Architecture et hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée

Benoit Deleplancque[1*], Pierre Weill[1], Isabelle Cojan[1], Baptiste Labarthe[1], Nicolas Flipo[1]

[1] Centre de Géosciences, MINES ParisTech, UMR 7615 Sisyphe, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau
* benoit.deleplancque@mines-paristech.fr

1. Introduction

La Seine supérieure, en amont de la confluence avec l'Yonne (Montereau), évolue au sein d'une vallée creusée dans le substratum crayeux d'âge Crétacé, où s'accumulent des sédiments depuis la dernière période glaciaire (Bendjoudi *et al.*, 2002). De par la nature même des processus hydro-sédimentaires associés à la dynamique fluviatile, et à leur variabilité en réponse aux variations climatiques, le remplissage alluvionnaire est hétérogène et présente une architecture complexe. Les principaux éléments architecturaux qui composent une plaine alluviale sont rappelés dans le rapport d'activité 2012 du PIREN Seine par Weill et al. (2013).

Ainsi, le fonctionnement hydrologique de la Seine est influencé par la répartition des sédiments de différentes natures au sein de la plaine alluviale. Cette dernière agit comme une zone tampon entre le réseau hydrographique de surface et l'aquifère régional.

L'objectif de ce projet, qui s'intègre dans le pilier Interfaces Nappe-Rivière du PIREN Seine, est de caractériser le remplissage et les hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Seine, sur le site atelier de la Bassée (entre les confluences de l'Aube et de l'Yonne avec la Seine). Cette étude s'appuie sur des données géophysiques et sédimentologiques pour comprendre la genèse et l'évolution de la plaine alluviale sur une échelle de temps de plusieurs milliers d'années. Cette connaissance de terrain permettra d'alimenter des modèles géostatistiques ou *process-based* (Flumy, Lopez et al., 2008) pour simuler à grande échelle les hétérogénéités structurelles de la Bassée.

Ce rapport dresse le bilan des actions menées en 2013 sur cette problématique, portée par la thèse de Benoit Deleplancque (Oct. 2012 - Oct. 2015). Dans un premier temps, nous présenterons le travail de compilation de données de sondage sur le site d'étude, et de son analyse pour caractériser le remplissage sédimentaire et reconstituer la géométrie du fond de vallée. Ensuite, nous montrerons comment l'étude de l'architecture du remplissage par géoradar, dont l'efficacité a été démontrée lors d'une étude de faisabilité (Weill *et al.*, 2013), permet d'appréhender la dynamique et l'évolution du système fluviatile au cours du comblement de la vallée. A la lumière de ces résultats, nous présenterons les actions envisagées pour l'année 2014.

2. Données de sondages

Les sondages représentent le premier moyen d'exploration du sous-sol à des fins économiques (approvisionnement en eau, études géotechniques etc.) et/ou environnementales (piezomètres, contrôle de la qualité de l'eau).
A l'échelle du territoire français, l'ensemble des données récoltées représente une archive précieuse pour la connaissance de la sub-surface. C'est le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) qui a pour mission de centraliser, de numériser et d'harmoniser cette masse d'information et de la mettre à disposition du public sous la forme d'une grande base de données (BSS-Banque du Sous-Sol). Dans le cadre de notre étude sur le secteur de la Bassée, ces données nous renseignent localement sur la position du substratum et sur la nature du remplissage sédimentaire de la plaine alluviale.
Nous présentons la démarche suivie pour l'élaboration d'une base de données répondant à nos besoins, et l'analyse qualitative et quantitative de ces données de sondage.

2.1. Présentation de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM

La base de données est consultable en ligne sur le visualiseur[1] Info Terre du BRGM (Figure 1). Les sondages sont localisés sur une carte topographique avec des symboles différents selon la qualité de l'information disponible. Ces informations correspondent à :

- une fiche de localisation (nom du forage, localisation, coordonnées et altitude)
- une fiche de description technique (nature et date des travaux, type de gisement, type de documents disponibles…), et les données géologiques fournies par le foreur (géologie initiale).

Dans certains cas, et s'il existe plusieurs observations pour le même forage, le BRGM fournit un log numérique validé et harmonisé par rapport à l'ensemble des données (géologie vérifiée). Très souvent, les documents originaux fournis par le foreur sont numérisés et téléchargeables.

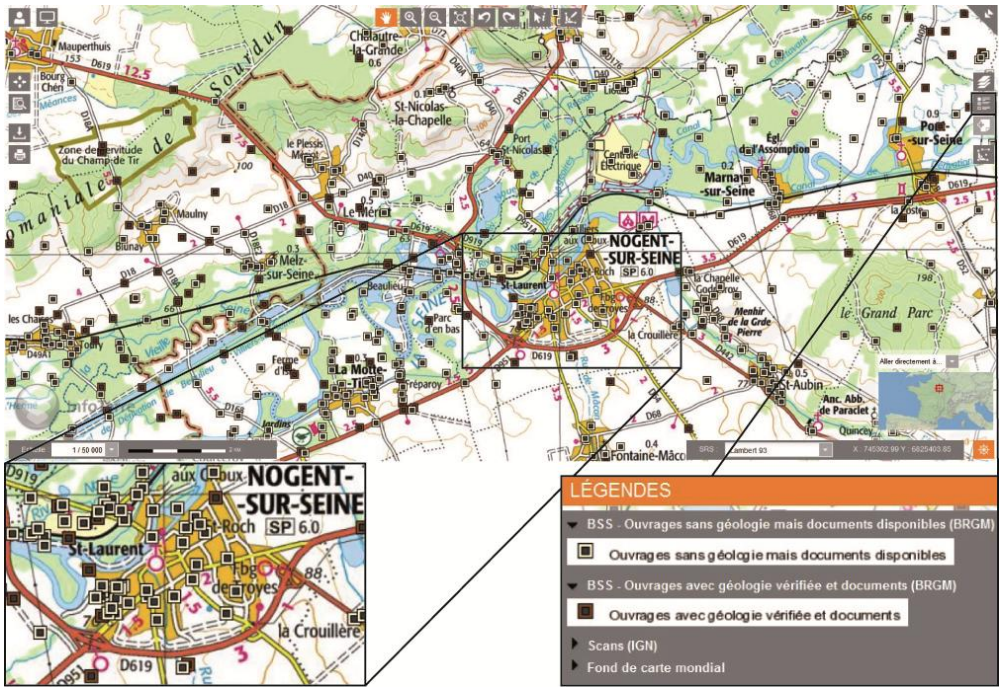

Figure 1. Interface de visualisation Info Terre de la base de données sous-sol du BRGM, avec affichage de certains ouvrages (Nogent-sur-Seine, 1/50 000).

[1] http://infoterre.brgm.fr/

En fonction des informations disponibles, les ouvrages sont classés en 6 catégories décrites dans la BSS sous les intitulés suivants :

- Ouvrages avec géologie vérifiée et documents (BRGM)
- Ouvrages avec géologie vérifiée mais aucun document (BRGM)
- Ouvrages avec géologie initiale et documents (BRGM)
- Ouvrages avec géologie initiale mais aucun document (BRGM)
- Ouvrages sans géologie mais documents disponibles (BRGM)
- Ouvrages sans géologie ni document (BRGM).

Toutes les catégories comportent la fiche de localisation, et la fiche de description technique n'est présente que dans les 5 premières.
Les deux premières catégories possèdent des logs validés (« géologie vérifiée » BSS) dont la finesse de description peut correspondre à celle du log dressé lors du forage (« géologie initiale » BSS, Figure 2), ou être beaucoup plus synthétique (Figure 3).
Cet écart entre les données numériques validées et les données de terrain nous a conduit à vérifier systématiquement les documents disponibles (comptes-rendus de missions, fiches de forages, essais de pompage ou analyse de qualité de l'eau) pour obtenir la description la plus fine possible des hétérogénéités.
Dans le cas où le log validé était peu précis, la consultation des documents initiaux a permis d'extraire une description fine de la succession des dépôts. Lorsque la description du log validé était aussi précise que la description notée sur la fiche de sondage, les descriptions de celui-ci ont été reprises.

A

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
	Sol (terre végétale)		Terre végétale	Holocène	
0.30					65.70
			Argile limoneuse brune		
0.80					65.20
			Argile limoneuse beige		
1.70					64.30
	Fz		Argile limoneuse grise avec matière organique		
2.80					63.20
			Argile beige à graviers		
3.20					62.80
			Sable à graviers		
4.60					61.40
	Craie à Actinocamax quadratus		Craie	Campanien inférieur	

B

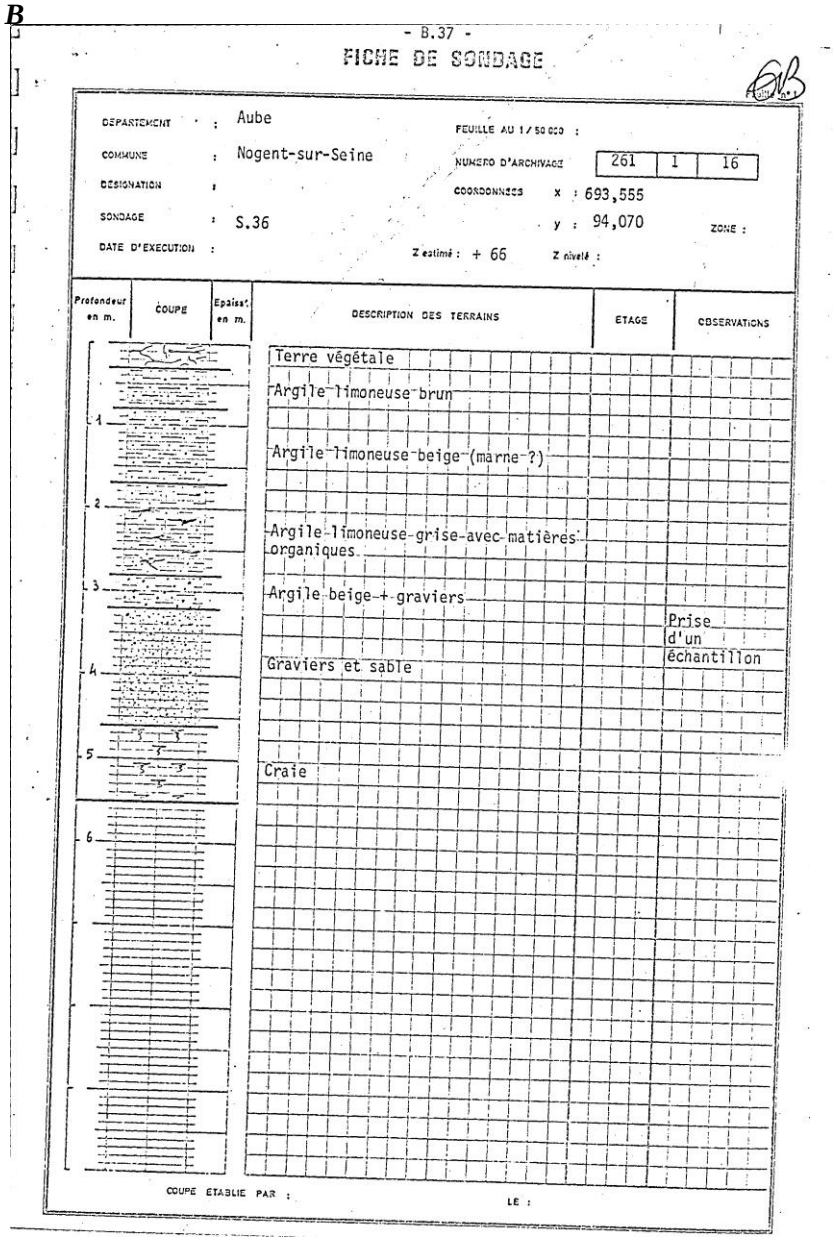

Figure 2. Comparaison entre le log validé de l'ouvrage 02611X0016_S36 (A) et la fiche de sondage initiale (B). La description du log validé correspond aux lithologies observées lors du forage. C'est donc la géologie vérifiée qui sera renseignée dans la base de données.

A

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
	Alluvions Quaternaires		Probablement sables et graviers	Quaternaire	
6.00					46.97
	Craie à Belemnitella mucronata		Craie	Campanien supérieur	

B

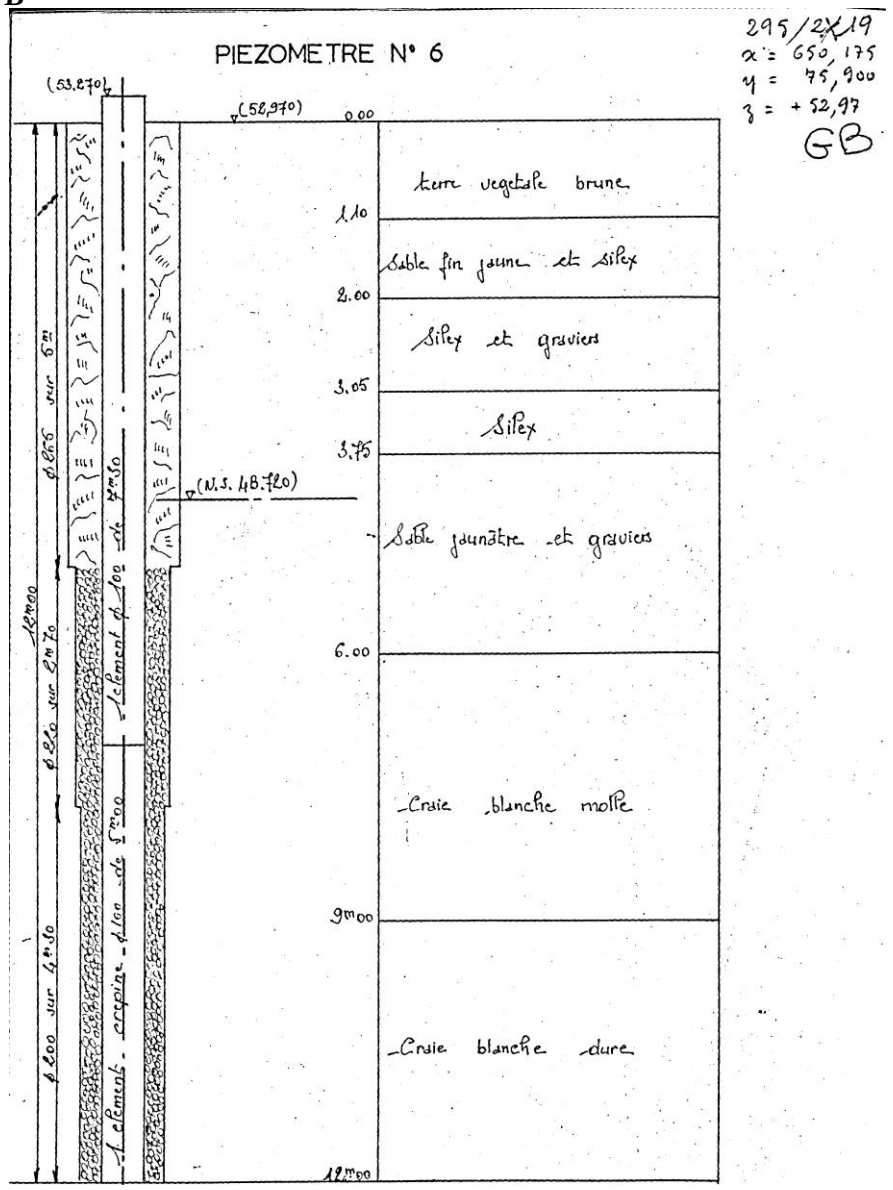

Figure 3. Comparaison entre le log validé de l'ouvrage 02952X0019_VPZ6 (A) et la fiche sondage initiale (B). La description du log validé est beaucoup moins fine que la description lithologique faite lors du forage. C'est donc la géologie initiale qui sera renseignée dans la base de données.

2.2.Création de la base de données de la Bassée (BD-Bassée)

2.2.1. Structuration de la BD-Bassée

La base de données se présente sous la forme d'un fichier Excel contenant la totalité des ouvrages référencés et leurs informations générales, soit :

- le nom du forage
- les coordonnées géographiques projetées (Lambert 93)
- l'altitude de la tête du forage
- la profondeur atteinte par la base du forage et son altitude
- la présence ou non (notée 1 ou 0) :
    - d'une coupe lithologique (log validé)
    - d'une description granulométrique
    - d'une stratigraphie du Quaternaire
- si le forage atteint la craie (noté 1) ou s'il se termine dans les alluvions (noté 0)
- la présence ou non (noté 1 ou 0) des lithologies suivantes : blocs, graviers, sable, silts, limons, argile, tourbe, tuf, silex
- le nombre de documents disponibles
- l'objet de la recherche (hydrocarbures, eau, stockage solide, ouvrage, carrière...)

Le base de donnée comprend également un sous-dossier par ouvrage avec :

- la totalité des documents disponibles téléchargés
- l'image du log validé
- un fichier Excel décrivant le forage niveau par niveau en terme de lithologie, de granulométrie et de stratigraphie (Figure 4).

Les lithologies présentes dans les forages sont classées en fonction de leur granulométrie et définies par un code (Figure 4, colonne E et Tableau 1). De même, un code est défini pour la stratigraphie (Figure 4, colonne F et Tableau 1). Le fichier Excel décrivant ces codes (granulométrique et stratigraphique) est également présent dans le dossier de la BD-Bassée.

Ainsi structurée, la base de données permet de trier facilement les sondages pour sélectionner des caractéristiques particulières. Elle est également adaptée à des exportations vers des logiciels variés (ArcGis, ISATIS…).

	A	B	C	D	E	F
1	Forages	X	Y	Z_tete	Prof	Z_fond
2	02952X0019_VPZ6	700982	6809149	52,97	12	40,97
3	Description_litho	Cote_litho_toit	Cote_litho_mur	epais_litho	code_granulc	code_strati
4	Terre vegetale brune	52,97	51,87	1,1	0	1
5	sable fin jaune et sile	51,87	50,97	0,9	7	1
6	Silex et graviers	50,97	49,92	1,05	20	1
7	Silex	49,92	49,22	0,7	23	1
8	sable jaunatre et grav	49,22	46,97	2,25	20	1
9	Craie blanche molle	46,97	43,97	3	12	0
10	Craie blanche dure	43,97	40,97	3	12	0

Figure 4. Exemple de fiche individuelle d'un forage (02952X0019_VPZ6).

Tableau 1. Codes granulométriques et stratigraphiques utilisés dans les fiches individuelles de forage.

Code granulométrique	
0	Divers : remblais, terre végétale, formation de versant, limons des plateaux, colluvions, inconnu
1	Argile
2	Argile silteuse, argile sableuse, limons argileux, limons fins
3	Limons, limons sableux, limons grossiers
4	Silts
5	Sable argileux, sable silteux, sable fin
6	Sable limoneux
7	Sable, sable moyen, alluvions sableuses
8	Sable grossier
9	Graviers, éléments grossiers
10	Blocs
11	Tuf
12	Craie et substrats divers
20	Granulométrie mixte (généralement sable et graviers), alluvions vasardes
21	Tourbe
22	Grés
23	Silex
Code stratigraphique	
0	Substrat (craie, Campanien, Sénonien…), non dit
1	Quaternaire
2	Würm
3	Weichsélien
4	Holocène
5	Pléistocène
6	A préciser

2.2.2. Présentation des données

Les données extraites couvrent la plaine alluviale de la Bassée sur environ 440 km² entre Montereau (confluence de l'Yonne avec la Seine) et Romilly-sur-Seine (confluence de l'Aube avec la Seine). Les limites latérales de la plaine alluviale sont définies par une augmentation marquée de l'altitude (passage vers une terrasse ancienne ou un plateau), ou lorsque le substrat crayeux était affleurant ou sub-affleurant sous une formation superficielle non-alluviale (colluvions, formations de versants...).
Pour la création de cette base de données sur la Bassée, les ouvrages avec géologie vérifiée et documents ont été privilégiés. Dans les zones où la densité de ce type d'ouvrage était faible, la base de données a été complétée avec des ouvrages sans géologie mais documents disponibles. En effet, même si l'ouvrage est indiqué sans géologie, les documents initiaux renferment souvent des informations exploitables.

Au total, 583 ouvrages ont été renseignés dans la BD-Bassée :

- 553 (95 %) proviennent d'ouvrages avec géologie vérifiée et documents, dont 23 ne contiennent pas l'information sur la profondeur atteinte ou la géologie;
- 30 (5 %) proviennent d'ouvrages sans géologie mais documents disponibles.

En enlevant les forages sans description géologique et sans information sur la profondeur atteinte, nous avons au final 500 forages possédant une information utile à notre étude sur la répartition des hétérogénéités sédimentaires au sein de la plaine alluviale (Figure 5).

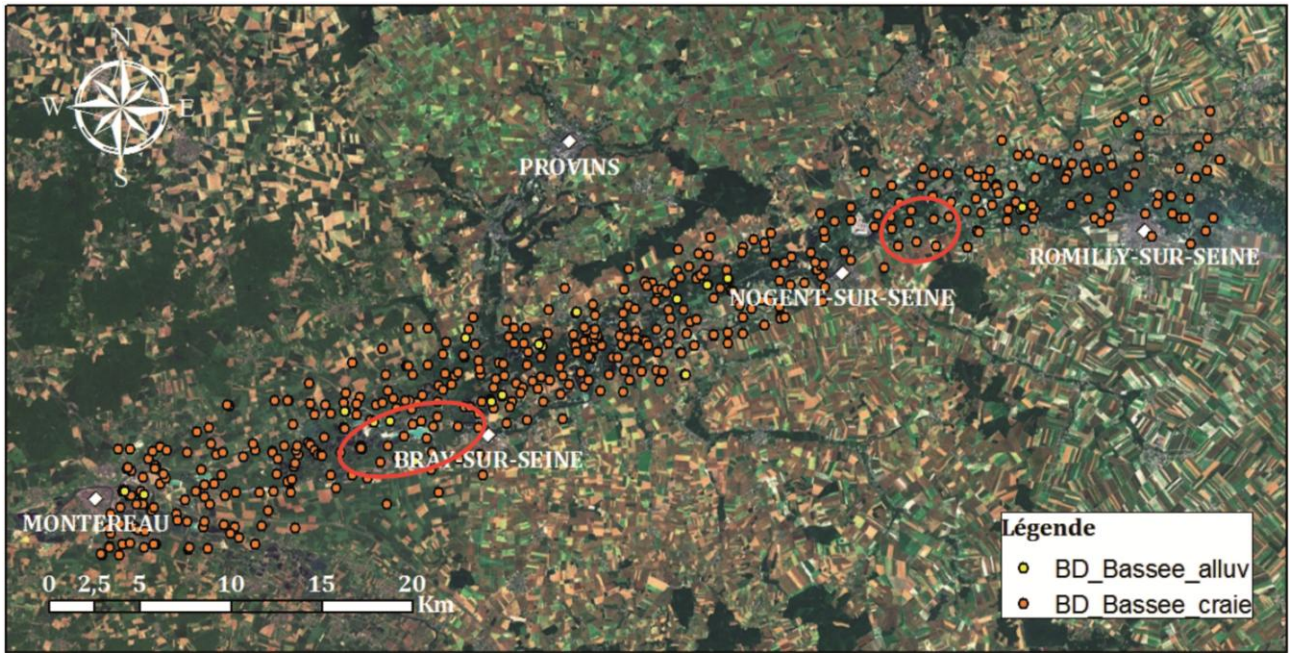

Figure 5. Répartition des ouvrages atteignant la craie (en orange, N=482), et ceux ne l'atteignant pas (en jaune, N=18), zone pauvre en données (cercles rouges).

2.3. Première analyse du remplissage

Parmi les 500 ouvrages exploitables, plus de 96 % atteignent le substratum rocheux (Figure 5) et leur répartition sur la plaine alluviale et ses épaulements est homogène. Au niveau de la Bassée, les alluvions reposent sur un calcaire crayeux d'âge crétacé. Les quelques forages n'atteignant pas la craie sont disséminés à travers la plaine et ne créent pas de larges zones sans information.

En terme de lithologie, les sables et graviers représentent le faciès dominant du remplissage alluvionnaire, tant par leur occurrence que par leurs épaisseurs. Ce faciès se retrouve dans plus de 86 % des sondages.
Les sondages ne comportant ni graviers ni sable correspondent majoritairement aux sondages en bordure de plaine alluviale, où le substratum crayeux affleure sous des colluvions ou d'autres formations superficielles (terre végétale et remblais par exemple).

Si les faciès grossiers semblent constituer l'essentiel du remplissage, les faciès plus fins ne sont pas anecdotiques. Les argiles sont présentes dans 51% des sondages, les limons dans 22% des sondages, les tourbes dans 7% et les tufs dans 2% environ (Figure 6). Quelques rares sondages sont composés uniquement de ces faciès fins, avec une absence totale de sables ou graviers.

Ces données feront l'objet dans les prochains mois d'une analyse géostatistique plus poussée. Au-delà de l'occurrence de certains faciès dans certains sondages, il s'agira d'étudier les proportions de faciès en termes d'épaisseur, en particulier les faciès fins qui constituent des barrières de perméabilité. Si ces derniers sont essentiellement présents en surface et sur les deux premiers mètres des alluvions, des niveaux tourbeux ou argileux sont parfois observés plus en profondeur.

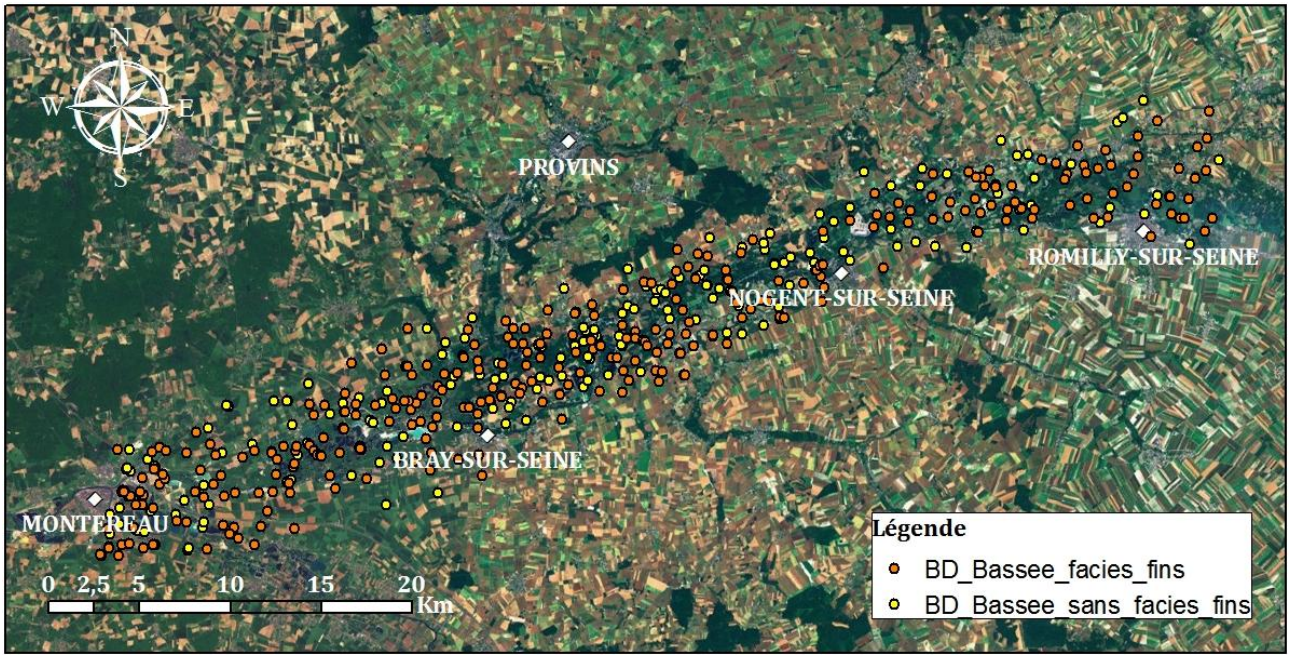

Figure 6. Répartition des sondages dans lesquels apparaissent au moins un faciès fin (en orange, N=307).

2.4. Interpolation des épaisseurs d'alluvions

La base de données BD_Bassée est utilisée pour réaliser une interpolation de l'épaisseur des sédiments de la plaine alluviale, et reconstituer la géométrie du fond de la vallée avant son remplissage. De la base de donnée ont été extraits les forages atteignant la craie et se trouvant, d'après la carte géologique au 1 / 50 000^{e}, sur des alluvions récentes, excluant de la sorte les sédiments de terrasses fluviatiles antérieures à la dernière phase de remplissage. Cette sélection représente au total 446 forages (Forages craie, Figure 7). Afin de contraindre l'interpolation sur les bordures de la plaine alluviale et à la confluence de petits cours d'eau, des pseudo-forages d'épaisseur d'alluvion nulle ont été ajoutés (Forages limites alluvions, Figure 7).

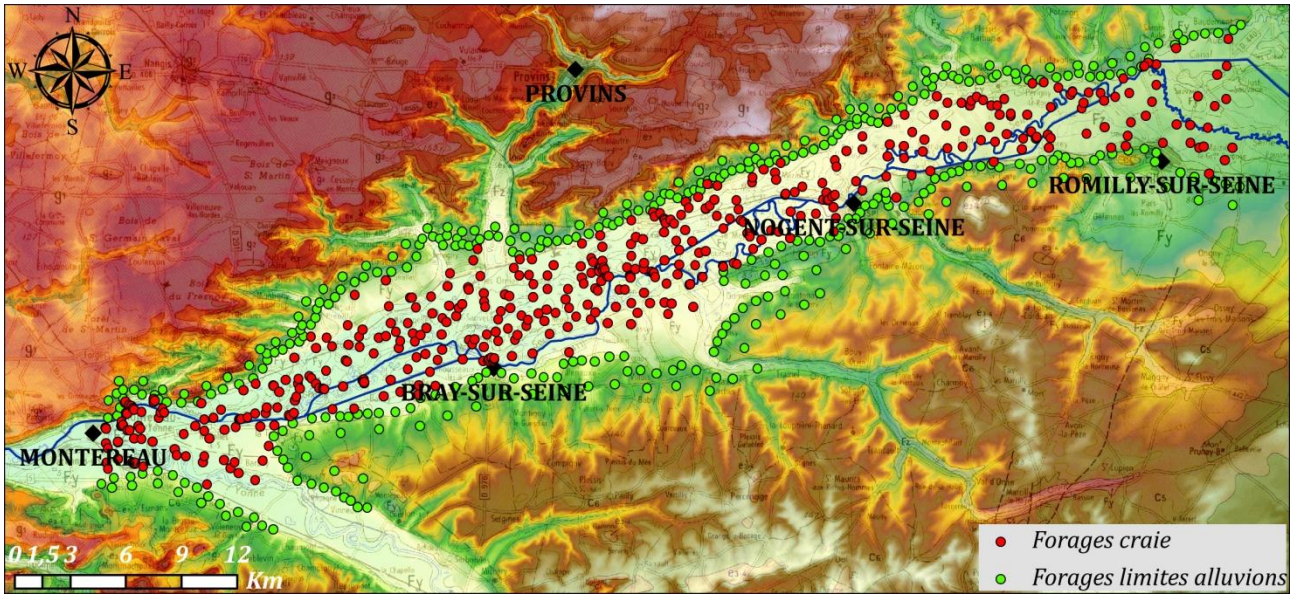

Figure 7. Répartition des forages atteignant la craie en rouge (N=446) et des forages limites de la plaine alluviale avec une épaisseur d'alluvions égale à zéro en vert (N=376).

A l'aide du logiciel ISATIS (Géovariance®), une interpolation de l'épaisseur des alluvions par krigeage unidirectionnel (N70°) a été effectuée à l'échelle de la plaine alluviale de la Bassée (Figure 8), avec une résolution horizontale de 25 m, en suivant la méthodologie adoptée par Turko (2013). Le krigeage est une méthode d'interpolation statistique linéaire, sans biais, qui minimise la variance (Matheron, 1962)

Les résultats de cette interpolation sont présentés sur la Figure 8. Les épaisseurs maximales d'alluvions sont localisées dans l'axe de la vallée, et varient entre 6 et 10 m. Les épaisseurs les plus importantes (9-10 m) sont observées à l'aval de Nogent-sur-Seine. Ces épaisseurs décroissent rapidement vers les bordures de la vallée. On constate que l'épaisseur des alluvions est généralement plus importante aux endroits où la plaine alluviale s'élargit. Les résultats de l'interpolation sont à prendre avec prudence à la jonction des plaines alluviales des petits affluents avec celle de la Seine. Il existe en effet peu de données de sondage sur les petits affluents, et les épaisseurs d'alluvions ont été systématiquement forcées à zéro aux limites de ce qui est considéré comme la plaine alluviale de la Seine au sens strict.

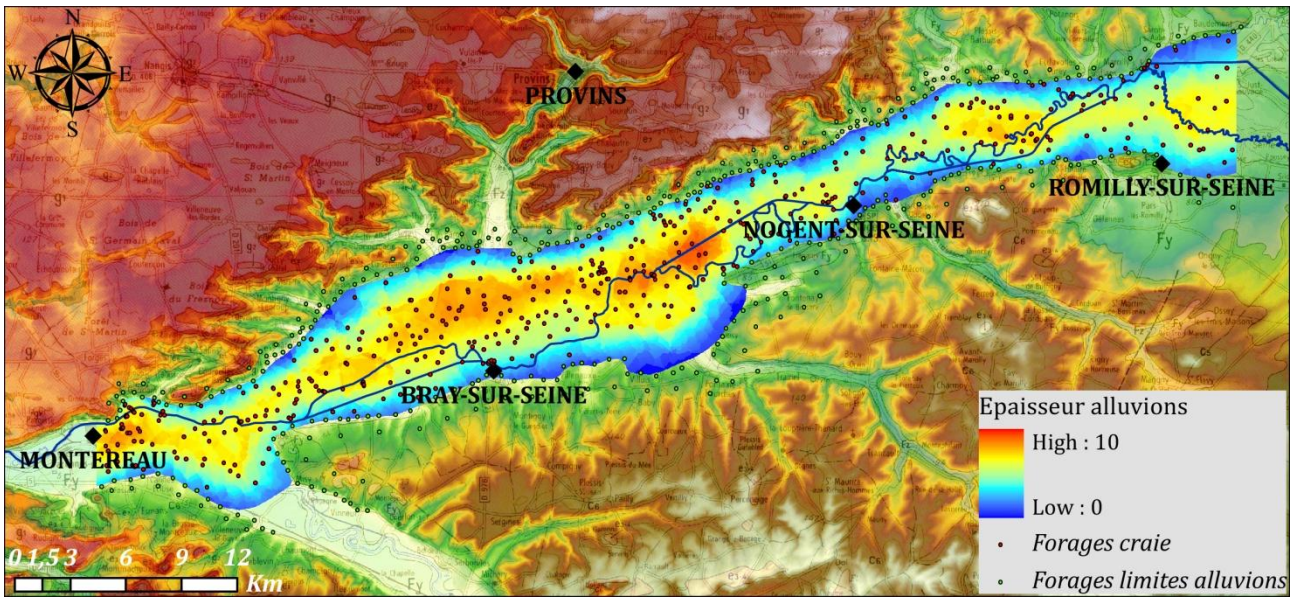

Figure 8. Carte des épaisseurs d'alluvions (en mètres) de la plaine alluviale de la Bassée, obtenue par krigeage des données de sondages (BD Bassée, en rouge), et contrainte sur les bords par l'ajout de points de contrôle à 0 m (en vert).

La carte des épaisseurs d'alluvions obtenue par krigeage des données de sondage a été soustraite au modèle numérique de terrain à 25 m de la topographie actuelle. On obtient ainsi la carte de l'altitude de l'interface entre le substrat crayeux et le remplissage alluvionnaire (Figure 9). Cette carte peut être vue comme une image de la vallée à la fin de la période d'incision de la Seine, avant son comblement sédimentaire.

Par la suite, cette reconstitution du fond de vallée servira de topographie initiale pour la simulation des dépôts sédimentaires avec le logiciel Flumy.

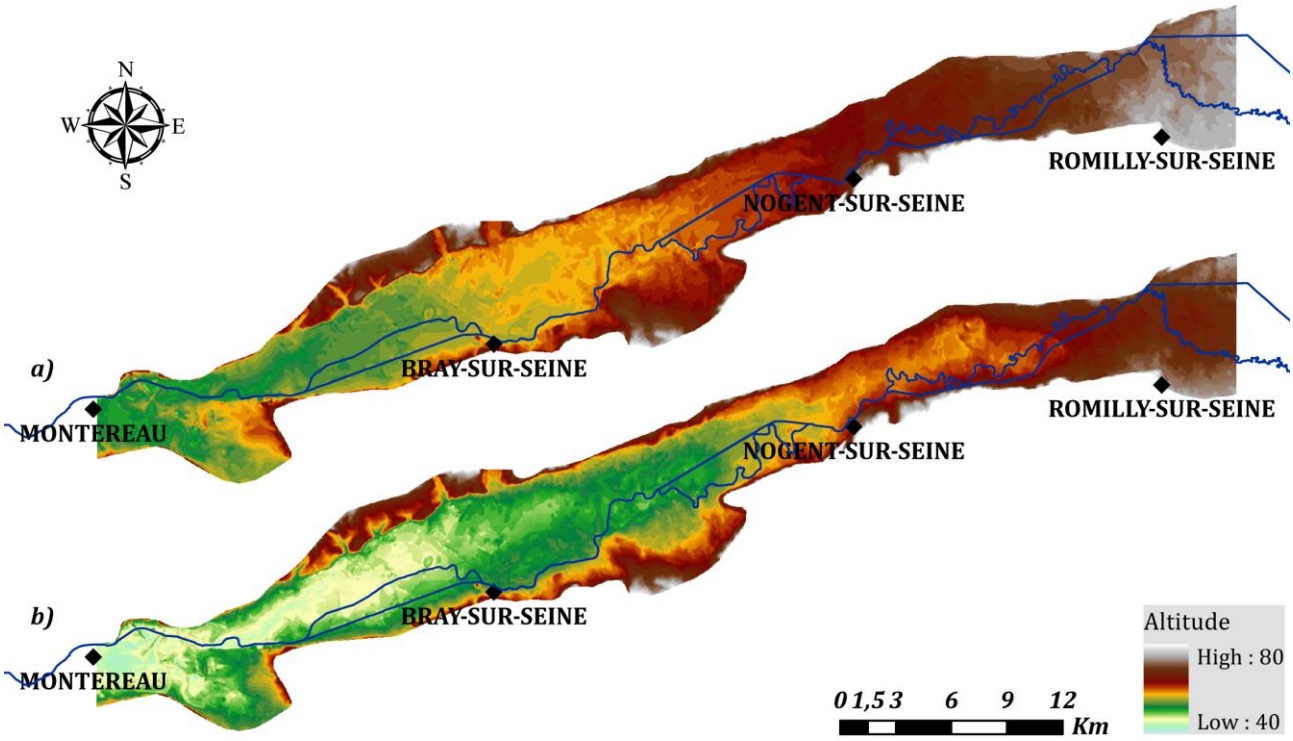

Figure 9. a) Modèle numérique de terrain (MNT) à 25 m de la topographie actuelle de la plaine alluviale de la Bassée sur la surface interpolée par krigeage, b) Carte d'altitude du toit de la craie obtenue par soustraction de l'épaisseur des alluvions au MNT de la topographie actuelle. Elle représente une image de la vallée incisée avant son comblement par les alluvions déposés au cours de l'évolution de la Seine.

BD Bassée est une nouvelle base de données de **500 sondages** créée après vérification, correction et harmonisation des données de la **Banque du Sous-sol du BRGM**. La répartition des sondages sur la plaine alluviale est homogène et les flancs de la vallée sont bien contraints. La structure de cette base de données permet de conserver un maximum d'informations sur la **géologie** et la **nature du remplissage** (faciès, granulométrie, épaisseur, stratigraphie). Ces informations peuvent être aisément importées dans un système d'information géographique. Cette nouvelle base de données a été utilisée pour modéliser l'**épaisseur des alluvions** dans la plaine alluviale de la Bassée, et (ii) reconstituer la **topographie initiale** de la vallée avant son remplissage. Par la suite, les données de sondage feront l'objet d'une analyse géostatistique visant à qualifier et quantifier la **répartition des lithologies** et les **hétérogénéités** au sein de la plaine alluviale.

3. Caractérisation de l'architecture sédimentaire de la plaine alluviale par géoradar

Au-delà de la description des lithologies observées dans les sondages, la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires passe par une compréhension des processus hydro-sédimentaires et des mécanismes de forçage qui contrôlent et influencent la formation de la plaine alluviale. En effet, la reconnaissance d'éléments architecturaux caractéristiques, et la reconstitution de paléo-environnements, permettent d'établir des modèles de faciès, où les hétérogénéités pourront être estimées à partir d'analogues actuels. D'autre part, la connaissance des paléo-systèmes permet de renseigner les paramètres d'entrée de modèles numériques basés sur des processus physiques (ex. Flumy), afin de simuler le remplissage de la plaine alluviale et ses hétérogénéités.

La plaine alluviale ne présentant pas d'affleurement naturel, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de prospection géophysique pour étudier la structure du remplissage. Parmi ces méthodes, le géoradar est un outil efficace en termes de rapidité de mise en œuvre et de qualité de résultats sur des terrains sédimentaires grossiers (Bristow & Jol, 2003; Hickin *et al.*, 2009). Il permet notamment d'avoir accès aux surfaces stratigraphiques, et donc aux géométries des corps sédimentaire. Nous présentons ici les résultats de plusieurs missions réalisées en 2013, et proposons quelques interprétations sur la variabilité de la dynamique fluviatile au cours du remplissage de la vallée.

3.1. Méthodologie

Principe du géoradar

Le géoradar, ou GPR (Ground Penetrating Radar), est une méthode d'investigation géophysique de la subsurface et du sous-sol. Utilisée pour les premières fois en sciences de la Terre dans les années 90 (Neal, 2004), cette méthode est utilisée dans de nombreux environnements (fluvial, côtier, éolien, deltaïque…) et présente un intérêt certain dans les milieux sédimentaires grossiers (Weill *et al.*, 2013). Cette méthode d'investigation non destructrice permet d'identifier des discontinuités présentes en profondeur au maximum jusqu'à 50 m. Elle s'appuie sur les principes de diffusion, de réflexion et de réception d'ondes électromagnétiques. Les fréquences sont de l'ordre du MHz au GHz.

Les profils obtenus sont composés d'une succession horizontale de traces verticales qui proviennent de l'émission d'un pulse électromagnétique. Lorsque les caractéristiques du milieu changent brutalement, une partie de l'onde est réfléchie vers la surface. Cette interface se traduit par un réflecteur sur la trace radar. Le temps entre l'émission du pulse et la réception de l'onde réfléchie est appelé « temps double de parcours » (Two-Way Traveltime – TWT) et est mesuré en nanoseconde. Il est fonction de la profondeur à laquelle se situe l'interface et de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu en question.
La propagation de l'onde électromagnétique dans le milieu est contrôlée par les propriétés du sédiment qu'elle parcourt. Dans le cas d'un milieu faiblement conducteur et amagnétique comme des sables et graviers, la vitesse de propagation des ondes est fonction de la permittivité diélectrique (ε) du milieu :

$$v = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon}}$$

avec C_0 la vitesse de progradation de l'onde électromagnétique dans le vide (3.10^8 $m.s^{-1}$).

La permittivité diélectrique de chaque matériau par rapport à l'air ($\varepsilon \approx 1$ $F.m^{-1}$) est différente (Tableau 2).

Tableau 2. Valeurs de permittivité de différents matériaux (d'après Jol (2008)).

Matériau	ε ($F.m^{-1}$)
air	1
sable sec	3-6
sable humide	10-30
Sol (moyenne)	16
Eau	78-88

Le rapport air-eau-sédiment définit principalement les caractéristiques électromagnétiques du milieu. Ainsi un réflecteur marque un changement de porosité, donc de granulométrie ou d'arrangement particulier des sédiments. Dans le cas considéré, la permittivité pour des sables et graviers secs varie de 3 à 6 ($F.m^{-1}$) et pour des sables et graviers mouillés de 10 à 30 ($F.m^{-1}$) (Fig. 14). Ainsi le GPR est sensible au changement du rapport air-eau-sédiment du milieu.
Des changements dans la quantité, le type de fluide occupant le réseau poreux, dans la porosité, et le type, la taille, l'orientation et l'arrangement des grains sont susceptibles de modifier la propagation de l'onde radar (Figure 10).

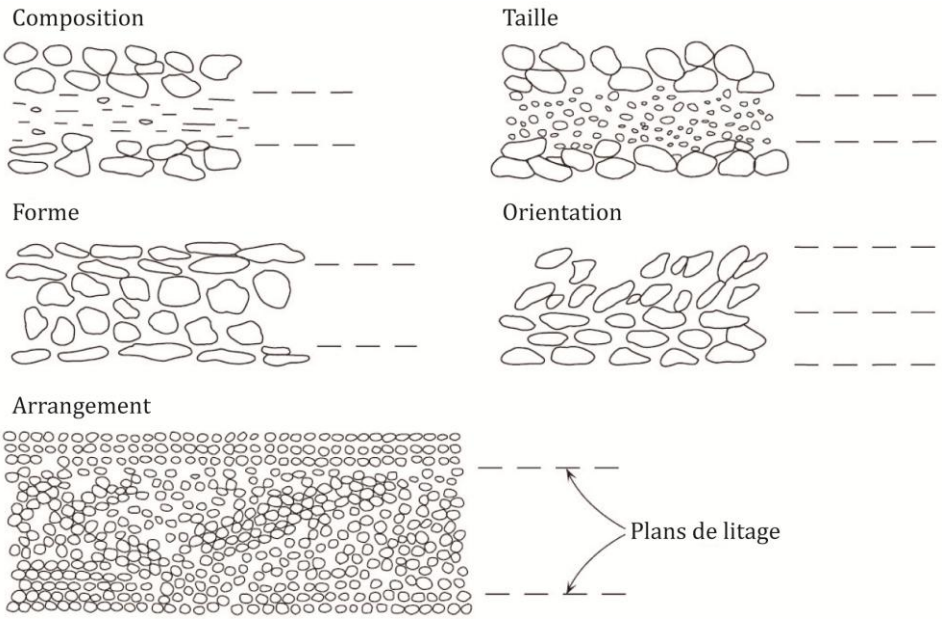

Figure 10. Litage résultant de la composition, la taille, la forme et l'arrangement des grains (modifiée d'après Neal, 2004).

Acquisition et traitement

Deux campagnes d'acquisition ont été réalisées sur des carrières de granulats, où le décapage de la terre végétale avant l'exploitation dégage de larges zones plates idéales pour la prospection radar. Le premier site, baptisé "La Motte-Tilly", se situe en aval de Nogent-sur-Seine, à l'intérieur d'une grande boucle de la Seine. Le deuxième site, "Les Ormes-sur-Voulzies", se trouve à 2,5 km au nord de Bray-sur-Seine et du cours actuel de la Seine (Figure 11).

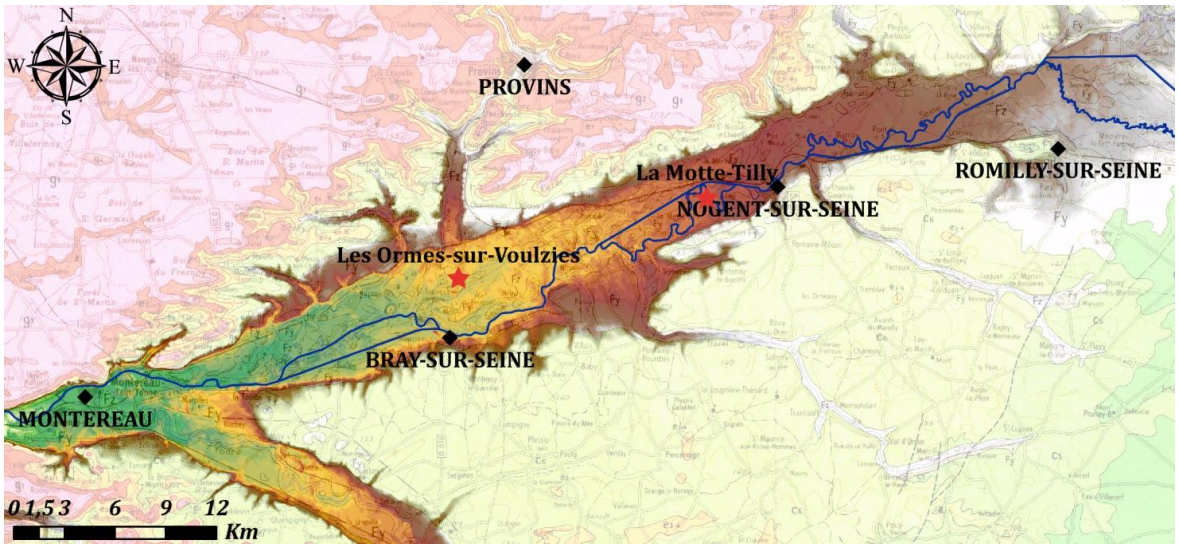

Figure 11. Carte de la Bassée montrant l'emplacement des carrières sélectionnées pour la prospection géoradar.

Les profils géoradar ont été acquis à l'aide d'antennes de marque GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) de fréquences de 300 et 400 MHz. Les antennes (Figure 12) en contact avec le sol sont montées sur des chariots qui permettent leur déplacement. La station d'acquisition est reliée à l'antenne permettant l'enregistrement et la visualisation des profils en temps réel. Une roue codeuse calibrée permet à la station d'acquisition de déclencher les tirs à une fréquence basée sur la distance parcourue, peu importe la vitesse de déplacement. Cette fréquence qui définit la résolution horizontale des profils, était fixée à 100 scans/m.

Figure 12. Antennes radar et système d'acquisition GSSI, A) antenne en contact avec le sol (gauche : antenne double 300 et 800 MHz, droite : antenne simple 400MHz), B) support pour le déplacement, C) roue codeuse et D) station d'acquisition (gauche : tablette durcie).

Les données acquises ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel Radan 7 (GSSI). Du fait de la bonne qualité des données GPR brutes, le post-traitement a été limité. Le gain a été ajusté sur la verticale des profils. Afin de réduire la distorsion des échelles horizontales et verticales et d'avoir un rapport d'aspect plus naturel pour l'interprétation, certains profils ont été stackés. Le stacking consiste à moyenner plusieurs traces, ou à diminuer la résolution horizontale en supprimant des traces. La deuxième option est utilisée par le logiciel Radan 7. Il n'a pas été utile de faire de correction topographique car les dénivelés étaient peu prononcés.

Conversion temps / profondeur

Pour convertir le temps double de trajet en profondeur, nous avons mesuré un profil de vitesse de propagation des ondes dans le sédiment, en utilisant la technique du point milieu commun (Common Mid-Point - CMP). Cette méthode consiste à évaluer la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu en faisant varier par incréments (40 cm) la distance entre deux antennes (une antenne émettrice et une réceptrice, Figure 13), et en mesurant les différences de temps de trajet. L'écartement maximal des antennes était de 14 m. Au total, 3 profils ont été échantillonnés sur la carrière des Ormes-sur-Voulzie.

Les mesures de vitesses de propagation des ondes dans le sédiment varient entre 0,06 et 0,1 m/ns, en fonction de la profondeur et de la localisation de la mesure sur le site. Un modèle de vitesse à deux couches est pressenti pour modéliser les données mesurées : une couche superficielle de sable sec à humide, caractérisée par des vitesses de propagation fortes (~ 0.15 m/ns), et une couche de sable saturé en eau (sous la nappe), caractérisé par des vitesses de propagation plus faibles (~ 0.05 m/ns). Malheureusement, l'absence de mesure de vitesse dans la zone non-saturée ne nous permet pas de déterminer l'épaisseur de celle-ci avec précision.

Figure 13. Matériel utilisé pour le CMP, A) antenne émettrice, B) antenne réceptrice, C) unité centrale, D) station d'acquisition (ordinateur portable), E) batterie.

Sur le site de la Motte-Tilly, la conversion temps / profondeur a pu être estimée en calant les profils radar à des données de sondage au niveau de la limite substratum / alluvions. Cette conversion nous donne une valeur de vitesse de l'ordre de 0.085 m/ns.

La comparaison de ces deux méthodes fournit des ordres de grandeur de vitesses similaires. La valeur moyenne estimée par calage sur sondage est proche de la moyenne des vitesses mesurée par la technique du CMP. C'est donc la valeur de vitesse de 0.085 m/ns qui est retenue pour la conversion temps / profondeur des profils, soit une constante de permittivité diélectrique de 12.

Interprétation des profils

Les réflecteurs sur les profils radar sont identifiés et digitalisés à l'aide d'un logiciel de DAO. Les réflecteurs sont analysés en termes de géométrie, de continuité et de puissance. Cette analyse permet de définir des faciès radar (Figure 14). Comme ils traduisent des changements de propriétés des sédiments, les réflecteurs sont assimilés à des surfaces stratigraphiques limitant des unités sédimentaires distinctes. Ces surfaces sont hiérarchisées en différents ordres suivant la classification de Miall (1996) (Tableau 3).

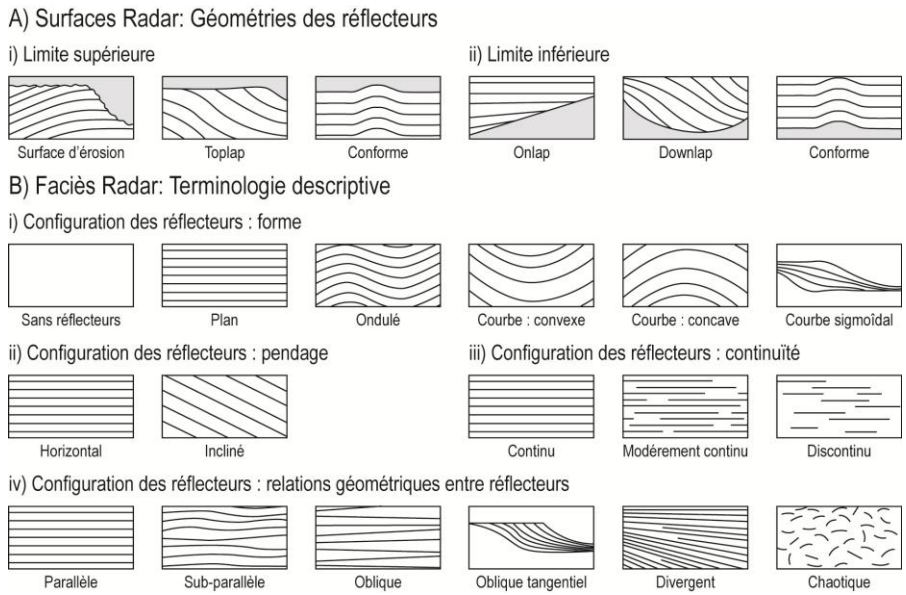

Figure 14. Nomenclature des surfaces et des faciès radar pouvant être observés (modifié d'après Neal, 2004).

Tableau 3. Hiérarchie des réflecteurs / surfaces stratigraphiques dans un environnement fluviatile (Miall, 1996).

Ordre	Unité sédimentaire	Echelle de temps (années)
0	Lamine	10^{-6}
1	Ride (microforme), structure de croissance de mésoforme (dune)	$10^{-5} – 10^{-3}$
2	Dune (mésoforme)	$10^{-2} – 10^{-1}$
3	Structure de croissance de macroforme	$10^{0} – 10^{1}$
4	Macroforme (barre de méandre, levée, lobe de crevasse...)	10^{2} - 10^{3}
5	Chenal, delta, paléosol mature	$10^{3} – 10^{4}$

3.2. Architecture sédimentaire des dépôts d'un méandre actif de la Seine - Site de La Motte-Tilly (Nogent-sur-Seine)

La carrière de La Motte-Tilly se situe à l'aval de Nogent-sur-Seine, à l'intérieur d'un méandre de la Seine (Figure 15). L'implantation des 12 profils (environ 1600 m cumulé) était conditionnée par l'espace disponible entre les fosses, les tas de stérile et les tapis convoyeurs. Les profils radar présentés par la suite ont été acquis avec une antenne de 400 MHz. Pour comparaison, des antennes de 200 et 270 MHz ont également été utilisées, mais les profils ne seront pas présentés dans ce rapport.

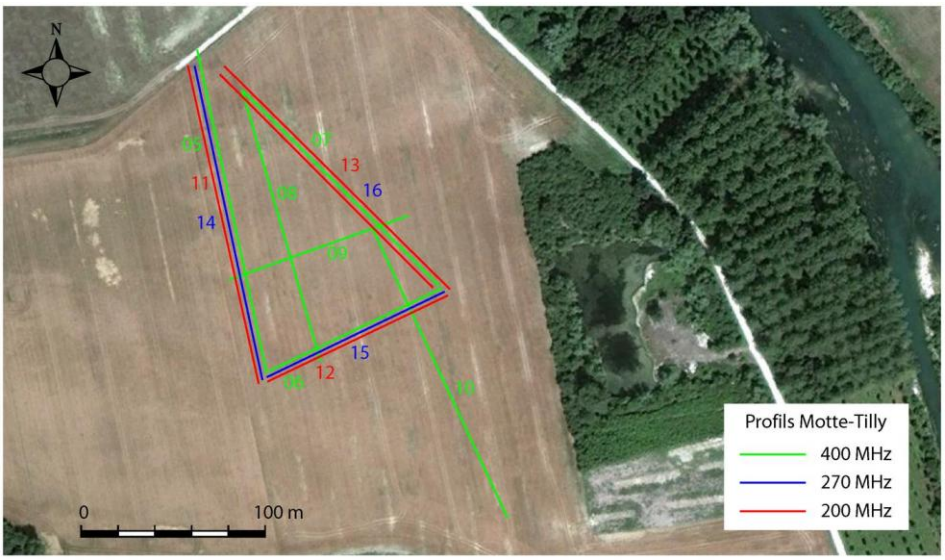

Figure 15. Schéma d'implantation des profils GPR sur la carrière de la Motte-Tilly.

La Figure 16 a présente un profil radar traité orienté NNO-SSE, et les différentes étapes de son interprétation.

Des réflecteurs puissants et continus sur plusieurs dizaines de mètres dessinent l'enveloppe externe de corps sédimentaires (Figure 16, traits gras). L'inclinaison des réflecteurs est relativement faible. Ils correspondent à des surfaces stratigraphiques d'ordre 4, soit l'enveloppe de macroformes. Des réflecteurs plus courts et plus fortement inclinés, contenus à l'intérieur des réflecteurs d'ordre 4, correspondent aux structures de croissance des macroformes, soit un ordre 3 (Figure 16 traits fins). Les surfaces stratigraphiques d'ordre inférieur tombent sous la résolution de l'antenne radar utilisée (de l'ordre de 15 cm), et ne sont pas visibles sur les profils.

La profondeur de pénétration est de l'ordre de 6 m. A la base du profil 5 (Figure 16), on observe un réflecteur relativement continu, horizontal à grande échelle, et présentant des irrégularités à plus petite échelle. Sa puissance est faible du fait de sa profondeur et de l'atténuation du signal. En dessous de cette limite, plus aucun réflecteur n'est observé. De par sa géométrie, sa profondeur, et par comparaison avec des données de sondage à proximité du profil, cette surface est attribué à la limite alluvions craie.
Cette surface est surmontée d'une zone pauvre en réflecteurs, à faciès chaotique (unité jaune, Figure 16). Cette unité est érodée en son sommet par une série de macroformes présentant des surfaces d'accrétion latérale orientées vers le NNO. Ces unités sont interprétées comme des barres fluviatiles traduisant la migration d'un chenal vers le NNO. Si celles-ci sont rattachées à la berge du chenal, on parle alors de barres de méandre.
La juxtaposition latérale de ces barres de migration est interrompue par une forme chenalisante, dont le remplissage est marqué par des réflecteurs inclinés vers le NNO et le SSE. L'ensemble est drapé par une couverture de faible épaisseur, dont les structures de croissance suggèrent un dépôt se construisant par accrétion latérale vers le SSE. Il peut s'agir ici de dépôts formés lors de crues de débordement (levée ou lobe de crevasse).

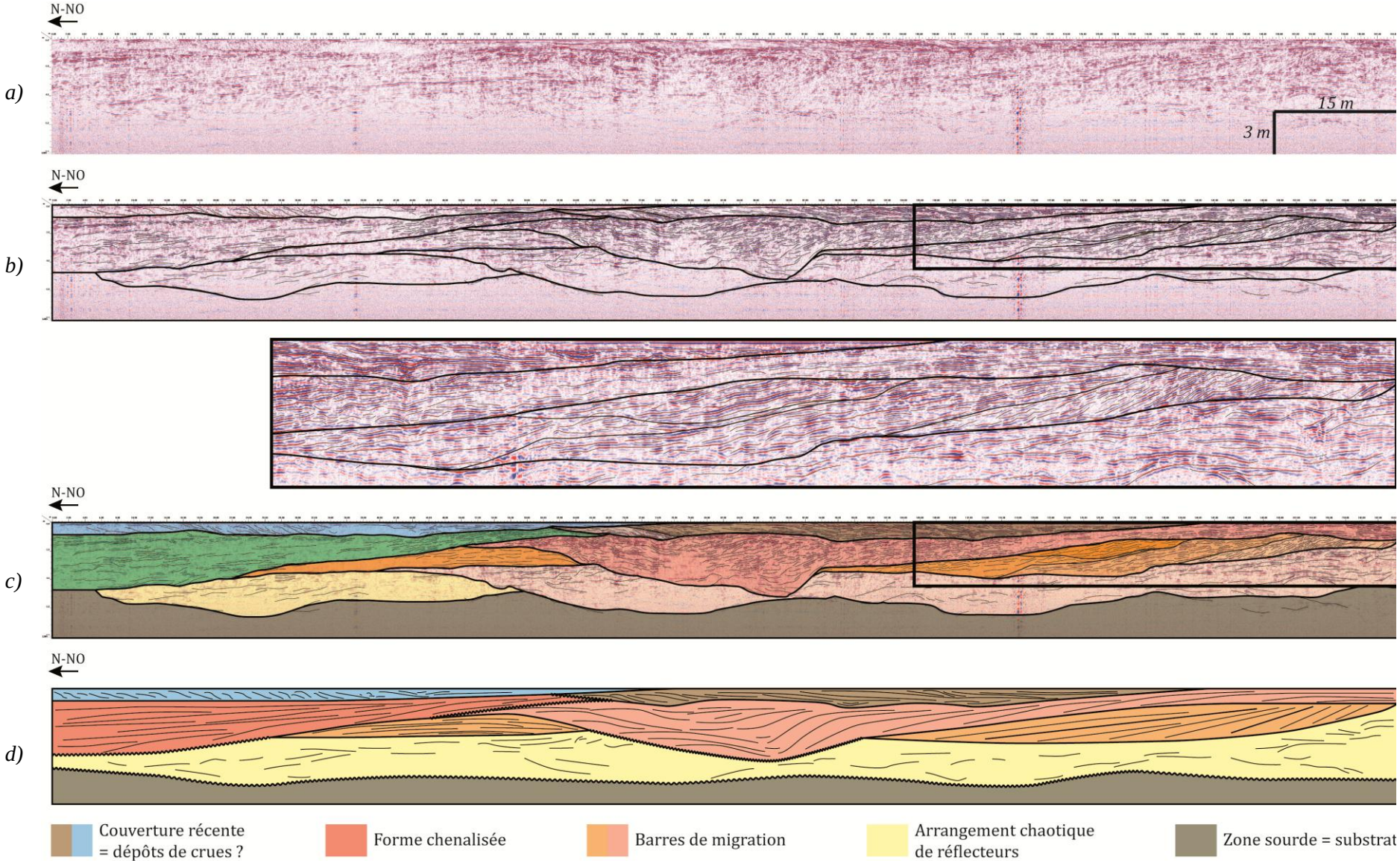

Figure 16. Profil 5 (voir Figure 15 pour localisation), a) profil traité, b) profil digitalisé, c) profil digitalisé montrant les différents corps morpho-sédimentaires et d) profil schématisé.

Tous les profils orientés de la même manière que le profil 5 (SSE-NNO) présentent une architecture interne similaire.

Les profils orientés perpendiculairement au profil 5, soit ENE- OSO, ne présentent pas une architecture interne aussi structurée (Figure 17). En effet, les réflecteurs forment des géométries plus tabulaires, et on ne retrouve pas les grandes unités à surfaces d'accrétion latérale observées précédemment. Ainsi, les profils orientés globalement E-O recoupent des corps sédimentaires dont les structures de croissance, et donc l'inclinaison des surfaces sédimentaires, montrent une migration globale vers le Nord.

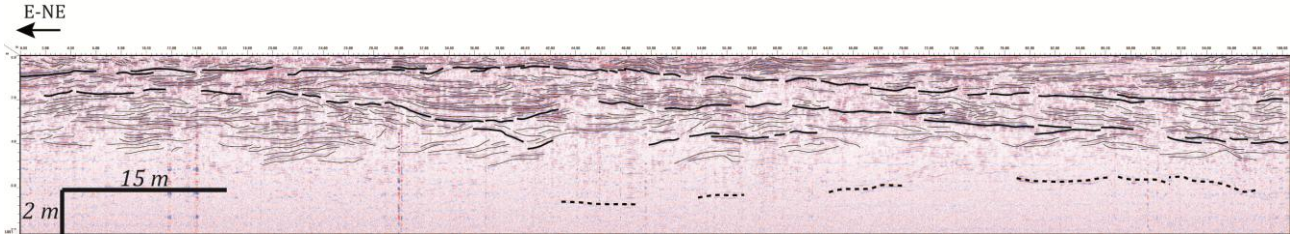

Figure 17. Profil 6 (voir Figure 15 pour localisation) orthogonal au profil 5, traité, digitalisé et interprété montrant des réflecteurs à tendances horizontales.

Les profils radar échantillonnés sur le site de la Motte-Tilly se trouvent à environ 1 km à l'intérieur de l'apex d'une grande boucle de méandre de la Seine qui se développe vers le NNO (Figure 18, flèche rouge). Cette direction de migration est quasi-perpendiculaire à la direction principale d'écoulement NE-SO du fleuve dans sa vallée (Figure 18, flèche bleue). Ce développement d'une sinuosité importante est caractéristique d'un système fluviatile méandriforme. Les boucles de méandre de déplacent par érosion de la berge externe, et dépôt de sable sur la berge interne, sous la forme de barres de méandre à forme sigmoïdale. Les barres d'accrétion latérales observées sur les profils radar montrent une direction de migration identique à celle du méandre actuel.

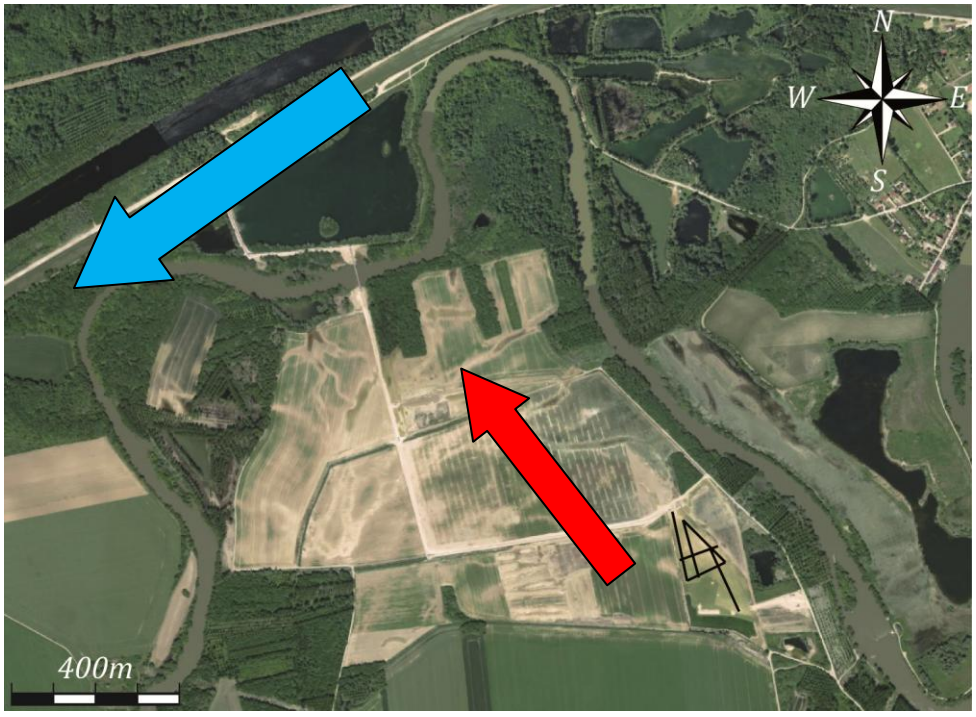

Figure 18. Direction de migration des barres de méandre (flèche rouge) en fonction de l'axe principal d'écoulement de la Seine dans la vallée (flèche bleue).

Les géométries des barres d'accrétion latérale ont été largement étudiées, et notamment leur corrélation avec les géométries de la section du chenal auxquelles elles sont associées (Held, 2011). Il existe ainsi un certain nombre de méthodes permettant la conversion des géométries des barres de méandres fossiles en géométrie de chenaux actifs. Parmi celles-ci, Allen (1965) et Moody-Stuart (1966) assimilent la hauteur de la barre de méandre à la profondeur de crue de plein bord du chenal. En considérant l'assymétrie d'un chenal méandriforme, ils utilisent un coefficient de 1.5 pour convertir la largeur d'un set de barre de méandre (L_R) en largeur de chenal ($W_{channel}$) à plein bord : $W_{channel}=1,5xL_R$.

Sur les profils radar, les barres de méandre identifiées font au maximum 3m d'épaisseur (Figure 19). Leur extension est d'environ 70 m, pour une longueur de set de migration (structure de croissance) de 40 m. En utilisant les estimations de reconstitution paléo-hydrologique, nous obtenons un chenal de 3 mètres de profondeur, pour une largeur d'environ 60 m. Ces paramètres sont très proches des paramètres actuels de la Seine sur le site de prospection. Ceci confirme donc que les géométries observées sont le produit de la migration de la Seine méandriforme actuelle, et de développement du méandre de La Motte-Tilly.

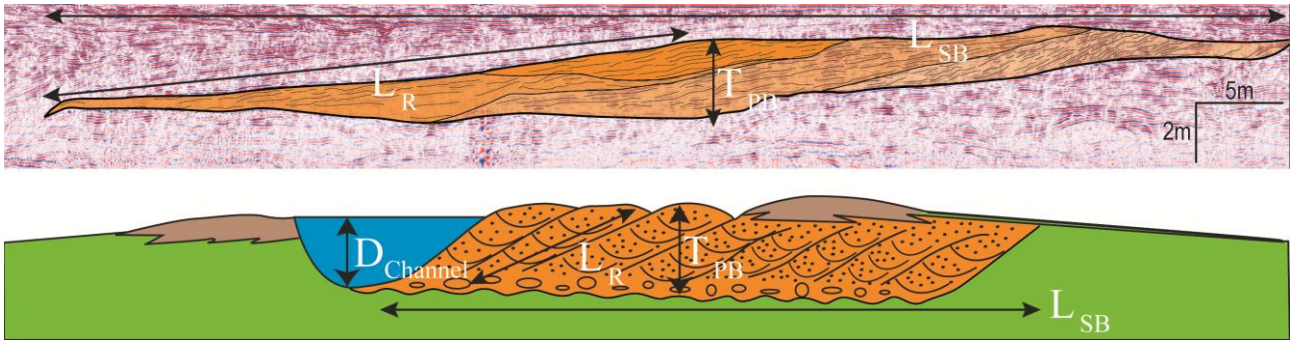

Figure 19. Estimation des paramètres géométriques de la paléo-Seine à la Motte-Tilly.

3.3. Architecture sédimentaire de dépôts distaux à la Seine moderne - Site des Ormes-sur-Voulzie (Bray-sur-Seine)

La carrière des Ormes-sur-Voulzie se situe au centre de la vallée à environ 2 km au Nord de la Seine actuelle. Trois zones décapées par les exploitants ont été prospectées au géoradar (Figure 20), en suivant une implantation de profils perpendiculaires, espacés de 5 m. Ne connaissant pas à priori l'orientation des structures imagées, l'acquisition de profils perpendiculaires permet de reconstituer une image pseudo-3D des corps sédimentaires, ou du moins de retrouver leur orientation réelle. Au total, une surface de 11 200 m² a été couverte, soit environ 5 km de profils.

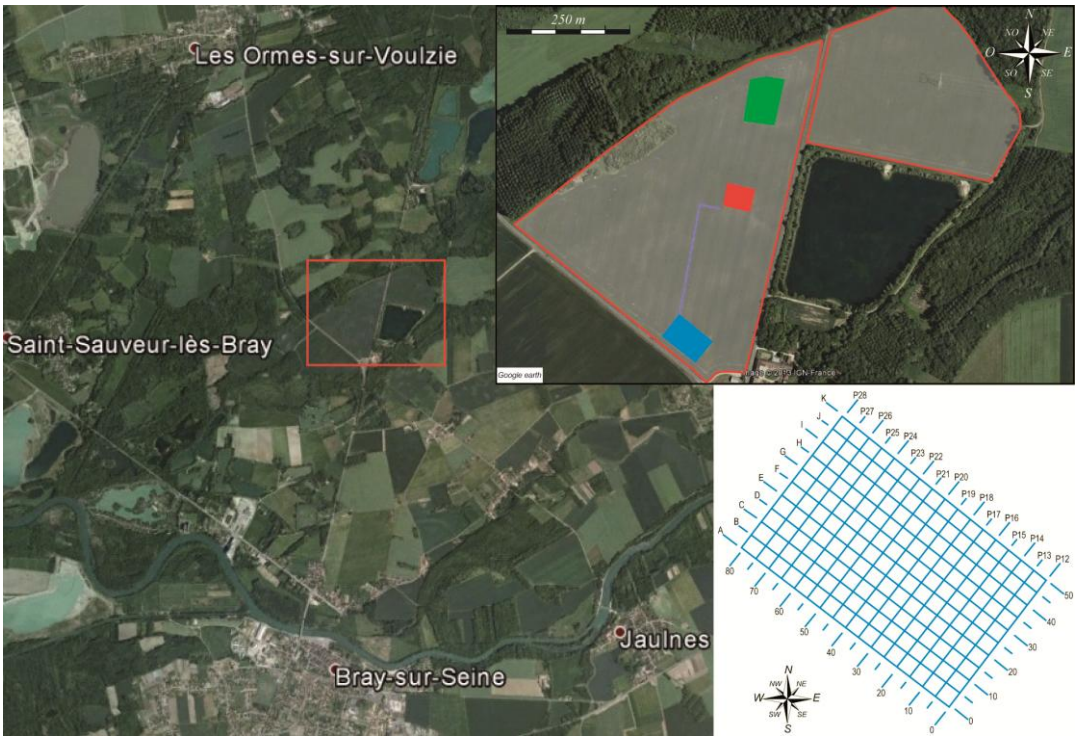

Figure 20. Localisation de la carrière des Ormes-sur-Voulzie et implantation des zones décapées avec les détails de l'échantillonnage de la zone 1 (zone bleue) avec un maillage de 5m.

La Figure 21 présente une portion du profil G, localisé sur la Figure 20. Comme sur le site de La Motte-Tilly, le remplissage est composé d'un ensemble de corps sédimentaires montrant des surfaces d'accrétion latérale. Deux ordres de surfaces stratigraphiques sont identifiables : les enveloppes des barres d'accrétion latérale (ordre 4), à pendage relativement faible, et les structures de croissance de ces barres (ordre 3), présentant une stratification oblique bien marquée. Plusieurs phases de migration d'une barre peuvent être observées (unité gris claire à gris foncé, Figure 21).

A l'inverse des profils de La Motte-Tilly, ces corps sédimentaires sont d'épaisseur modérée (~1.5 m). Sur une même verticale, on retrouve un empilement de 2 à 3 barres, présentant parfois des directions d'accrétion latérale différentes (Figure 21).

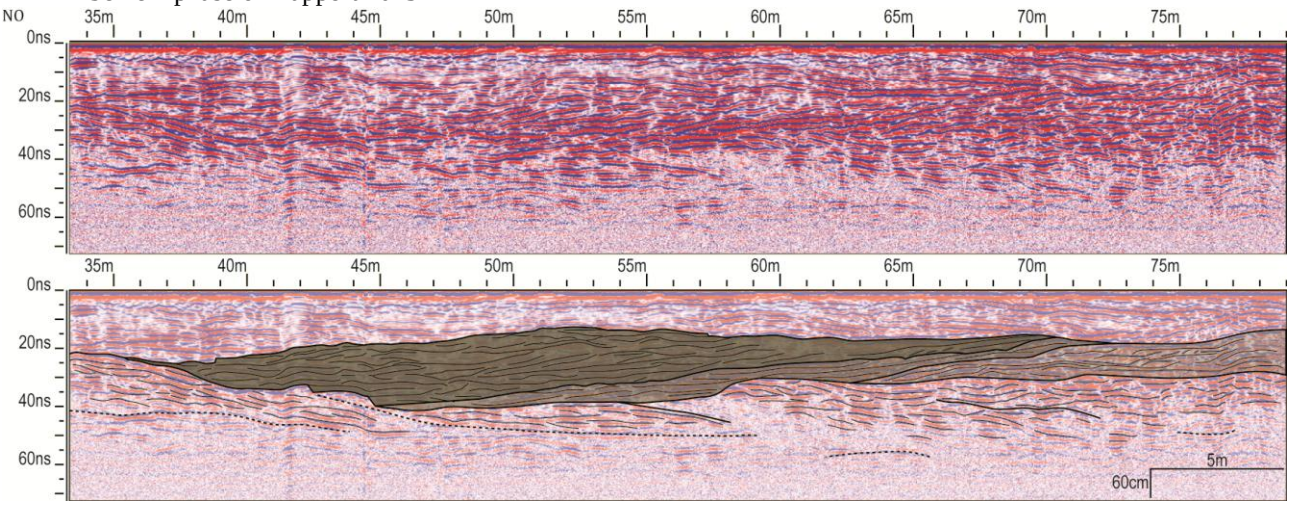

Figure 21. Profil G (voir Figure 20 pour localisation) traité et digitalisé montrant une unité morpho-sédimentaire migrant vers le NO, composée de plusieurs phases de migration.

Le maillage fin des profils nous permet de carter les différents corps sédimentaire, d'évaluer leurs directions réelles de migration, et d'effectuer une reconstitution 3D. Sur un même niveau stratigraphique, on retrouve des barres d'accrétion latérale présentant des directions de migration différentes, voir opposées (Figure 22). Les directions de migration de ces corps sont généralement obliques à quasi-perpendiculaires à l'axe principal d'écoulement du fleuve dans la vallée. La présence de barres migrant sous l'influence d'un courant dans une direction différente de l'orientation générale de la vallée indique une certaine sinuosité du cours d'eau auquel elles sont associées, à l'image du méandre de La Motte-Tilly.

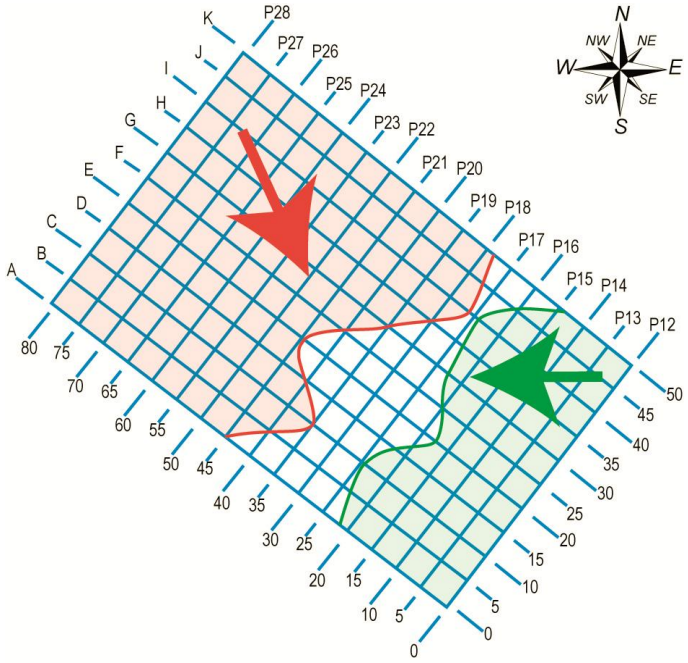

Figure 22. Cartographie et direction de migration de deux barres d'accrétion latérale situées sur un même niveau stratigraphique. La direction d'écoulement général de la Seine dans sa vallée est vers le Sud-Ouest.

Comme cela a été fait sur le site de La Motte-Tilly, il est possible d'estimer, à partir de la géométrie des corps sédimentaires préservés, la géométrie du chenal auquel ils sont associés et donc la paléo-hydrologie (Allen, 1965; Moody-Stuart, 1966). Sous l'hypothèse que les barres d'accrétion latérales correspondent bien à des barres de méandre, raccrochées à la berge du chenal, les estimations suggèrent un chenal d'une profondeur de l'ordre de 1,5 m, pour une largeur de plein bord de 20 à 30 m. Il est évident que ces dimensions sont largement inférieures à celles de la Seine actuelle.

D'autre part, la présence d'un empilement vertical de barres d'accrétion latérale démontre l'existence d'un système en aggradation, signe d'un fort apport sédimentaire. La juxtaposition de barres d'accrétion latérale de directions de migration différentes suggère également une forte mobilité du chenal.

Le site des Ormes-sur-Voulzie est relativement éloigné de la Seine actuelle, et aucun indice géomorphologique ne suggère d'activité récente de la Seine méandriforme sur cette portion de plaine alluviale. D'autre part, les paramètres paléo-hydrologiques (Figure 23) reconstitués ne sont pas en accord avec les paramètres hydrologiques de la Seine actuelle. Il est donc probable que les structures observées correspondent à une activité ancienne d'une paléo-Seine sous un contexte climatique différent. Jusqu'à l'amorce du réchauffement climatique de l'Holocène, la végétation arbustive est peu développée (Antoine, 1997a, 1997b). Les régimes hydrologiques sont contrôlés par de fortes crues associées aux périodes de débâcle. Avec la fonte du pergélisol, une grande quantité de sédiment est libérée. Sous ces conditions, la paléo-Seine était très probablement composée de plusieurs chenaux à forte mobilité, balayant la plaine alluviale sur une largeur relativement importante. La distribution des débits dans plusieurs chenaux explique la faible épaisseur des corps sédimentaires observés.

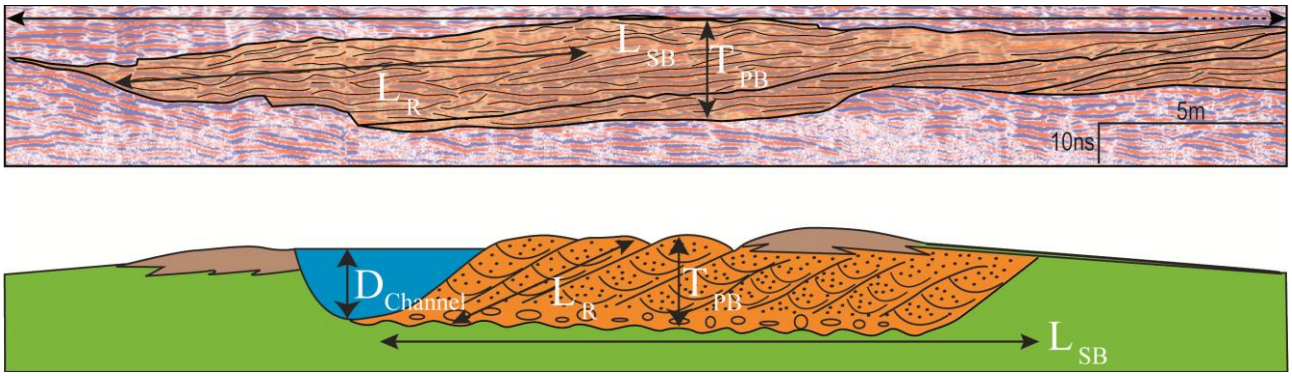

Figure 23. Estimation des paramètres géométriques du paléo-chenal ayant mis en place les corps sédimentaires observés aux Ormes-sur-Voulzie.

L'analyse des profils radar sur les sites de La Motte-Tilly et des Ormes-sur-Voulzie montre des **architectures sédimentaires différentes** mises en place dans des **contextes hydrologiques et climatiques contrastés**. En contexte climatique froid, soumis à des épisodes de débâcle et à un apport sédimentaire important, un **système aggradant mutli-chenaux** (de type anabranche) comble la plaine alluviale de barres d'accrétion latérale amalgamées et de faible épaisseur (~1.5m). Dans ce système de forte énergie, le remplissage est essentiellement grossier. Même si cela reste à confirmer, il est peu probable que des quantités significatives de matériaux fins soient préservées.
A la transition vers l'interglaciaire, le couvert végétal se développe et la Seine évolue vers un **système méandriforme mono-chenal** qui s'approfondit, et de plus faible énergie. La migration des méandres **remanie les dépôts fluviatiles anciens** sur une grande épaisseur (3-4 m). Les recoupements de méandres forment des dépressions qui se comblent progressivement de sédiments fins. Ce processus est à l'origine d'importantes **hétérogénéités sédimentaires** dans la plaine alluviale.

4. Conclusion et perspectives

Les actions menées en 2013 sur la genèse et les hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée se sont structurées autour de deux points :

- **Compilation et analyse de données de sondage.** La récupération, la vérification et l'uniformisation de données issues de la Banque du Sous-Sol du BRGM a permis la création d'une base de données de 500 forages sur la Bassée. Le format, adapté aux besoins du projet, préserve toutes les informations sur la lithologie et la stratigraphie du remplissage, et permet une utilisation dans les logiciels de SIG ou de

géostatistique. Une première analyse qualitative des sondages a montré une dominance des faciès sablo-graveleux dans le remplissage alluvionnaire. Les faciès fins pouvant générer des barrières de perméabilité sont néanmoins présents, essentiellement dans les sédiments les plus superficiels. La base de données a également été utilisée pour réaliser un krigeage de l'épaisseur des alluvions. Dans l'axe de la vallée, la puissance du remplissage varie entre 6 et 10 m. Le fond de vallée avant le remplissage a pu être reconstitué par soustraction de la carte des épaisseurs d'alluvions au MNT de la topographie actuelle. Cette carte d'altitude du contact craie-sédiment sera utilisée comme état initial lors de modélisations du remplissage alluvionnaire.

- **Prospection géophysique par géoradar.** L'étude de faisabilité réalisée en 2012 (Weill *et al.*, 2013) a justifié la poursuite de la prospection géophysique par géoradar. La première mission dans une boucle de la Seine moderne a été complétée par des acquisitions sur des terrains plus éloignés du tracé actuel du fleuve, et donc plus anciens. Une troisième mission a permis de mesurer les vitesses de propagation des ondes radar dans le sédiment, afin d'améliorer les conversions temps/profondeur. Ces premiers résultats nous permettent d'ébaucher un modèle conceptuel de l'évolution de la plaine alluviale et de la création des hétérogénéités. Celles-ci semblent être essentiellement créées en période interglaciaire par une Seine méandriforme remaniant sur une grande épaisseur les dépôts grossiers mis en place dans un contexte climatique plus froid. Ces hétérogénéités se caractérisent par des remplissages argileux de méandres abandonnés.

Ces résultats ont fait l'objet de deux communications orales dans des congrès internationaux (Deleplancque *et al.*, 2013a) et nationaux (Deleplancque *et al.*, 2013b).

Les actions envisagées pour 2014 sont dans la continuité de celles menées en 2013, et orientées par les résultats obtenus. Elles se déclinent en deux volets :

- Architecture sédimentaire et géométrie du remplissage alluvial
Si le géoradar s'est révélé efficace sur des terrains sablo-graveleux, les deux sites sondés sont insuffisants pour avoir une vision robuste et représentative de l'ensemble de la Bassée, et le modèle conceptuel de formation de la plaine alluviale doit être confronté à d'avantage de données. Nous prévoyons donc de nouvelles campagnes d'acquisition mi-2014 pour confirmer le modèle géométrique des dépôts du système anabranche (période froide) et mieux caractériser la présence ou non d'hétérogénéités. Une analyse géostatistique plus poussée des données de sondage sera réalisée dans ce sens. Parallèlement, nous prévoyons un travail de terrain sur les méandres abandonnés, associés au système méandriforme plus récent, qui constituent des corps de faible perméabilité. Des mesures de résistivité électrique seront réalisées pour déterminer leurs géométries. Des sondages carottés permettront d'étudier finement le remplissage des bras morts. Des datations au Carbone 14 seront réalisées sur la matière organique, et permettront d'estimer la période de transition entre système anabranche et système méandriforme actuel.

- Dynamique et évolution morphologique de la Seine méandriforme
Les premiers résultats suggèrent que l'hétérogénéité est essentiellement créée en période interglaciaire par une Seine méandriforme profonde qui remanie les dépôts plus anciens. Un stage de M2 (J. Amestoy) a débuté le 1er février 2014 pour étudier l'évolution morphodynamique récente de la Seine, sur une échelle de temps de quelques centaines d'années. Un travail de comparaison de cartes historiques et de photographies aériennes plus récentes sur SIG permettra d'estimer les vitesses de migration de la Seine, et un certain nombre de paramètres morphométriques. La localisation et la cartographie des méandres abandonnés servira de support pour les prospections géophysiques, et permettra d'appréhender la dynamique de la Seine méandriforme sur une période plus longue et non documentée par les cartes. L'ensemble de ces données servira à réaliser un premier paramétrage du modèle Flumy et à simuler la formation et la préservation d'hétérogénéités sédimentaires par le recoupement et l'abandon de méandres.

Références

Allen, J.R.L. (1965) The sedimentation and palaeography of the old red sandstone of anglesey, Nort Wales. *Proceedings of the Yorkshire Geological and Polytechnic Society*, **35**, 139–185.

Antoine, P. (1997a) Modification des systèmes fluviatiles à la transition Pléniglaciaire-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. (1997b) Évolution Tardiglaciaire et début Holocène des vallées de la France septentrionale: nouveaux résultats. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, **325**, 35–42.

Bendjoudi, H., Weng, P., Guerin, R. & Pastre, J.F. (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.

Bristow, C.S. & Jol, H.M. (2003) *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society Publishing House.

Deleplancque, B., Weill, P., Cojan, I., Labarthe, B. & Flipo, N. (2013a) Characterization and modelling of sediment heterogeneity in an alluvial plain. The example of the upper Seine River (France). In *10th International Conference on Fluvial Sedimentology, 14-19 july, Leeds (UK)*.

Deleplancque, B., Weill, P., Cojan, I., Labarthe, B., Flipo, N. & Turko, M. (2013b) Etude d'un remplissage alluvionnaire par géoradar, exemple de la Seine supérieure (France). In *14éme Congrès français de sédimentologie, 4-8 novembre, Paris*.

Held, A.-E. (2011) Apport de la paléohydrologie dans la quantification des rôles respectifs du climat et de la tectonique des systèmes fluviatiles méandriformes fossiles. Application à des systèmes oligo-miocènes d'Europe occidentale. *Thèse de Doctorat - Ecole nationale supérieure des mines de Paris*, 334 pp.

Hickin, A.S., Kerr, B., Barchyn, T.E. & Paulen, R.C. (2009) Using ground-penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate 3-D fluvial architecture and grain-size distributiuon of gravel floodplain in northeast British Columbia, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, **79**, 457–477.

Jol, H.M. (2008) *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier Science.

Lopez, S., Cojan, I., Rivoirard, J. & Galli, A. (2008) Process-Based Stochastic Modelling: Meandering Channelized Reservoirs. In *Analogue and Numerical Modelling of Sedimentary Systems: From Understanding to Prediction*. Wiley-Blackwell, pp. 139–144.

Matheron, G. (1962) *Traité de géostatistique appliqué*. tome I. In E. Technip.

Miall, A.D. (1996) *The geology of fluvial deposits*. Springer Verlag.

Moody-Stuart, M. (1966) High and low-sinuosity stream deposits, with examples from the Devonian of Spisbergen. *Journal of Sedimentary Petrology*, **36**, 1102–1117.

Neal, A. (2004) Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, **66**, 261–330.

Turko, M. (2013) *Modélisation du fonctionnement hydrologique des plaines alluviales du bassin de la Seine*.

Weill, P., Deleplancque, B. & Norgeot, C. (2013) *Etude de faisabilité sur la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée par géoradar*. PIREN Seine.