ÉVOLUTION PLÉISTOCÈNE DE LA SEINE FLUVIATILE PRÉSERVÉE EN BAIE DE SEINE

Massinissa BENABDELLOUAHED^{1,*}, Olivier DUGUÉ¹, Bernadette TESSIER¹,
Isabelle THINON² & Pol GUENNOC²

RÉSUMÉ

L'acquisition de nouvelles données sismiques haute résolution couplées à des prélèvements au carottier à roches a permis de réviser la carte géologique de la baie de Seine afin de comprendre le rôle du substratum géologique dans la morphogénèse et l'évolution de la Seine, au Pléistocène. Confirmant les travaux antérieurs, la baie de Seine peut être subdivisée en deux ensembles géologiques : un domaine monoclinale mésozoïque occupant l'essentiel de la baie et un domaine synclinal, principalement tertiaire, au nord, à la transition avec la Manche centrale. La mise en évidence de déformations synsédimentaires éocènes avec la présence de blocs glissés dans ce synclinal est l'un des apports nouveaux de cette révision soulignant le rôle important du substratum dans la formation de la paléo-vallée de la Seine. Dans le domaine monoclinale mésozoïque, trois nappes étagées respectivement d'âge anté-saalien, saalien et weichselien comblent la paléo-vallée de la Seine qui est préférentiellement incisée dans les terrains marneux du Jurassique moyen et supérieur, et limitée au nord-est par le prolongement en mer de la cuesta oxfordienne. Le dispositif d'étagement, préservé seulement en rive droite, témoigne d'une migration du nord-est vers le sud-ouest des cours successifs de la Seine pléistocène. Cette migration est associée au soulèvement tectonique pléistocène de la bordure ouest du Bassin parisien. Au nord, la paléo-Seine occupe l'axe du synclinal tertiaire où trois nappes sont dénombrées, probablement de même âge que les nappes étagées, mais présentant une morphologie emboîtée en réponse au caractère subsident de ce secteur septentrional de la baie de Seine.

Mots-clés : Normandie, baie de Seine, Pléistocène, paléo-Seine, sismique haute résolution, incision, nappes étagées, nappes emboîtées, contrôle tectonique

ABSTRACT

PLEISTOCENE EVOLUTION OF THE SEINE RIVER PRESERVED IN THE BAY OF SEINE

New high-resolution seismic data complemented with bedrock samples allowed us to propose a revised geological map of the Bay of Seine and to better define the control by the geological substrate on the morphogenesis and evolution of the Seine River during Pleistocene times. The new data confirm previous works. The Bay of Seine can be divided into two geological parts: a Mesozoic monocline domain occupying most of the bay and a syncline domain, mostly Tertiary, in the north, at the transition with the Central English Channel area. The highlighting of Eocene synsedimentary deformations, marked by sliding blocks in the syncline domain, is one of the most original inputs of this new study in the Bay of Seine that underlines the significant role of the substrate on the formation of the Seine paleo-valley. In the monocline domain, three terraces, pre-Saalian, Saalian and Weichselian in age respectively, constitute the infill of the paleovalley, preferentially incised into the middle to upper Jurassic marl-dominated formations, and bounded to the north by the seaward extension of the Oxfordian cuesta. The three terraces are preserved only along the northern bank of the paleovalley, evidencing a NE-to-SW migration of the successive valleys during the Pleistocene. We assume this displacement results from the tectonic tilt of the Paris Basin western margin. In the North, the paleo-Seine is incised into the axis of the tertiary syncline, and comprises three fill terraces that are assumed to have similar ages than those of the terraces. The fill terrace pattern is associated to the subsiding character of this northern domain of the Bay of Seine.

Keywords: Normandy, Bay of Seine, Pleistocene, paleo-Seine river, high-resolution seismic, incision, strath terraces, fill terraces, tectonic control

1 - INTRODUCTION

Le toit du substratum de la baie de Seine est incisé par un paléo-réseau fluvial attribué à la Seine au cours de Plio-Pléistocène, et situé dans le prolongement de l'embouchure actuelle. La paléo-Seine représente l'une

des trois principales vallées, avec les vallées septentrionale (Solent) et médiane (Somme), formant le fleuve Manche (Lautridou *et al.*, 1999a). Le fleuve Manche s'écoule à travers la Manche orientale et centrale, puis converge en Manche occidentale vers la fosse centrale, incision profonde du substratum (Lericolais *et al.*, 1995).

¹ Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR CNRS 6143, Université de Caen - Basse Normandie, 24 rue des Tilleuls, F-14000 CAEN. Courriel : massinissa.benabdellouahed@ifremer.fr

² BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, F-45060 ORLÉANS cedex 2.

* adresse actuelle : IFREMER, Centre de Brest, F-29280 PLOUZANÉ.

Le fleuve pléistocène Seine est connu en baie de Seine depuis les années 60 (Graindor, 1964; Larssonneur *et al.*, 1974; Alduc, 1979; Auffret *et al.*, 1980). La thèse récente de Benabdellouahed (2011) a eu pour objectif d'étudier le rôle du substratum géologique dans la morphogénèse et le remplissage de cette paléo-Seine en baie de Seine. Lautridou *et al.* (1999b) ont mis en évidence un système de terrasses alluviales étagées qui ont été partiellement mises en parallèle avec celles décrites à terre dans les différents méandres de la Seine. Les données alors disponibles ne permettaient cependant pas de préciser l'évolution à la fois dans le temps et dans l'espace du paléo-réseau. À partir de nouveaux prélèvements au carottier à roches et de données sismiques, Benabdellouahed (2011) présente une carte géologique du substratum anté-quaternaire de la baie de Seine plus précise que les cartes précédentes, et propose un modèle d'évolution du réseau fluvial pléistocène de la paléo-Seine, dans le cadre structural et lithologique de la baie.

2 - SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES DISPONIBLES

2.1 - BREFS RAPPELS DES CONNAISSANCES SUR LA BAIE DE SEINE ET LA PALÉO-SEINE

La baie de Seine occupe une position charnière entre la Manche centrale au nord, le Bassin parisien au sud et à l'est, et le Massif armoricain à l'ouest (fig. 1A). La carte géologique détaillée de la baie de Seine, publiée par Larssonneur *et al.* (1974), puis complétée par Auffret *et al.* (1982) a été établie d'après de nombreuses données stratigraphiques issues de prélèvements par carottages ou dragages (Guyader, 1968; Larssonneur, 1971; groupe Norois, 1972), et par quelques profils de sismique réflexion acquis durant les années 70 par le Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), les universités de Caen et de Londres ou le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (Larssonneur, 1971; Auffret & Larssonneur, 1977).

2.1.1 - Le substratum de la baie de Seine: généralités

Les principaux ensembles stratigraphiques du substratum de la baie de Seine sont: 1) le socle armoricain et les terrains du Trias, au large du Cotentin; 2) la couverture mésozoïque avec ses différentes auréoles, des terrains du Jurassique inférieur à l'ouest, du Jurassique moyen au centre, du Jurassique supérieur à l'est et du Crétacé au nord-est (Larssonneur *et al.*, 1974); 3) la couverture crétacée et tertiaire, présente au nord (Auffret *et al.*, 1982).

Trois principales directions d'accidents sont présentes en baie de Seine, varisque (NE-SO), armoricaine (ONO-ESE) et E-O. Les terrains mésozoïques et tertiaires sont affectés par des déformations à grand rayon de courbure qui définissent deux ensembles structuraux: 1) un ensemble à structure monoclinale avec un pendage régional vers le NE, affectant des terrains triasiques et jurassiques. Il occupe la quasi-totalité de la baie de Seine. Au large du pays de Caux, les terrains jurassiques sont recouverts en discordance par les formations du Crétacé inférieur (faciès wealdiens) et du Crétacé supérieur. Ils sont affectés par des failles normales de direction NE-SO et à regard vers le NO, limitant des héli-grabens. Cette structuration induit un approfondissement du substratum vers le NO, en direction de la Manche centrale (fig. 2A). Nous discuterons par la suite de l'influence de ce trait structural majeur de la baie de Seine sur l'écoulement de la paléo-Seine; 2) un synclinal dissymétrique orienté E-O et incliné vers l'ouest (synclinal de la baie de Seine) affectant les terrains crétacés et cénozoïques au nord de la baie de Seine. Limité au nord par le prolongement occidental de la faille de Fécamp et à l'ouest, par un relais de failles d'orientation NE-SO, il met en contact les séries crétacées à cénozoïques avec les terrains du Jurassique inférieur à moyen. Les nouvelles données acquises dans ce secteur apportent comme nous le verrons ultérieurement des éléments originaux (Benabdellouahed, 2011; Benabdellouahed *et al.*, soumis) sur le remplissage des

Fig. 1: (A) Situation générale de la baie de Seine, et (B) plan de position des nouvelles données de sismique haute résolution et de prélèvements (Benabdellouahed, 2011).

Fig. 1: (A) General setting of the Bay of Seine, and (B) position map of the new seismic profiles and samples (Benabdellouahed, 2011).

fosses jusqu'à présent considéré comme d'âge principalement plio-quaternaire et associé à la paléo-Seine (Auffret *et al.*, 1980; Lericolais *et al.*, 2003).

2.1.2 - La paléo-Seine en baie de Seine

Les limites d'extension de la paléo-Seine fluviale ainsi que l'épaisseur de son remplissage ont été cartographiées initialement par Larssonneur *et al.* (1974), Auffret et Larssonneur (1977), Auffret et Alduc (1977), Alduc (1979) et Auffret *et al.* (1980). D'une centaine de kilomètres de long pour une largeur d'environ quinze kilomètres, la paléo-Seine présente une direction est-ouest depuis l'estuaire actuel de la Seine jusqu'au méridien de l'Orne (Alduc, 1979). Elle se dirige ensuite vers le NO (Alduc, 1979; Alduc *et al.*, 1979; Auffret & Larssonneur, 1977; Larssonneur & Walker, 1982) pour déboucher dans la fosse du Cotentin (Alduc, 1979; Quesney, 1983; Lericolais *et al.*, 1996, 1999a; Lericolais, 1997). Son tracé est conservé dans la bathymétrie actuelle (Alduc, 1979), entre le NE de Barfleur et le méridien de l'Orne et disparaît sous le banc de Seine ou le prisme sédimentaire estuarien (Auffret & Larssonneur, 1977). Selon Alduc (1979), le tracé de la paléo-Seine serait indépendant des accidents tectoniques et contrôlé principalement par les variations lithologiques du substratum.

D'après Auffret *et al.* (1980), le remplissage alluvial de la paléo-Seine est caractérisé par deux morphologies de nappes : 1) des nappes étagées présentes dans la partie amont de la baie de Seine ; 2) des nappes emboîtées à proximité des fosses au nord du Cotentin dans la partie nord du secteur d'étude. Lericolais (1997) et Lericolais *et al.* (2003) ont proposé une corrélation entre le système des nappes emboîtées des fosses du Cotentin et centrale, et les terrasses étagées décrites à terre (Lautridou *et al.* 1974, 1999b; Lefebvre *et al.*, 1994). La corrélation générale le long de tout le profil, entre le système à terre et les fosses en passant par la baie de Seine, reste jusqu'à présent débattue, en raison d'un nombre différent de terrasses préservées : pour un dispositif de huit terrasses identifiées à terre (Lautridou *et al.*, 1974, 1999b; Lefebvre *et al.*, 1994), cinq à six nappes emboîtées sont décrites dans les fosses au nord (Lericolais *et al.*, 2003) et seules deux terrasses étagées principales ont été reconnues en baie de Seine (Auffret *et al.*, 1980).

2.2 - NOUVELLES DONNÉES : OBJECTIFS ET MÉTHODES

Dans le dispositif général quaternaire du fleuve Manche, la baie de Seine, avec le paléo-réseau de la Seine, représente une zone clef en raison de sa position géologique charnière entre la Manche centrale et sa structure synclinale, et le Bassin parisien et sa structure monoclinale. Pour mieux comprendre l'évolution pléistocène du fleuve Seine dans ce cadre géologique complexe, 3 100 km de profils de sismique réflexion haute et très haute résolution ont été acquis au cours de trois missions conjointes de l'université de Caen et du BRGM, en 2007 et 2008 (fig. 1B) : campagnes BaiSeine07 (N/O INSU/

CNRS Côte d'Aquitaine), SeineTHR (N/O INSU/CNRS Côte d'Aquitaine) et SeineHR (N/O INSU/CNRS Côte de la Manche). 2 900 km ont été acquis à l'aide d'un sparker SIG 50 J, et 230 km à l'aide d'un boomer IKB-Seistec 200 J. L'acquisition de ces nouvelles données avait pour objectifs de : 1) réviser la carte géologique de la baie de Seine ; 2) préciser le tracé de la paléo-Seine et les géométries de ses remplissages pour proposer des corrélations entre l'amont et l'aval ; 3) établir les relations précises entre la paléo-Seine et le substratum afin de comprendre le rôle de ce dernier.

L'interprétation stratigraphique des unités sismiques reconnues est basée sur les prélèvements disponibles (Larssonneur, 1971 ; groupe Norois, 1972) complétés par 117 nouveaux prélèvements réalisés à l'aide d'un carottier à roches (CNEXO-ville), lors de la mission Carobseine (N/O Ifremer/Genavir Thalia, avril 2009, fig. 1B). L'interprétation stratigraphique des échantillons prélevés en mer est basée sur leur comparaison avec les faciès mésozoïques et cénozoïques décrits à terre. Une étude biostratigraphique des échantillons tertiaires prélevés dans le synclinal de la baie de Seine a été établie par C. Bourdillon (ERADATA in Benabdellouahed, 2011).

3 - RÉSULTATS : MORPHOLOGIE DE L'INCISION DE LA PALÉO-SEINE ET GÉOMÉTRIE DU REMPLISSAGE

3.1 - ÉLÉMENTS NOUVEAUX SUR LE SUBSTRATUM DE LA BAIE DE SEINE

Le réseau dense et la bonne qualité des nouvelles données sismiques, couplés aux nouvelles datations biostratigraphiques, ont permis de proposer une nouvelle carte géologique de la baie de Seine (Benabdellouahed *et al.*, soumis) qui précise les cartes géologiques antérieures (Larssonneur *et al.*, 1974; Auffret *et al.*, 1982). D'après les travaux de Benabdellouahed (2011), plus de 20 unités sismiques ont été identifiées, cartographiées et corrélées aux prélèvements réalisés en mer et aux formations géologiques définies à terre sur le bassin versant côtier de la baie de Seine, dont les différentes formations jurassiques (Dugué, 2007). Pour la première fois, les discontinuités mésozoïques majeures, comme la surface de Ranville ou la surface de Blangy, ont été reconnues en mer. La carte géologique révisée de Benabdellouahed (2011) confirme le prolongement en mer de l'ensemble des formations géologiques décrites à terre mais avec un degré de détail qui n'existait pas auparavant. Les deux ensembles structuraux, la baie de Seine monoclinale et la zone nord synclinale sont très clairement identifiés. Le fait le plus original que les nouvelles données ont permis de mettre au jour, est l'existence dans la zone synclinale de déformations synsédimentaires d'âge Éocène moyen (Bartonien ? ; cf. tab. 1), avec la présence de blocs glissés. Benabdellouahed *et al.* (soumis) suggèrent que ces déformations constitueraient les prémices de la phase d'inversion structurale positive de la Manche. Cette découverte permet d'affirmer qu'une partie du remplissage des fosses

Unités sismiques	Localisation	Épaisseur en mstd	Géométrie unité sismique	Surface inférieure	Surface supérieure	Faciès sismique	Caractéristiques réflecteurs			Extraits profils sismiques
							fréq.	ampl.	cont.	
Unité N5 (Holocène)	embouchure Seine et baie des Veys	0 à 20	progradante, agradante, chenalisante	downlap concordant	fond marin	transparent sub-parallèle à parallèle	-+	-+	-+
Nappe N4	entre estuaire de Seine et Barfleur	~ 20	agradante, chenalisante	toit du substrat	fond marin ou troncature	chaotique	+	+	+
	NE Barfleur sur substratum Crétacé	~ 20	progradante, chenalisante	toit du substrat	fond marin	sub-parallèle à parallèle	-+	+	-+
Nappe N3	Principalement Nord Barfleur	0 à 20	lenticulaire, chenalisante	downlap	fond marin	sub-parallèle à parallèle	+	+	+
Nappe N2		0 à 24	lenticulaire, progradante	downlap concordant	toplap	oblique parallèle, tangentielle, pendage moyen à fort	+	-	+	
Nappe N1		0 à 10	lenticulaire	toit du substrat		transparent, chaotique	-	-	-	

Tab. 1 : Nomenclature et caractéristiques des unités et faciès sismiques reconnus dans le remplissage pléistocène de la paléovallée de la Seine, d'après Benabdellouahed (2011).

Sur tous les profils, les barres d'échelles verticales et horizontales représentent respectivement pour 20 mstd (millisecondes temps double) et 500 m.

Tab. 1 : Denomination and characteristics of seismic facies and units identified into the Pleistocene infill of the Paleo-Seine river, after Benabdellouahed (2011). On all profiles, vertical and horizontal scales respectively represent 20 mstd (milliseconds two way travel time) and 500 m.

au nord de la baie de Seine est d'âge éocène, remettant ainsi en cause les conclusions d'Auffret *et al.* (1980) et de Lericolais *et al.* (2003) attribuant un âge plio-pléistocène au remplissage des fosses. En effet, les premières nappes emboîtées qu'ils décrivent à la base de ces remplissages correspondent en fait à ces séries éocènes impliquées dans les blocs glissés décrits par Benabdellouahed *et al.* (soumis). La bonne pénétration du signal acoustique dans cette partie profonde du remplissage confirme cette nouvelle interprétation : la base des fosses est constituée de blocs glissés à lithologie marno-calcaire plutôt que de nappes de cailloutis fluviaux.

3.2 - MORPHOLOGIE DE L'INCISION DE LA PALÉO-SEINE

La nouvelle carte géologique de Benabdellouahed (2011) précise les relations entre la morphologie de l'incision de la paléo-Seine et la lithologie et la structuration du substratum de la baie de Seine. Le modèle numérique maillé de la profondeur du toit du substratum, construit à partir de l'interprétation des nouvelles données sismiques, montre une morphologie de l'incision plus détaillée (fig. 2B) que celle établie par Auffret *et al.* (1980). Au nord de la baie, la paléo-Seine présente un profil transversal assez régulier et symétrique, où la profondeur moyenne de son incision atteint -20 m à proximité du Havre et de Ouistreham, mais -40 m à vingt kilomètres de la côte. À partir du méridien de Ouistreham, l'encaissement de la paléo-Seine apparaît peu important, avec une dénivelée de 10 m, entre -40 et -50 m de profondeur, sur une distance de trente kilomètres. En revanche, au nord de Barfleur, l'encaissement de la paléo-Seine atteint -100 m dans la fosse du Cotentin. Au nord de la baie de Seine, des îlots existent où le substratum est peu ou pas incisé. D'autres hauts fonds sont présents au centre de la baie, au large d'Ouistreham. Souvent orientés NO-SE dans le sens de l'écoulement de la paléo-Seine, ils traduisent une résistance à l'érosion inégale, fonction des lithologies du substratum. La pente moyenne longitudinale de l'incision est estimée entre 0,02 % et 0,04 % ; elle est plus faible dans la zone des hauts fonds du nord et augmente à nouveau, au large du Cotentin, dans la fosse (0,5 %).

Si l'incision de la paléo-Seine est liée aux chutes du niveau de base d'origine climato-eustatique au Pléistocène, son évolution morphologique (profondeur et orientation) peut en grande partie être attribuée à un contrôle lithologique et structural du substratum. La nouvelle carte géologique permet d'illustrer plusieurs exemples d'un tel contrôle. En effet, la diversité des formations géologiques trouvées en baie de Seine peut se résumer à deux grands ensembles lithologiques (fig. 2A) : 1) un ensemble de roches dures et résistantes à l'érosion, tels les calcaires cimentés du Bathonien supérieur, les craies du Crétacé supérieur ou les calcaires lumachelles éocènes ; 2) un ensemble de roches plus friables et plus faciles à éroder, comme les marnes et alternances marno-calcaires du Lias, les caillasses bathoniennes, les marnes du Bathonien terminal ou de l'Oxfordien inférieur et

supérieur ou les sables bartoniens. La paléo-vallée de la Seine s'écoule au centre de la baie et occupe la totalité de l'auréole marneuse correspondant aux formations terrigènes fines décrites entre le Bathonien terminal et l'Oxfordien inférieur. Elle est guidée par le front d'une cuesta dans le prolongement en mer de celle du Pays d'Auge (fig. 2A). Les profils sismiques réalisés au droit de la structure monoclinale mésozoïque illustrent ainsi l'installation préférentielle de la paléo-vallée de la Seine, entre les calcaires cimentés très durs du Bathonien supérieur à l'ouest et les alternances marno-calcaires et marnes plus faciles à éroder du Bathonien terminal/Oxfordien inférieur à l'est. L'incision est plus accusée avec une profondeur supérieure à 10 m dans les terrains plus marneux du Bathonien terminal / Oxfordien inférieur, alors qu'elle atteint seulement 5 m dans les calcaires du Bathonien supérieur. Au nord-ouest, l'encaissement devient plus discret, avec la préservation d'îlots de craies du Crétacé supérieur, armées de silex et donc plus résistantes à l'incision. Alduc (1979) a aussi proposé l'hypothèse d'un écoulement karstique dans les craies, provoquant une perte du débit liquide par infiltration. Pour l'instant, les profils sismiques ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer la présence de figures de dissolution à proximité des îlots de craies. Au Nord de Barfleur, la morphologie de l'incision de la paléo-Seine dans les sables bartoniens devient plus importante, avec une profondeur avoisinant 50 m.

Le rôle de la structuration du substratum dans la morphologie de l'incision de la paléo-Seine s'exprime à une plus grande échelle (fig. 2A). La structure monoclinale mésozoïque, pour l'essentiel formée de terrains jurassiques, est affectée par des failles NE-SO à regard NO qui délimitent une série d'hémi-grabens déterminant une inclinaison générale du substratum vers le NO. Vers le nord, à la transition avec la Manche centrale, la structure synclinale orientée O-E dans les terrains crétacés à bartoniens est fermée à l'est, et son axe est incliné vers l'ouest. Entre l'estuaire actuel et le parallèle de Barfleur, dans la baie de Seine monoclinale, l'écoulement de la paléo-Seine s'effectue vers le NO, influencé par la topographie du substratum. Dans le nord de la baie, l'inclinaison du synclinal vers l'ouest contrôle aussi l'inflexion du cours fluvial en direction de la fosse centrale.

3.3 - LE REMPLISSAGE PLÉISTOCÈNE DE LA PALÉO-SEINE

3.3.1 - Distribution des épaisseurs

L'interprétation des nouvelles données sismiques a permis de construire un modèle numérique maillé des épaisseurs du remplissage de l'incision plio-quaternaire de la paléo-Seine (fig. 2C). Cette carte isopaque apporte des informations complémentaires sur la géométrie de ce remplissage et sur son évolution spatio-temporelle. Deux zones de dépôts importants (zones A1 et A2) et une zone de dépôts réduits (zone E) se distinguent. La zone de dépôt la plus importante (zone A1) est localisée au nord du Cotentin, dans le synclinal de la baie de Seine où

l'épaisseur du remplissage sédimentaire dépasse 40 m. La seconde zone d'accumulation sédimentaire (zone A2) est située entre l'embouchure actuelle de la Seine et le parallèle de Barfleur/Cap-Antifer; l'épaisseur moyenne des sédiments atteint environ 15 m. Entre ces deux zones A1 et A2, il existe de nombreux hauts fonds crétacés et lutétiens qui attestent de la très faible épaisseur des dépôts préservés dans cette partie de la paléo-vallée. D'après les forages réalisés au large du Havre (Guyader, 1968, 1977; Michel, 1968), les alluvions grossières de la zone A2 sont constituées de graviers, galets ou blocs, emballés dans une gangue sableuse ou silto-argileuse qui reposent sur un substratum jurassique; les silex représentent les principaux matériaux de ce remplissage alluvionnaire (Larsonneur, 1971). D'après les profils sismiques, le remplissage présente un faciès sismique non homogène, avec la distinction de plusieurs nappes alluviales limitées par des discontinuités, interprétées comme des surfaces d'érosion.

3.3.2 - Unités de remplissage

Au-dessus de la surface d'incision majeure (nommée R1), cinq unités sismiques sont distinguées au sein du remplissage de la paléo-vallée, de N1 la plus ancienne à N5 la plus récente (tab. 1; fig. 3). Les unités sismiques N1, N2, N3 sont reconnues au nord, dans le synclinal de la baie de Seine et localement en baie de Seine. L'unité sismique N4 est reconnue sur l'ensemble de la baie de Seine. Enfin, l'unité sismique N5, la plus récente, correspond au remplissage holocène préservé à l'embouchure actuelle de la Seine.

Les unités sismiques N1, N2 et N3 possèdent une géométrie de nappes emboîtées, tandis que l'unité sismique N4 se compose de plusieurs nappes étagées (tab. 2). Les trois unités sismiques N1, N2 et N3 sont localisées dans la zone d'accumulation A1, au nord de la baie. Séparées par des discontinuités (réflecteurs de forte amplitude), elles se caractérisent par des faciès sismiques transparents à lités, témoignant de dépôts à lithologies contrastées (fig. 3). L'ensemble de ces unités a une épaisseur supérieure à 40 m, et atteint 60 à 80 m dans la zone de confluence au nord du Cotentin (Alduc, 1979; Quesney, 1983; Lericolais, 1997). Au milieu de la zone d'accumulation A2, les nappes emboîtées N1 et N2 sont également préservées à la faveur d'une morphologie en fosse de l'incision.

Les nappes étagées sont représentées par l'unité sismique N4 d'une épaisseur maximale d'environ 20 m. Cette unité recouvre la plus grande partie de la structure monoclinale de la baie de Seine, entre l'embouchure

actuelle de la Seine et le nord de Barfleur (fig. 3 et 4) et forme l'essentiel du remplissage de la zone d'accumulation A2. Elle se caractérise par un faciès acoustique chaotique. Dans le détail, l'unité sismique N4 correspond à trois nappes étagées, N4a, N4b et N4c (tab. 2). Les talus d'érosion qui marquent l'étagement du dispositif sont souvent dégradés par l'érosion et n'apparaissent pas sur tous les profils sismiques. La nappe supérieure N4a, la plus ancienne, est préservée uniquement en rive droite de la paléo-Seine sous forme de lambeaux de 3 km de large et de 7 m d'épaisseur au maximum. Elle se raccorde à un palier d'érosion situé entre -9 et -12 m CM (Cote Marine). La nappe intermédiaire N4b est continue et bien conservée, sauf sous l'embouchure actuelle de la Seine. Sa limite avec la nappe étagée supérieure N4a est difficile à établir. N4b présente une largeur d'environ 7 km et une épaisseur autour de 15 m. Elle se raccorde à un palier d'érosion situé autour de -19 m CM. Dans la zone d'accumulation A2, la nappe intermédiaire N4b est caractérisée par un faciès sismique chaotique reflétant une nappe de cailloutis massifs. Dans la zone de moindre accumulation (zone E), cette nappe présente au contraire un faciès sismique lité progradant qui témoignerait de dépôts plus fins et d'un processus de migration latérale, indiquant probablement une barre fluviale de méandre. Les deux nappes N4a et N4b représentent deux anciens tracés de la paléo-vallée de la Seine, entièrement comblés et érodés, puis abandonnés avant la mise en place de la nappe la plus récente N4c. La nappe N4c, qui correspond donc au dernier tracé reconnu de la paléo-Seine (fig. 4), est continue et sans interruption depuis l'embouchure actuelle jusqu'au nord de la baie de Seine. Sa largeur moyenne est d'environ 10 km et son épaisseur atteint une dizaine de mètres. Elle se biseaute au niveau des hauts fonds crétacés, dans la zone de moindre accumulation (zone E). Toutefois, la nappe N4c ne comble pas la totalité de la paléo-vallée de la Seine puisque son tracé reste encore conservé dans la bathymétrie actuelle (fig. 3).

4 - DISCUSSION : MODÈLE D'ÉVOLUTION PLÉISTOCÈNE DE LA SEINE FLUVIATILE PRÉSERVÉE EN BAIE DE SEINE

4.1 - LA PALÉO-SEINE ET LE DISPOSITIF LITHOLOGIQUE ET STRUCTURAL DE LA BAIE DE SEINE : RELATIONS GÉNÉRALES

Si l'on compare le réseau de la paléo-Seine avec la carte géologique du substratum de la baie de Seine, l'orientation de l'incision et le style des nappes alluviales comblant la

Baie de Seine synclinale	Baie de Seine monoclinale	Basse vallée de la Seine
<i>Nappes emboîtées</i>	<i>Nappes étagées</i>	<i>Nappes étagées</i>
N3	N4c	Weichselien (Terrasses Rouen 1 & Rouen 2)
N2	N4b	Saalien (Formation de Tourville <i>pro parte</i>)
N1	N4a	Anté-Saalien

Tab. 2 : Nomenclatures des nappes préservées en baie de Seine, et corrélations proposées avec les nappes reconnues dans la basse vallée de la Seine.

Tab. 2 : Denomination of the terraces preserved in the Bay of Seine, and correlations with the terraces identified in the lower valley of the Seine River.

Fig. 3: Deux exemples de profils sismiques haute résolution.

Le profil Bs07-s05 montre les trois nappes étagées caractérisant le remplissage de la paléo-Seine préservée dans le monocline de la baie de Seine; le profil Bs08b-s41 montre les nappes emboîtées spécifiques au synclinal de la baie de Seine (Benabdellouahed, 2011).

Fig. 3: Two examples of high resolution seismic profiles. Profile Bs07-s05 displays the three strath terraces typically preserved in the monocline domain; profile Bs08b-s41 shows the fill terraces that characterize the syncline domain (Benabdellouahed, 2011).

Fig. 4 : Cartographie des trois nappes successivement anté-saaliennne, saaliennne et weichselienne qui participent au remplissage pléistocène de la paléovallée de la Seine.

La migration du nord-est vers le sud-ouest des cours successifs de la Seine est associée au soulèvement tectonique de la bordure ouest du Bassin parisien (Benabdellouahed, 2011) (voir fig. 2A pour la légende de la carte géologique).

Fig. 4: Contours of the three successive pre-Saalian, Saalian and Weichselian terraces that compose the general Pleistocene infill of the paleo-Seine river. The NE to SW migration of the successive Pleistocene rivers is associated to the tectonic tilt of the western border of the Paris Basin (Benabdellouahed, 2011) (see fig. 2A for caption of the geological map).

paléo-vallée sont étroitement liés à la topographie du substratum, en relation avec les deux grands ensembles structuraux. Le secteur monoclinale de la baie de Seine présente des nappes alluviales étagées, tandis que le synclinal de la baie de Seine possède des nappes emboîtées. Dans l'ensemble monoclinale, l'incision occupe principalement des terrains marneux jurassiques. De plus son orientation SE - NO est compatible avec l'approfondissement général du substratum vers le NO lié aux héli-grabens successifs qui affectent les terrains mésozoïques. Dans l'ensemble synclinal, la paléo-vallée s'oriente vers l'ouest, selon le plongement de l'axe du synclinal, et les nappes emboîtées incisent préférentiellement les lithologies à dominante sableuses des terrains tertiaires.

4.2 - CORRÉLATION AMONT - AVAL ET FACTEURS D'ÉVOLUTION DE LA PALÉO-SEINE

Le remplissage de la paléo-Seine est composé de trois nappes principales, de type étagé dans la partie monoclinale de la baie de Seine, emboîté dans le synclinal de la baie de Seine. Ces différentes géométries ont déjà été reconnues dans les travaux antérieurs d'Alduc (1979), mais leur nombre diffère. Alduc (1979) a dénombré deux nappes étagées et quatre à six nappes emboîtées, tout comme Lericolais *et al.* (2003) pour ces dernières.

À terre, dans la basse vallée de la Seine, la nappe alluviale la plus récente est d'âge weichselien (nappe des « graviers de fond ») regroupant les terrasses dites « Rouen 1 » et « Rouen 2 » (Lautridou *et al.*, 1984; Lefebvre *et al.*, 1994). En baie de Seine, la nappe la plus récente N4c est corrélée à la nappe weichselienne (tab. 2). Elle est principalement préservée en rive gauche de la paléo-vallée dans le monoclinale de la baie de Seine. Directement sur les nappes emboîtées N1 et N2 comblant une petite fosse présente en baie de Seine, la nappe N4c se raccorde à la nappe emboîtée N3 dans le synclinal de la baie de Seine. Dans cette hypothèse, les nappes emboîtées N1 et N2 sont respectivement corrélées aux nappes étagées N4a et N4b d'âge anté-weichselien, c'est-à-dire au moins du Saalien. Des terrasses saaliennes sont également décrites dans la Formation de Tourville, en basse Seine (Lautridou *et al.*, 2003).

Le remplissage alluvial de la paléo-Seine est soumis aux fluctuations climatiques pléistocènes, avec des alternances de périodes glaciaires, pendant lesquelles la Seine est un fleuve périglaciaire, et interglaciaires, mais aussi à des changements de flux sédimentaires en réponse à ces variations du climat. Les données disponibles ne permettent pas pour l'instant de quantifier ces change-

ments de flux. En revanche, il est souvent établi que les incisions se produisent plutôt durant la chute du niveau de base, au passage interglaciaire-glaciaire, alors que l'alluvionnement se produit dès lors que le niveau de base se stabilise et commence à remonter au passage glaciaire-interglaciaire. Les nouvelles données sismiques, en dépit de leur haute résolution, ne permettent pas véritablement de décrire des changements dans les styles fluviaux associés à ces variations du niveau de base. Les seuls changements de faciès sismiques retrouvés dans les nappes indiquent le passage amont-aval d'un système en tresses proximal très grossier à un système en tresses plus distal, avec localement la préservation de dépôts plus fins et de barres de méandre.

L'origine de l'étagement des nappes alluviales en baie de Seine monoclinale serait quant à elle, comme pour les terrasses fluviales de la vallée de la Seine (Lautridou *et al.*, 1999b), à relier au soulèvement global pléistocène de l'Europe de l'Ouest et de la bordure ouest du Bassin parisien. Le dernier étagement de la paléo-Seine, le mieux préservé, présente un dénivelé d'environ 7,5 à 10 m, comme en basse Seine (10 m) (Benabdellouahed, 2011). Le dispositif des terrasses en baie de Seine indiquerait un soulèvement moyen de l'ordre de 7 à 10 m pour 100 ka. Ce soulèvement serait également responsable de la migration, du nord-est vers le sud-ouest, des cours successifs pléistocènes de la Seine (Benabdellouahed, 2011). Cette migration est marquée par la préservation de l'étagement uniquement en rive droite de la paléo-vallée. Incisant d'abord l'auréole marneuse de la baie de Seine monoclinale, le cours de la Seine serait forcé ensuite de se déplacer vers le sud-ouest, lors de ce soulèvement régional, et s'écoulerait finalement sur un substratum calcaire bathonien plus dur, au Weichselien. Dans ce contexte de soulèvement généralisé de l'Europe de l'Ouest, des zones stables ou en subsidence peuvent localement exister. C'est le cas du synclinal de la baie de Seine et des fosses au large du Cotentin qui préservent une épaisse sédimentation tertiaire. Cette subsidence favoriserait l'emboîtement des formations alluviales.

5 - CONCLUSION

L'interprétation de Benabdellouahed (2011) des données sismiques haute résolution récemment acquises en baie de Seine a contribué à mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle de la paléo-Seine pléistocène et a mis en lumière le rôle prépondérant du substratum géologique sur le tracé de la paléo-Seine. Les principales conclusions de ces travaux sont :

1- la lithologie du substratum contrôle la localisation et la morphologie de la paléo-vallée de la Seine. Dans la partie monoclinale de la baie de Seine, la paléo-Seine a préférentiellement incisé les terrains marneux jurassiques au pied de la cuesta oxfordienne. Dans la partie synclinale, au nord de la baie, la paléo-Seine a incisé l'axe du synclinal tertiaire constitué de terrains à dominante sableuse ;

2- la topographie générale du substratum de la baie de Seine, en relation avec son dispositif structural, a une influence sur le tracé de la paléo-Seine. Au sein de l'ensemble monoclinale mésozoïque, la succession d'hémi-grabens limités par les failles NE-SO induit une pente générale vers le NO ; l'écoulement fluvial de la paléo-Seine s'effectue vers le NO. Au nord de la baie de Seine, l'axe du synclinal tertiaire est incliné vers l'ouest ; l'écoulement de la paléo-Seine suit cette pente ;

3- le substratum influe sur les géométries de remplissage. Ainsi, le remplissage alluvial de la paléo-Seine est constitué de trois nappes étagées dans le domaine monoclinale, et trois nappes emboîtées dans le domaine synclinal. À partir des données sismiques, une corrélation entre les deux systèmes de nappes alluviales est proposée. En comparant avec les données décrites à terre, des âges respectivement anté-saalien, saalien et weichselien sont proposés pour ces trois nappes, qu'elles soient étagées ou emboîtées. En l'absence de données chronologiques, les dépôts les plus anciens d'âge anté-saalien pourraient remonter au moins jusqu'au Pléistocène moyen basal ;

4- l'étagement des nappes dans le domaine monoclinale n'est préservé qu'en rive droite de la paléo-vallée, en raison d'une migration du nord-est vers le sud-ouest des cours successifs de la Seine, durant le Pléistocène. Cette migration est attribuée au soulèvement tectonique récent de la bordure ouest du Bassin parisien. L'emboîtement des nappes dans le domaine synclinal est au contraire mis en relation avec la subsidence de cette partie de la baie de Seine appartenant au domaine géologique de la Manche centrale.

REMERCIEMENTS

La thèse de Massinissa Benabdellouahed a été co-financée par le Conseil Régional de Basse-Normandie et le BRGM. Les analyses par ERADATA et la confection lames minces ont été financées par le programme de recherche « Plateau continental » du BRGM. Nous remercions les équipages des NO Thalía (Ifremer / Genavir), Côte d'Aquitaine et Côte de la Manche (CNRS / INSU) grâce auxquels les missions de sismique et de prélèvements ont pu être réalisées. Enfin, nous remercions vivement Phil Gibbard et Gilles Lericolais pour leurs commentaires et corrections, ainsi que Sylvie Coutard pour son travail d'édition.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALDUC D., 1979 - *La Manche orientale : étude géomorphologique du réseau des paléovallées*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 146 p.
- ALDUC D., AUFFRET J.-P., CARPENTIER G., LAUTRIDOU J.-P., LEFEBVRE D. & PORCHER M., 1979 - Nouvelles données sur le Pléistocène de la basse vallée de la Seine et son prolongement sous-marin en Manche orientale. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, 16 (2), 27-33.
- AUFFRET J.-P. & ALDUC D., 1977 - Ensembles sédimentaires et formes d'érosion du Quaternaire sous-marin de la Manche orientale. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, 14 (4), 71-75.

- AUFFRET J.-P. & LARSONNEUR C., 1977 - Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord du Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, **64** (2), 21-33.
- AUFFRET J.-P., ALDUC D., LARSONNEUR C. & SMITH A.J., 1980 - Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale. *Annales de l'Institut Océanographique*, Paris, **56** (8), 21-35.
- AUFFRET J.-P., ALDUC D. & LARSONNEUR C., 1982 - *La Manche orientale, carte des paléovallées et des bancs sableux*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.
- BENABDELLOUAHED M., DUGUÉ O., TESSIER B., THINON I., GUENNOC P. & BOURDILLON C., soumis - Mesozoic and cenozoic geological history of the Bay of Seine. Contribution of new high resolution seismic data. *Bulletin de la Société géologique de France*.
- DUGUÉ O., 2007 - *Le Massif armoricain dans l'évolution mésozoïque et cénozoïque du nord-ouest de l'Europe: contrôles tectonique, eustatique et climatique d'un bassin intracratonique (Normandie, mer de la Manche, France)*. Mémoires de Géosciences Rennes, Hors-Série, **6**. Géosciences Rennes, Rennes, 335 p.
- GRAINDOR M.-J., 1964 - Le Quaternaire marin de Normandie. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, **54**, 1-15.
- GROUPE NOROIS, 1972 - Contribution à l'étude stratigraphique des terrains affleurant en Manche centrale et orientale. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, **79**, 123-170.
- GUYADER J., 1968 - *Le Jurassique supérieur de la Baie de la Seine. Étude stratigraphique et micropaléontologique*. Thèse de Doctorat-Ingénieur, Université de Paris, Paris, 269 p.
- GUYADER J., 1977 - Le Quaternaire de la zone portuaire havraise. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, **64** (4), 39-63.
- LARSONNEUR C., 1971 - *Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Caen, Caen, 394 p.
- LARSONNEUR C., HORN R., AUFFRET J., HOMMERIL P. & MOAL A., 1974 - Géologie de la partie méridionale de la Manche centrale. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **279** (1288), 145-153.
- LARSONNEUR C. (resp.) & WALKER P. (coll.), 1982 - *Le golfe normand-breton: synthèse sédimentologique*. Contrat CNEXO 81/6646, Université de Caen, Laboratoire de Géologie marine, Caen, 79 p.
- LAUTRIDOU J.-P., MASSON M., PAEPE R., PUISSEUR J. & VERRON G., 1974 - Loess, nappes alluviales et tufs de Saint-Pierre-lès-Elbeuf, près de Rouen. Les terrasses de la Seine de Muids à Caudebec. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **11** (3-4), 193-201.
- LAUTRIDOU J.-P., LEFEBVRE D., LÉCOLLE F., CARPENTIER G., DESCOMBES J., GAQUEREL C. & HUAULT M.-F., 1984 - Les terrasses de la Seine dans le méandre d'Elbeuf, corrélations avec celles de la région de Mantes. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **21** (1-3), 27-32.
- LAUTRIDOU J.-P., AUFFRET J.-P., BALTZER A., CLET M., LÉCOLLE F., LEFEBVRE D., LERICOLAI G., ROBLIN-JOUE A., BALESCU S., CARPENTIER G., DESCOMBES S. & ROUSSEAU D.-D., 1999a - Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **170** (4), 545-558.
- LAUTRIDOU J.-P., BAIZE S., CLET M., COUTARD J.-P. & OZOUF J.-C., 1999b - Les séquences plio-pléistocènes littorales et estuariennes de Normandie. *Quaternaire*, **10** (2-3), 161-169.
- LAUTRIDOU J.-P., AUGUSTE P., CARPENTIER G., CORDY J., LEBRET P., LECHEVALIER C. & LEFEBVRE D., 2003 - L'Eemien et le Pléistocène moyen récent fluvio-marin et continental de la vallée de la Seine de Cléon au Havre (Normandie). *Quaternaire*, **14** (1), 25-30.
- LEFEBVRE D., ANTOINE P., AUFFRET J.-P., LAUTRIDOU J.-P. & LÉCOLLE F., 1994 - Réponses de la Seine et de la Somme aux événements climatiques, eustatiques et tectoniques du Pléistocène moyen et récent: rythmes et taux d'érosion. *Quaternaire*, **5** (3-3), 165-172.
- LERICOLAI G., 1997 - *Évolution plio-quaternaire du fleuve Manche: Stratigraphie et Géomorphologie d'une plateforme continentale en régime périglaciaire*. Thèse de Doctorat Université Bordeaux 1, Bordeaux, 265 p.
- LERICOLAI G., AUFFRET J.-P., BOURILLET J.-F., BERNÉ S., GUENNOC P., LE DREZEN E., NORMAND A. & GUILLOCHÉAU F., 1995 - L'énigmatique Fosse Centrale de la Manche: une approche de sa morphologie et de son remplissage par géophysique haute résolution. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2, Sciences de la Terre et des Planètes*, **321** (1), 39-46.
- LERICOLAI G., GUENNOC P., AUFFRET J.-P., BOURILLET J.-F. & BERNÉ S., 1996 - Detailed survey of the western end of the Hurd Deep (English Channel): New facts for a tectonic origin. *Special Publication - Geological Society of London*, **117**, 203-215.
- LERICOLAI G., AUFFRET J.-P. & BOURILLET J., 2003 - The Quaternary Channel River, seismic stratigraphy of its palaeovalleys and deeps. *Journal of Quaternary Science*, **18** (3-4), 245-260.
- MICHEL J., 1968 - Étude sédimentologie des forages dans l'estuaire de la Seine, port du Havre. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, **58**, 9-17.
- QUESNEY A., 1983 - *Manche occidentale et mer Celtique: étude des paléovallées, des fosses et des formations superficielles*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 162 p.