

Apport d'une sismique en ondes S pour la recherche hydrogéologique dans un aquifère alluvial

Benefits of S-wave seismic for water research in alluvial context

Florian MIQUELIS^{1,*}, Franck HANOT¹, Serge GRAVELAT² and Audrey LAFONT²

¹ CDP Consulting, 7 boulevard Chanzy, 41000 Blois, France

² Fugro, Savoie Technolac BP230, 34 allée du lac d'Aiguebelette, 73375 Le Bourget du Lac cedex, France

Résumé. Dans le cadre de l'implantation de nouveaux forages en contexte de plaine alluvial dans le Bassin de Paris, une nouvelle méthode géophysique a été mise en œuvre afin d'imager proprement les alluvions et d'en préciser les séquences ainsi que leur géométrie et les épaisseurs. Cette méthodologie repose sur une acquisition et le traitement de lignes sismiques ultra haute résolution en ondes S, dont les vitesses très lentes permettent une haute définition de l'imagerie dans les premiers mètres. Un traitement sismique minutieux a permis de restituer des résultats très concluants. Ce type d'opération, permet d'offrir à des prix très compétitifs des résultats bien plus fiables que les méthodes électriques. La réussite de ce type de mise en œuvre reste cependant conditionnée aux choix des paramètres d'acquisition et surtout à un traitement sismique minutieux.

Abstract. In order to master the implantation of new boreholes in alluvial context in the Paris Basin, a new geophysical method has been implemented in order to properly image the alluvium and to specify the sequences, the geometry and the thickness. This methodology is based on the acquisition and seismic processing of 2D S-wave seismic lines characterized by low velocities allowing high resolution imagery in first tens of meters. A very sensitive and accurate seismic processing has produced very conclusive results. This type of methodology offers much more reliable results at very competitive prices than electrical methods. However, the success of this methodology strongly depends on the choice of acquisition parameters and accurate seismic processing.

*Corresponding author: f.miquelis@cdpconsulting.fr; f.hanot@cdpconsulting.fr

1 Introduction

La recherche de ressource d'eau dans l'alluvial utilise des outils de prospection géophysique classiques tels que les méthodes électriques (trainé, panneau). Ces dernières sont en général privilégiées pour des raisons de coût et de mise en œuvre. Leur interprétation n'est malheureusement pas univoque. En effet, dans le cadre de la prospection dans l'alluvial, les passées argileuses conductrices intercalées peuvent largement perturber les enregistrements et conduire à des interprétations erronées de la géométrie du remplissage alluvial et de la nature du substrat.

La méthode mise en œuvre dans cette étude repose sur l'acquisition et le traitement de lignes sismiques ultra haute résolution en ondes S. Elle a pour but d'optimiser l'implantation de nouveaux forages sur un champ captant existant, en restituant une image fiable des alluvions, l'identification des séquences sédimentaires et leurs géométries et épaisseurs.

1.1 Contexte géologique et hydrogéologique

Cette méthodologie a été mise en œuvre dans le bassin de Paris, dans une plaine alluviale à remplissage quaternaire érodant la craie du Crétacé supérieur.

L'aquifère exploité est mixte. Il correspond aux alluvions et à la partie supérieure fracturée et/ou altérée de la craie. Trois forages anciens avaient permis de mettre en évidence une variabilité de l'épaisseur des alluvions entre 4 et 7m.

Les nouveaux forages seront dimensionnés pour atteindre une profondeur de l'ordre de 20 mètres. Cette profondeur peut être modifiée en fonction de l'aléa qu'induit les variations locales d'épaisseur des alluvions sus-jacentes. L'étude géophysique est un préalable pour la validation des implantations des futurs captages et l'ajustement de leur dimensionnement en fonction de la succession lithologique rencontrée.

De façon novatrice cette recherche met en œuvre la sismique réflexion en ultra haute résolution (UHR) en onde S. Cette technique particulière est dérivée de la sismique réflexion classique en onde P, utilisée depuis les années 50 par les pétroliers. Elle s'est adaptée pour imager la très proche surface sur quelques dizaines de mètres avec une source et des capteurs adaptés.

1.2 Déroulement de l'étude

5 lignes sismiques UHR en ondes S ont donc été paramétrées, en tenant compte des besoins et des contraintes du terrain qui limitent la longueur en offset par la présence d'anciennes gravières aujourd'hui en eau.

L'acquisition a été réalisée durant l'été 2021 après avoir défini les paramètres d'acquisition au regard des formations à imager et de la géologie connue. Ces paramètres ont été validés et affinés durant une phase de test en début de mission.

Les données brutes enregistrées sur le terrain ont été collectées pour réaliser le traitement sismique en ondes S. Les données sismiques traitées ont ensuite été interprétées en intégrant les données géologiques disponibles.

2 Acquisition

2.1 Raison du choix d'une acquisition en ondes S

La sismique réflexion, de par son mode de propagation, permet de repérer des réflecteurs qui renvoient les ondes réfléchies en raison d'un changement significatif des propriétés physiques du milieu (contraste d'impédance). Ces surfaces de discontinuité peuvent correspondre à des limites de couches, à des structures géologiques... La profondeur d'investigation dépend de la géométrie du dispositif mis en œuvre et de l'énergie de la source.

Il existe plusieurs types de mise en œuvre de sismique réflexion. Historiquement, les méthodes de sismique réflexion utilisaient les ondes P, celles-ci permettant notamment d'atteindre des objectifs profonds visés

principalement par l'industrie pétrolière. Les dispositifs en ondes P ont ensuite évolué pour s'adapter à différentes thématiques et ont permis d'imager des cibles entre quelques dizaines de mètres et plusieurs kilomètres. Mais ce type de mise en œuvre reste limité pour la proche surface en raison de la vitesse assez élevée des ondes P (400m/s à 6000m/s environ) et n'autorise pas de haute résolution dans l'intervalle considéré, même avec un dispositif d'enregistrement très serré en surface.

Ces dernières années, de nouvelles acquisitions en ondes S ont vu le jour. Ce type d'acquisition ultra haute résolution exploite les vitesses lentes des ondes S pour imager distinctement les 20 premiers mètres de terrain incluant le sol et les premiers horizons géologiques sensu stricto.

Dans le contexte alluvial de l'étude, les acquisitions en ondes P ne pouvaient permettre une bonne définition au sein des alluvions dont l'épaisseur semblait initialement contenue dans les 10 premiers mètres. Une acquisition en ondes S a donc été définie dans l'espoir d'imager favorablement ce type de terrain de proche surface.

2.2 Programme d'acquisition et planning

Ce type d'acquisition est relativement léger à mettre en œuvre et a nécessité 5 jours dans le cas de cette étude.

5 profils sismiques UHR avec un linéaire global de 440 mètres ont été acquis. Les espacements inter-géophones sont de 0.40m et ceux des tirs de 0.80m.

Les implantations des lignes, contraintes par la présence des anciennes gravières réalisées sont présentées sur la figure ci-dessous. Il est indispensable de bien préparer le terrain pour un bon couplage de la source avec le sol.



Figure 1: Localisation des lignes sismiques réalisées.

2.3 Matériel de mesure utilisé

L'acquisition des données sismiques a été réalisée en utilisant le système GEODE de Geometrics associés à des géophones horizontaux 4.5Hz espacés de 0.40 mètre. La source sismique employée est l'Elvis III, capable de générer des ondes S via une plaque vibrante.

Chaque géophone dispose de prises de manière à être branché au câble sismique, constituant ainsi la ligne d'acquisition qui est reliée à la centrale d'enregistrement.

Les mesures ont été réalisées avec un dispositif d'acquisition GEODE incluant :

- 1 PC semi-durci avec logiciel Seismodule Controller permettant de piloter les paramètres d'acquisition et la visualisation des données;
- 9 enregistreurs sismiques de type GEODE;
- 8 interfaces câbles permettant de relier les enregistreurs sismiques au PC d'acquisition ;
- 10 batteries de voiture 12V;
- 196 géophones horizontaux 4.5Hz;
- 8 câbles sismiques;
- 1 système de déclenchement de l'acquisition reliée à la source ;
- 1 source sismique Elvis III.



Figure 2: Dispositif d'enregistrement d'une ligne sismique



Figure 3 : Source sismique Elvis III.

2.4 Phases de test

Préalablement à l’acquisition des profils sismiques, une phase de tests a été menée avec pour objectif de déterminer les meilleurs paramètres d’acquisition.

Plusieurs essais ont été réalisés afin d’être analysés dans les locaux de CDP Consulting le soir même et s’assurer de la bonne fiabilité des paramètres choisis. Parmi ces tests, on peut notamment signaler les tests suivants :

- nombre de points vibrés par position (1 à 4) ;
- Test de l’offset utile avec de tirs en offset pour évaluer la zone hors ground roll ;
- Fréquence et durée du sweep.

Ces différents tests ont été menés et contrôlés à travers un traitement QC visant à évaluer les résultats sur tirs unitaires et sur stack. Sur la base des résultats obtenus, il a notamment été convenu de retenir le nombre de 4 points vibrés par position.

Tableau 1 : Paramètres d’acquisition appliquée à l’étude.

Paramètres	Description
Numériseur	Système GEODE de Geomatics
Source	Elvis III – S8GB2
Nombre de traces actives	196 stations actives
Espacement inter-capteurs	0.40m
Type de capteurs	Géophones horizontaux 4.5Hz
Espacement inter-tirs	0.80m

Paramètres	Description
Nombre de stacks	4 (2 dans chaque direction)
Longueur d'enregistrement	1s
Echantillonnage	1ms
Fréquences du sweep	20-120 Hz
Durée du sweep	10s

2.5 Mise en œuvre sur site

L'implantation des géophones et points d'émission a été réalisée telle que définie au préalable.

Lorsque le système d'acquisition est en place et connecté, l'ingénieur en charge s'assure que tous les géophones répondent correctement (phase de troubleshooting).

Cette étape permet de s'assurer qu'aucun capteur n'est défectueux, de l'alimentation générale du système et également de vérifier que tous les branchements soient correctement faits.

Une fois que ces vérifications et actions correctives si nécessaires sont réalisées, la phase de tirs à l'aide de l'Elvis peut commencer aux points définis et marqués au sol préalablement.

Chaque enregistrement sismique fait l'objet d'un contrôle qualité (QC) par l'ingénieur sismicien. En cas de mauvaise qualité de données, la position est reprise. Lorsque certaines conditions non favorables pour l'acquisition ont été rencontrées (vent, pluie, passage de trains), les acquisitions sismiques ont été arrêtées et reprises **lorsque** le bruit ambiant était réduit et acceptable.

Chaque profil géophysique a fait l'objet d'un relevé topographique des positions de tous les capteurs et points de tirs à l'aide d'un DGPS Leica avec correction Orphéon et complété d'un niveau laser lorsque la couverture végétale ne permettait pas une précision suffisante en Z.

La précision des données topographiques est de 5 cm en X, Y et de 10 cm en Z.

Les paramètres géodésiques utilisés lors de cette campagne sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2: Paramètres d'acquisition en topographie.

Paramètres	Description
Appareil	Leica avec correction Orphéon / niveau laser
Système de coordonnées	RGF93, Lambert93
Précisions planimétrique	5cm
Précisions altimétrique	10cm

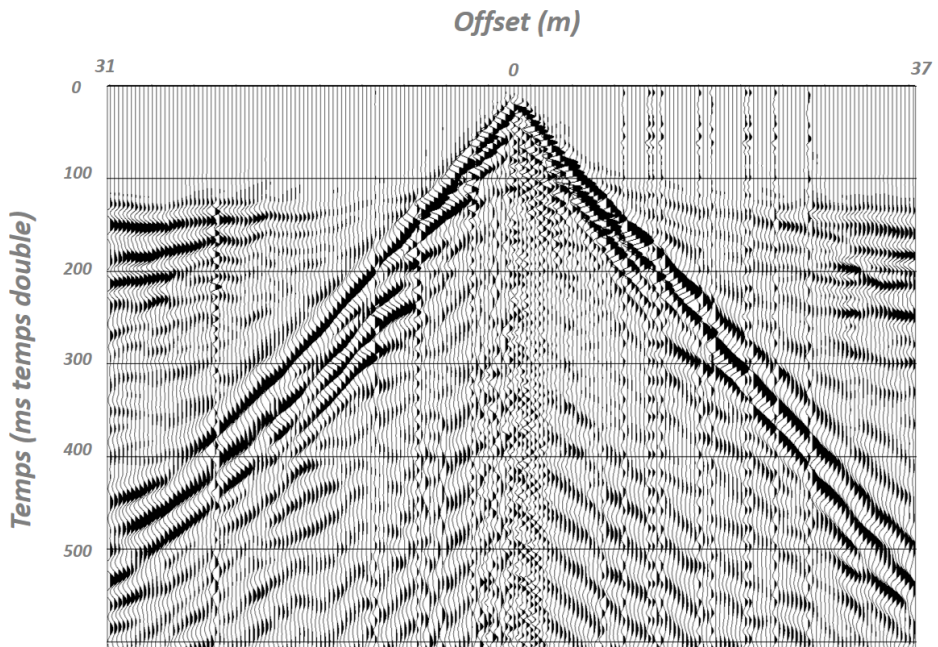


Figure 4: exemple de tir unitaire en ondes S obtenu pour la ligne 1.

3 Traitement sismique en ondes S

Le traitement des acquisitions en ondes S est un travail de patience qui nécessite un véritable savoir-faire. Les très fortes variations de vitesses observées dans les terrains de proche surface et la faible longueur du dispositif rendent compliqué ce traitement de surface à plusieurs titres (statiques, vitesses de stack...) et obligent à adapter la séquence de traitement à chacune des lignes.

3.1 Méthodologie et mise en place d'une séquence adaptée

Se différenciant assez fortement d'une séquence classique en ondes P, la séquence de traitement a été établie sur la base des différentes expériences pour ce type d'acquisition.

Un des points importants du traitement pour ce type de mise en œuvre consiste principalement à identifier les réflexions au sein des tirs, les données brutes étant généralement assez bruitées et très sensibles aux vitesses de corrections dynamiques. En ce sens, les corrections dynamiques et le mute doivent être très minutieusement analysés.

La déconvolution est généralement peu adaptée à ce type de mesures UHR.

3.2 Stack initial

Un premier travail de géométrisation des data a été nécessaire pour contrôler l'exploitabilité des données.

Un premier stack a ensuite été réalisé pour la ligne test avec :

- un modèle de vitesse très théorique basé sur la géologie des forages situés à proximité et pour lequel des vitesses en ondes S ont été déterminées sur la base d'analogie tiré de l'expérience. Pour cette loi de vitesse NMO théorique un dérivé de la formule de Dix à partir des vitesses d'intervalle a été établi ;
- un mute très provisoire basé sur l'analyse des tirs.

3.3 Elimination des bruits

Cette étape a été établie en plusieurs fois puisque son efficacité doit être in fine évaluée en stack. Pour ce type de données des filtres de types FK doivent être générés et ajustés en fonction du modèle de vitesse NMO établi.

Plusieurs filtres FK ont alors été générés sur la base de vitesses croissantes comprises entre 90m/s et 200m/s. Le filtre FK à 160m/s a semblé dans ce cas donner les meilleurs résultats.

3.4 Création d'un modèle de vitesse NMO sur la base de l'exploitation des stacks à vitesses constantes

L'importance des corrections dynamiques dans le traitement sismique en ondes P et S amène rapidement à construire un modèle géologique de vitesses NMO. Les vitesses d'intervalle en ondes S des formations géologiques sont en général comprises entre 80m/s et 1500m/s et nécessitent un échantillonnage fin dans les vitesses lentes.

Dans ce but un modèle temps vitesse est basé sur l'exploitation des stacks à vitesses constantes. Ces derniers sont ainsi été générés dans cet intervalle de vitesse [80- 1500 m/s] avec un pas de 10m/s jusqu'à 300m/s et plus espacés ensuite.

Quelques stacks à vitesses constantes générés pour la ligne 2 sont présentés dans la figure suivante. Ils permettent d'imager les variations de vitesses observées dans la formation alluviale.

Leur analyse conduit à la création d'un nouveau modèle de vitesses NMO, géologiquement consistant.

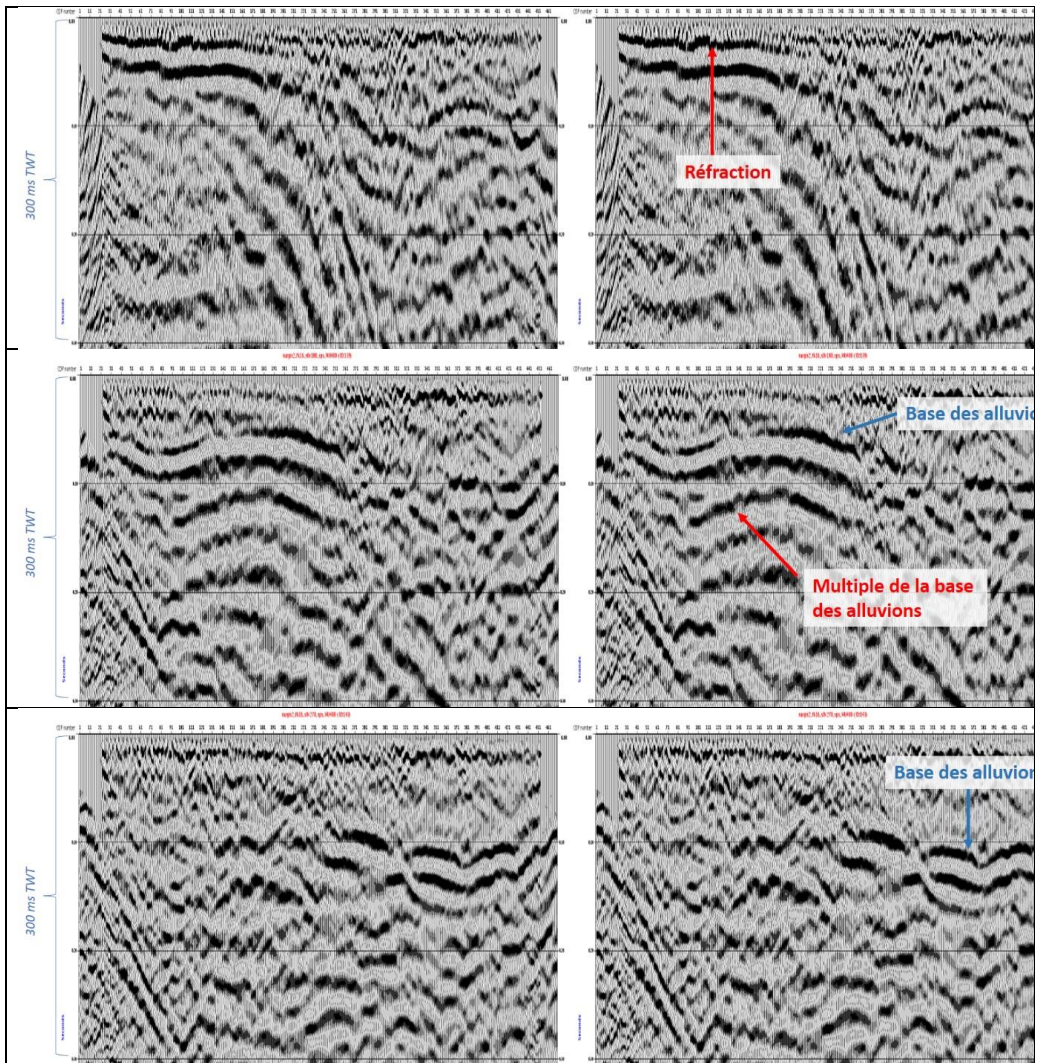


Figure 5 : Sélection de stacks à vitesses constantes représentatifs pour la ligne test

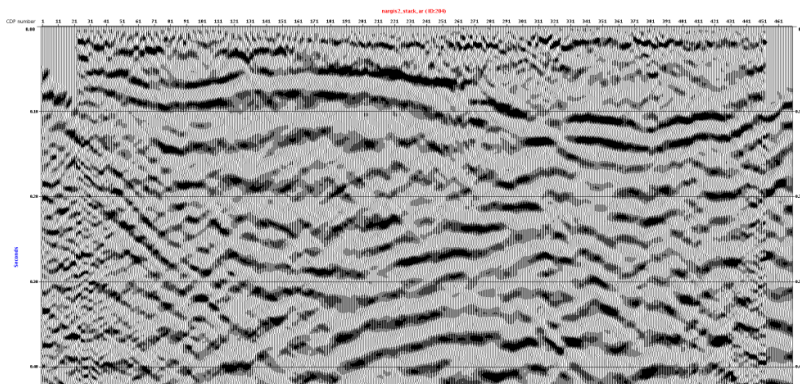


Figure 6: Stack obtenu pour la ligne test après mise à jour du champ de vitesse NMO sur la base de l'exploitation des stacks à vitesses constantes.

3.5 Tests de Mute

Plusieurs mutes externes et internes ont été testés afin de ne conserver que l'information pertinente. Un mute variable a finalement été adopté en fonction des besoins détectés.

3.6 Test de statiques résiduelles

Plusieurs essais de statiques résiduelles basées sur l'optimisation du stack ont été réalisés mais les résultats sont systématiquement meilleurs sans statiques résiduelles. Cela semble être généralement le cas dans le traitement des données ultra haute résolution en ondes S.

3.7 Conclusion sur le traitement sismique

Le traitement sismique est réalisé sur station au sein des bureaux et nécessite finalement plus de temps et de ressources que l'acquisition. Ce type de traitement nécessite de très nombreux tests et de nombreuses itérations afin d'obtenir un stack de qualité.

Ce travail a permis de définir une séquence type pour la zone d'étude et surtout une méthodologie de travail particulière. Il a notamment été démontré le besoin d'approcher les vitesses NMO de manière géologique, notamment à travers l'exploitation des stacks à vitesses constantes, le traitement étant très sensible aux variations de vitesse. Le mute a également été un élément important.

L'effort réalisé sur le terrain lors de l'acquisition (4 PV par position), la bonne définition des paramètres et un débruitage de type FK ont permis d'optimiser assez nettement dans ce cas le ratio signal sur bruit.

La déconvolution et les statiques résiduelles se sont avérées être des éléments qui nuisaient à la qualité du stack et n'ont finalement pas été retenues.

4 Interprétation

4.1 Méthodologie

La méthodologie de l'interprétation se base sur plusieurs étapes :

- Une phase de calibration des réflecteurs par exploitation des forages existants, des vitesses de stack et des stacks à vitesses constantes
- Un pointé en temps réalisé sur station d'interprétation des principaux horizons visibles :
 - la base des alluvions,
 - les réflecteurs discordants définis par des onlaps ou toplaps ;

- une phase de conversion en temps exploitant :
 - les vitesses de stack,
 - les stacks à vitesses constantes,
 - les données de forage projeté
- Un essai d'attribution des différentes formations

4.2 Mise en évidence d'une variabilité importante de l'épaisseur des alluvions par la présence d'un paléo-chenal en bordure est de la zone d'étude

L'exploitation des différentes lignes en ondes S permet d'apporter des informations très détaillées et très précises au regard de la zone alluvionnaire de la zone d'étude.

En effet, l'exploitation des profils a permis de mettre en évidence la présence d'un chenal en bordure est de la zone d'étude (ligne 1, ligne 2 et potentiellement en extrémité de la ligne 3B).

La présence de ce chenal s'accompagne d'une forte augmentation de l'épaisseur des alluvions, avec une épaisseur de 5 m en dehors de la zone chenalisée à presque 15m dans le cœur du chenal.

Cette surépaisseur d'alluvions (15m) en comparaison des zones bordant le chenal (environ 5m) pourrait présenter un vrai potentiel hydrogéologique.

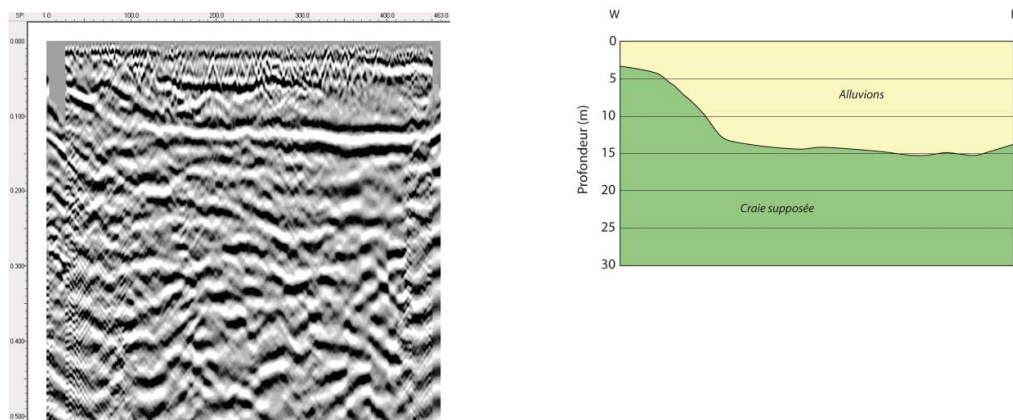


Figure 7 : La ligne 1 présente une base érosive correspondant probablement à la base des alluvions recouvrant les formations crayeuses sous-jacentes. Elle semble recouper un ancien chenal caractérisé par une épaisseur d'alluvions avoisinant 15m dans sa partie la plus profonde. Le flanc ouest du chenal est visible et montre en ce point une forte réduction d'épaisseur des alluvions (environ 4m).

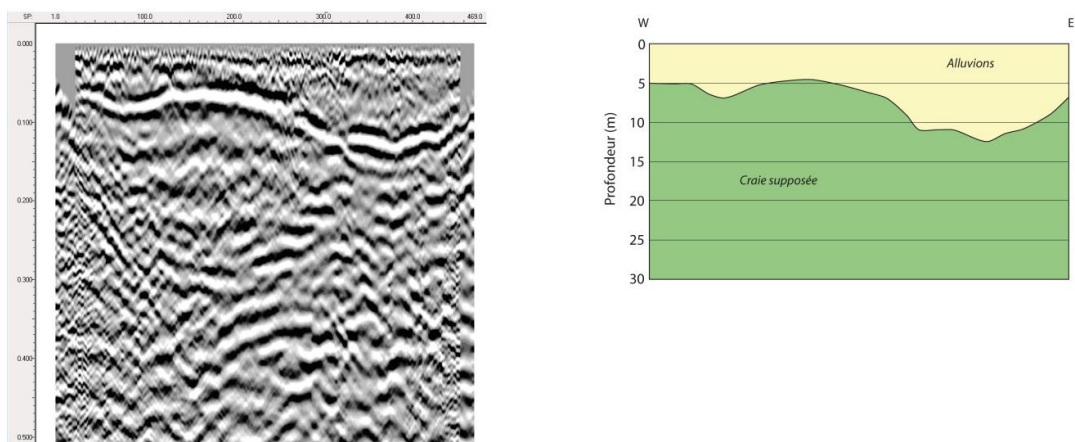


Figure 8 : La ligne 2 présente une base érosive correspondant probablement à la base des alluvions recouvrant les formations crayeuses sous-jacentes. Dans la partie E de la ligne, le modelé de la base des alluvions montre la présence d'un ancien chenal avec un remplissage alluvionnaire excédant 10m, probablement concordant avec celui de la ligne 1.

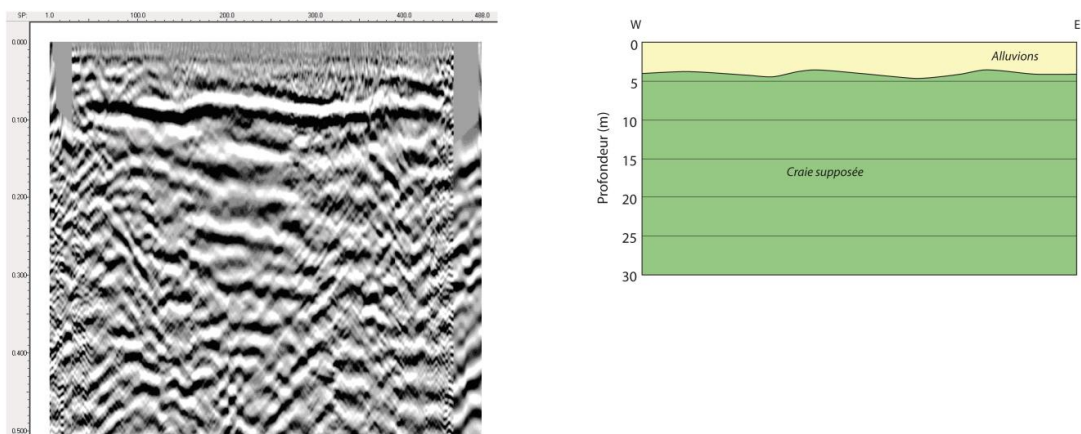


Figure 9: La ligne 4 montre un modelé de la base des alluvions assez plat avec une épaisseur d'environ 4,5m assez conforme aux données des forages situés à proximité. Cette ligne ne recoupe pas le chenal visible au nord sur les lignes 1 et 2.

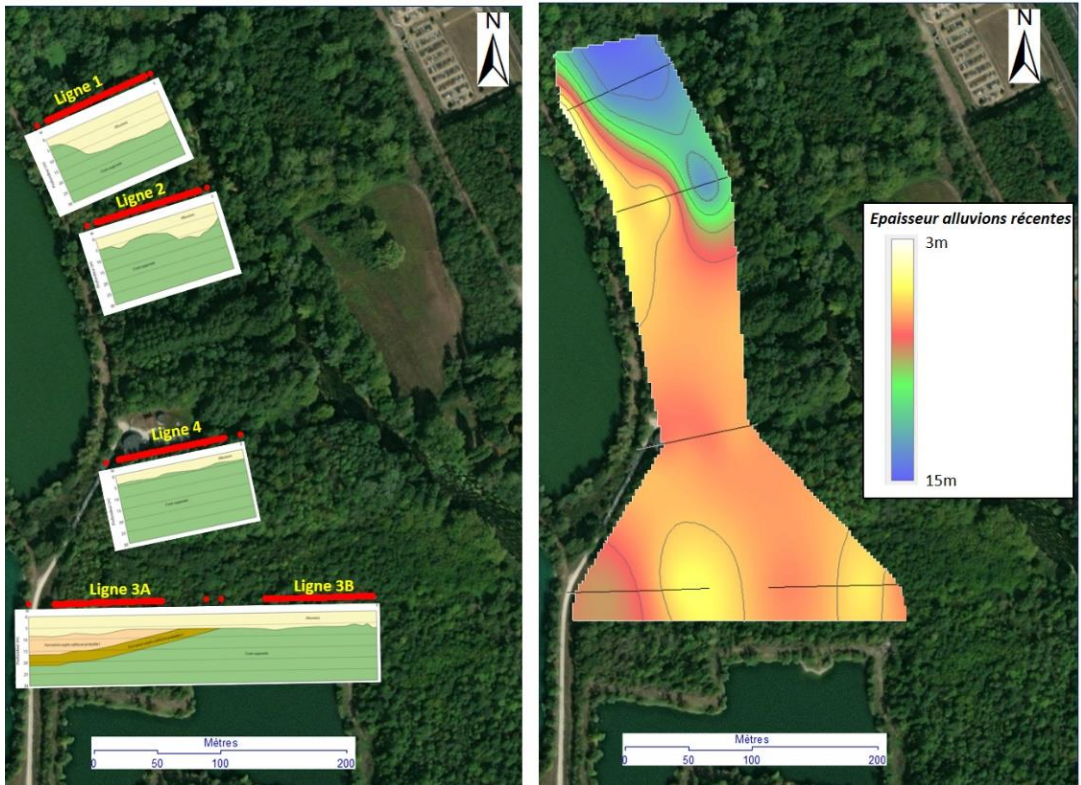


Figure 10: Essai de cartographie supposée du chenal. La bordure ouest du chenal reconnu sur les lignes 1 et 2 pourrait délimiter une zone à l'est de faible épaisseur d'alluvions (avoisinant 5m) d'une zone à l'ouest de plus grande épaisseur d'alluvions récentes (15m environ).

4.3 Mise en évidence d'une autre formation clastique entre les alluvions récentes et le toit de la Craie

Les lignes 3A et 3B ont été mises en connexion pour une meilleure lecture. La zone située à l'ouest montre un modelé de la base des alluvions assez régulier avec une épaisseur d'alluvions « récentes » variant linéairement d'ouest (environ 9m) en est (5m). Cette base des alluvions pourrait recouvrir directement la Craie sur l'étendue de la ligne 3B. En revanche, elle semble couvrir à l'est (le long de la ligne 3A) un ensemble de formations coupées en pleine masse par les alluvions récentes et se développant vers l'ouest. Ces formations d'environ 200m/s en ondes S doivent correspondre au vu de ces vitesses à des formations clastiques (argilo-sableuses), les formations calcaires étant généralement beaucoup plus rapides.

Ces formations pourraient soit se rapporter à des formations tertiaires localement préservées ou bien à des alluvions anciennes. Si ces dernières sont sableuses elles pourraient être un réservoir potentiel.

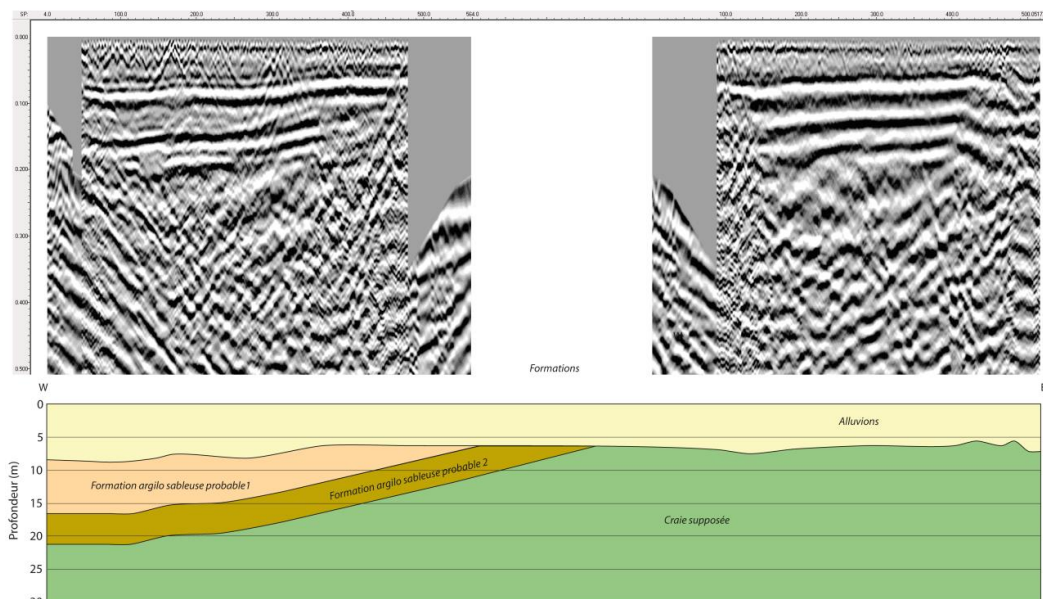


Figure 11 : Ligne 3 constituée des profils sismiques 3A et 3B1 en temps et son interprétation en profondeur.

4.4 Limite relative à la définition de la Craie

Les vitesses intrinsèques de la Craie pour les ondes S oscillent entre 1000 et 1500m/s (beaucoup plus rapides que les vitesses des formations clastiques). L'imagerie de ces formations crayeuses se trouve dès lors très difficile à imager. En effet, les variations d'épaisseur et de vitesse des alluvions rendent très variables les vitesses RMS des unités de la Craie à l'échelle de la ligne alors même que la limite en offset (contrainte de surface du dispositif) ne permet pas de bien discriminer ces vitesses. L'interprétation d'accidents structuraux (cherchés pour d'éventuels drains) est donc rendue très difficile pour ces lignes.

5 Conclusion

Les résultats de l'étude s'avèrent très prometteurs, d'une part à l'échelle du projet mais également d'un point de vue méthodologique pour la recherche d'eau dans des aquifères de très faibles profondeur. Cette acquisition a été réalisée dans le délai très court d'une semaine.

L'acquisition

La faible profondeur des aquifères ciblés et des futurs ouvrages envisagés nous ont conduit à préconiser une acquisition sismique en ondes S. Les vitesses lentes des ondes S permettent ainsi une bonne résolution des réflexions peu profondes, c'est-à-dire inférieures à 10m et jusqu'à quelques dizaines de mètres en fonction de la géologie.

Les paramètres définis et leur validation au cours d'une phase de test ont permis d'obtenir 5 lignes sismiques de très bonne qualité, particulièrement bonne au regard des contraintes de terrain qui limitaient la longueur des lignes et ainsi la longueur en offset.

Le traitement sismique

Le traitement des lignes sismiques en ondes S a ensuite été réalisé. Le traitement en ondes S est un traitement sismique pas classique, exigeant, très compliqué qui requiert un véritable savoir-faire et une grande expérience. Les grandes difficultés attenantes à ce type de traitement réfèrent :

- à la difficulté de discriminer l'information géologique des évènements bruités ou des multiples ;
- à la difficulté à discriminer les vitesses par le manque d'offsets lointains et l'absence de vitesses en ondes S dans la zone d'étude ;
- aux très faibles vitesses et aux forts contrastes de vitesses observés dans les premiers mètres relatifs au sol et constituant la zone altérée (weathering zone).

La séquence de traitement a été définie au regard des quelques projets mis en œuvre dans ce genre d'environnement, notamment dans des zones de couplage alluvial/Tertiaire/Craie. Cette expérience nous a permis malgré l'absence de données de vitesses en ondes S de subodorer rapidement les vitesses attendues pour les terrains de la zone d'étude. Ces dernières ont été confirmées et affinées en cours de traitement.

Les résultats obtenus se sont trouvés être particulièrement intéressants, notamment dans la caractérisation de la base des alluvions. La base des alluvions est souvent difficile à imager lorsque les vitesses des terrains sus-jacents présentent de forte variabilité (particulièrement dans les zones d'épaisseur de sols variables). Un véritable effort de traitement a été nécessaire pour recouvrir l'intégralité de la base des alluvions pour l'ensemble des lignes, pour un résultat très satisfaisant.

En revanche, la caractérisation de la Craie est très compliquée dans ce cas, à la fois par la faible profondeur qui ne permet pas une imagerie en ondes P mais également par les vitesses très élevées en ondes S qui les caractérisent. Les faibles offsets contraints par le dispositif de surface ne permettent pas d'apporter une image fiable au sein de la Craie, cette dernière ne pouvant pas être discriminée des artefacts (multiples et bruits linéaires) de manière fiable.

L'interprétation sismique et les résultats

Une fois traitées, ces données sismiques ont fait l'objet d'un travail d'interprétation sismique qui nécessite également un véritable savoir-faire, ce type de données étant très singulier. L'interprétation sismique nécessite pour ce type de données une réelle maîtrise du traitement sismique mais aussi une parfaite connaissance des choix opérés et des limites rencontrées durant le traitement sismique, notamment en ce qui concerne les vitesses utilisées. Elle offre en retour une interprétation précise et quantitative, et de grande valeur en comparaison des méthodes électriques classiquement utilisées dans ce genre d'environnement.

L'interprétation sismique a permis d'identifier la base des alluvions pour chacune des lignes. Un essai de conversion profondeur a été réalisé sur la base des observations faites le long des stacks à vitesses constantes. Ce travail a été validé après avoir trouvé une bonne concordance des résultats de la conversion profondeur lors de la projection des données issues des forages proches.

Cette interprétation a permis de mettre en évidence plusieurs points intéressants à l'échelle de ce projet qui influenceront l'implantation des futurs forages :

- la présence d'un ancien chenal se développant à l'est des lignes (rencontrées sur les lignes 1 et 2, et potentiellement au bout de la ligne 3B) qui permet d'espérer une surépaisseur de sédiments (avoisinant potentiellement 15m) en comparaison des 4-5m rencontrés dans les forages existants,
- la présence de séries clastiques (argilo-sableuses) sur la ligne 3A directement sous-jacentes aux alluvions récentes et actuellement non identifiables (Tertiaire ? Alluvial ancien ?) et qui semblent se développer vers le sud-ouest. Ces séries clastiques isolent la Craie des alluvions récentes mais pourraient, si elles s'avéraient être des séries sableuses, étendre le potentiel hors-craie.

6 Reference

R. Garotta, Shear waves from acquisition to interpretation, Society of Exploration Geophysicists, ISBN 1-5608-086-0 (2000)