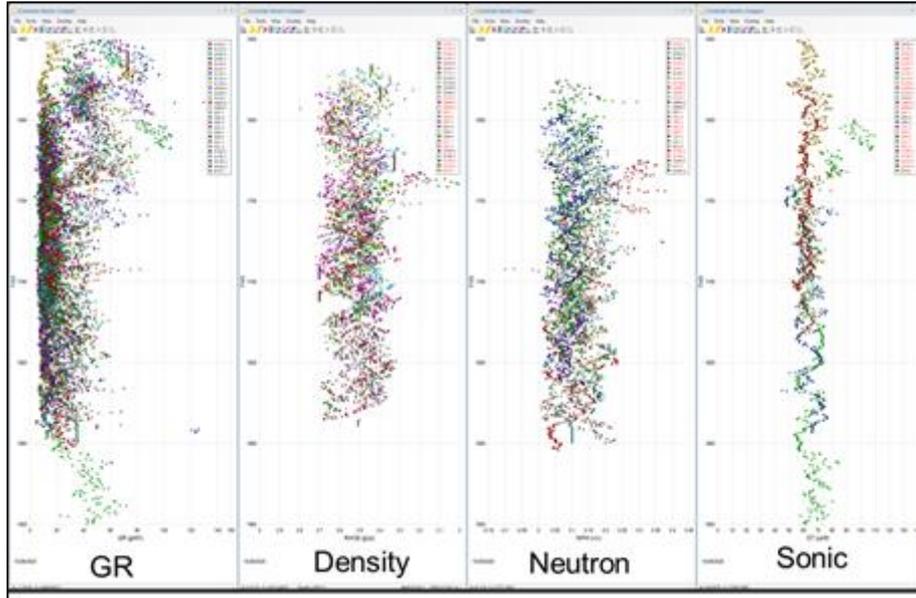


Figure 25 : Résultats après normalisation et corrections des diagraphies Gamma Ray/Densité/Neutron/Sonic-P pour les puits de géothermie.

Les éditions spécifiques de diagraphies sur certains puits ont été nécessaires. Cependant, une analyse approfondie a été faite pour s'assurer que les variations visibles sur les diagraphies n'étaient pas dues à une variation géologique. L'analyse des diagraphies et des données sur carottes a permis de valider les éditions effectuées afin de retrouver les mêmes caractéristiques diagraphiques que les autres puits.

Après correction, les diagraphies des puits pétroliers, ont été utilisées comme modèle dans la création de régressions multilinéaires, ayant pour objectif de récréer les diagraphies manquantes (Sonic-P, Densité et Neutron) de l'ensemble des puits géothermiques.

3.3. LES CALAGES TEMPS-PROFONDEUR (PUITS-SISMIQUE)

Dans la partie inversion sismique acoustique de ce projet, les puits sont une donnée importante qui est utilisée dans la construction du modèle acoustique initial, utilisé en entrée de l'inversion sismique acoustique. Les diagraphies des puits (Sonic-P, Densité, Impédance) sont traitées afin de ne garder que la partie basse fréquence manquante à la donnée sismique, avant d'être utilisées pour le remplissage du modèle.

Les données de puits sont des mesures en profondeur, alors que la sismique est une mesure en temps. L'utilisation des puits nécessite la création d'une loi temps- profondeur (TFP) calibrée à la sismique, qui permet le passage du domaine profondeur au domaine temps. Cette loi permet de savoir à quel temps correspond quelle profondeur et réciproquement. La loi TFP est créée à partir des données de puits et de la sismique. Si les données sismiques et de puits sont de bonne qualité, alors le calage entre elles, sera d'autant plus fiable.

Cependant, dans ce projet, aucune des cinq lignes sismiques ne passe directement par la position des puits disponibles. Il faut donc projeter les informations des puits sur les lignes sismiques, sur des distances variant de centaines de mètres à quelques kilomètres. La géologie de la zone étudiée étant relativement simple cette approche est possible, mais peut être un facteur d'erreur.

Une seconde source d'incertitudes provient du fait que certains puits sont projetés au bout de la ligne sismique, là où des artefacts dus à la migration sont présents, rendant le calage moins fiable entre les données de puits et la sismique.

La troisième source d'incertitudes est liée aux diagraphies de certains puits, en particulier les puits de géothermie, sur la zone d'étude, qui ne couvrent que la partie supérieure du Dogger, ce qui ne permet pas de faire un calage correct avec la sismique, par manque de données.

Finalement, l'absence d'informations sur la polarité des données sismiques (à savoir si une amplitude positive du signal sismique représente un contraste positif d'impédance ou un contraste négatif) est un autre facteur d'incertitudes qui n'a pas pu être levé du fait de l'ambiguïté entre un décalage en temps et un changement de polarité (Figure 26) Un contenu fréquentiel basse-fréquence plus important dans les données sismiques aurait sans doute permis de statuer entre les deux scénarii.

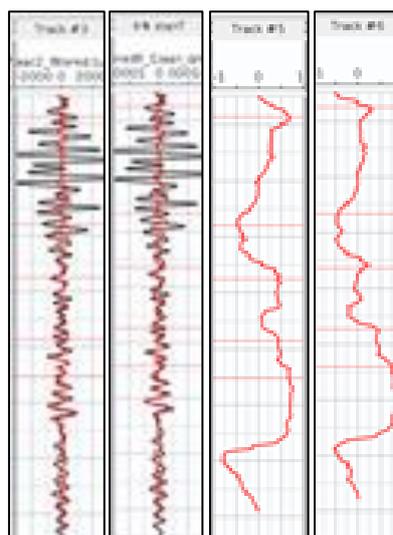


Figure 26 :Exemple d'ambiguïté de calage en temps pour le puits MTR-1D.

La figure 26 montre, un exemple de l'ambiguïté de calage temps pour le puits MTR-1D. En détaillant la Figure 26, de la gauche vers la droite : le premier graphe montre la trace sismique extraite le long du puits au niveau de sa projection sur la ligne sismique (trace noire) après un décalage vertical de 2ms et une trace synthétique calculée en hypothèse de polarité normale (trace rouge) à partir des données de puits. Le second graphe montre la même trace sismique (trace noire) mais après un décalage vertical de -10ms et comparée cette fois à la trace synthétique calculée en hypothèse de polarité inverse (trace rouge). Les troisièmes et quatrièmes graphes présentent respectivement une mesure de la similarité entre les traces synthétiques et les traces extraites de la sismique. On peut observer que la similarité est la même entre un décalage de 2ms avec une polarité normale et un décalage de -10ms avec une polarité inverse.

3.4. INCERTITUDES SUR LES DONNÉES

Les incertitudes sur les données de sismique réflexion viennent principalement des traitements appliqués pour obtenir l'image finale. Il est nécessaire que le traitement soit en amplitude préservée. Cette incertitude sur les données de sismique réflexion n'est pas réellement quantifiable.

L'incertitude sur les données de puits vient principalement de la position des puits par rapport aux lignes sismiques et des lois temps-profondeur pour convertir les données de puits de la profondeur au temps.

Afin de minimiser les incertitudes, il est préférable que :

- les données de sismique réflexion soient de bonne qualité, avec un rapport signal sur bruit élevé, en amplitude préservée et sans effet autres que la nature géologique du sous-sol étudié ou du réservoir étudié ;
- les puits soient sur les lignes sismiques, répartis de façon homogène et en nombre suffisant, avec les diagraphies nécessaires (Gamma ray, Sonic-P/Densité/Neutron, Vs) ;
- d'avoir des lois temps-profondeur, bien réparties sur la zone d'étude.

3.5. CONCLUSIONS SUR LES DONNÉES EXISTANTES POUR L'INTERPRÉTATION QUANTITATIVE

Les données, de sismique réflexion, utilisées dans ce projet montrent une résolution verticale globalement compatible avec l'objectif de l'interprétation quantitative sur le Dogger du Bassin parisien. Le contenu fréquentiel des données sismiques, inhérent aux paramètres d'acquisition des années 1986 et 1988, manque légèrement de basses fréquences. Cependant celles-ci ont été ajoutées au modèle initial de l'inversion sismiques acoustique à partir des données de puits.

Le bruit sur les traces élémentaires n'affecte pas le Dogger et les variations latérales et verticales d'amplitude ont été corrigées. Le léger non-alignement des événements sismiques sur les CMP, ne semble pas affecter les amplitudes.

L'ensemble des diagraphies, Gamma Ray, Sonic-P, Densité, Neutron et Vs disponibles, permet d'avoir les informations pour obtenir une estimation des propriétés petrophysiques du Dogger du Bassin parisien.

3.6. RECOMMANDATIONS SUR LES DONNÉES

L'ensemble de ces recommandations a pour objectif de vérifier la compatibilité des données d'entrée avec l'interprétation quantitative et de minimiser les biais et incertitudes des résultats.

Données de sismique réflexion brutes :

- connaître la convention de polarité en se référant aux documents disponibles, et la phase du signal sismique en le contrôlant lors du traitement par un algorithme adapté, afin de pointer les marqueurs sismiques correspondant au toit et la base du réservoir ;
- résolutions verticale et horizontale compatibles avec les objets étudiés ;
- avoir un contenu fréquence assez large et contenant des basses et des hautes fréquences : les basses fréquences pour le modèle initial d'inversion sismique acoustique, les hautes fréquences pour la résolution verticale nécessaire à identifier le toit et la base du réservoir ainsi que les différentes couches le composant ;
- une qualité des données permettant d'avoir un rapport signal sur bruit compatible avec l'objectif recherché.

Données de sismique réflexion traitées :

À l'issu du traitement, les données de sismique réflexion doivent :

- contenir le moins de bruit possible ;
- les amplitudes doivent être les plus représentatives possibles de la géologie, en évitant les variations latérales et verticales d'amplitudes non liées à la géologie ;
- les événements sismiques, rangés en CMP, doivent être alignés le plus parfaitement possible, afin d'éviter le mélange d'amplitudes ;
- être en amplitude préservée.

Le pointé des horizons du réservoir :

Le pointé des horizons géologiques sur la sismique, doit suivre le même événement sismique sur toutes les lignes du projet.

Les données de puits :

Les puits doivent avoir des diagraphies de Gamma-Ray, et au minimum une diagraphie de Sonic-P, Densité ou Neutron, traversant entièrement le réservoir étudié. Une diagraphie de Vs est un plus.

Les diagraphies doivent être :

- corrigées des erreurs de mesures ;
- normalisées entre elles, afin de corriger des différences de valeurs dues à l'utilisation de différents outils et calibrations utilisés lors des différents forages.

4. Interprétation Quantitative

4.1. DÉFINITION

L'interprétation quantitative des données de sismique réflexion consiste à utiliser l'information contenue dans l'amplitude du signal sismique (après traitement) pour dériver des informations sur les caractéristiques du milieu traversé par ces ondes. Elle peut potentiellement permettre d'évaluer des propriétés pétrophysiques comme la porosité, la perméabilité ou encore le volume d'argile. De par sa couverture spatiale, l'interprétation quantitative des données de sismique réflexion vient compléter l'analyse locale des diagraphies. Très utilisées dans le milieu pétrolier pour identifier les réservoirs et leurs contenus, il est proposé ici de l'appliquer au domaine de la géothermie. En effet connaître la variabilité latérale de propriétés comme la porosité ou la perméabilité est un facteur de succès important de l'exploration géothermique.

4.1.1. Principe

Lors de la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol, une multitude d'effets modifie son amplitude et sa phase. Un de ces effets est la séparation de l'énergie de l'onde sismique, lorsque celle-ci rencontre des couches géologiques aux propriétés élastiques (par exemple : la densité, la vitesse des ondes sismiques) différentes, entre la partie réfléchi du signal vers la surface et la partie transmise qui continue à se propager en profondeur (Figure 27). La séparation de l'énergie dépend des propriétés élastiques du sous-sol elles-mêmes dépendantes des propriétés pétrophysiques du réservoir. L'amplitude du signal enregistrée en surface contient donc des informations sur le milieu traversé et surtout sur les couches desquelles il se réfléchit.

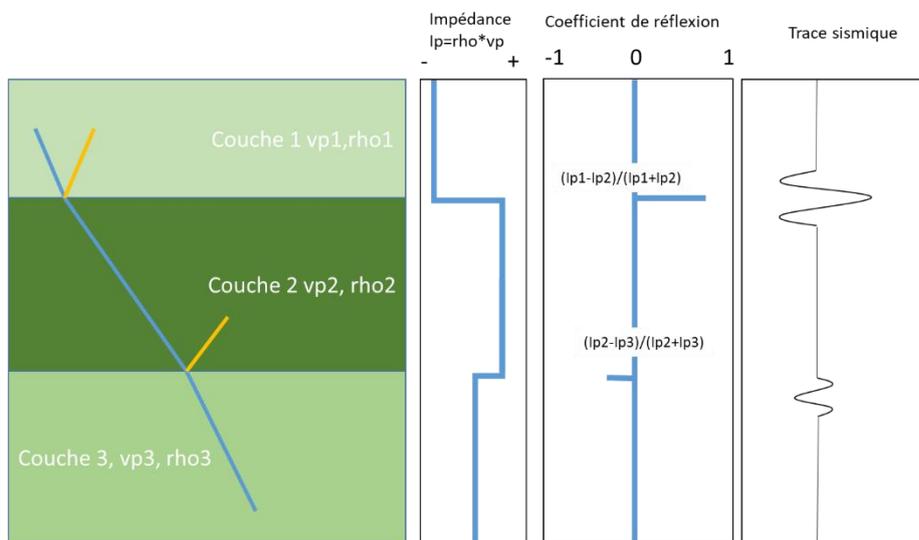


Figure 27 : Illustration simplifiée de la réflexion et de la transmission d'une onde sismique dans le sous-sol.. L'interprétation quantitative consiste à partir de la trace sismique à droite afin de retrouver les propriétés du sous-sol, à gauche.

En mettant en relation les propriétés élastiques du milieu à ses propriétés pétrophysiques, issues notamment des diagraphies enregistrées dans les puits, il est donc possible d'utiliser la sismique pour obtenir des propriétés caractéristiques du réservoir comme la porosité.

Deux types d'approche permettant de passer de la sismique aux propriétés réservoirs sont utilisées sur les données réelles. Une méthode d'inversion sismique acoustique classique et une méthode plus exploratoire, basée sur l'entraînement des réseaux de neurones.

Ces deux techniques s'appuient sur une préparation identique des données sismiques et des puits.

Les données sismiques doivent être préparées de telle sorte à ce que les variations d'amplitude liées à la propagation dans le sous-sol soient préservées, et que toutes autres variations, liées à l'acquisition, par exemple, soient atténuées, voir éliminées. Les chapitres 2 et 3 décrivent la préparation des données pour l'interprétation quantitative.

Les diagraphies jouent un rôle crucial dans l'interprétation quantitative. En effet elles permettent : (1) d'obtenir in-situ, en un point, les données pétrophysiques, (2) de lier des quantités comme la porosité à l'impédance acoustique (propriété élastique dérivée de la sismique), (3) d'obtenir un modèle pétrophysique composé des différents minéraux du réservoir et de l'encaissant et (4) d'établir des relations mathématiques adaptées aux différentes lithologies, liant l'impédance acoustique à la porosité totale.

Dans le chapitre 3, les données de diagraphie dans la zone d'étude ont été contrôlées et les ajustements nécessaires à l'exploitation de ces données ont été effectués.

4.2. ANALYSE PÉTROPHYSIQUE

4.2.1. Création du modèle pétrophysique

Le modèle pétrophysique représente un ensemble d'équations, d'algorithmes ou d'autres représentations mathématiques qui permettent de lier les données issues des diagraphies de puits aux propriétés élastiques (vitesses des ondes sismiques). Dans le cadre de ce projet un modèle pétrophysique composé de trois minéraux (calcite, dolomie, argile) a été dérivé des données de puits et des carottes. Ce modèle permet de bien différencier les parties réservoirs Dogger et la partie encaissante.

En effet l'analyse des données des puits pétroliers dans le Dogger et en dehors a permis d'établir deux relations adaptées à des lithologies différentes et liant l'impédance acoustique à la porosité totale.

La Figure 28 illustre les deux types de régressions (équation mathématique représentant au mieux un ensemble de points) qui caractérisent l'intervalle « Dogger géothermique », défini comme un ensemble lithologique composé principalement de calcaires, situé entre le toit de la Dalle Nacrée et le Bathonien, et l'intervalle « argiles » défini 100 mètres en-dessous et 100 mètres au-dessus du « Dogger géothermique ».

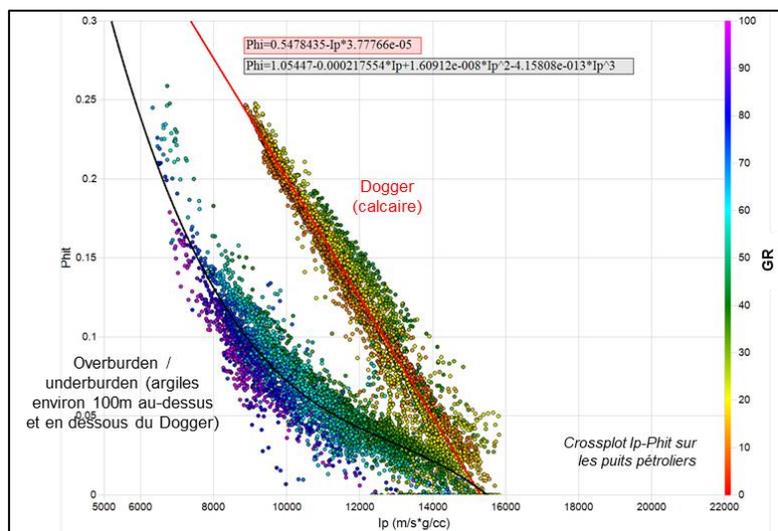


Figure 28 : Graphe Ip -Phi à partir des diagraphies des puits pétroliers, coloré par le Gamma-Ray (en API). Deux tendances sont discriminées (Dogger et argiles au-dessus et en-dessous), modélisées par deux équations $\text{Phi} = f(\text{Ip})$ différentes (courbes noire et rouge).

Dans les équations mathématiques reliant l'impédance acoustique à la porosité, Ip est l'impédance acoustique et Phi, la porosité.

La Figure 28 est importante car elle permet de voir que :

- la porosité peut être prédite à partir de l'impédance, c'est-à-dire à partir de la sismique car les régressions sont de bonne qualité ;
- le Dogger et l'encaissant répondent différemment, c'est-à-dire, que la relation liant impédance et porosité est différente pour ces deux formations géologiques. Il est rassurant de voir que la différence de géologie calcaire du Dogger et « argile » soient bien visible sur ce graphe ;
- l'impédance seule ne permet pas de discriminer le volume d'argile, puisque pour une même valeur d'impédance, on voit que la réponse du Gamma ray est différente pour les argiles (bleu /cyan) et les calcaires (orange/vert) ;

- qu'il y a une très grande sensibilité de l'impédance acoustique du Dogger à des variations de porosité garantissant un fort pouvoir de prédiction.

Il est donc raisonnable de penser que l'interprétation quantitative des données sismiques, permettra d'obtenir des quantités pétrophysiques du Dogger.

Le modèle pétrophysique sera utilisé pour l'entraînement des réseaux de neurones.

4.2.2. Création du modèle d'impédance initial

La création du modèle initial d'impédance est une étape clef du processus d'interprétation quantitative. La sismique enregistrée à la fin des années 80, a une gamme limitée de fréquences et ne possède pas les basses fréquences, qui permettraient de retrouver les variations verticales à grandes longueurs d'ondes des propriétés du sous-sol. Un modèle initial est créé pour y remédier. Le modèle initial, contient les variations à grandes longueurs d'ondes reconstruites à partir des données de puits et extrapolées dans tout le modèle à partir des horizons pointés sur les lignes sismiques. Cette approche est valide, en considérant l'hypothèse de variations latérales de la géologie, faibles.

Pour remplir les modèles initiaux avec les données de puits, deux groupes se distinguent :

- les puits de géothermie qui présentent une trop faible couverture verticale de données ;
- les puits pétroliers qui présentent une couverture de données suffisantes pour décrire correctement la tendance basse-fréquence attendue dans le Dogger.

Après analyse des différents puits seul le puits VLL-1D a été utilisé, car il a été estimé suffisamment représentatif pour décrire à lui seul les tendances basses fréquences sur l'ensemble des lignes sismiques (exemple sur la ligne 88PIF13 : Figure 29).

Le remplissage des modèles initiaux (un pour chaque ligne sismique à inverser) avec les données de puits est également guidé latéralement par des horizons stratigraphiques, Figure 12. Pour cela, deux horizons interprétés sur la sismique sont utilisés : le Toit de la Dalle Nacrée et le Bajocien Moyen.

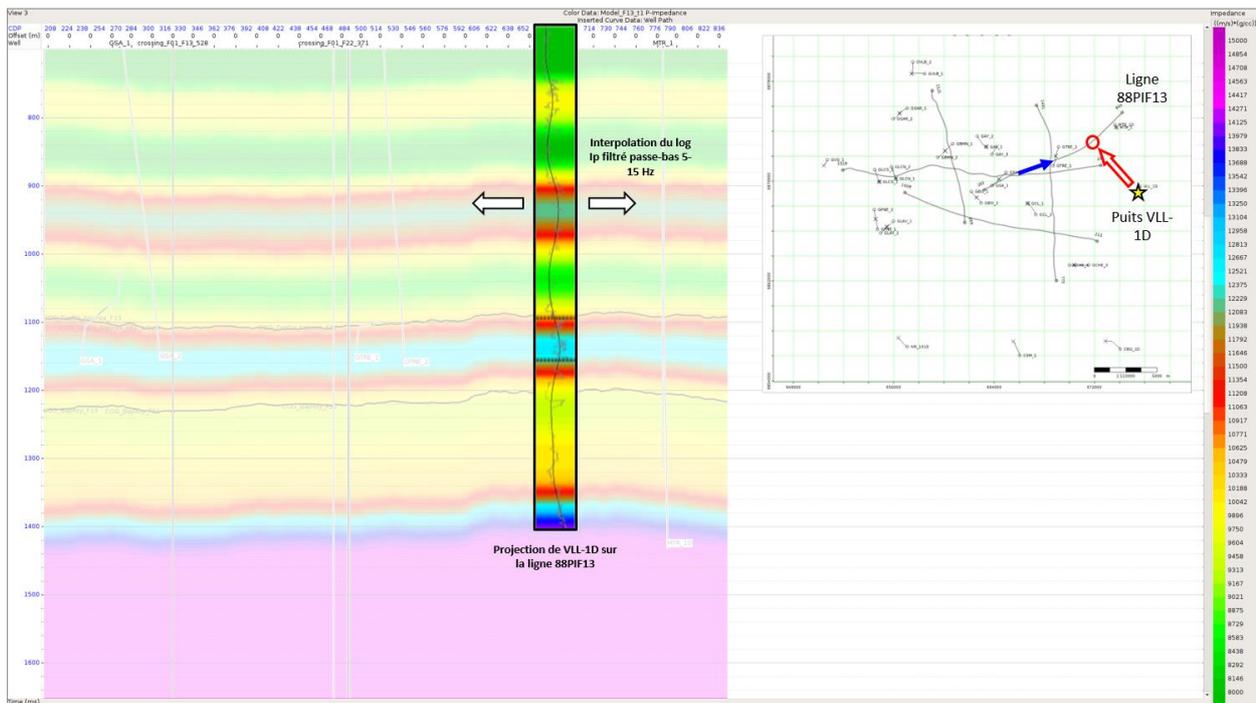


Figure 29 : Illustration du remplissage du modèle initial Basse Fréquence d'impédance acoustique sur la ligne 88PIF13.

4.3. APPROCHE CLASSIQUE PAR INVERSION

4.3.1. Principe

L'inversion d'impédance acoustique est une méthode itérative qui utilise en entrée le modèle d'impédance acoustique initial ainsi que la sismique. Des traces sismiques synthétiques sont calculées à partir du modèle initial d'impédance et comparées aux données réelles. La différence entre les données réelles et les données synthétiques est calculée et si cette différence est supérieure à un seuil minimal, le modèle initial est mis à jour. De nouvelles données synthétiques sont calculées et ce processus est répété jusqu'à ce que la différence entre données synthétiques et réelles soit plus petite que le seuil minimal défini par l'utilisateur.

4.3.2. Inversion des données

L'impédance acoustique inversée a été estimée sur les 5 lignes sismiques puis analysée le long des lignes sismiques et comparée aux puits.

Au sein du Dogger, l'inversion acoustique permet de voir des variations latérales d'impédance qui se traduiront par des variations de porosité (dans l'hypothèse d'une lithologie homogène). Certaines couches fines décrites par les puits sont plutôt bien retrouvées et peuvent être suivies le long des lignes sismiques.

Le contraste du Toit du Dogger est clairement défini par l'inversion, permettant par ailleurs de souligner des corrections potentielles de l'interprétation faite sur la ligne 86PIF01 (Figure 30).

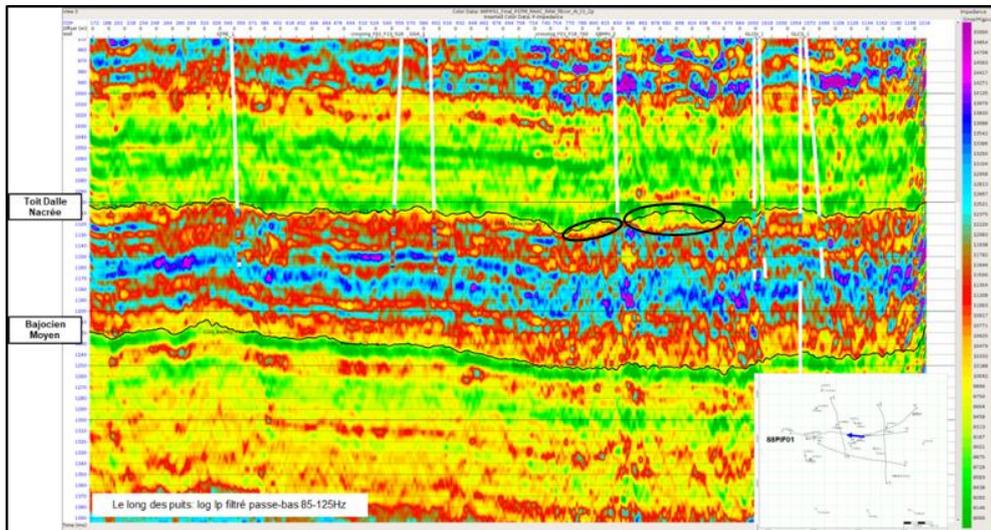


Figure 30 : Impédance acoustique absolue obtenue par inversion sur la ligne sismique 86PIF01. Ellipses noires indiquant les zones potentielles de correction de l'interprétation sismique.

4.3.3. Résultats

À partir de l'analyse pétrophysique présentée en 4.3.2 il est possible de transformer les sections d'impédance acoustique en section de porosité. Les résultats de prédiction de porosité sont obtenus en suivant une approche d'équation variable par intervalle :

- au-dessus du Toit de la Dalle Nacrée, équation des argiles ;
- entre le Toit de la Dalle Nacrée et le Bajocien Moyen, équation du Dogger ;

- en-dessous du Bajocien Moyen, équation des argiles.

La Figure 31 montre le processus d'inversion sismique acoustique et la porosité (totale) prédite pour la ligne 86PIF01.

La porosité totale : représente la mesure du volume totale d'une roche, et qui comprend à la fois les pores connectés et les pores liés à la structure des argiles. Par essence, les argiles seront donc les roches les plus poreuses.

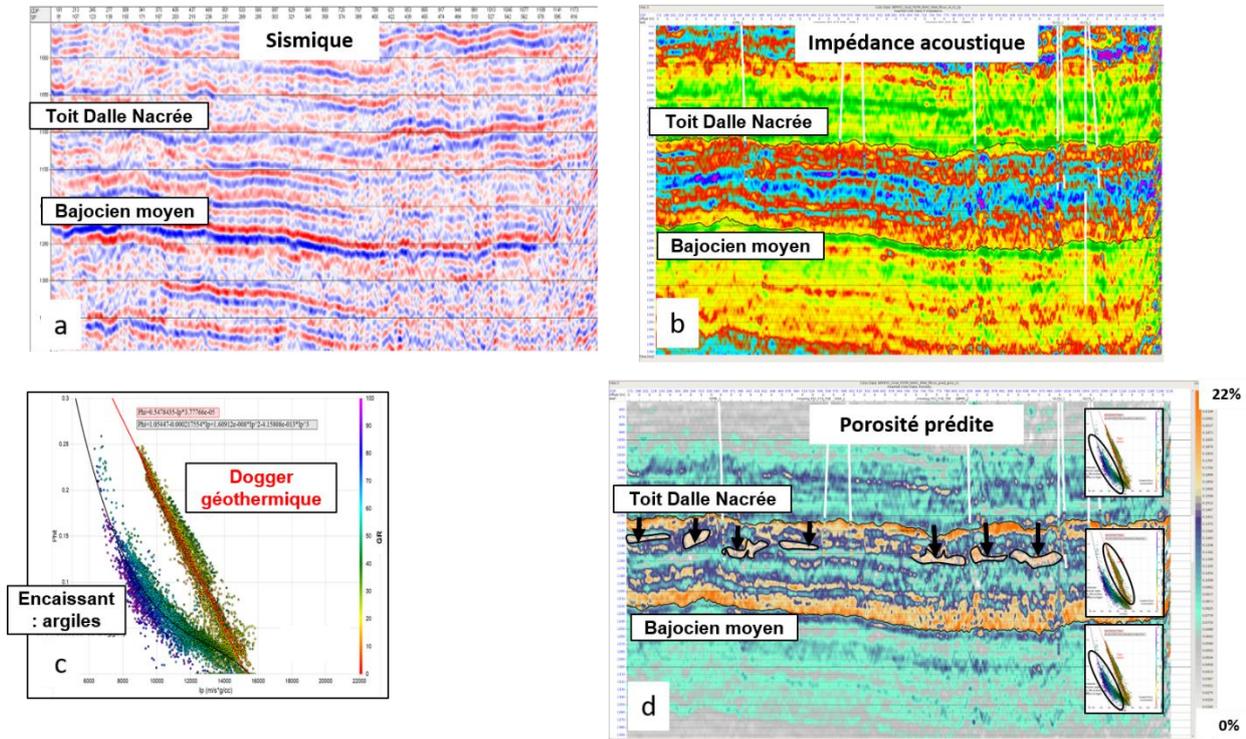


Figure 31 : Processus d'inversion sismique acoustique et porosité prédite (d) à partir des données sismiques (a) et de l'impédance acoustique inversée (b) avec les équations variables (c) par intervalle sur la ligne sismique 86PIF01. Corps oolithiques poreux identifiés (flèches noires).

Bien que réaliste, cette approche ne permettra pas de prendre en compte des variations de lithologie à l'intérieur de l'intervalle Dogger, ce qui pourrait fausser les prédictions. Néanmoins, les variations observées peuvent donner une appréciation qualitative de la porosité et de la connectivité attendue dans le Dogger.

4.3.4. Incertitudes à prendre en compte dans les résultats d'inversions

Il est nécessaire de garder à l'esprit lors de l'interprétation des résultats les sources d'incertitudes. Ci-dessous sont discutés les causes d'incertitudes les plus importantes.

a) Tendance basse-fréquence dans les modèles d'impédance

Afin de simplifier la construction des modèles initiaux, leur remplissage a été effectué à l'aide des données du puits VLL-1D uniquement. Ce choix de construction suppose une géologie régionale parfaitement homogène et basée sur les informations d'un seul puits pouvant se trouver jusqu'à 20 km de distance de certaines zones à inverser. Cette approche peut donc se trouver biaisée dans le cas où des variations locales de la géologie et de l'épaisseur du Dogger surviennent.

Une telle incertitude se manifeste sur la description de la tendance Basse Fréquence de certaines lignes sismiques (86PIF18 par exemple), qui amène à sous-estimer l'impédance absolue obtenue par inversion. Ce biais a pour conséquence directe de surestimer la porosité prédite, en particulier près du toit du Dogger (Figure 32).

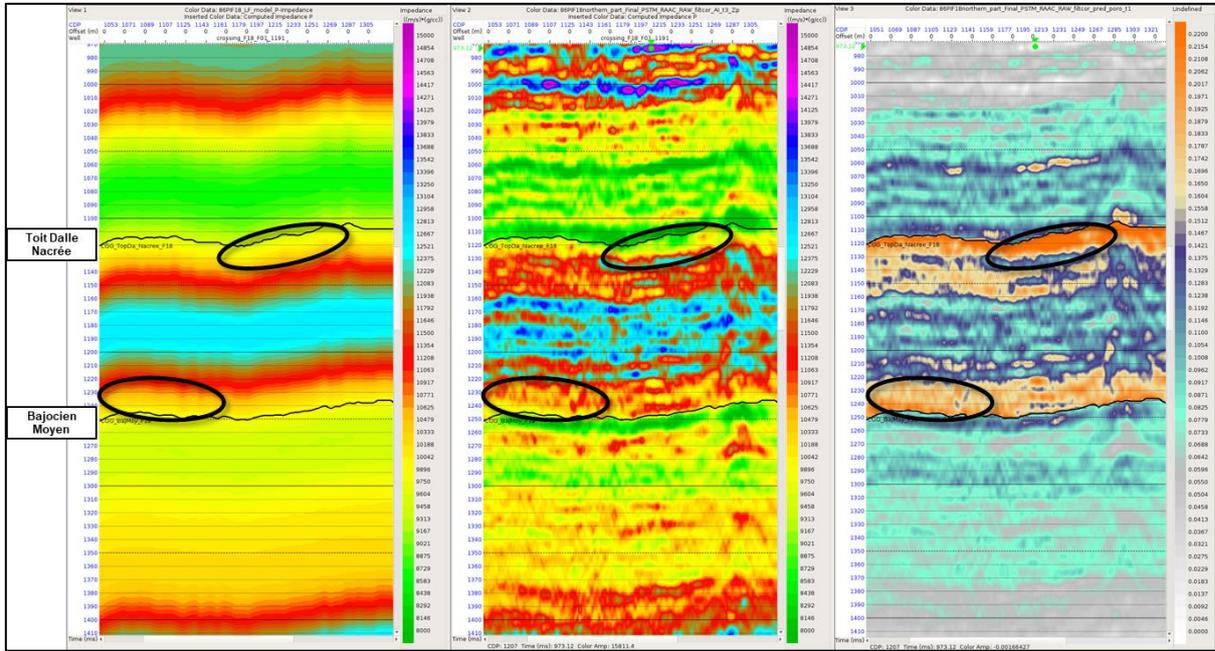


Figure 32 : Illustration de l'impact des incertitudes du modèle initial (basses fréquences) (gauche) sur l'inversion (Impédance) (milieu) et la prédiction de porosité (droite) le long de la ligne sismique 86PIF18.

Sur la Figure 32, dans les ellipses noires, la tendance basse fréquence issue du puits VLL-1D ne décrit pas correctement les contrastes attendus près des horizons et par conséquent y sous-estime l'impédance absolue après inversion. L'application de l'équation Dogger sur de telles valeurs produit alors des porosités apparentes trop fortes et potentiellement incohérentes.

Les résultats absolus de l'inversion et la prédiction de porosité qui s'en suit, doivent donc être analysés avec prudence, en prenant en compte le biais potentiel introduit par le modèle initial basse-fréquence. Afin de mieux analyser les résultats, il est conseillé de regarder également les résultats relatifs de l'inversion qui s'affranchissent de la tendance basse fréquence et traduisent uniquement les durcissements et amollissements de la roche à travers les contrastes d'impédance.

b) Amplitudes sismiques et calage au puits

Les variations latérales des amplitudes observées sur les données sismiques peuvent biaiser les résultats finaux de l'inversion, bien qu'un travail important pour les éliminer a été accompli. Il est donc nécessaire de les prendre en compte dans l'interprétation quantitative du Dogger.

Par ailleurs, il a été difficile de retrouver avec certitude la polarité des données sismiques. D'apparence trivial, ce problème n'est pas simple à résoudre avec ces données du fait de la limitation de leur contenu fréquentiel. Une mauvaise polarité aura des conséquences sur le calage de la fonction temps-profondeur et aussi sur l'évaluation des propriétés pétrophysiques.

c) Estimation de la porosité

Les deux équations de porosité estimées à partir des données de puits sont adaptées à deux lithologies très distinctes (calcaire et argile) qui peuvent être délimitées dans les puits par des marqueurs géologiques. La lithologie dans l'intervalle Toit Dalle Nacrée – Bajocien Moyen présente des calcaires dont la fraction d'argile augmente vers sa base, ce qui explique que sa partie supérieure soit utilisée en géothermie et non sa partie inférieure, plus argileuse. Il en résulte qu'appliquer l'équation de porosité des calcaires (Dogger) sur l'intégralité du réservoir surestimerait la porosité dans sa partie basse.

Afin de mieux analyser la porosité, il est conseillé de regarder les résultats avec l'équation Dogger uniquement dans la partie haute de l'intervalle Toit Dalle Nacrée – Bajocien Moyen. Une correction des interprétations (comme suggérée dans l'observation des résultats d'inversion – paragraphes 4.3.3 et 4.3.4) permettrait aussi d'affiner la description des porosités près du toit du Dogger.

Il faut également rappeler que ces deux équations sont estimées sur une fenêtre limitée, centrée sur le Dogger géothermique (entre le Toit de la Dalle Nacrée et le Bathonien. Les estimations de porosité en dehors de la fenêtre d'intérêt sont totalement biaisées (différentes lithologies, profondeurs...). Par conséquent, toute analyse d'un autre intervalle que le Dogger géothermique, nécessiterait de redéfinir un modèle pétrophysique et de refaire une inversion.

4.4. APPROCHE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES

4.4.1. Principe

Ces cinq dernières années les méthodes numériques liées à l'utilisation de réseau de neurones, comme le machine learning ou le deep feed, neural network ont pris un essor important et ont touché tous les secteurs d'activités, y compris les géosciences. Cet engouement vient du fait qu'il est possible d'apprendre à la machine à prédire un résultat en fonction de données sans avoir à spécifier la relation entre les données et le résultat. En effet, la machine construit elle-même, au cours d'un apprentissage, la relation complexe et non linéaire entre les données et la quantité à prédire.

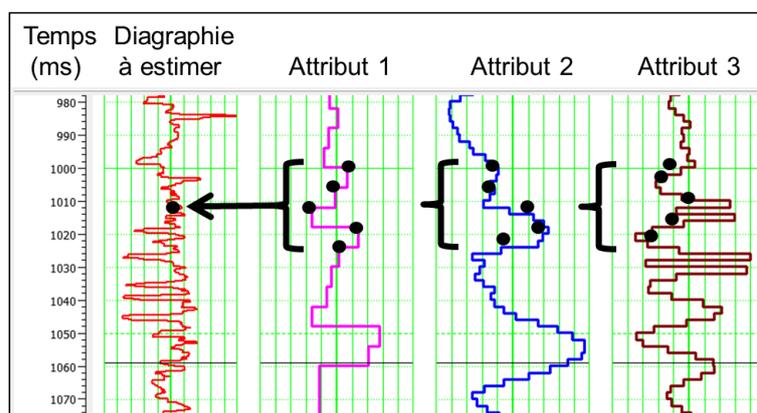
L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent d'obtenir des résultats très rapidement et de prendre en compte implicitement toute la complexité de la relation entre données d'entrée et le paramètre à prédire, ce qui peut être difficile à réaliser avec une approche purement basée sur les lois physiques.

La difficulté majeure est que la phase d'apprentissage peut être longue et nécessite beaucoup de données pertinentes pour pouvoir établir une relation fiable entre données d'entrée et résultat.

4.4.2. Entraînement des réseaux de neurones

La méthode d'apprentissage supervisé a été appliquée dans le cadre de ce projet. Elle permet entre autres applications, de prédire des propriétés de diagraphie de puits grâce à une somme pondérée d'attributs sismiques comme illustré sur la Figure 33. Les attributs sismiques utilisés peuvent être soit les amplitudes des traces sismiques soit des transformations plus ou moins complexes de ces traces (valeur absolue, intégrale, dérivée...). Cette méthode repose sur l'analyse des relations statistiques entre la propriété à estimer et les attributs. Ces relations statistiques sont extraites sur un jeu de données d'entraînement à des localisations de puits donnés et le poids associé à chaque attribut est optimisé lors de l'entraînement du réseau de neurones.

Le pouvoir de prédiction du réseau de neurones est évalué lors d'une étape de validation par application à des données qui n'ont pas été utilisées lors de l'entraînement du réseau.



$$y_j = \sum_{k=0}^{M_a} \sum_{i=1}^{M_w} w_{k,i} x_{k,j-i}$$

Figure 33 : Apprentissage supervisé pour reproduire une diagraphie donnée à partir d'un ensemble d'attributs sismiques.

Afin de générer des résultats fiables et précis, cette méthode d'apprentissage supervisé requiert un nombre de données suffisant dans le jeu d'entraînement pour représenter la variabilité des propriétés et attributs sur la zone d'intérêt. Vu le nombre de puits limité dans ce projet, il a été nécessaire de créer des données synthétiques pour augmenter la taille du jeu de données d'entraînement et s'assurer qu'il soit représentatif des variations potentiellement attendues dans la formation du Dogger lorsque l'on s'éloigne des puits existants. Au total 324 puits synthétiques ont été créés pour élargir la base de données. À partir de ces puits, des traces sismiques synthétiques sont calculées.

Quatre réseaux de neurones ont été entraînés, un pour chaque quantité à prédire, à savoir, l'impédance, la densité, la porosité, et le volume d'argile.

4.4.3. Étude de faisabilité sur données sismiques simulées

La méthode des réseaux de neurones étant appliquée pour la première fois pour l'interprétation quantitative, une étude sur données synthétiques a été réalisée. Une étude sur des données synthétiques, permet d'évaluer la validité d'une méthode car le résultat est connu (Figure 34).

Des données sismiques simulées ont été générées en utilisant un modèle construit à partir d'un modèle géologique 3D contenant des informations de faciès, porosité et perméabilité du Dogger (Figure 34). Ce modèle construit au BRGM a été transformé en cube 3D d'impédance en utilisant le modèle pétro-élastique présenté en 4.2.1. Un encaissant est ajouté à ce modèle en utilisant les informations du puits VLL-1D. À partir de ce modèle d'impédance, des données sismiques simulées ont été générées. L'inversion sismique acoustique a été appliquée sur les données sismiques simulées pour obtenir la porosité. Un bon accord est observé entre le modèle de porosité construit à partir du modèle géologique et le résultat de l'inversion sismique acoustique (Figure 34).

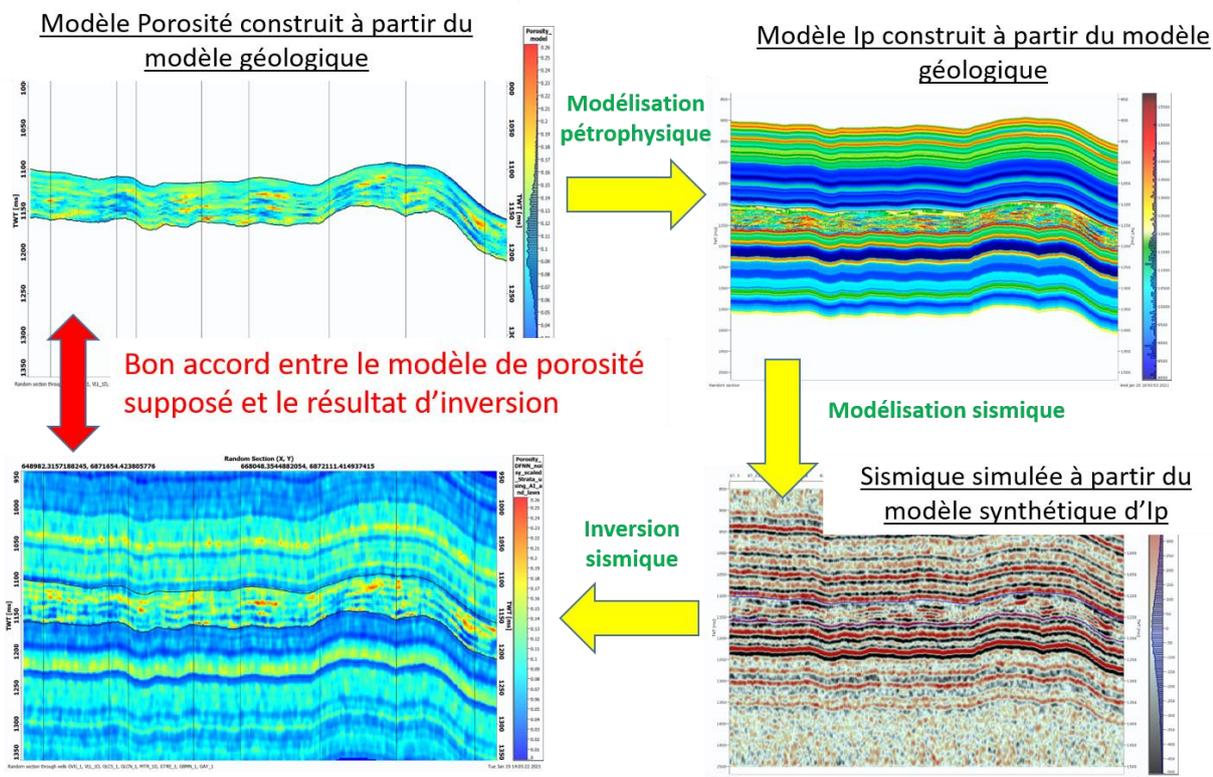


Figure 34 : Schéma montrant la faisabilité de l'inversion sismique acoustique sur des données sismiques simulées.

Après entraînement des réseaux de neurones, les données sismiques simulées ont été utilisées pour prédire l'impédance et la porosité grâce aux réseaux de neurones. Les résultats de ces tests sur données sismiques simulées sont présentés en Figure 35. Comparées au modèle initial, les variations d'impédance ainsi que de porosité dans le Dogger sont bien prédites par les réseaux de neurones.

Ce test, valide le potentiel des réseaux de neurones à prédire les propriétés pétro-élastiques du Dogger. On peut donc envisager son utilisation sur des données réelles. Cependant, malgré l'attention portée à la préparation des données sismiques, du bruit (signal non désirable) est toujours présent sur ces données. Les réseaux de neurones risquant d'interpréter ce bruit pour du signal, il est nécessaire, d'entraîner ces derniers à prédire les propriétés du réservoir en présence de bruit sur les données sismiques. Une phase d'entraînement sur des traces sismiques simulées bruitées, plus représentatives de la réalité, a été effectuée.

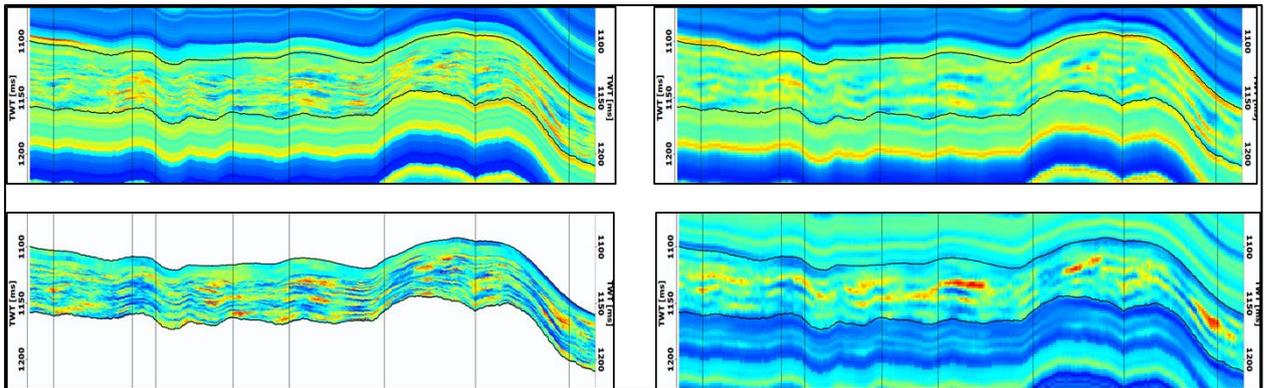


Figure 35: Résultat des tests de la méthode des réseaux de neurones sur les données sismiques simulées. À gauche le modèle exact (en haut l'impédance, en bas la porosité). À droite le modèle prédit (en haut l'impédance, en bas la porosité). Les détails retrouvés dans l'impédance et la porosité sont en accord avec le modèle initial.

4.4.4. Application sur les données réelles

La Figure 36 illustre le résultat de la prédiction de l'impédance acoustique par réseau de neurones pour la ligne sismique 86PIF01.

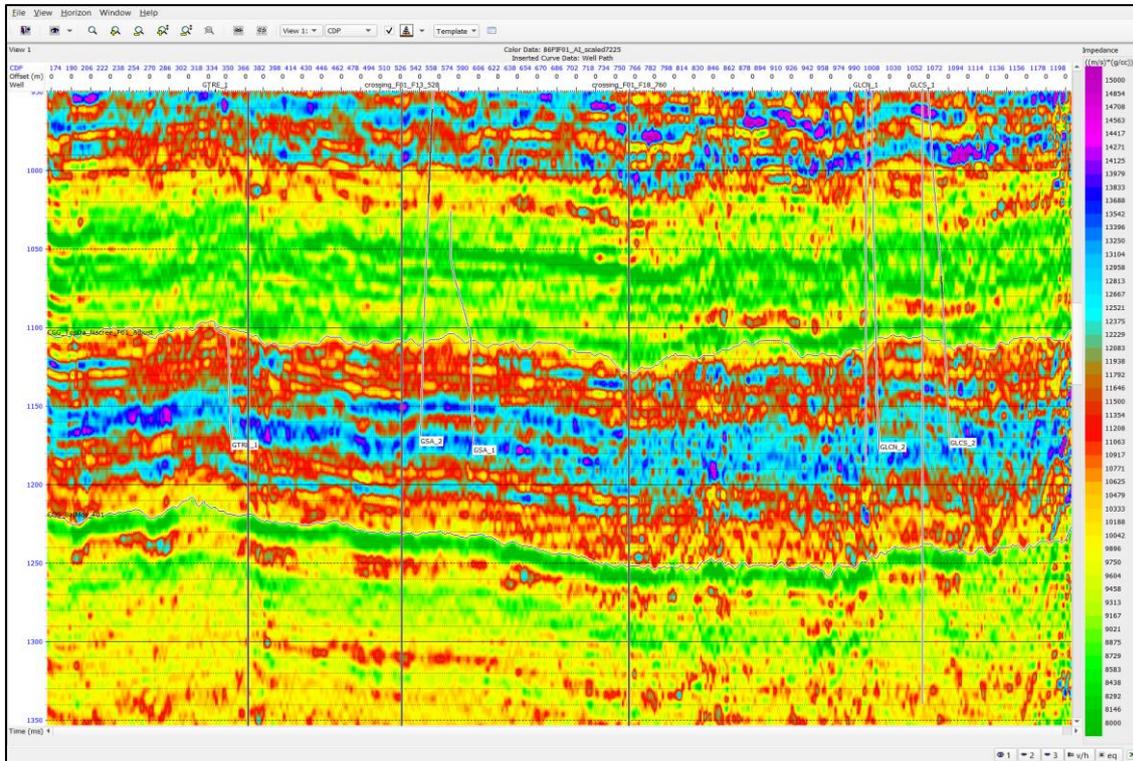


Figure 36 : Impédance acoustique prédite par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.

La Figure 37 illustre le résultat de la prédiction de la porosité totale par réseau de neurones pour la ligne sismique 86PIF01.

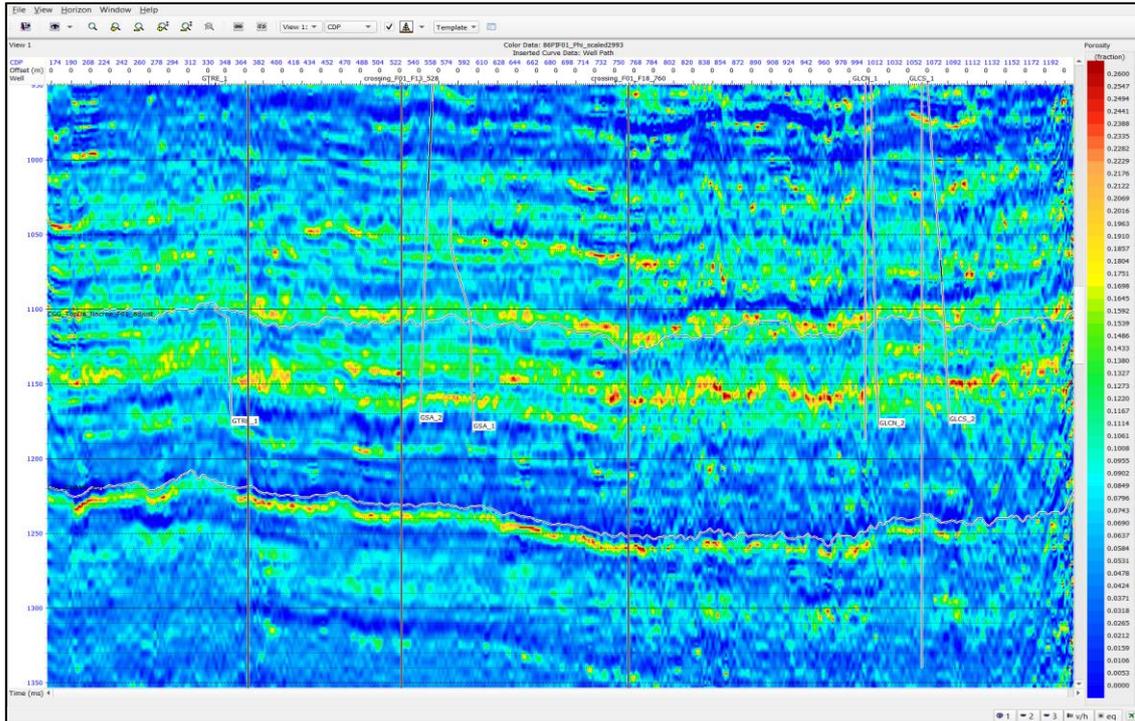


Figure 37 : Porosité totale prédite par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.

La Figure 38 illustre le résultat de la prédiction du volume d'argile par réseau de neurones pour la ligne sismique 86PIF01.

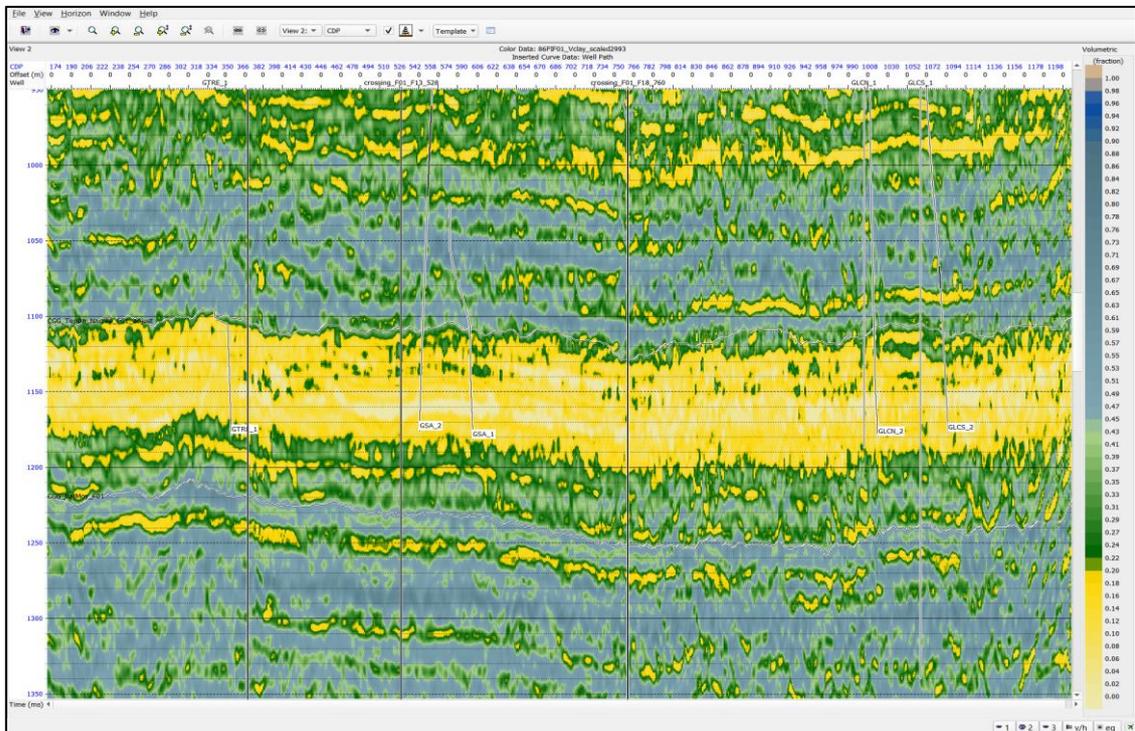


Figure 38 : Volume d'argile prédit par réseau de neurones à partir de la ligne sismique 86PIF01.

L'intérêt de l'estimation du volume d'argile est qu'elle permet d'en déduire la porosité effective.

La porosité efficace ou effective, correspond à la seule porosité résultant des pores connectés. Elle exclue la porosité liée aux argiles dont l'eau porale est difficilement mobilisable en réservoir. La porosité efficace est donc parfois appelée porosité dynamique.

Avec la porosité effective ainsi obtenue et en appliquant les lois porosité-perméabilité observées sur les carottes, la perméabilité de la roche peut être évaluée. Une section de porosité effective est visible sur la Figure 39. Contrairement à la porosité totale, les intervalles à forte porosité effective se trouvent principalement dans le Dogger géothermal (partie supérieure du Dogger calcaire) ce qui est validé par la bonne connaissance géologique du Bassin parisien.

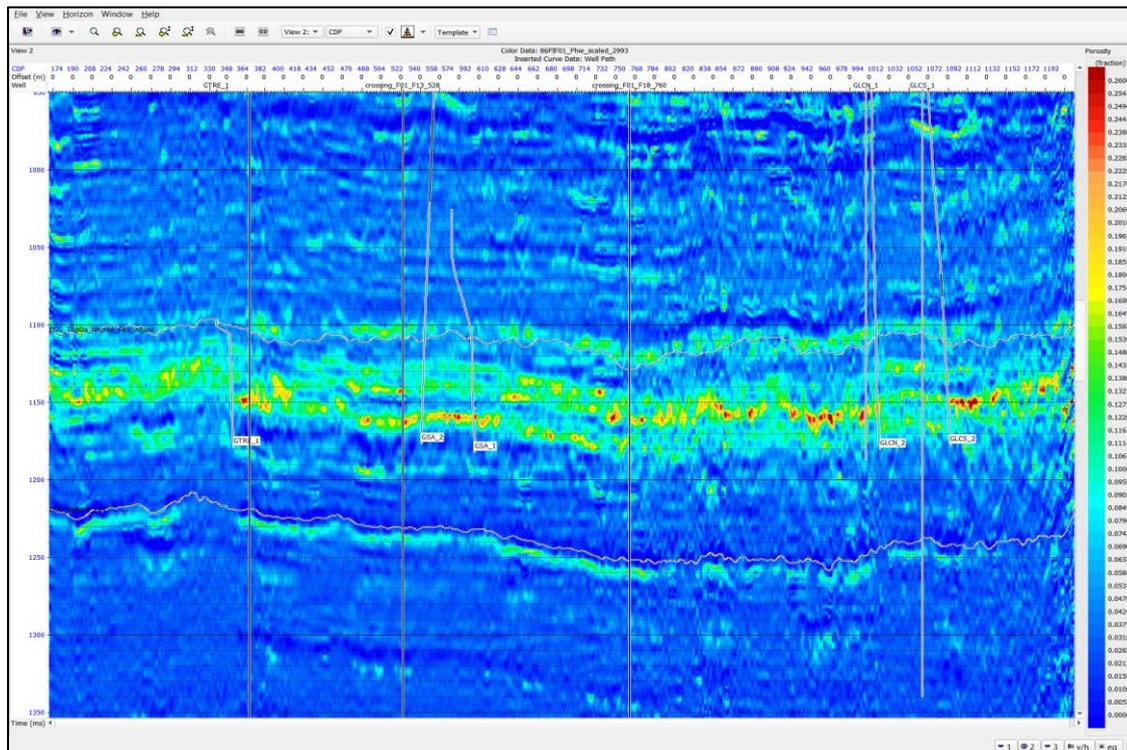


Figure 39 : Porosité effective calculée à partir de la porosité totale et du volume d'argile prédits pour la ligne sismique 86PIF01.

4.4.5. Estimation de la perméabilité

L'analyse de la perméabilité et de la porosité ont été réalisées à partir des mesures de perméabilité effectuées en laboratoire sur des carottes.

Les lois porosité-perméabilité ont été ajustées en prenant en compte des faciès « propres » avec un volume d'argile très faible. Dans ce cas les porosités totales et effectives sont presque identiques. Bien que les lois soient définies à partir de la porosité totale, elles ont été appliquées sur la porosité effective estimée pour les lignes sismiques. La perméabilité prédite dans les faciès « propres » est très peu impactée par ce changement mais cela permet de prédire des perméabilités très faibles dans les faciès plus argileux caractérisés par une porosité totale importante mais une porosité effective très faible. La Figure 40 illustre la perméabilité estimée pour la ligne sismique 86PIF01 basée sur la loi porosité-perméabilité moyenne. La palette de couleur met en évidence les zones de perméabilité supérieure à 100 milliDarcy (mD) (en rouge foncé) susceptibles d'être de bons conduits pour la circulation de fluides.

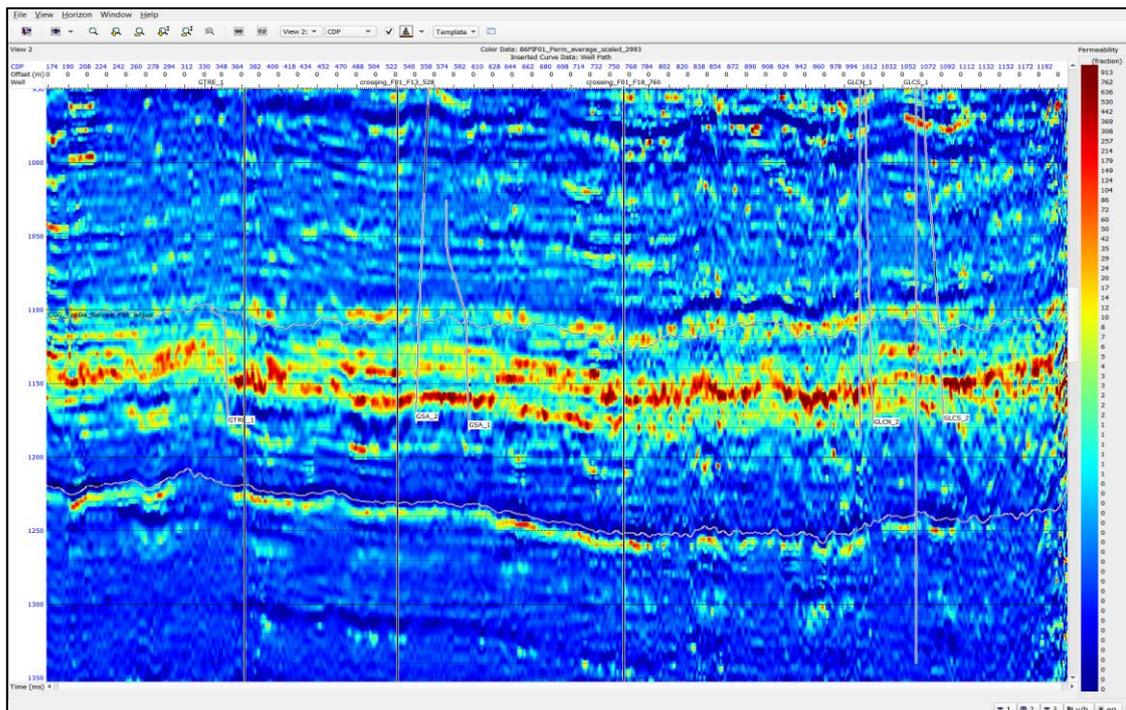


Figure 40 : Perméabilité absolue dérivée de la loi porosité-perméabilité moyenne à partir de la porosité effective prédite pour la ligne sismique 86PIF01.

4.4.6. Incertitudes à prendre en compte dans les résultats

La prédiction par les réseaux de neurones, est sensible, tout comme l'inversion classique, au choix du modèle d'impédance initial (celui-ci étant une variable de l'entraînement), à la qualité des amplitudes du signal sismique et à sa polarité. En outre il est important de discuter aussi des incertitudes propres à la méthode des réseaux de neurones.

a) Influence du jeu de données d'entraînement

Contrairement à une inversion sismique acoustique ou élastique, il a été montré qu'un réseau de neurones permet d'estimer directement des propriétés réservoirs, ce qui facilite l'interprétation des résultats. Cependant cette capacité dépend de la qualité des données utilisées pour entraîner le réseau de neurones. Dans le cadre de ce projet, cet entraînement s'est fait à partir de données synthétiques avec un niveau de bruit similaire aux bruits présents sur les lignes sismiques du projet. Cependant le bruit estimé n'est qu'une évaluation moyenne et ne prend en compte que les bruits de type bruit blanc (un bruit non structuré dans le temps ou dans l'espace, par exemple le bruit de la pluie). Par conséquent tout autre artefact d'imagerie ou bruit cohérent non éliminé durant le traitement sera transformé en variation des propriétés pétrophysiques.

b) Influence de la normalisation des données

Il est important de noter que les réseaux de neurones sont très sensibles à l'énergie des traces sismiques utilisées lors de l'entraînement et de celles sur lesquelles les réseaux sont appliqués. L'énergie de ces traces doit être aussi proche que possible, les unes des autres, pour éviter un biais sur les propriétés prédites. Différentes méthodes et facteurs de normalisation (correction de l'amplitude des traces) ont été testées. La méthode et le facteur de normalisation permettant d'obtenir les meilleurs prédictions (e.g. porosité, impédance) comparées aux diagraphies de puits ont été choisis. Cette approche bien que robuste et pragmatique est limitée par l'éloignement des puits des lignes sismiques et peut aussi être biaisée par le fait que le choix de la méthode ou du facteur de normalisation puisse être dépendant de la ligne sismique ou du puits utilisé.

5. Apport de l'interprétation quantitative à la compréhension de la qualité des réservoirs géothermiques

5.1. INTRODUCTION : COMMENT DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS RÉSERVOIRS

Un paramètre clef d'une exploitation géothermique est la caractérisation des propriétés pétrophysiques du réservoir. Ces dernières correspondent entre autres aux valeurs de porosité/perméabilité (Φ/k); et ce sont en très grande partie ces deux paramètres qui contrôlent les circulations de fluide dans un réservoir.

Si les méthodes diagraphiques modernes permettent d'imager en continu les porosités le long d'un puits (diagraphie de Porosité via l'outil neutron), les valeurs de perméabilité associées sont rarement disponibles. Ces dernières ne sont obtenues que par mesure du milieu géologique à deux échelles possibles : celles de l'échantillon (carotte) et du milieu plus large (pompage d'essai).

Par ailleurs, il est possible de remonter à des données de porosité en procédant à une combinaison d'outils diagraphiques tels que la densité et le Sonic-P. Cette porosité dite totale est à opposer à la porosité dite efficace qui est la porosité inter-granulaire sollicitée dans les transferts de fluides rapides. Le passage d'une porosité totale à efficace se fait simplement par une correction du volume d'argile, estimé via le gamma-ray.

Classiquement en matière de géologie réservoir, on utilise des données de porosité/perméabilité issues de carottes pour étudier l'interdépendance de la perméabilité avec la porosité (loi Φ/k). Une fois une relation identifiée, elle est appliquée aux données de porosités diagraphiques afin d'obtenir une évolution porosité/perméabilité tout au long du puits.

Dans le cadre de ce projet, les données porosité (Φ) et perméabilité (k) listées dans les rapports de fin de sondages pétroliers ont été compilées. Seuls les couples Φ/k issus du réservoir de « l'Oolithe Blanche », nommé aussi « Dogger » dans cette étude, ont été intégrés dans l'étude afin d'assurer une restitution cohérente de l'objet géothermique.

5.2. PASSER DE L'ESTIMATION 1D DES PROPRIÉTÉS RÉSERVOIRS À UNE INTERPRÉTATION 2D

Comme décrit au paragraphe 4.1.1, deux types d'approche permettent de passer de la sismique aux propriétés réservoirs : une méthode d'inversion sismique acoustique classique et une méthode plus exploratoire, basée sur l'entraînement des réseaux de neurones. L'intérêt de ces approches est de caractériser les propriétés des roches. Sur les lignes sismiques retraitées, les puits ont été projetés ce qui permet de croiser les informations de porosité et d'impédance. C'est une tâche primordiale car la porosité est l'un des facteurs clefs contrôlant l'impédance, et elle conduit à proposer une loi reliant la porosité à l'impédance (Figure 28) et ainsi dériver sur l'intégralité des lignes sismiques inversées une visualisation de la géométrie des corps poreux.

De l'intérêt des lignes sismiques habillées en porosité

Des travaux internes BRGM ont permis de déterminer l'architecture du réservoir carbonaté du Dogger. Très schématiquement, les résultats mettent en avant :

- des géométries de corps oolitiques relativement déconnectés dans la partie inférieure du réservoir, en lien avec une grande phase de progradation (avancée des corps sédimentaires) ;
- une partie médiane où les corps oolitiques aggradent, c'est-à-dire qu'ils ont moins tendance à se développer latéralement, et ils privilégient une accrétion « verticale » ;
- une partie sommitale où le domaine lagunaire construit en arrière des cordons oolitiques s'étalent de manière très généralisée dans la partie orientale et centrale du bassin de Paris.

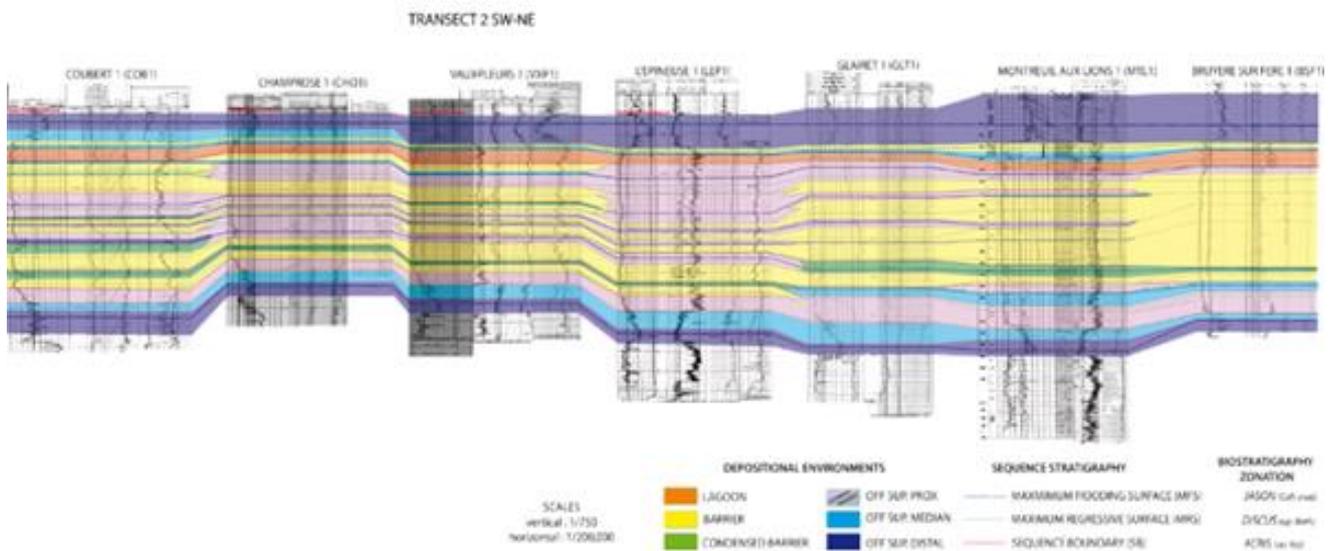


Figure 41 : Profil de corrélations diagraphiques dans le Dogger du Bassin parisien.

La Figure 41 montre un profil de corrélation diagraphique dans le Dogger du Bassin parisien. Ce profil montre une première grande phase de progradation en base de profil caractérisée par le passage de faciès marneux (bleu foncé) vers les premiers corps oolitiques (jaunes). S'en suit au-dessus des premiers niveaux soulignés par une couleur verdâtre la phase d'aggradation de la plateforme carbonatée matérialisée par une « fixation » des cordons oolitiques et leur empilement plus vertical. Le sommet du profil correspond à un étalement des faciès de lagon.

Avant d'interpréter quantitativement les résultats (de l'interprétation quantitative ???), il est important de comprendre la géométrie et nature des objets que l'on cherche à identifier. Les niveaux réservoirs qui intéressent les exploitants géothermiques sont des niveaux oolitiques. Ces derniers correspondent à des sables carbonatés relativement peu cimentés, organisés sous la forme de lentilles convexes (Figure 42).

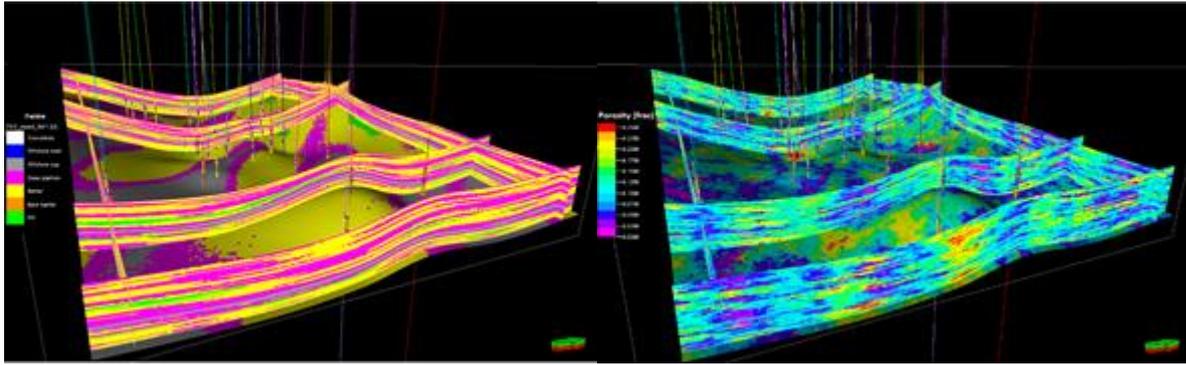


Figure 42 : Extraction d'un modèle faciès (gauche) et de porosité (droite) construit au BRGM. On y voit la géométrie des corps oolitiques en jaune issue d'une simulation de faciès basée sur une analyse géostatistique.

Les propriétés pétrophysiques obtenues dans cette étude, l'ont été soit par une inversion classique (paragraphe 4.3) soit par l'approche par réseaux de neurones (paragraphe 4.4).

L'interprétation des résultats par réseaux de neurones, qui est une prédiction basée sur un apprentissage, permet d'obtenir une information sur la porosité effective. Les résultats obtenus le long des profils sismiques permettent de retrouver les architectures sédimentaires évoquées ci-dessus.

Sur le profil sismique 86PIF22 (Figure 43) d'orientation globalement nord-sud d'environ 10 kilomètres de long, les corps poreux y sont représentés dans des teintes chaudes (jaune à rouge) qui au maximum atteignent 26 % de porosité. L'interprétation quantitative de ce profil restitue particulièrement bien l'architecture sédimentaire décrite plus haut et illustrée dans la Figure 42. On y retrouve dans la partie inférieure du profil des corps poreux de petite dimension et très déconnectés, ce qui montre une bonne adéquation avec la compréhension sédimentaire de corps oolitiques isolés. Au-dessus de ces premiers réservoirs aux porosités modestes (12 à 20 %), un certain nombre de corps beaucoup plus continus se développent, là encore en adéquation avec l'architecture sédimentaire présentée plus haut. Leur extension atteint entre 2 et 4 km, ce qui est assez proche des dimensions de corps simulées dans le modèle BRGM (Figure 42).

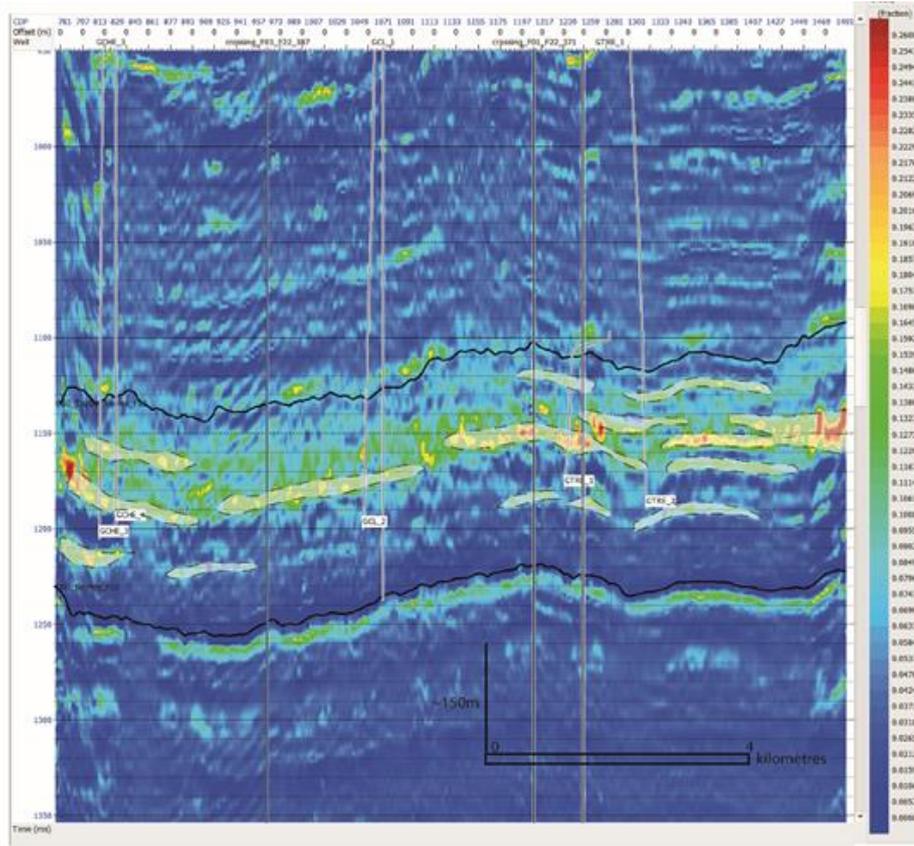


Figure 43 : Profil sismique 86PIF22. L'image montre le résultat obtenu par la méthode d'apprentissage par réseaux de neurones conduisant à obtenir la porosité effective, ici exprimée en %.

La comparaison entre les corps poreux identifiés en sismique et ceux corrélés par le BRGM sur des bases d'analyses diagraphiques est assez bonne. Schématiquement, au niveau du doublet géothermique de Chelles (GCHE-3 et GCHE-4 ; à gauche sur la Figure 43), le profil sismique révèle l'existence de 2 corps assez poreux, interconnectés dans les 2 puits. La corrélation de ces 2 puits permet d'identifier 3 grands réservoirs qui représentent individuellement des extensions verticales de 5 à 10 mètres entrecoupés de niveaux plus argileux de dimensions similaires. Ces tailles de corps réservoirs sont très en deçà de la résolution sismique des lignes utilisées qui imagent des objets d'une trentaine à une cinquantaine de mètres d'épaisseur, ce qui explique le léger flottement entre les méthodes d'interprétation (i) sismique et (ii) diagraphique.

Le profil 86PIF01 (Figure 44) est sécant au précédant profil 86PIF22, soit une orientation est-ouest et il mesure une quinzaine de kilomètres de long. On retrouve les mêmes tendances sur la géométrie des corps poreux, à savoir des corps isolés en base, puis beaucoup plus interconnectés au-dessus. Ce profil passe au travers des doublets géothermiques de Sevrans (GSA-1 et GSA-2) et de La Courneuve (GLCN-1, GLCN-2 et GLCS-1, GLCS-2).

Les ouvrages de la Courneuve Nord et Sud montrent l'existence d'un premier corps en fond de puits localisé sous une épaisse corniche argileuse, et ce dernier apparaît bien sur la Figure 44 (RC1). Une quarantaine de mètres au-dessus un second corps poreux d'une dizaine ou quinzaine de mètres d'épaisseur se développe, et ce dernier se retrouve particulièrement bien sur le profil sismique (RC2 ; Figure 44). Le côté diffus du signal « poreux » entre les deux doublets est intéressant car il questionne sur la connectivité inter-doublet. Pour terminer, un corps poreux assez fin se développe sous les faciès lagunaires sommitaux que l'on retrouve également sur le profil 86PIF01 (RC3 ; Figure 44).

Le doublet géothermique de Sevrans témoigne de l'existence de deux corps poreux assez « massifs » séparés par un niveau argileux épais. Le corps le plus profond atteint près de 20 mètres d'épaisseur contre 10 mètres pour celui au-dessus de la corniche argileuse (respectivement RSA1 et RSA2 ; Figure 44). Ces deux ensembles ressortent assez bien sur le profil 86PIF01. Le plus profond des deux se localise sur un niveau stratigraphique (un réflecteur sismique) où se multiplient des corps poreux similaires. Leur connectivité est difficile à assurer en raison de zones où la porosité est plus diffuse entre les objets, ce qui semble certain en revanche, c'est qu'ils sont déconnectés du niveau équivalent localisé dans les doublets de La Courneuve. Le corps poreux situés stratigraphiquement au-dessus est de plus grande dimension (RSA2 ; Figure 44), et il semble qu'il soit potentiellement séparé de l'important corps poreux identifié en même position stratigraphique dans les doublets de la Courneuve (RC2 ; Figure 44). Là encore, la connectivité entre RSA2 et RC2 est floue. Pour terminer, les puits mettent en avant au sommet du réservoir une succession de corps poreux et perméables assez fins (quelques mètres) entrecoupée de nombreux niveaux non poreux, et ces derniers ne ressortent pas particulièrement bien sur le profil sismique (Figure 44) très probablement en raison de leur faible dimension au regard de la résolution sismique de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Cependant ils sont très probablement connectés à un corps plus massifs latéral au doublet de Sevrans (ligne en pointillés blancs ; Figure 44).

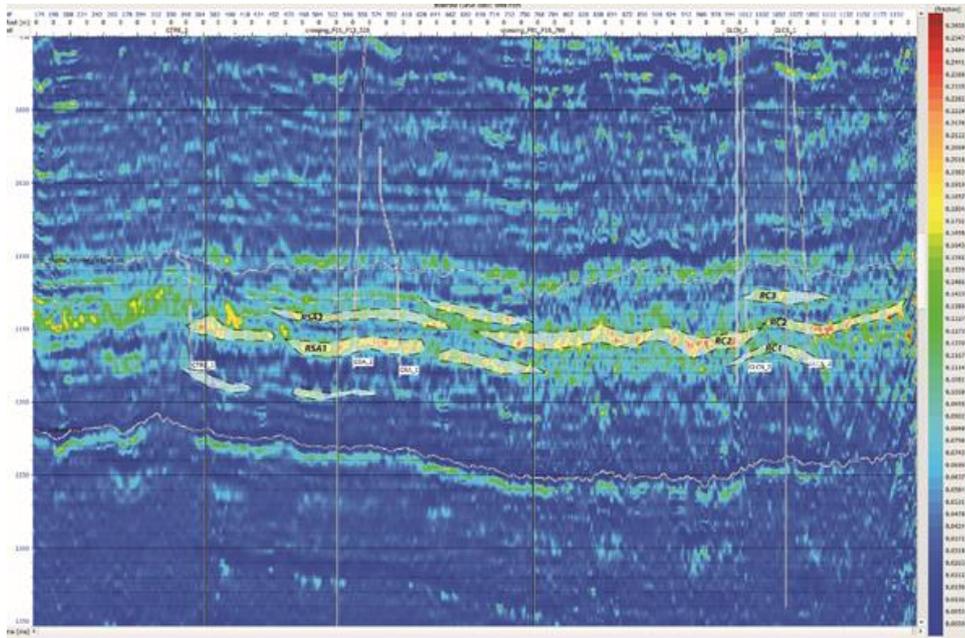


Figure 44 : Profil 86PIF01. Profil de porosité effective (exprimée en %) issue de l'entraînement par réseaux de neurones.

6. Recommandations et Conclusion

6.1. RECOMMANDATIONS

Afin d'obtenir des résultats exploitables lors de l'interprétation quantitative, utilisant des données existantes, il est important que :

- les données de sismique réflexion représentent au maximum la nature du sous-sol ;
- le pointé des réflecteurs sismiques représentant le toit et la base du réservoir soit le plus précis possible ;
- les diagraphies des puits, nécessaires à l'interprétation quantitative, couvrent le réservoir cible et l'encaissant ;
- les données de diagraphie soient mises en cohérence.

Les régressions polynomiales, liant l'impédance acoustique à la porosité, sont caractéristiques uniquement des intervalles sur lesquels elles ont été calculées.

6.2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie pour obtenir des résultats significatifs issus de l'interprétation quantitative et diminuer les risques lors d'opérations de géothermie consiste à :

- contrôler des données de sismique réflexion et des puits, selon les recommandations énoncées au paragraphe 0 ;
- établir les régressions polynomiales pour le ou les réservoirs et les encaissants ;
- associer à chaque réservoir sa régression polynomiale ;
- estimer au mieux les incertitudes ;
- contrôler les résultats avec les données terrains de géologie et de puits.

6.3. COÛTS / BÉNÉFICES

L'utilisation de données existantes de qualité suffisante pour l'interprétation quantitative, semble être un bon compromis pour identifier des zones plus propices à la présence de réservoirs géothermiques. L'utilisation de ces données, à l'avantage de permettre de réaliser à des coûts nettement moins élevés, des travaux pertinents pour identifier de potentielles cibles géothermiques et diminuer les risques liés à l'exploration.

En effet les nouvelles acquisitions de données de sismique réflexion 2D voir 3D ainsi que la réalisation de puits nécessitent plusieurs dizaines de millions d'euros. Cette approche est recommandée lorsque la cible finale a été identifiée, car les données acquises seront de meilleure qualité, et bien plus précises que les données des années antérieures. L'utilisation des techniques actuelles permet d'obtenir des résultats ayant des résolutions plus fines, d'acquérir des données sismiques ayant des fréquences bien plus basses qu'en 1980/1990 et de mieux imager les objets recherchés.

Une acquisition sismique 3D et des diagrapies couvrant l'ensemble du réservoir étudié avec un enregistrement suffisant de l'encaissant, permettraient de renforcer la qualité du signal sismique pour l'inversion sismique acoustique et d'affiner les résultats sur la porosité, la perméabilité, le volume d'argile et voir la transmissivité.

Donc, au préalable, l'utilisation des données existantes de sismique réflexion et de puits permet à moindre coût (pour quelques centaines de milliers d'euros au maximum), d'obtenir des informations pertinentes du point de vue structurale et des propriétés pétrophysiques du réservoir cible.

6.4. CONCLUSION

Ces résultats géophysiques totalement inédits sur ce type de données de sismique réflexion des années 80, montrent une excellente corrélation avec la connaissance qu'a le BRGM sur le réservoir du Dogger. Cette bonne adéquation valide donc la méthodologie qui s'avère intéressante sur plusieurs aspects :

- (i) elle permet d'avoir une meilleure appréhension du volume des corps poreux investigués par les doublets dans des zones où l'activité géothermique est opérationnelle et donc potentiellement mieux prédire l'exploitation de la ressource (percée de la bulle froide dans le puits producteur) ;
- (ii) elle permet d'avoir une idée de la potentielle connectivité des corps poreux entre plusieurs doublets, même si ces hypothèses devraient être vérifiées via des pompages d'essais et d'interférence entre plusieurs de ces doublets ;
- (iii) elle permet d'orienter l'implantation des ouvrages en surface pour maximiser le nombre de réservoirs traversés par le puits, et elle permet d'aller investiguer des niveaux poreux plus profonds qui n'ont jamais été caractérisés.

Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'un corps poreux n'est pas nécessairement perméable, en particulier dans les réservoirs carbonatés et que cette méthodologie ne peut assurer un résultat absolu. Dans cette étude, il est nécessaire de regarder les résultats avec la régression polynomiale du Dogger, uniquement dans sa partie haute.

Par ailleurs, le succès de la méthode tient également au volume relativement important de données (puits, porosité, perméabilité, tests hydrauliques etc.) et de connaissances sur cet objet qui, dans le Bassin parisien en l'occurrence, est le plus travaillé depuis une quarantaine d'années.

Si l'interprétation quantitative s'avère prometteuse pour l'exploration de réservoirs en thématique frontière (réservoirs peu connus), elle ne saura être déconnectée d'une étude géologique qui permettra d'interpréter conjointement les résultats avec des géophysiciens et d'en assurer ensemble une certaine cohérence.

7. Bibliographie

Beccaletto L., Hanot F., Marc S. avec la collaboration d'**A. Perrin** (2007) - coordination F. Hanot – Etude structurale des réservoirs du bassin de Paris. Rapport final. BRGM/RC-56407-FR, 37 p. Confidentiel.

Thinon I., avec la collaboration de **Grataloup S.** (2007) - Projet Picoref - Interprétation sismique. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-55632-FR, 83 p., 45 fig., 1 tabl., 5 ann.

Yilmaz O. (1987) - Seismic data processing. Investigations in geophysics n° 2. Society of Exploration Geophysics. ISBN 0-931830-46-X (Series) – ISBN 0-931830 -40-0 (Volume 2).

Annexe 1

Liste des puits

Nom du puits	Abréviation du puits	X (m) Lambert 93	Y (m) Lambert 93	Nature du puits
CROISSY_BEAUBOURG_1D	CBG_1D	672878.90	6857176.20	pétrolier
CHAMPIGNY_SUR_MARNE_1D	CSM_1	665553.14	6857144.18	pétrolier
AULNAY-SOUS-BOIS-RDV	GAY_1	663395.60	6872739.10	géothermique
AULNAY-SOUS-BOIS-RDV	GAY_2	663369.60	6872741.60	géothermique
AULNAY-SOUS-BOIS-VGS	GAY_3	664236.70	6872740.00	géothermique
LE BLANC MESNIL	GBMN_1	660112.70	6872430.00	géothermique
LE BLANC MESNIL	GBMN_2	660102.70	6872431.00	géothermique
BONDY	GBO_1	662595.00	6868669.70	géothermique
BONDY	GBO_2	662595.00	6868669.70	géothermique
CHELLES 2	GCHE_3	670388.60	6863253.20	géothermique
CHELLES 2	GCHE_4	670378.60	6863253.30	géothermique
CLICHY-SOUS-BOIS	GCL_1	666687.00	6868195.80	géothermique
CLICHY-SOUS-BOIS	GCL_2	666696.40	6868207.40	géothermique
GARGES-LES-GONESSE	GGAR_1	656479.80	6875430.90	géothermique
GARGES-LES-GONESSE	GGAR_2	656474.80	6875440.00	géothermique
LA VILLETTE	GLAV_1	655454.90	6866330.00	géothermique
LA VILLETTE	GLAV_2	655449.10	6866348.10	géothermique
LA COURNEUVE NORD	GLCN_1	656188.40	6870172.00	géothermique
LA COURNEUVE NORD	GLCN_2	656189.50	6870187.00	géothermique
LA COURNEUVE SUD	GLCS_1	654852.90	6869920.80	géothermique
LA COURNEUVE SUD	GLCS_2	654861.60	6869933.70	géothermique
AUBERVILLIERS	GPNE_1	654567.10	6866935.70	géothermique
AUBERVILLIERS	GPNE_2	654564.90	6866947.30	géothermique
SEVRAN	GSA_1	664386.80	6870170.50	géothermique

SEVRAN	GSA_2	664402.80	6870167.40	géothermique
TREMBLAY-EN-FRANCE	GTRE_1	668918.70	6871994.00	géothermique
TREMBLAY-EN-FRANCE	GTRE_2	668904.60	6871989.20	géothermique
VILLENEUVE LA-GARENNE	GVG_1	650420.90	6871229.60	géothermique
VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	GVLB_1	657443.60	6878599.10	géothermique
VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	GVLB_2	657434.60	6878599.20	géothermique
IVRY_101D	IVR_101D	656368.93	6857421.73	pétrolier
MITRY_MORY_1	MTR_1	673739.00	6874293.00	pétrolier
MITRY_MORY_1D	MTR_1D	673739.00	6874293.00	pétrolier
VILLEVAUDE_1D	VLL_1D	675424.00	6869067.00	pétrolier

Annexe 2

Abréviations

ABRÉVIATIONS	DEFINITION
BRESS	Bureau des Ressources Énergétiques du Sous-Sol
CMP	Common Middle Point ou Point Milieu Commun
DFNN	Deep Feed Neural Network
DGEC	Direction Générale de l'Énergie et du Climat
GR	Gamma Ray
Hz	Hertz
Ip	Impédance acoustique
m/s	Mètre par seconde
NMO	Normal Move Out
NPHI	Neutron
Overburden	Encaissant au-dessus du réservoir cible
Phit	La porosité
RhoB	Densité
SEG	Society of Exploration - Geophysicists
TFP	Loi Temps en fonction de la Profondeur
TWT	Two Way Travel Time
Underburden	Encaissant au-dessous-du réservoir cible
Vs	Vitesse de propagation des ondes sismiques de cisaillement



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr