

Etude de faisabilité sur la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée par géoradar

Pierre Weill^{1*}, Benoit Deleplancque¹, Christophe Norgeot²

¹ Centre de Géosciences, Mines ParisTech, UMR 7619 Sisyphe, 35 rue Saint-Honoré, 77 305 Fontainebleau

² Le Matériel de Sondage, 24 place Charles-Fillon, 75 017 Paris

* pierre.weill@mines-paristech.fr

1 Introduction

Le système de la Seine supérieure (en amont de la confluence avec l'Yonne, Fig. 1) ne repose pas directement sur le substratum rocheux, mais évolue au sein d'une vallée active où les s'accumulent sur plusieurs mètres d'épaisseur depuis la fin de la dernière période glaciaire (Bendjoudi et al., 2002). Ainsi, le fonctionnement hydrologique de la Seine supérieure, et plus particulièrement les échanges nappe-rivière, est fortement lié à la nature et à la distribution spatiale des sédiments au sein de la

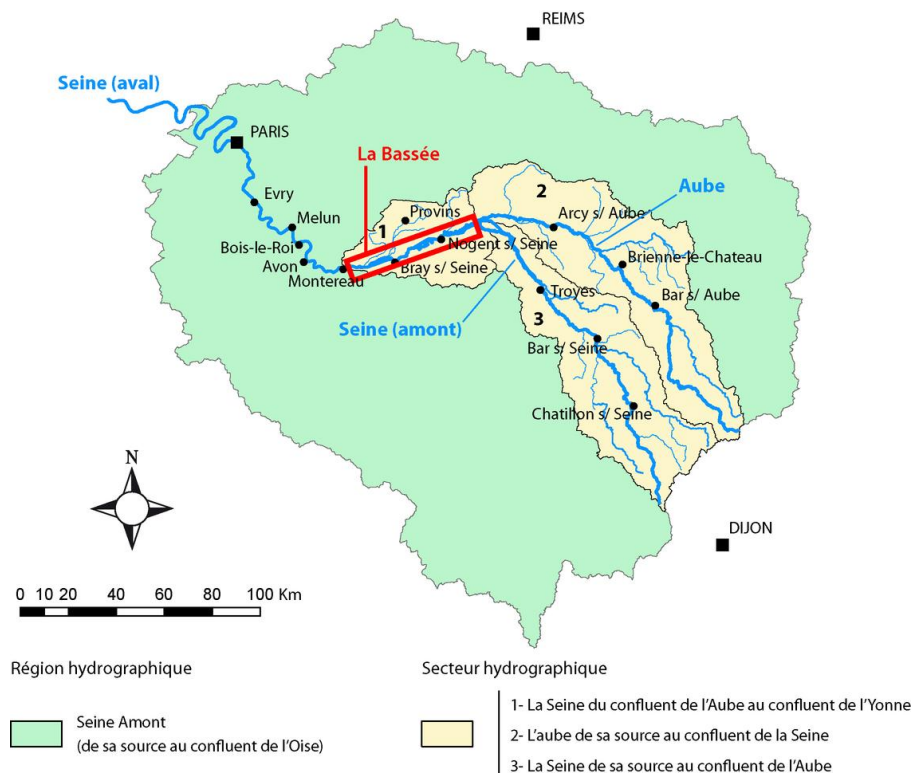


FIGURE 1 – Région hydrographique du système Seine amont, et secteurs hydrographique en amont de la confluence avec l'Yonne (au niveau de Montereau). La Bassée correspond à la vallée active de la Seine entre la confluence avec l'Aube et la confluence avec l'Yonne (secteur 1).

vallée active. Celle-ci peut être vue comme une zone tampon entre l'aquifère régional et le réseau de surface.

L'objectif de ce projet est de caractériser le remplissage et les hétérogénéités de la plaine alluviale de la Bassée (Fig. 1), ainsi que la géométrie de la surface de contact entre la craie Crétacée et les alluvions Quaternaires, à l'aide d'outils géophysiques et sédimentologiques. Les campagnes d'imagerie serviront à contraindre un modèle numérique (FLUMY) permettant de modéliser les hétérogénéités structurales de la plaine alluviale sous la forme d'un bloc 3D, qui pourra servir de point d'entrée à une modélisation hydrologique précise des interactions nappe-rivière sur le secteur d'étude.

Plusieurs méthodes géophysiques complémentaires seront utilisées au cours de ce projet : sismique réfraction, résistivité électrique, et géoradar. Le géoradar est une méthode attrayante de par sa facilité et rapidité de mise en œuvre, mais nous ne disposons que de peu d'expérience sur le type de terrain du secteur d'étude, ainsi que sur les objets à observer. Une première campagne géophysique a été réalisée les 2 et 3 mai 2012, dans le but de tester l'efficacité de la méthode géoradar, ou ground-penetrating radar (GPR), sur les différents types de terrains constituant la vallée active de la Seine supérieure. Ce rapport en est le compte-rendu.

Afin de replacer la Bassée dans un cadre sédimentologique, nous présenterons dans un premier temps les principaux éléments architecturaux qui composent une plaine alluviale de rivière méandri-forme. Après avoir exposé les principes du géoradar et le matériel utilisé, nous présenterons le schéma d'acquisition suivi lors de cette campagne, et détaillerons les premiers résultats obtenus. A la lumière de ces derniers, nous proposerons un plan d'actions à mener pour l'année 2013.

2 Éléments architecturaux d'une plaine alluviale

Les plaines alluviales associées aux rivières méandriformes telles que la Seine sont composées de différentes unités morpho-sédimentaires de géométries et de lithologies très contrastées. La nature des dépôts est intrinsèquement liée aux processus hydrodynamiques à l'origine de leur formation. La dynamique des rivières en méandres a fait l'objet de nombreuses publications (c.f. [Miall \(1996\)](#) pour un aperçu général). Nous nous contenterons ici de détailler les principaux éléments architecturaux de la plaine alluviale (Fig. 2) :

- Les barres de méandres résultent du dépôt de sables et de graviers sur la bordure interne des méandres. Elles sont caractérisées par une géométrie sigmoïde, et une stratification interne oblique. Leurs dimensions sont de l'ordre des dimensions du chenal. La granulométrie est plus importante en pied de barre, et diminue vers le haut.
- Lorsque la rivière est en crue et déborde de son lit, des sédiments en suspension sont emportés dans la plaine alluviale. Les éléments les plus lourds (silts) sont rapidement déposés en bordure de chenal, et forment les levées. Les argiles sont transportées sur de plus grandes distances et déchantent lors de la décrue. Elles participent à l'aggradation de la plaine alluviale.
- Il arrive lors de fortes crues que la levée du chenal soit éventrée. En plus des silts et argiles en suspension, l'eau s'engouffrant dans la brèche emporte avec elle des sables qui se déposent en grands épanchements. On parle de lobes de crevasse.
- Lorsqu'un méandre se recoupe ou que la rivière adopte un nouveau cours, il se forme des lacs de méandres abandonnés. Ces derniers se comblent lentement d'argile et de matière organique, pour former des bouchons argileux.

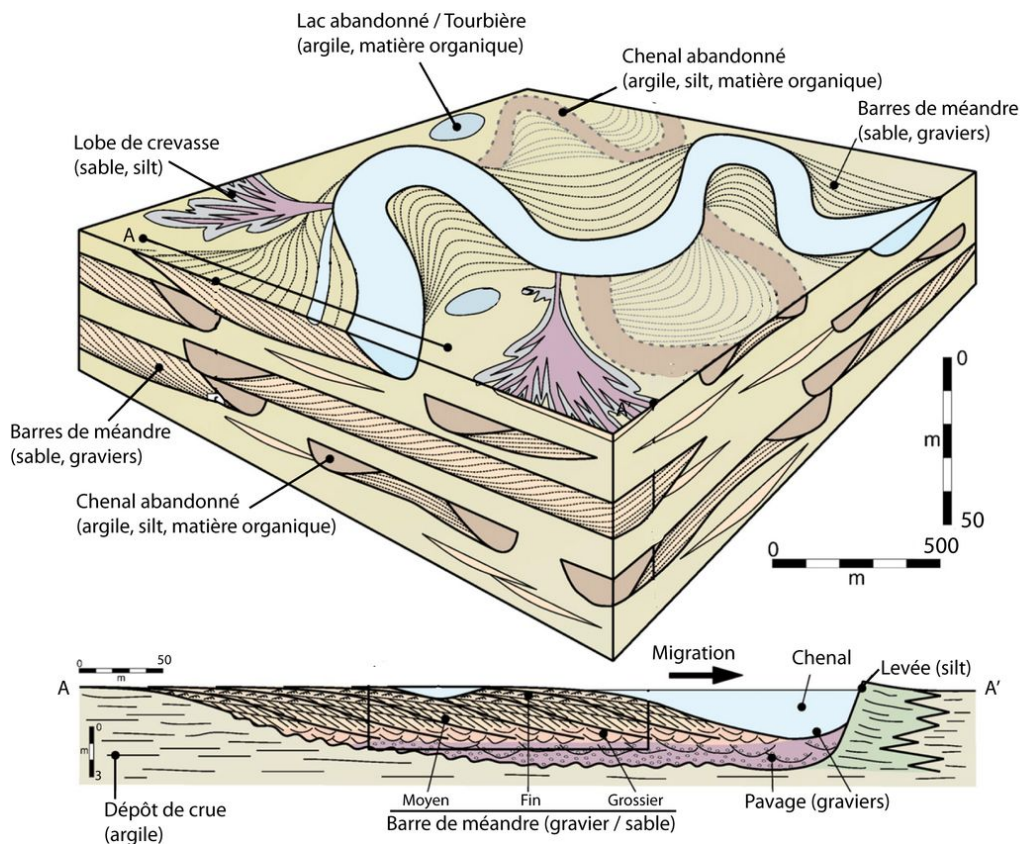


FIGURE 2 – Architecture sédimentaire d'une plaine alluviale de rivière méandriforme. Modifié d'après [Ghazi and Mountney \(2009\)](#).

La dynamique des rivières méandriformes, qui entraîne à la fois une divagation des chenaux et une accumulation verticale de sédiments, résulte en la formation d'une plaine alluviale extrêmement hétérogène, d'une épaisseur de plusieurs mètres à dizaines de mètres. Si les barres de méandres sablo-graveleuses, poreuses et perméables, forment des chemins d'écoulement préférentiels pour les fluides, les dépôts de crue argileux, au contraire, créent d'importantes barrières de perméabilité.

La Seine, comme la plupart des fleuves d'Europe du Nord-Ouest (Kasse et al., 2003; Antoine et al., 2000, 2003), comble de ses alluvions une vallée incisée dans le substratum rocheux par les épisodes glaciaires successifs du Quaternaire. Avec un niveau de base de 120 mètres plus bas que le niveau marin actuel, et un régime hydraulique puissant contrôlé par les crues de débâcle, la dernière période glaciaire a entraîné l'incision de la Seine jusqu'aux environs de -18 000 ans (Antoine, 1997). Avec l'augmentation des apports sédimentaires et sous un climat périglaciaire, une première phase de remplissage s'effectue jusqu'à -13 000 ans par un système fluvial en tresses. A partir de -12 000 ans, avec la remontée du niveau de base et le passage à un climat plus tempéré, la paléo-Seine adopte un cours méandriforme. Le remplissage alluvionnaire de la vallée incisée se fera jusqu'à l'Atlantique (Antoine, 1997; Pastre et al., 2000). Aujourd'hui, l'épaisseur du remplissage alluvionnaire dans le secteur de la Bassée varie entre 6 et 10 mètres, et repose sur le substrat très irrégulier de la craie Crétacée.

3 Principes du géoradar et matériel utilisé

Le géoradar, ou GPR (Ground Penetrating Radar) est une méthode d'investigation géophysique non destructive, qui détecte les discontinuités électriques dans la subsurface. Cette méthode repose sur l'émission, la propagation, la réflexion et la réception d'ondes électromagnétiques hautes fréquences, de l'ordre du MHz au GHz. Le GPR est aujourd'hui fréquemment utilisé en sédimentologie pour étudier la géométrie et l'architecture des dépôts et remonter à la nature des processus sédimentaires dans des contextes très variés (Neal, 2004). Il peut être également utilisé pour localiser des aquifères de surface (Rejiba et al., 2012) pour des études hydro-géologiques, ou encore pour étudier la structure interne et l'évolution de glaciers (Monnier et al., 2011).

Un profil radar est composé d'une succession de traces verticales qui proviennent de l'émission d'une pulsation électromagnétique de très haute fréquence (de l'ordre du MHz au GHz). Quand l'onde se propage dans le sol, elle rencontre des matériaux ayant des propriétés différentes qui modifient sa vitesse. Si ces changements de vitesse de propagation sont rapides par rapport à la longueur d'onde caractéristique du signal, une partie de l'énergie est réfléchie vers la surface, et enregistrée par l'antenne réceptrice (Fig. 3). Le temps entre l'émission et la réception du signal est appelé "temps double de parcours" (Two-Way Traveltime - TWT).

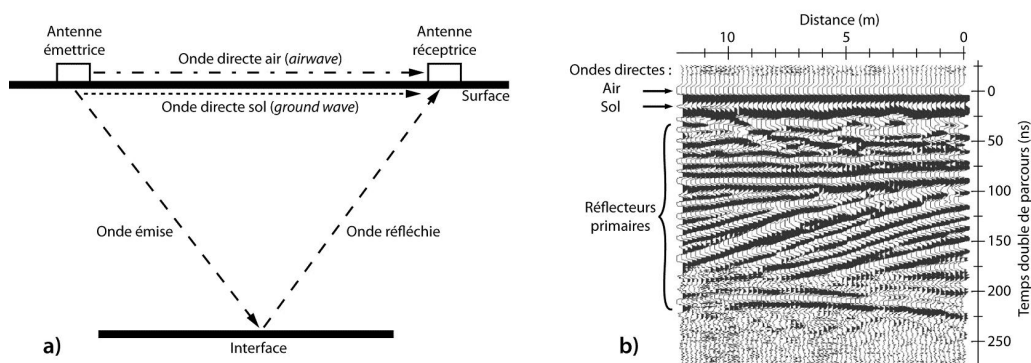


FIGURE 3 – a) Propagation des ondes radar directes et réfléchies entre l'émetteur et le récepteur. b) Exemple de profil radar illustrant les ondes directes et les réflecteurs primaires. Modifié d'après Neal (2004).

La propagation de l'onde électromagnétique est contrôlée par les propriétés du sédiment qu'elle traverse : la permittivité diélectrique (ϵ), la conductivité électrique (σ) et la perméabilité magnétique (μ). La vitesse de propagation (v) de l'onde électromagnétique est donc fonction sa fréquence (f) et des caractéristique électromagnétique du sédiment. Pour les matériaux faiblement conducteurs et amagnétiques, comme des sables ou des graviers, la vitesse peut être assimilée à une fonction de la seule permittivité diélectrique :

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

avec c_0 la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide (3.10^8 m.s^{-1}).

L'eau douce possède une très forte permittivité diélectrique ($\epsilon \simeq 80 \text{ F.m}^{-1}$) par rapport à l'air ($\epsilon \simeq 1 \text{ F.m}^{-1}$) ou aux sédiments ($\epsilon \simeq 3 - 10 \text{ F.m}^{-1}$). Ainsi, le GPR est sensible aux changements du rapport air/eau/sédiment du milieu considéré. Des changements dans la quantité ou le type de fluide occupant le réseau poreux, des changements de porosité, ou des changements dans le type, la taille, l'orientation et l'agencement des grains sont susceptibles de modifier la propagation de l'onde radar (Fig. 4). Par conséquent, des structures sédimentaires, des contrastes lithologiques ou des limites de nappes devraient pouvoir être imagées par le GPR. Les réflecteurs radar primaires peuvent être associés aux litages sédimentaires.

La capacité du radar à détecter des discontinuités sédimentaires dépend des résolutions verticales et horizontales. La résolution verticale est inversement proportionnelle à la fréquence. Autrement dit, plus la fréquence de l'antenne est élevée, meilleure sera la résolution, mais plus faible sera la pénétration. En général, on considère que la meilleure résolution verticale que l'on puisse atteindre est de l'ordre du quart de la longueur d'onde du signal réfléchi. Cependant, il semblerait qu'un facteur 1/2 soit plus réaliste.

La plaine alluviale étudiée correspond au remplissage sédimentaire d'une vallée incisée dans le substratum crayeux d'âge Crétacé. La profondeur de l'incision, et donc l'épaisseur des dépôts, varie

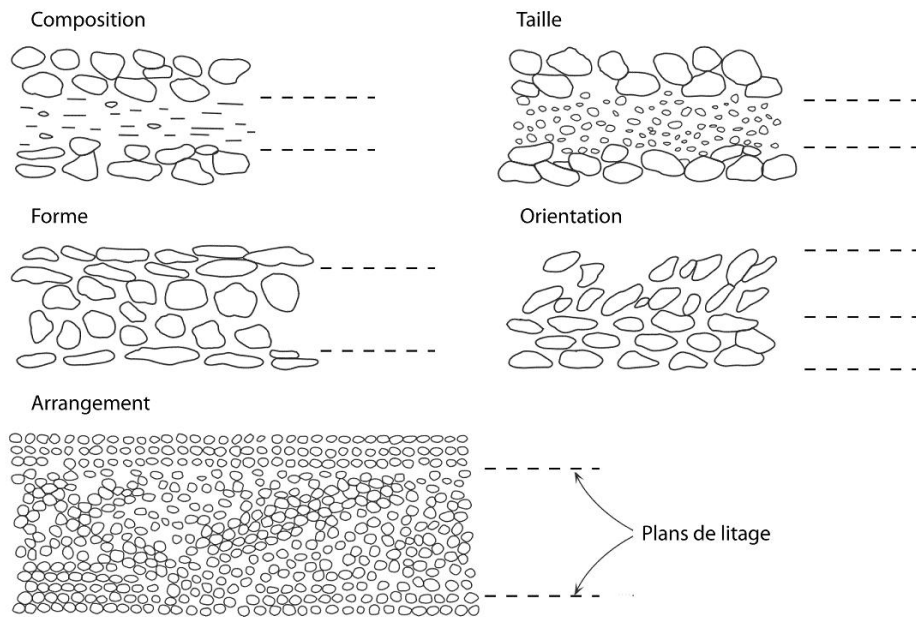


FIGURE 4 – *Litages résultants de variations de composition, taille, forme, orientation et arrangement des grains sédimentaires. Ces litages induisent des changements de porosité et de réponse radar. Modifié d'après Neal (2004).*

entre 6 et 10 m. D'autre part, les structures sédimentaires à observer sont parfois de petite échelle (de quelques dizaines de centimètre au mètre). Par conséquent, l'utilisation d'antennes radar de moyennes fréquences semble être un bon compromis entre résolution verticale et profondeur de pénétration. Un lot de trois antennes (Fig. 5) de marque GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) a été utilisé, avec des fréquences de 200, 270 et 400 MHz. De manière générale, le matériel se compose d'une antenne en contact avec le sol, montée sur un support permettant son déplacement. Une roue codeuse et un GPS enregistrent en continu les positions et les distances parcourues. Une station d'acquisition (SIR-3000 de GSSI) câblée à l'antenne permet la configuration du système, l'enregistrement des données et une visualisation en temps réel.



FIGURE 5 – Antennes radar GSSI de 400 (A), 270 (B) et 200 MHz (C) testées sur le terrain. L'antenne de 400 MHz est montée sur un charriot, alors que les antennes de 270 et 200 MHz, plus grandes et lourdes, sont trainées.

4 Schéma d'acquisition

Pour ces premiers essais de prospection des terrains alluviaux au géoradar, deux secteurs d'étude ont été choisis, chacun présentant des caractéristiques morphologiques et lithologiques différentes.

La première zone se situe en amont de la ville de Romilly-sur-Seine et de la confluence avec l'Aube, à proximité du village de Clesles. La Seine est de largeur relativement faible ($\simeq 20\text{m}$), et accompagnée de plusieurs chenaux secondaires. Les terrains relativement argileux sont composés de forêts alluviales, de champs et d'exploitations forestières. La largeur de la plaine varie entre 2 et 3 km. Ce site a été choisi pour i) tester l'influence d'un couvert de terre végétale ou de terrains argileux sur la pénétration du signal radar, ii) évaluer la possibilité de réaliser des profils radar au travers de la plaine alluviale le long de routes ou de chemins carrossables, et iii) suivre l'interface craie / alluvions en partant d'un bord de la vallée incisée. Environ 3 km de profils ont été acquis sur ce site, à l'aide des antennes de



FIGURE 6 – Localisation des deux zones choisies pour les essais de prospection radar : Clesles et la Motte-Tilly.

200 et 400 MHz, sur route et chemins carrossables (Fig. 7).

La deuxième zone se situe à proximité du village de la Motte-Tilly, sur une gravière de la CEMEX en cours d'exploitation. Située en aval de la confluence avec l'Aube, la Seine présente une largeur plus importante (≈ 40 m) et forme un large méandre à l'intérieur duquel se trouve l'exploitation de sables et de graviers. Le décapage de la terre végétale avant l'exploitation dégage de larges zones plates idéales pour la prospection radar. La nature sablo-graveleuse est associée à des dépôts de barres de méandres. Ce site a été sélectionné pour tester les capacités du géoradar à imager des architectures complexes sur plusieurs mètres de profondeur, avec un niveau de nappe haut. Près de 2 km de profils ont été enregistrés sur cette zone, à des fréquences de 200, 270 et 400 MHz. Les mêmes profils ont été échantillonnés avec des antennes différentes, afin de comparer les résultats issus de fréquences différentes (Fig. 8). L'implantation des profils était conditionnée par l'espace disponible entre les fosses, les tas de stérile et les tapis convoyeurs.

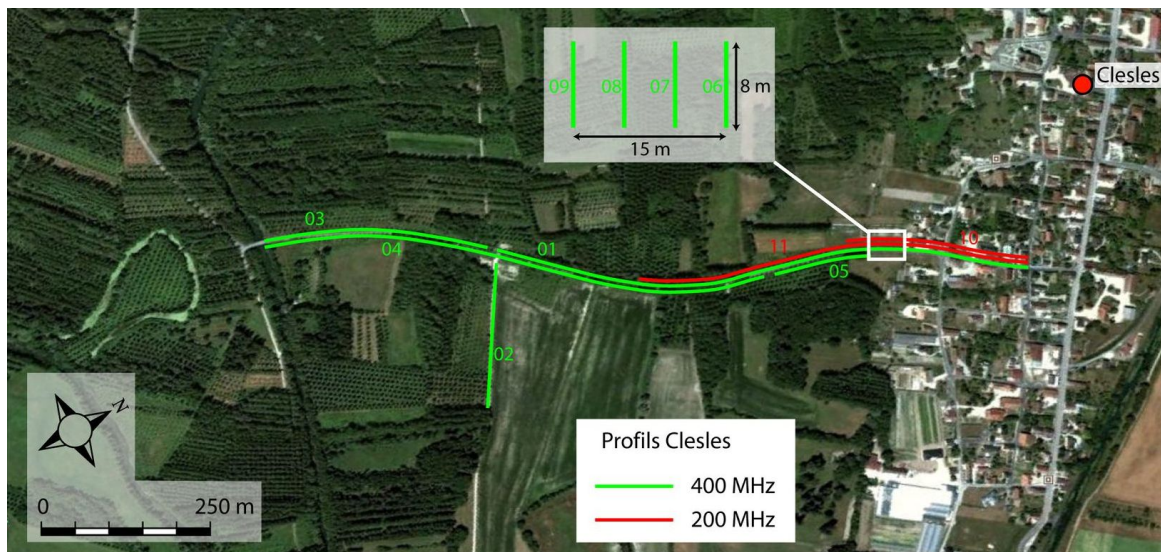


FIGURE 7 – Localisation des profils radar sur le site de Clesles.

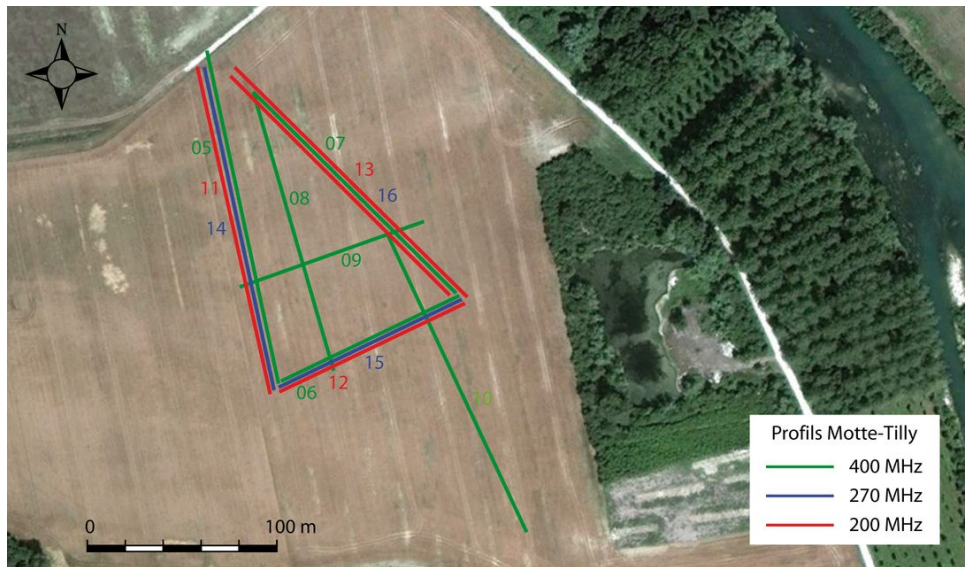


FIGURE 8 – Localisation des profils radar sur le site de la Motte-Tilly.

Tous les profils radar ont été enregistrés avec un pas de 50 scans par mètre. Sur le site de Clesles, une permittivité diélectrique de $12 F.m^{-1}$ a été choisie. Cette valeur est arbitraire, et correspond à une valeur moyenne pour un sol humide. Elle n'est utilisée que pour convertir les temps doubles de parcours et donner une première estimation des profondeurs. Sur la carrière de la Motte-Tilly, où le matériel est sablo-graveleux et dépourvu d'argile, une permittivité de $8 F.m^{-1}$ a été utilisée pour les conversions temps double / profondeur.

5 Résultats

5.1 Clesles, terrains alluviaux humides

Sur le site de Clesles, les profils ont été réalisés sur chaussées goudronnées et chemins carrossables, traversant des terrains agricoles, des exploitations forestières et des forêts alluviales. Ces terrains très argileux associés à un niveau de nappe très haut se sont révélés peu propices au géoradar. Le signal, très rapidement atténué par les terrains très conducteurs, présente des profondeurs de pénétration faibles. Mis à part les installations de voiries (soubassements de routes, piles et tabliers de pont) et de canalisation, les profils ne révèlent aucune structure particulière, sauf en de rares endroits où apparaissent des réflecteurs interprétés comme des corps sédimentaires. Le portion sud du profil 04 (voir Fig. 7 pour localisation) en est le plus bel exemple (Fig. 9).

Sur la verticale, les 50 premiers centimètres du profil sont représentés par des réflecteurs relativement continus et horizontaux. Le profil est réalisé sur une route goudronnée, et ces réflecteurs peuvent donc être interprétés comme des couches de remblais et des sous-couches routières. On trouve ensuite une surface pseudo-horizontale, relativement perturbée, qui localement présente une double forme canalisée. Le signal est très fortement atténué sous ces lentilles, témoignant d'un matériau relativement conducteur. Il est possible qu'il s'agisse là de petits chenaux abandonnés, remplis d'argile ou de tourbe. Enfin, entre 0,5 et 1 m de profondeur, l'image radar est caractérisée par une succession de réflecteurs obliques, orientés dans la même direction (Sud-Ouest), et relativement parallèles les uns aux autres. Certains de ces réflecteurs se redressent en leur partie basale pour devenir sub-horizontaux. Cette signature est typique de la stratification oblique des barres de méandres. L'épaisseur de ces barres donne l'indication de paléo-chenaux de faibles profondeurs (environ 1 m). Sous ce niveau probablement composé de sables, le signal est très fortement atténué, et aucune structure particulière n'est observée.

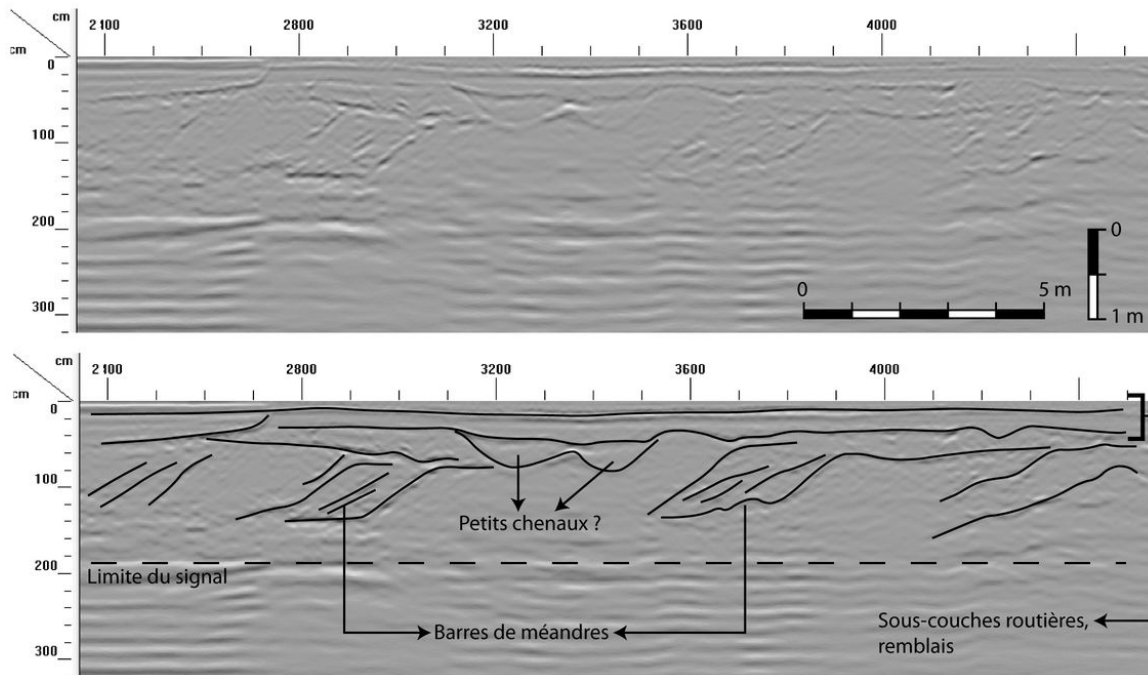


FIGURE 9 – Portion du profil 04 à 400 MHz (extrémité sud, Fig. 7). Haut : Profil brut. Bas : Profil interprété. La profondeur de pénétration est inférieure à 2m. Sous les premiers 50 cm composés de remblais et de sous-couches routières, des réflecteurs obliques sont interprétés comme des barres de méandres.

Les tests réalisés sur le secteur de Clesles montrent les limites de l'outil géoradar sur des terrains à dominante argileuse, en particulier lorsque le niveau de la nappe est haut. Ces terrains conducteurs atténuent fortement le signal, et limitent les profondeurs de pénétration à quelques mètres au maximum. Si le géoradar permet tout de même de repérer des zones sableuses associées à la migration de paléo-chenaux proches de la surface, les terrains sont difficilement praticables et limitent la prospection aux routes, chemins, et exploitations forestières.

5.2 Carrière de la Motte-Tilly, barres de méandres sablo-graveleuses

Contrairement au site de Clesles, la nature sablo-graveleuse des sédiments sur la carrière CEMEX de la Motte-Tilly a permis l'obtention de profils radar de très belle qualité, avec des profondeurs de pénétration dépassant parfois les 7 m. Les figures 10 et 11 présentent deux profils parallèles distants d'une vingtaine de mètres, obtenus avec des antennes de 200 et 400 MHz respectivement. Pour chaque figure, nous présentons les profils bruts et interprétés. Le profil à 200 MHz présente une très bonne qualité de signal jusqu'à environ 7 m de profondeur, avec des amplitudes de réflecteurs homogènes. Au-delà, le rapport signal sur bruit augmente brutalement, et aucun autre réflecteur n'est observé. Les réflecteurs les plus profonds, sub-horizontaux, présentent des amplitudes fortes. Cette perte brutale de signal en profondeur pourrait indiquer la présence d'un milieu homogène, peut-être le substratum crayeux. Les profondeurs de 7 m concordent bien avec la profondeur moyenne de l'interface craie/alluvions relevée sur différents sondages de ce secteur.

Le profil à 400 MHz montre également une très bonne profondeur de pénétration, quasi équivalente à celle de l'antenne de 200 MHz, avec toute fois une plus forte atténuation du signal à partir de 5m. La résolution verticale du profil à 400 MHz est de l'ordre d'une dizaine de centimètres, révélant des structures sédimentaires très fines. Malgré la différence de résolution, les deux profils à 200 et 400 MHz montrent une même architecture sédimentaire. Au-dessus de la limite interprétée comme l'interface substratum/alluvions, 4 unités sont identifiées :

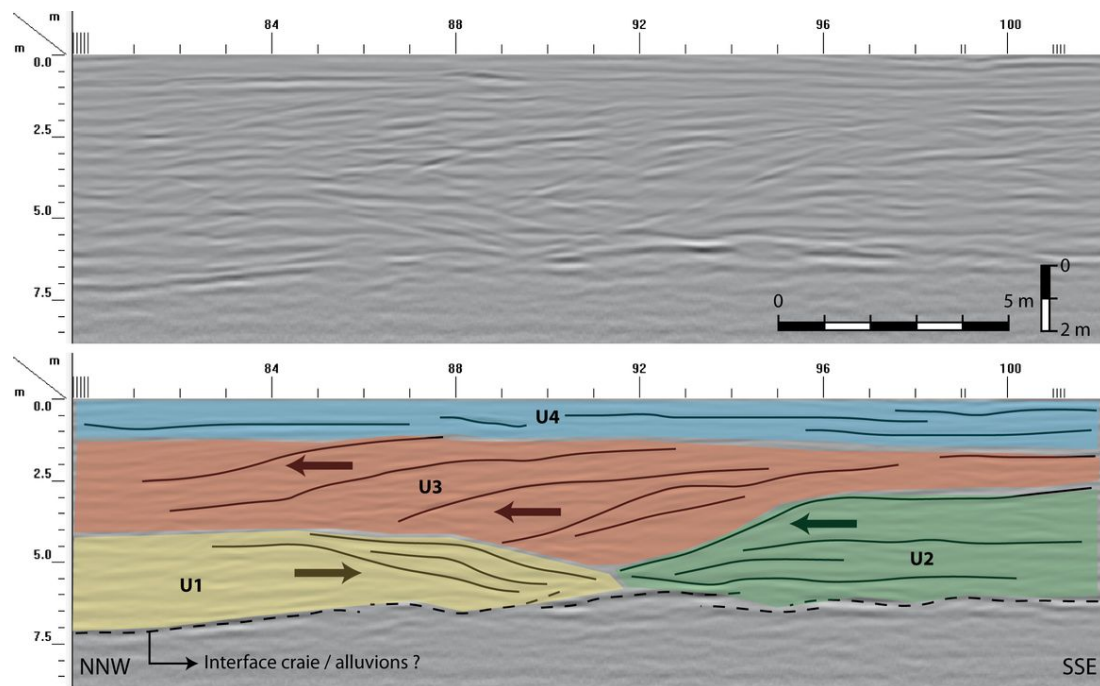


FIGURE 10 – Portion du profil 11 à 200 MHz (voir Fig. 8 pour localisation). Haut : Profil brut. Bas : Profil interprété.

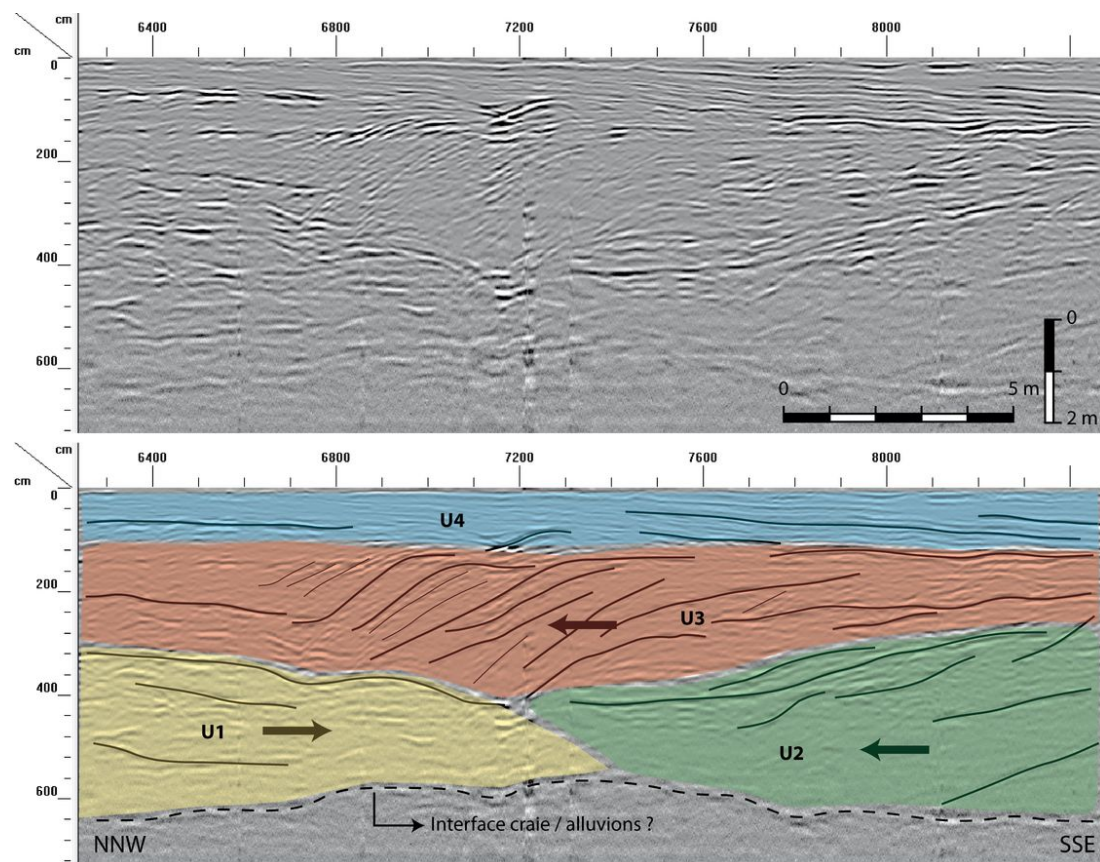


FIGURE 11 – Portion du profil 08 à 400 MHz (voir Fig. 8 pour localisation). Haut : Profil brut. Bas : Profil interprété.

Les unités U1 et U2 reposent sur le fond de la vallée incisée, et présentent des grands réflecteurs obliques de directions opposées. Ces corps sédimentaires interprétés comme des barres de méandres, reflètent la migration d'un chenal de 2-3 mètres de profondeur, migrant vers le sud-sud-est dans le cas de l'unité 1, puis vers le nord-nord-ouest dans le cas de l'unité 2. Recouvrant ces deux unités basales, l'unité 3 présente des réflecteurs obliques à pendage vers le nord-nord-ouest. Elle est drapée par l'unité 4 à réflecteurs sub-horizontaux, d'une épaisseur moyenne d'un mètre.

La figure 12 présente une partie du profil 7 à 400 MHz, orienté nord-ouest sud-est, et donc oblique par rapport aux profils 08 (Fig. 11) et 11 (Fig. 10). Si la partie basse montre moins de détails que les profils présentés précédemment, le premier mètre est structuré en une série de barres de méandres accolées les unes aux autres, et traduisant une migration vers le nord-ouest. A l'intérieur de chaque barre de méandre, la résolution de l'antenne de 400 MHz permet d'observer les litages obliques associés à chaque dépôt de crue. L'épaisseur de ces barres de méandres traduit le passage d'un chenal de l'ordre d'un mètre de profondeur. Cette valeur est faible par rapport à l'épaisseur des barres de méandres présentes dans les unités 1, 2 et 3 des profils 08 et 11, de l'ordre de 2 à 3 mètres. Cette évolution est probablement associée à un changement du régime hydrologique du système entre le début et la fin du remplissage alluvionnaire.

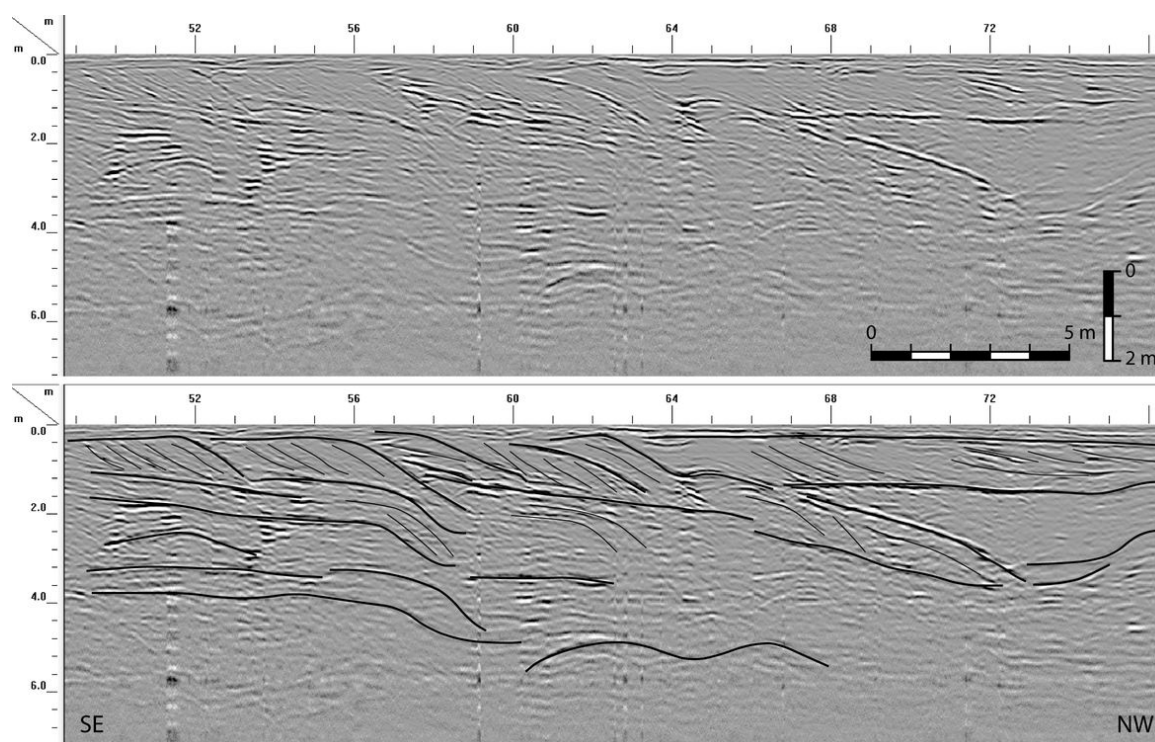


FIGURE 12 – Portion du profil 07 à 400 MHz (voir Fig. 8 pour localisation). Haut : Profil brut. Bas : Profil interprété.

6 Conclusions et perspectives

Cette étude de faisabilité sur l'utilisation du géoradar pour caractériser les hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée a permis de mieux cerner les capacités et les limites de cet outil, et ainsi de préparer le plan des actions à mener en 2013 :

- Les ondes radar sont très fortement atténuées par les terrains argileux et gorgés d'eau. Le géoradar est donc d'une utilité limitée pour une prospection « à l'aveugle » sur les routes et chemins parcourant la plaine alluviale de la Bassée. Tout au plus, il permettra de mettre en évidence des zones sableuses associées à des barres de méandres sur les 2 premiers mètres de sédiment. Cependant, il serait intéressant de renouveler l'expérience par temps sec, en période d'étiage. D'une rapidité de mise en œuvre incomparable avec les autres techniques géophysiques, le géoradar permettrait de caractériser au premier ordre l'extension des hétérogénéités proches de la surface.
- Le géoradar fournit des données de qualité exceptionnelle sur les terrains composés exclusivement de sables et de graviers propres, même avec un niveau de nappe affleurant. Les gravières en cours d'exploitation offrent un excellent terrain de jeu, puisque de grandes surfaces sont décapées de la terre végétale par les exploitants.
- Sur les terrains sablo-graveleux, les fréquences de 200 et de 400 MHz présentent des profondeurs de pénétration similaires. Si les profils à 400 MHz montrent une plus forte atténuation du signal vers le bas, la résolution verticale est plus importante, permettant d'observer des structures

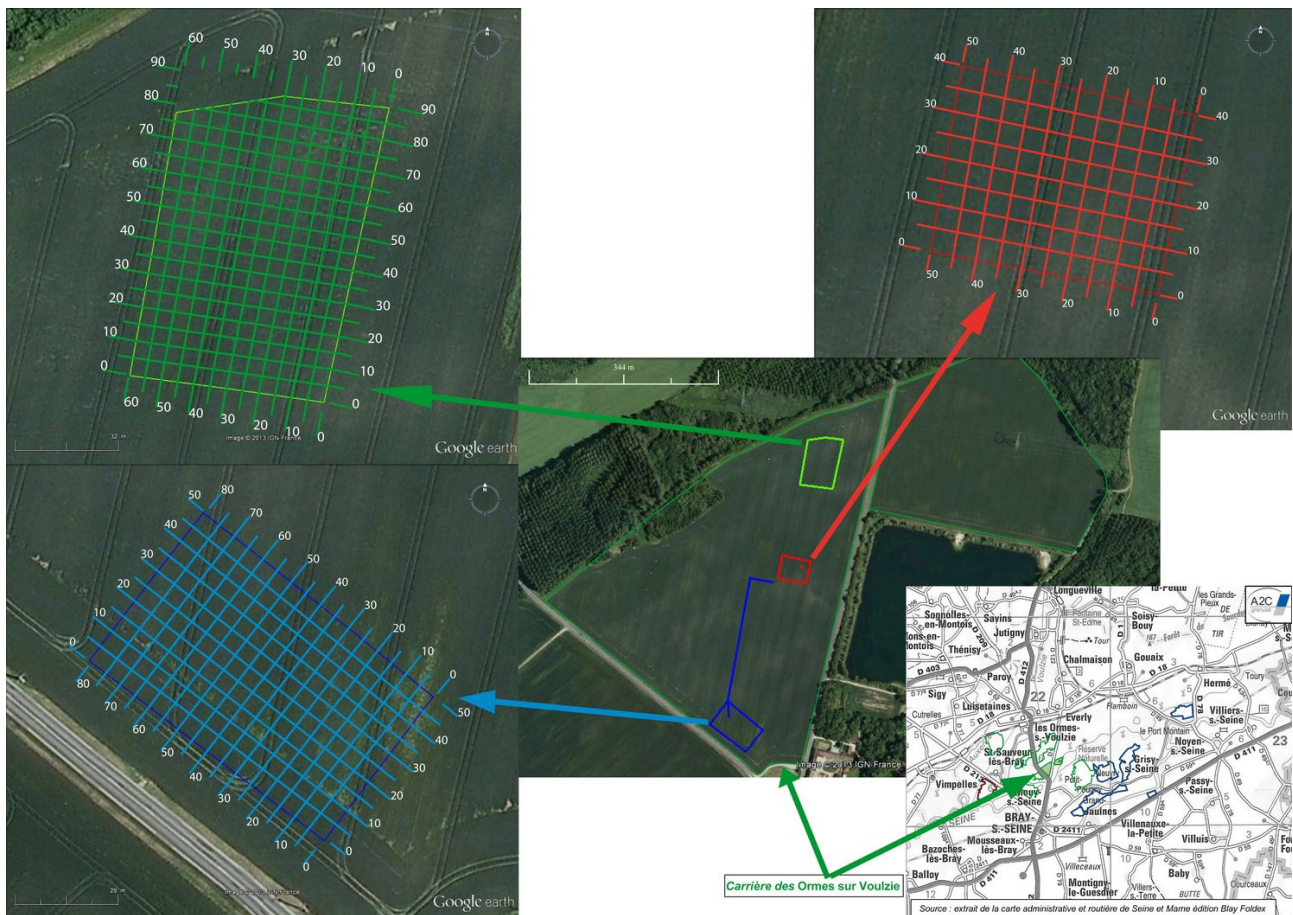


FIGURE 13 – Plan de position des profils radar acquis en février 2013 sur une des carrières de A2C Granulats. Une antenne à double fréquence de 300 et 800 MHz (matériel GSSI, fourni par MDS Paris) a été utilisée. Elle permet d'acquérir 2 profils radar en un passage, pour un gain de temps considérable.

sédimentaires très fines.

- Sur la plupart des profils radar obtenus, le signal de bonne qualité se perd brutalement dans le bruit à partir d’une certaine profondeur. L’hypothèse la plus plausible, mais qui reste à confirmer, est que cette brutale atténuation traduit la présence d’un milieu très homogène, probablement le substratum crayeux.
- Les valeurs de profondeur données sur les profils géoradar ne sont pour le moment approximatives, la conversion des temps doubles de parcours étant faite avec une valeur de permittivité standard de sol.

Au vu de ces premiers résultats encourageants, le géoradar restera un outil privilégié pour l’étude des hétérogénéités sédimentaires, sur des terrains appropriés. Les prochaines missions seront centrées uniquement sur des terrains sablo-graveleux dégagés, à vocation d’exploitation pour les granulats. L’étude de l’architecture complexe des barres de méandres enchevêtrées permettra de caractériser un certain nombre de paramètres du paléo-système fluvial et de son évolution au cours du remplissage de la vallée. Ces paramètres permettront de renseigner le modèle numérique FLUMY pour la simulation des hétérogénéités à plus grande échelle.

Un contact solide a été noué avec l’entreprise A2C Granulats, qui a débouché sur une campagne d’acquisition géoradar sur une de leur carrière des Ormes-sur-Voulzie (4-6 février 2013). 3 zones d’environ 4000 m² chacune ont été couvertes avec un maillage de 5 m (Fig. 13). Les données sont en cours de traitement et d’interprétation. Une mission est prévue le 12 mars prochain pour mesurer précisément les profils verticaux de vitesse des ondes radar sur la carrière des Ormes-sur-Voulzie (méthode du point-milieu commun). Ceci permettra une meilleure conversion des temps doubles de parcours en profondeur, et donc une meilleure interprétation des structures sédimentaires.

Références

- Antoine, P., 1997. Modification des systèmes fluviaux à la transition Pléni-glaciaire-Tardiglaciaire et à l'Holocène : l'exemple du bassin de la Somme (Nord de la France). *Géographie physique et Quaternaire* 51, 93–106.
- Antoine, P., Coutard, J.P., Gibbard, P., Hallegouet, B., Lautridou, J.P., 2003. The Pleistocene rivers of the English Channel region. *Journal of Quaternary Science* 18, 227–243.
- Antoine, P., Fagnart, J.P., Limondin-Lozouet, N., Munaut, A., 2000. Le Tardiglaciaire du bassin de la Somme : éléments de synthèse et nouvelles données. *Quaternaire* 11, 85–98.
- Bendjoudi, H., Weng, P., Guérin, R., Pastre, J., 2002. Riparian wetlands of the middle reach of the Seine river (France) : historical development, investigation and present hydrologic functioning. A case study. *Journal of Hydrology* 263, 131–155.
- Ghazi, S., Mountney, N., 2009. Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession : The Permian Warchha Sandstone, Salt Range, Pakistan. *Sedimentary Geology* 221, 99–126.
- Kasse, C., Vandenberghe, J., Huissteden, J.V., Brohncke, S., Bos, J., 2003. Sensitivity of Weichselian fluvial systems to climate change (Nochten mine, eastern Germany). *Quaternary Science Reviews* 22, 2141–2156.
- Miall, A., 1996. *The geology of fluvial deposits*. Springer Verlag.
- Monnier, S., Camerlynck, C., Rejiba, F., Kinnard, C., Feuillet, T., Dhemaied, A., 2011. Structure and genesis of the Thabor rock glacier (Northern French Alps) determined from morphological and ground-penetrating radar surveys. *Geomorphology* 134, 269–279.
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology : principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261–330.
- Pastre, J.F., Leroyer, C., Limondin-Lozouet, N., Chaussé, C., Fontugne, M., Gebhardt, A., Hatté, C., Krier, V., 2000. Le Tardiglaciaire des fonds de vallée du Bassin Parisien (France). *Quaternaire* 11, 107–122.
- Rejiba, F., Bobée, C., Maugis, P., Camerlynck, C., 2012. GPR imaging of a sand dune aquifer : A case study in the niayes ecoregion of Tanma, Senegal. *Journal of Applied Geophysics* 81, 16–20.