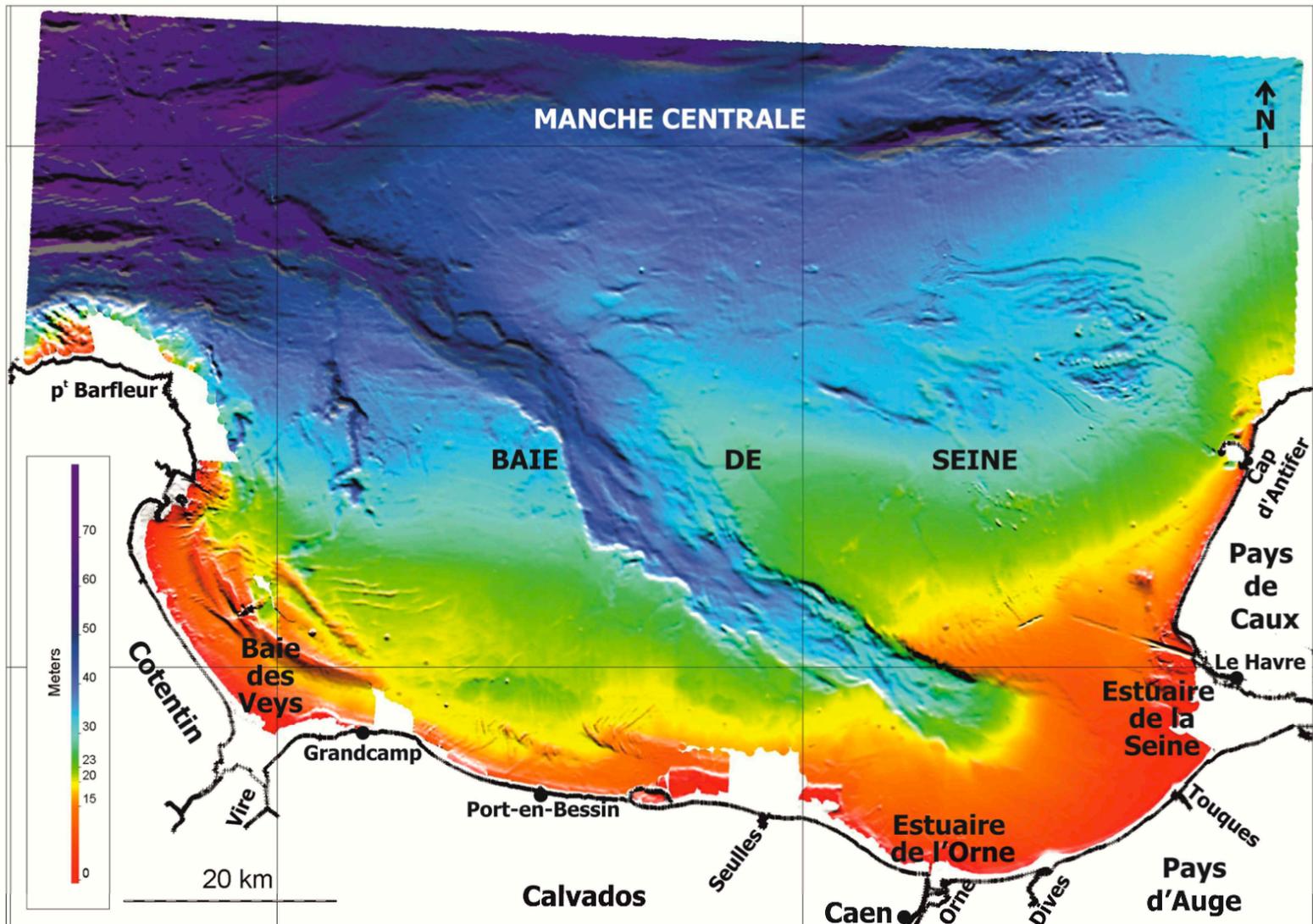


Étude bibliographique sur la géologie et élaboration du modèle géologique initial de la Baie de Seine



MNT bathymétrique de la baie de Seine (source Benabdellouahed, 2012)

Version	Date	Remarques
1.0	4/02/21	Transmission à DNV-GL
1.5	9/03/21	Transmission à DNV-GL
1.6	15/03/21	Transmission à DNV-GL

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable : en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des indications et énonciations de **Gaïa – Terre bleue** ne saurait engager la responsabilité de celle-ci.

Crédit photographique : **Gaïa – Terre bleue** (sauf mention particulière)

Auteurs

Didier Grosdemange, Océanologue
Matthieu le Tixerant, géomaticien-géographe

Gaïa - Terre bleue

Bureau n°6 – Criée Ouest
29900 Concarneau - France
06 08 21 05 67

dgrosdemange@gaia-terrebleue.fr

www.gaia-terrebleue.fr

Sommaire

1. OBJECTIF DE LA PRESENTE NOTE	6
2. RAPPEL DE L'HISTORIQUE DES ETUDES GEOLOGIQUES SUR LA BAIE DE SEINE	7
3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET BATHYMETRIQUE DE LA BAIE DE SEINE	7
4. HYDRODYNAMISME ACTUEL	11
4.1. MARNAGE	11
4.2. COURANTS DE MAREE	12
4.3. RAPPEL SUR LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE	12
4.4. RAPPEL SUR LA GRANULOMETRIE	14
5. CARACTERISTIQUE DU BASSIN SEDIMENTAIRE	15
5.1. CARACTERISATION GENERALE	15
5.2. CISAILLEMENT ET TRANSPORT	16
5.3. PEUPELEMENTS BENTHIQUES	17
6. ÉPAISSEUR DE SEDIMENT AU-DESSUS DU SUBSTRATUM	18
7. SUBSTRATUM DE LA BAIE DE SEINE	19
7.1. STRATIGRAPHIE	19
7.2. DISCONTINUITES	20
7.3. STRUCTURATION	21
7.4. SYNTHESE ET REVISION DE LA CARTE GEOLOGIQUE	21
7.5. LE FLEUVE SEINE PLIO-QUATERNAIRE EN BAIE DE SEINE	24
7.6. CONCLUSION SUR LA CARTE GEOLOGIQUE REVISEE ET LE REMPLISSAGE ALLUVIAL	26
8. CONCLUSION GENERALE	28
8.1. DETAIL SUR LE CORRIDOR OUEST	28
8.2. DETAIL DE LA ZONE POTENTIELLE DU PARC EOLIEN	29
8.3. DETAIL DU CORRIDOR EST	29
9. BIBLIOGRAPHIE	31
10. GLOSSAIRE	32
11. ÉCHELLES STRATIGRAPHIQUE DES TEMPS GEOLOGIQUES	34

Table des figures

Figure 1 : Aire de l'étude géologique de l'AO4 (source DGEC)	6
Figure 2 : Figure 14 : Topographie de la Manche et localisation des sites étudiés (source Duclos, 2013).....	8
Figure 3 : Isopaques des nappes alluviales et des bancs sableux (Auffret et al.).....	9
Figure 4 : Carte des isohypses (même profondeur) du toit du substratum géologique de la baie de Seine établie à partir des données sismiques des campagnes des années 2010 (profondeur par rapport au 0 cote marine) (source Benabdellouahed, 2013)	9
Figure 5 : Localisation du système fluvial plio-quadernaire de la Manche et de ses différents affluents, avec leur prolongement dans les bassins versants français et anglais (Source Antoine <i>et al.</i> , 2003).....	10
Figure 6 : Profil longitudinal de la paléoSeine, de la source à la fosse centrale (d'après Lautridou, 1985 ; Auffret et al., 1980 in Lautridou et al., 1999b).....	10
Figure 7 : Carte des marnages (source SHOM).....	11
Figure 8 : Distribution en surface des vitesses maximales des courants tidaux en m/s (A : Larssonneur <i>et al.</i> , 1982) et trajectoires résiduelles lagrangiennes issues de modélisation hydrodynamique avec un vent de secteur sud-ouest (B : Bailly du Bois et Dumas, 2005).....	12
Figure 9 : modes de transport des particules dans un courant (source Web).....	13
Figure 10 : diagramme d'Huljstrom (source Web).....	13
Figure 11 : Zonéographie sédimentaire (source Auffret, 1975).....	15
Figure 12 : Tension de cisaillement sur le fond d'après le modèle d'Aldridge et Davies (Carpentier <i>et al.</i> , 2009).....	16
Figure 13 : Carte des sédiments superficiels du Bassin oriental de la Manche (modifiée par Carpentier et al., 2009 d'après Larssonneur et al., 1979 ; coordonnées WGS 84), des gradients d'affinement (Larssonneur et al., 1978).....	17
Figure 14 : Cartographie des peuplements benthiques (d'après Cabioch et al., 1978)	18
Figure 15 : Carte géologique de la baie de Seine (Auffret et al., 1982) et de son bassin versant (issu des cartes géologiques du BRGM)	19
Figure 16 : Carte géologique simplifiée de la baie de Seine montrant les principaux ensembles structuraux et lithologiques et le contour de la paléo-Seine (Benabdellouahed, 2011).....	20
Figure 17 : Carte révisée du modèle géologique de la Baie de Seine (Benabdellouahed, 2011).....	22
Figure 18 : Bloc diagramme en mètres du toit du substratum géologique établi à partir du Modèle Numérique de Terrain d'isohypse en temps double, montrant la paléoSeine, la paléoVire et les haut fond (hf) (? lacune de données) (Benabdellouahed et al., 2009 ; 2011)	24
Figure 19 : Carte des isopaques des nappes alluviales pléistocènes et des dépôts holocènes en baie de Seine, montrant les deux zones d'accumulation sédimentaire (zones A1 et A2) et la zone en érosion (zone E) pour la paléoSeine) (Benabdellouahed, 2011)	25
Figure 20 : Tracés de la paléoSeine et de ses affluents (en marron clair) superposés à la carte géologique révisée du substratum de la baie de Seine (Benabdellouahed, 2013)	25
Figure 21 : Modèle de l'évolution de la paléoSeine périglaciaire au Plio-Quaternaire en réponse aux variations climatiques (A,B,C,D) et soulèvement pléistocène (Benabdellouahed, 2011).....	26
Figure 22 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour le corridor Ouest.....	28
Figure 23 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour la zone centrale.....	29
Figure 24 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour le corridor Est	29
Figure 23 : Échelle stratigraphique des temps géologiques (source Web).....	34
Figure 24 : Coupe géologique simplifiée de la Basse-Normandie présentant les principales unités lithologiques et les grands événements géodynamiques (Ma, million d'années) entre le Paléozoïque et le Cénozoïque (Le Gall & Dugué, 2003, in : Guérin, 2003).....	35
Figure 25 : Échelle stratigraphique du Quaternaire (inspiré de Zagwijn 1985 et de Grellet et al. 1993)	36

Table des planches

Planche 1 : Aire de l'étude géologique de l'AO4 (source DGEC).....	6
Planche 2 A à 2D : Carte marine de la zone d'étude (source SHOM).....	8
Planches 3A à 3C : MNT Bathymétrique (source IFREMER)	8
Planche 4 : Marnage (source SHOM)	11
Planches 5A à 5D : Vitesses maximales des courants en vives eaux issus des modélisations 2D et 3D (source SHOM)..	12
Planches 6A à 6C : Cartes sédimentaires (source SHOM)	15
Planche 7 : Sédiments superficiels de la Manche, dite Larsonneur (source Larsonneur)	17
Planche 8 : Peuplements macrobenthiques (source SHOM).....	18
Planche 9 : Carte d'habitats physiques (source SHOM/IFREMER).....	18
Planches 10A et 10B : Épaisseurs de la couverture sédimentaire (source IFREMER)	18
Planche 11 : Zones d'intérêt pour l'exploitation des matériaux marins déterminées selon leurs potentiels extractifs ..	18
Planche 12 : Isopaques des nappes alluviales	18
Planche 13 : Extraction de matériaux	18
Planche 14 : carte géologique du BRGM au 1/1 000 000	19
Planche 15 : carte géologique du BRGM au 1/250 000 – Zone Est.....	19
Planches 16A et 16D : Cartes géologiques 1/50 000 du BRGM Littoral Est et Ouest.....	19
Planche 17 : Carte géologique de la Baie de Seine	19
Planche 18 : Carte géologique révisée de la Baie de Seine	22
Planche 19 : Carte géologique simplifiée de la baie de Seine (Auffret et al., 1982)	22
Planche 20 : Isopaques des nappes alluviales (Benabdellouahed, 2011).....	26
Planche 21 : Tracé de la paléoSeine et de ses affluents (Benabdellouahed, 2011).....	26
Planches 22A et 22B : Base géologique marine du BRGM (carottages/forages)	27

Table des tableaux

Tableau 1 : classification granulométrique générale (Migniot, 1987)	14
Tableau 2 : Notice des cartes de Natures de Fond (source SHOM)	14
Tableau 3 : Nature des formations géologiques et unités sismiques de la carte 18 (Sour Benabdellouahed, 2012)	23

1. OBJECTIF DE LA PRESENTE NOTE

Dans le cadre du développement de la filière éolienne en mer, la Programmation Pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixe un calendrier indiquant, pour les prochaines années, la localisation et la puissance maximale des projets de parcs éoliens en mer, posés ou flottants, à mettre en concurrence.

Pour chaque Appel d'offres, des études de « dérisquage » sont réalisées respectivement par la DGEC et par RTE sur la zone d'implantation du parc, du poste en mer, et les corridors de raccordement.

L'objectif de l'étude bibliographique géologique est de rassembler le maximum d'informations disponibles sur la composition du fond marin et du sous-sol pouvant permettre de faire ressortir les aléas géologiques majeurs et d'orienter la définition des choix de solutions de fondations et de raccordement réalistes.

Cette présente note traite de la Baie de Seine qui est le sujet de l'appel d'offres 4, lancé par la DGEC. La zone d'étude est reportée sur la carte suivante (voir également les planches associées, dont la planche 1).

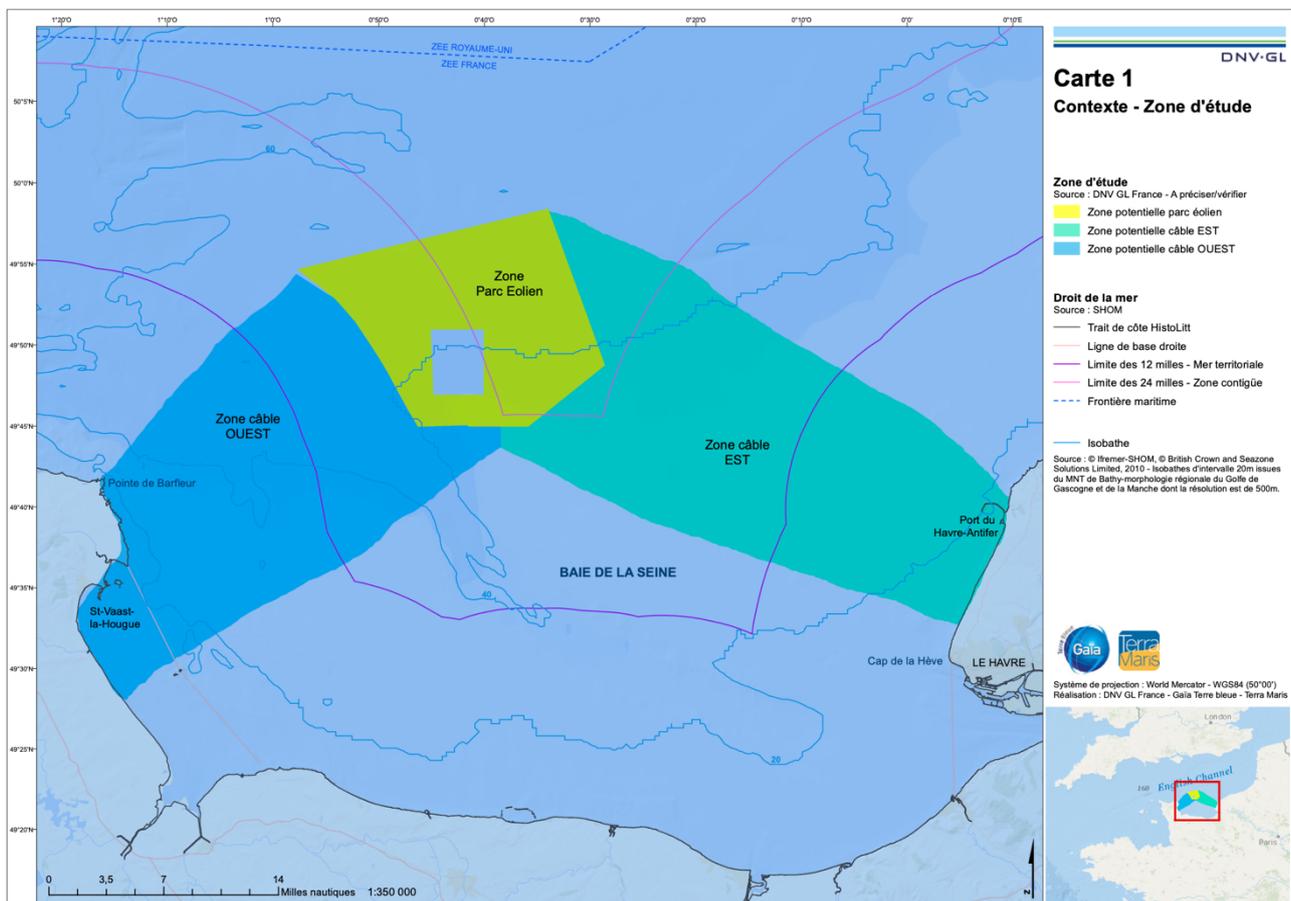


Figure 1 : Aire de l'étude géologique de l'AO4 (source DGEC)

Les planches ont été insérées à l'emplacement où elles sont citées en référence. Il est à noter que plusieurs figures sont des fac-similés d'articles scientifiques ou de thèses. Elles ne sont donc pas modifiées et ne peuvent pas faire figurer la zone du projet et les corridors. Il a donc été opté d'associer généralement à ces figures une planche dédiée qui quant à elle porte ainsi la zone du projet et les corridors.

Planche 1 : Aire de l'étude géologique de l'AO4 (source DGEC)

Les termes techniques et scientifiques sont définis dans un glossaire en annexe. Il a également des échelles de temps géologiques pour mieux comprendre les successions temporelles.

2. RAPPEL DE L'HISTORIQUE DES ETUDES GEOLOGIQUES SUR LA BAIE DE SEINE

L'expertise géologique et sédimentologique de la Baie de Seine s'est accompagnée de 3 périodes autour 4 géologues qui ont dirigés des campagnes en mer. Ces 3 périodes ont fait l'objet de publications scientifiques accessibles. Il existe aussi des investigations en mer plus récentes, mais privées, comme pour le site d'extraction de Granulats Manche Orientale Zone A (dont la zone est incluse dans la zone centrale de la zone d'étude) porté par le consortium GIE Manche Orientale (composé de DEME, STREFF et GIRARD & FOSSE), ou le parc éolien en mer de Corseilles sur mer, porté par EDF-R et ENDBRIGE. Les données privées n'ont pas pu être récupérées dans cette étude.

Les 3 périodes d'études de la Baie de Seine sont les suivantes :

- ▷ **Années 1970** : Claude Larsonneur (associé à Jean-Paul Auffret et également avec Jean-Pierre Lautridou) a soutenu sa thèse en 1971 sur la géologie du substratum et sur les dépôts meubles. Il a travaillé une trentaine d'années sur le sujet à l'Université de Caen, où il a été professeur.
- ▷ **Fin Années 1990** : Gilles Lericolais a soutenu sa thèse en 1997 sur la paléovallée de la Seine et le « fleuve Manche ». Il a travaillé une trentaine d'années à IFREMER est à ce jour chargé de mission auprès du secrétariat de la mer, qui dépend du Premier Ministre. Pour la Baie de Seine, il a travaillé avec Pol Guennoc du BRGM et Calude Augris de IFREMER.
- ▷ **Années 2010** : Massinissa Benabdhellouahed a réalisé sa thèse en 2011 sur la Seine fluviatile plio-quaternaire en Baie de Seine, en relançant des campagnes en mer. Il a publié plusieurs articles dans la première partie des années 2010, où il exerce à IFREMER. Il a ensuite quitté la recherche public en 2017, où il a travaillé dans des entreprises de géotechnique. Il est actuellement enseignant au CESFA BTP (Nanterre). Pour la Baie de Seine, il a collaboré pour les campagnes en mer avec Pol Guennoc du BRGM.

Les principales publications sont donc les suivantes et font l'objet de l'étude de cette présente note :

- ▷ 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.
- ▷ LERICOLAIS 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.
- ▷ BENABDELLOUAHED M., 2011 - La Seine fluviatile plio-quaternaire en baie de Seine: évolution morphologique et sédimentaire (rôle du substratum géologique et des cycles climato-eustatiques). Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 300 p.

3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET BATHYMETRIQUE DE LA BAIE DE SEINE

La Manche est une mer épicontinentale et intracontinentale du Nord-Ouest de l'Europe. Zone maritime de transition entre l'océan Atlantique et la Mer du Nord, elle forme un couloir entre le sud de la Grande-Bretagne et le nord-ouest de la France.

Elle est délimitée à l'ouest de la mer Celtique par une limite arbitraire entre l'île Vierge (Finistère, France) et le cap Lizard (Cornouaille, Royaume-Uni) et à l'est par le détroit du Pas-de-Calais. Sa longueur est d'environ 500 km. Sa largeur décroît de 150 km à l'ouest à 35 km à l'est. Elle sera plus large au droit du golfe Normand-Breton (250 km) et de la Baie de Seine (170 km) et plus étroite au droit de la presqu'île du Cotentin. Sa profondeur décroît d'ouest en est, d'environ -110 m jusqu'à des profondeurs atteignant les -15 m au niveau du détroit du Pas-de-Calais.

Au niveau de la presqu'île du Cotentin, la Manche se subdivise en deux grands ensembles morpho-structuraux aux caractéristiques hydrosédimentaires différentes : la Manche Occidentale et le Bassin oriental de la Manche (Cabioch, 1968). La Manche Occidentale est un entonnoir synclinal ouvert vers l'ouest, bordé sur ses deux flancs par des massifs hercyniens : le massif armoricain côté français, le massif de Cornouailles et Devon côté britannique. Elle est plus profonde et largement influencée par les eaux atlantiques. Le Bassin oriental de la Manche est le prolongement géologique des bassins sédimentaires de Paris et de Londres et est influencé par le seul grand fleuve se déversant en Manche, le long des côtes françaises, la Seine. Elle est peu influencée par les eaux atlantiques contrairement à la Manche Occidentale.

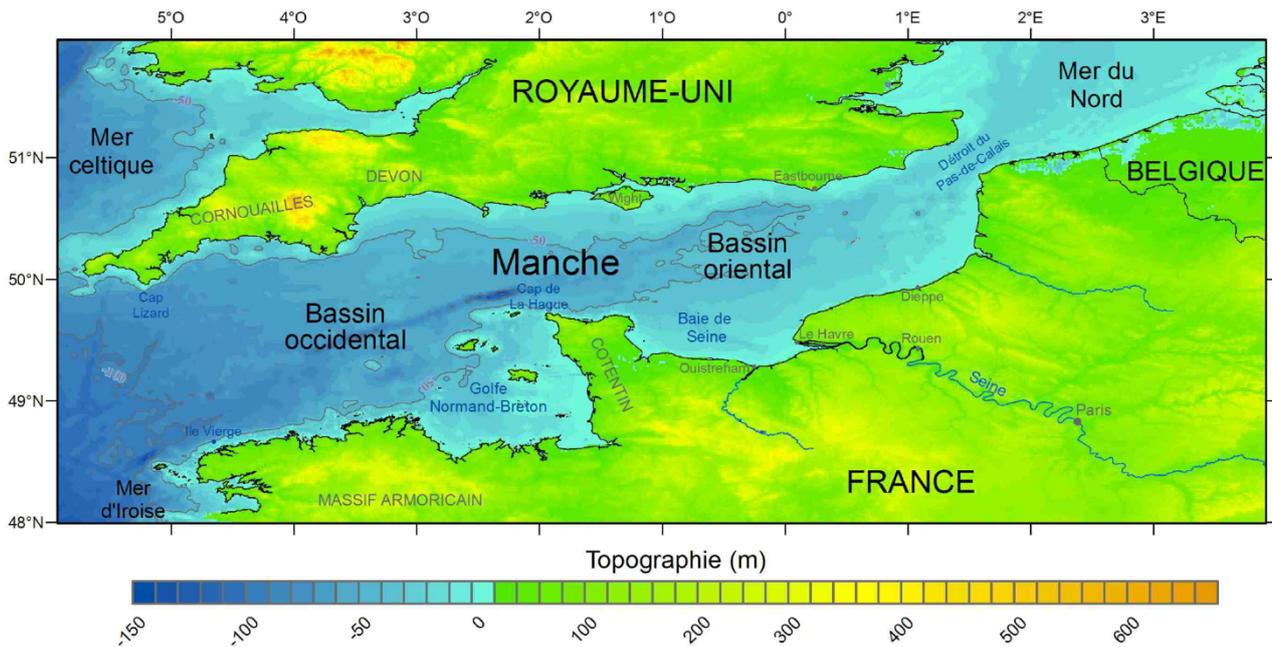


Figure 2 : Figure 14 : Topographie de la Manche et localisation des sites étudiés (source Duclos, 2013)

Planche 2 A à 2D : Carte marine de la zone d'étude (source SHOM)

La série de planches 2 présente la bathymétrie de la zone d'étude, issue des cartes SHOM. Au premier abord, la zone semble homogène avec des profondeurs :

- ▷ De 34 à 44 m CM (cote marine, soit en dessous du zéro hydrographique) sur la zone centrale (zone possible d'implantation d'un parc de 1 GW)
- ▷ De 40 à 20 m du fuseau Ouest pour le câble export (vers Barfleur), avec une isobathe des 20 m à 3 milles nautiques de la côte
- ▷ De 40 à 20 m du fuseau Est pour la câble export (vers Antifer), avec une isobathe des 20 m à 3 milles nautiques de la côte.

Les pentes sont donc faibles du centre de la Baie vers l'Est ou l'Ouest de celles-ci.

Cependant, le Modèle Numérique de Terrain permet de mieux comprendre le tracé laissé par la paléo-vallée de la Seine, issu de la dernière transgression flandrienne (16 000 ans Before Present B.P.).

Planches 3A à 3C : MNT Bathymétrique (source IFREMER)

En effet, au début de la transgression du Quaternaire (période glaciaire), le niveau d'eau était autour de 110 m CM (soit 110 m plus bas que le zéro hydrographique actuel), soit au niveau de la fosse centrale de la Manche au Nord-Est du Cotentin (Lautridou et al., 1999b) et. La fonte des glaces a fait remonter ce niveau d'eau, au niveau 10 m CM en environ 9000 ans, noyant ainsi la vallée de la Seine qui sinuait sur l'actuelle Baie. Cette paléovallée a été comblée par des matériaux sédimentaires, mais ce comblement n'est pas complètement au même niveau que le fond en bordure. La trace de l'ancienne paléo-vallée fluviale reste ainsi bien visible sur le MNT.

Lors de la dernière période glaciaire du Würm (80 000 / 10 300 B.P.), le Pléniglaciaire (environ 25 000 ans B.P.) définit le niveau marin le plus bas du maximum glaciaire à environ 130 m CM (Lautridou, 1985). Le Bassin oriental de la Manche était alors exondé. La dernière transgression, dite flandrienne, débute vers 16 000 B.P. (Larsonneur, 1971) par une phase de hausse rapide du niveau de la mer jusqu'à 7 000 B.P. où le rivage atteint alors la cote de 10 m CM puis par une phase de hausse plus lente.

Le Bassin oriental de la Manche forme une gouttière peu profonde, légèrement inclinée (0,01%) et évasée vers l’Ouest. Sa profondeur peut atteindre 15 m au niveau du détroit du Pas-de-Calais et dépasser les 70 m au large du Cotentin. Elle est formée par une vaste plaine d’érosion sous-marine. Elle est parcourue par un réseau discontinu de dépressions marquant en partie un vaste réseau de paléovallées (paléovallée septentrionale, paléovallée médiane, paléo-Somme et paléo-Seine), creusées lors de la dernière régression et partiellement comblées par des alluvions fluviales déposées à cette époque et des sédiments charriés lors de la dernière transgression. Cette plaine est reliée au rivage par un court talus pré-littoral d’une amplitude globale de 20 m avec une pente de 0,3 à 0,5 %. Au nord du Cotentin, le socle anté-Mésozoïque forme un pédiment jalonné de roches dures plus en relief. En Baie de Seine, au large de la Seine et de la Vire et au large de la Picardie et du Nord-Pas-de-Calais, d’importants prismes sableux, modelés de bancs sableux, recouvrent la plaine d’érosion (Auffret et al., 1982; Figure 15).

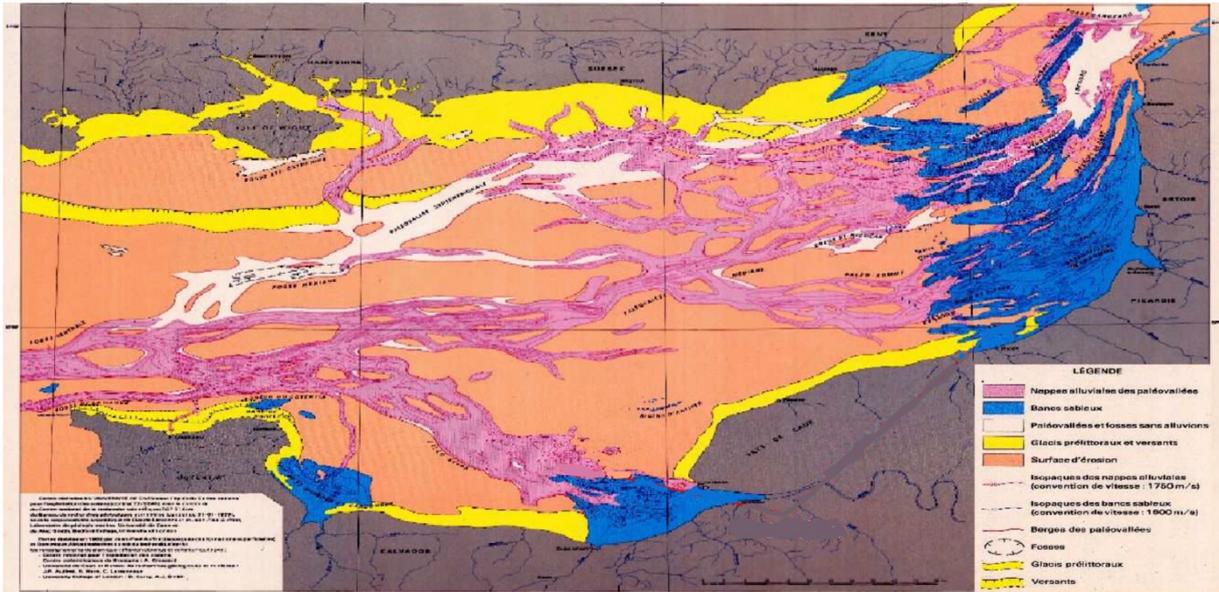


Figure 3 : Isopaques des nappes alluviales et des bancs sableux (Auffret et al.,).

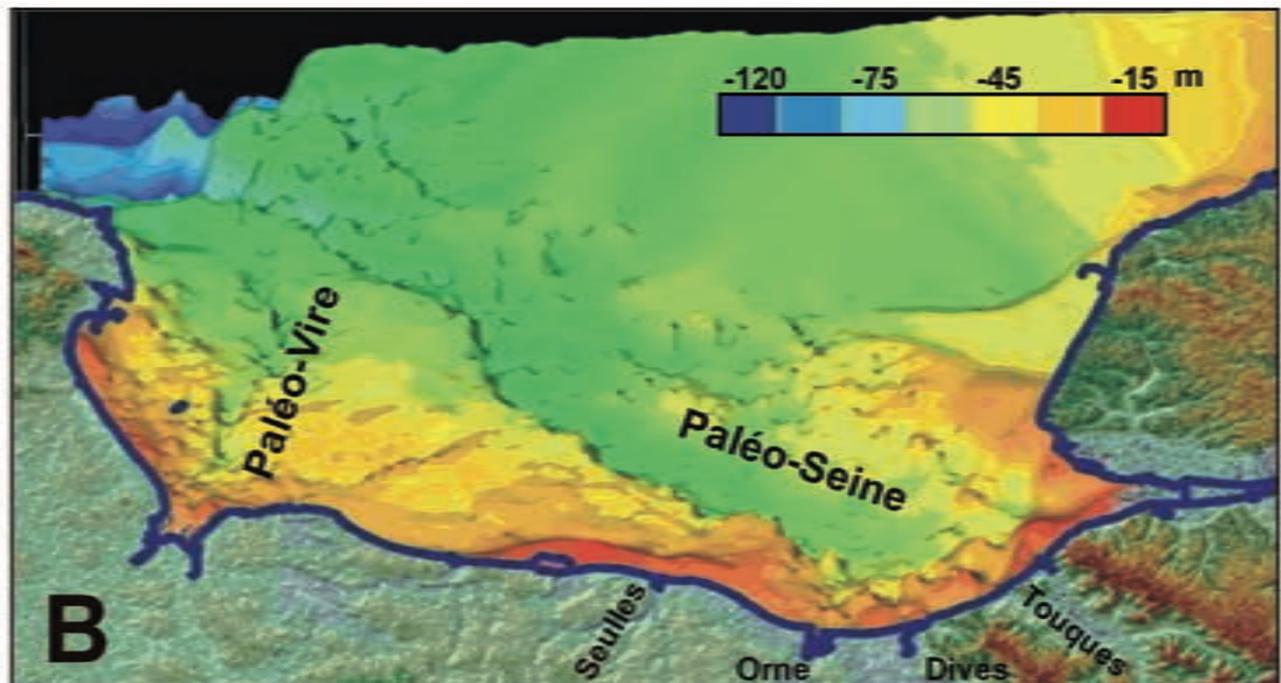


Figure 4 : Carte des isohypses (même profondeur) du toit du substratum géologique de la baie de Seine établie à partir des données sismiques des campagnes des années 2010 (profondeur par rapport au 0 cote marine) (source Benabdellouahed, 2013)

La figure 3 représente les isopaques, c'est-à-dire les mêmes épaisseurs des couches sédimentaires. Elle permet de comprendre le système des paléovallées du quaternaire que l'on retrouve sur la figure 5. Ce système fluvial a creusé le substratum (ou socle rocheux) qui s'est par la suite en partie rempli par des sédiments alluvionnaires. Cependant, malgré se remplissage qui n'a pas été forcément total, on peut encore voir les traces de ce relief sur les cartes bathymétriques (Cf. planches 3B à 3C), c'est-à-dire sur le niveau du fond sédimentaire actuel.

La figure 4 complète les informations ci-dessus, dont les cartes représentant le niveau du fond de la mer (Cf. planches 3B et 3C et figure 3), car elle montre le relief du substratum, c'est-à-dire le relief du socle rocheux. On peut y voir les profondes rainures et stries dans celui-ci, provoqué par l'écoulement des fleuves du Quaternaire.

La figure 5 présente une coupe stratigraphique qui suit le lit de la « PaléoSeine ».

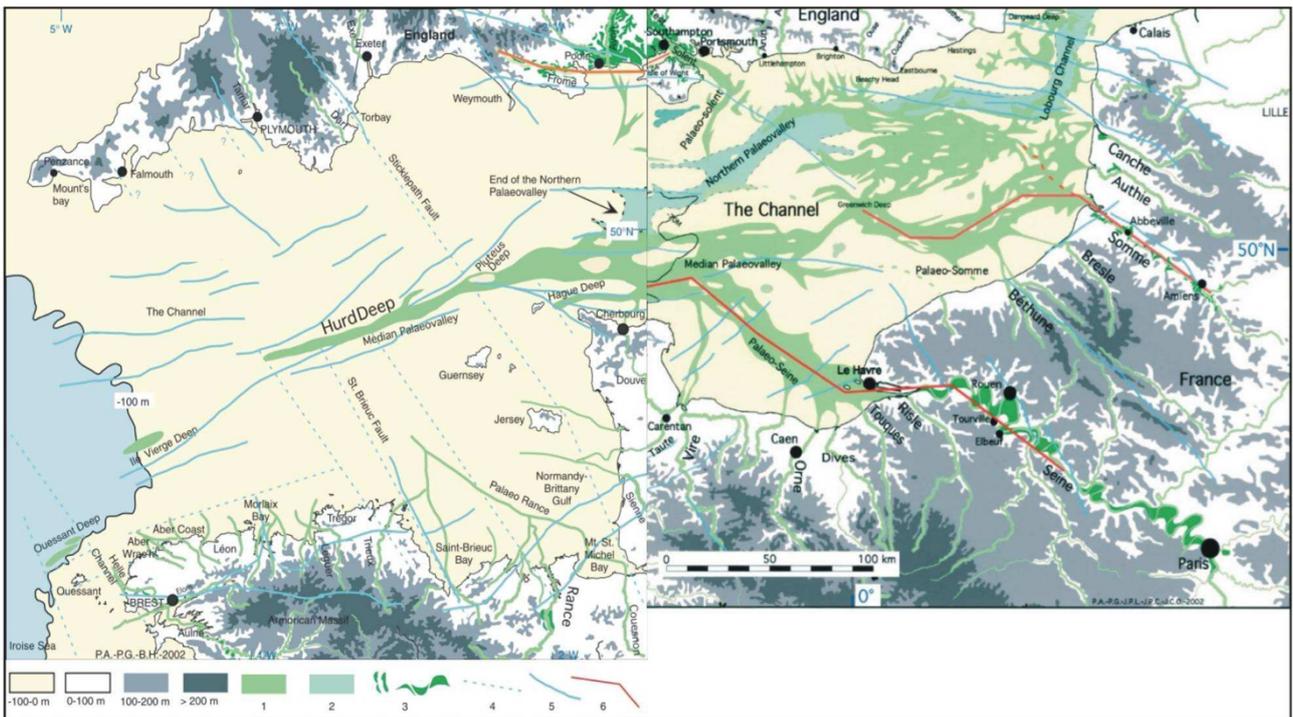


Figure 5 : Localisation du système fluvial plio-quaternaire de la Manche et de ses différents affluents, avec leur prolongement dans les bassins versants français et anglais (Source Antoine *et al.*, 2003).

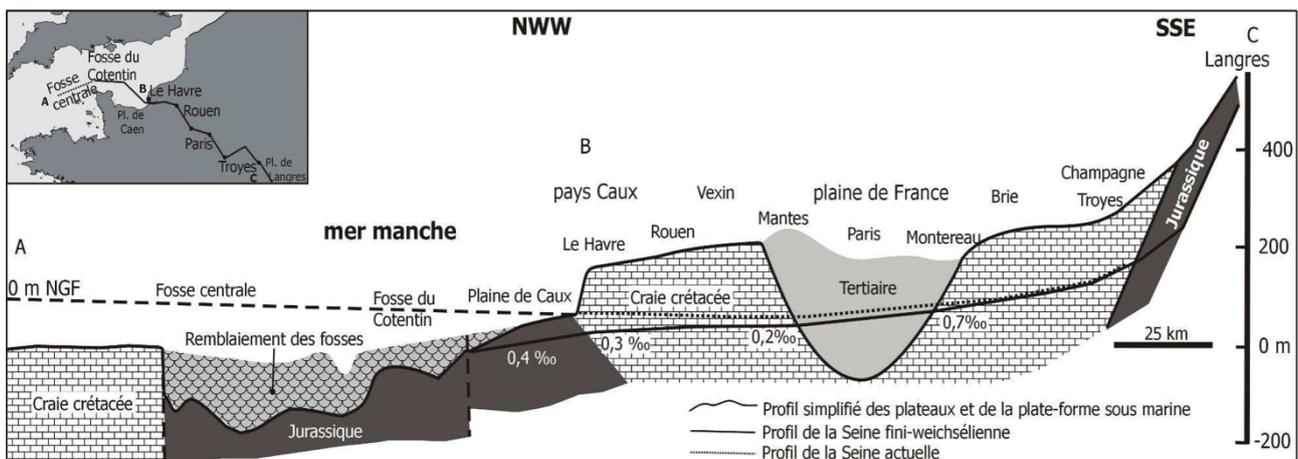


Figure 6 : Profil longitudinal de la paléoSeine, de la source à la fosse centrale (d'après Lautridou, 1985 ; Auffret *et al.*, 1980 in Lautridou *et al.*, 1999b)

4. HYDRODYNAMISME ACTUEL

4.1. MARNAGE

Le Bassin oriental de la Manche est une mer macrotidale dont le marnage est principalement compris entre 4 et 8 m. Le marnage est minimum (2 m) autour de l'Île de Wight et maximum (9 m) à proximité de la Baie de Somme.

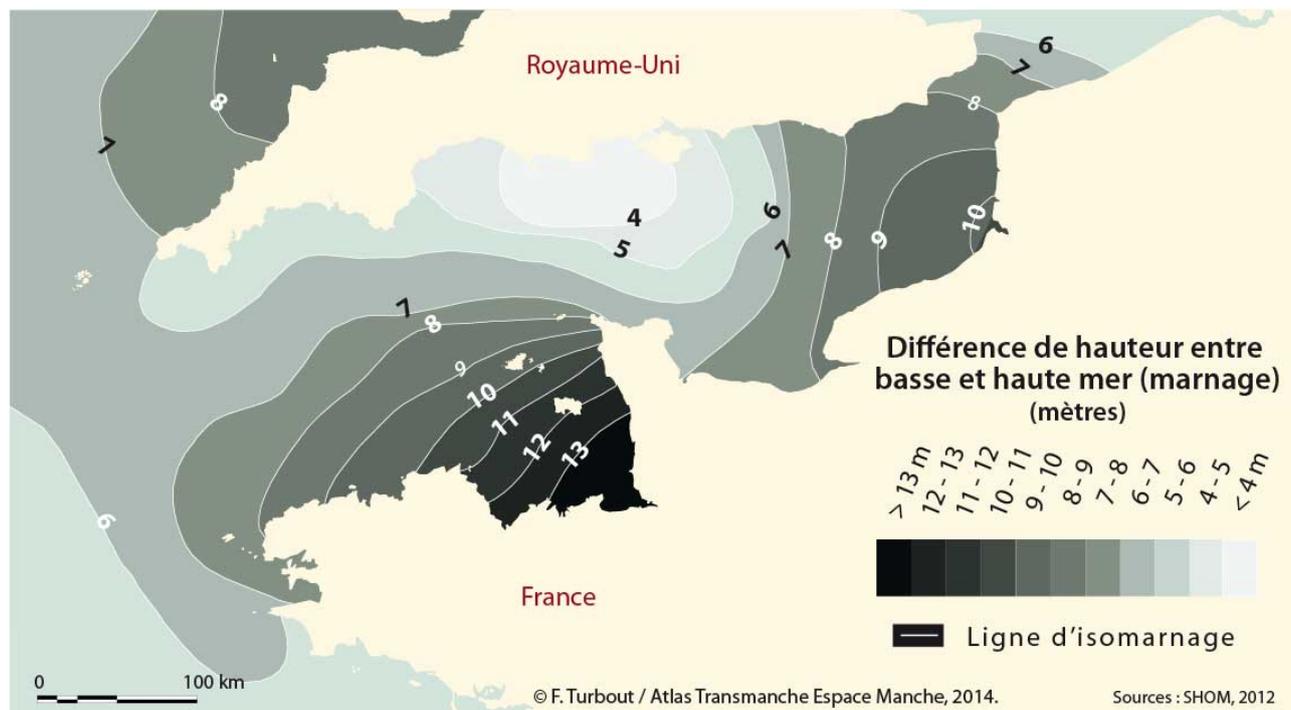


Figure 7 : Carte des marnages (source SHOM)

Planche 4 : Marnage (source SHOM)

L'onde de marée est de type semi-diurne. Sa phase progresse d'ouest en est avec une période d'environ 12h24min. L'onde se déforme progressivement et devient dissymétrique en direction de l'estuaire de la Seine en raison de la morphologie des fonds et de la résonance de composantes de l'onde de marée. Les courants tidaux sont globalement alternatifs. Le flot est orienté vers le Nord-Est et le jusant vers le Sud-Ouest.

À proximité des côtes, en fonction de leur morphologie, cette alternance peut être déformée comme en Baie de Seine où les courants sont sub-rotatifs. Ces fortes marées impliquent des courants rapides, dont la vitesse en surface est supérieure à 1 m/s sur la majeure partie du Bassin oriental de la Manche. Ils sont particulièrement forts au large du Cap d'Antifer et au niveau des resserrements au droit du détroit du Pas-de-Calais et plus particulièrement en surface.

Ces courants de marée sont dissymétriques avec un flot légèrement plus fort que le jusant. Cette dissymétrie est responsable d'un résiduel en direction du nord-est.

4.2. COURANTS DE MAREE

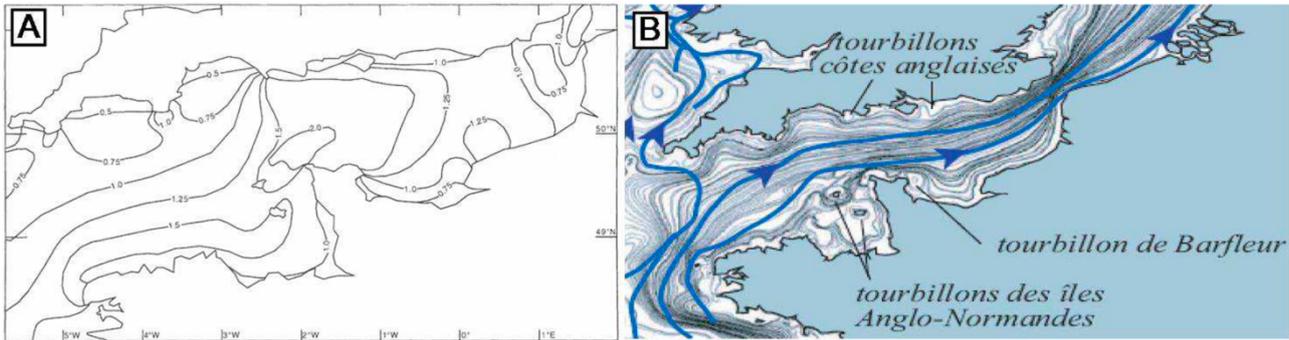


Figure 8 : Distribution en surface des vitesses maximales des courants tidaux en m/s (A : Larssonneur *et al.*, 1982) et trajectoires résiduelles lagrangiennes issues de modélisation hydrodynamique avec un vent de secteur sud-ouest (B : Bailly du Bois et Dumas, 2005).

Ce résiduel est confirmé par des modélisations numériques (Salomon et Breton, 1991; Bailly du Bois et Dumas, 2005) et des traçages in situ (Guegueniat et al., 1995) qui a permis de déterminer la circulation résiduelle des masses d'eau. Si le transport général est bien dirigé vers le Pas de Calais et la Mer du Nord, les particules, sur quelques cycles de marée, ont souvent des trajectoires oscillantes ou circulaires appelées « gyres » (par exemple autour des îles Anglo-Normandes, le tourbillon de Barfleur, etc...).

Planches 5A à 5D : Vitesses maximales des courants en vives eaux issus des modélisations 2D et 3D (source SHOM)

Les résultats issus des modèles 2D et 3D du SHOM (Cf. planche), donnent des valeurs de vitesses maximales de courants (lors des marées de vives eaux) :

- ▷ Faible à la côte entre 0,25 et 0,5 m/s
- ▷ Plus fort sur le corridor Est (entre 0,5 et 0,75 m/s sur le fond et de 1 à 1,25 m/s en surface)

Avec un gradient de vitesse en allant vers l'Ouest, avec :

- ▷ 0,75 à 1 m/s sur le fond dans le centre de la zone et entre 1 m/s à 1,75 m/s en surface de l'Est à l'Ouest de la zone centrale.
- ▷ De 1,25 à 1,75 m/s sur le fond sur le corridor Ouest en allant de la zone centrale vers l'atterrage le plus à l'Ouest et avec des vitesses un peu plus grandes en surface (de 1,5 à 2,25 m/s).

D'une manière générale, les vitesses sont plus grandes en surface que sur le fond. Il existe un gradient de vitesse, liée à l'onde de marée et au forçage au niveau du passage du Cotentin avec des vitesses plus fortes vers l'ouest que vers l'Est et dans la Baie.

Ces courants de marée assez forts ont permis le transport sédimentaire sur l'ensemble de la baie de Seine et notamment les remplissages des anciennes vallées.

4.3. RAPPEL SUR LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE

Le transport des sédiments peut être divisé en trois types :

- ▷ le transport en solution,
- ▷ le transport en suspension (qui peut être divisé en suspension uniforme et suspension graduelle)
- ▷ et le transport de fond ou transport par charriage.

La charge dissoute correspond aux ions (cations et anions, comme par exemple les ions K, Na, Ca) qui sont transportés en solution dans l'eau.

La charge en suspension et la charge de fond correspondent aux flux solides (particules).

La charge en suspension (Matière en suspension ou MES) est constituée par des matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond. Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de limons.

La charge de fond est formée de matériaux trop grossiers pour être mis en suspension à cause de leur densité et de la vitesse du courant. Ces particules glissent, roulent ou se déplacent par saltation (par saut) sur le fond.

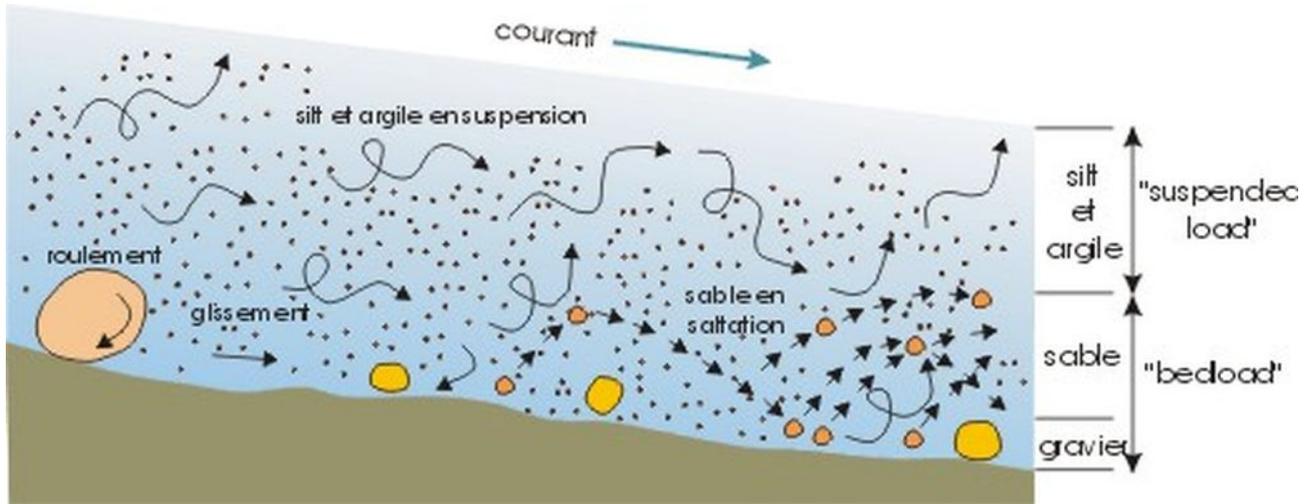


Figure 9 : modes de transport des particules dans un courant (source Web)

La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leur transport (et sur leur vitesse de sédimentation). Ces relations sont synthétisées par le diagramme de Hjulstrom . Ce graphe (essentiellement basé sur des expériences en laboratoire) montre la vitesse minimale d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable. Si l'on examine d'abord la partie supérieure de ce graphe (érosion des particules), la portion de la courbe représentant l'érosion des particules moyennes à grossières (sable fin à galets) semble logique : la vitesse du courant nécessaire pour mobiliser des grains augmente avec leur granulométrie. Pour les particules fines, par contre, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée des particules fines, surtout liée à un effet électrostatique. La partie inférieure du graphe montre la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt.

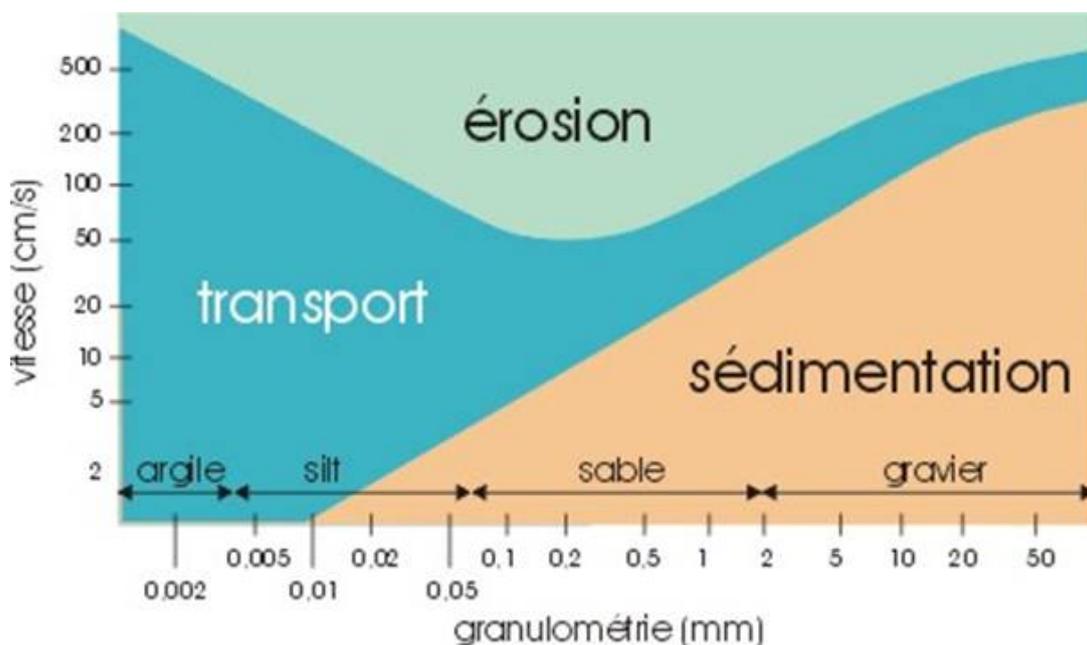


Figure 10 : diagramme d'Huljstrom (source Web)

Si l'on transpose cela en étudiant la planche 5B, on peut ainsi schématiser que les courants de fond :

- ▷ du corridor Est avec des vitesses maximales entre 0,25 à 0,5 m/s peuvent transporter des particules jusqu'à quasiment 2 mm (gravier)
- ▷ de la zone centre avec des vitesses maximales entre 0,75 et 1 m/s peuvent ainsi transporter des particules jusqu'à quasiment 10 mm (gravier)
- ▷ du corridor Ouest avec des vitesses maximales entre 1 m/s à presque 2 m/s (Barfleur) peuvent ainsi transporter des particules jusqu'à environ 20 mm (cailloutis graveleux).

La vitesse des courants nous donne ainsi des informations sur la nature des fonds. Les hypothèses de transport précédentes sont d'ailleurs confirmées par les cartes sédimentaires (Cf. paragraphe ci-dessous).

4.4. RAPPEL SUR LA GRANULOMETRIE

La granulométrie est la taille des grains des sédiments. La table suivante définit les classes par taille.

Dénomination	classe	Diamètre des grains
Vases	Colloïdes	< 0,12 µm
	Précolloïdes	0,12 – 4 µm
	Silts	4 – 63 µm
Sables	Sables très fins	63 – 125 µm
	Sables fins	125 - 250 µm
	Sables moyens	250 – 500 µm
	Sables grossiers	500 – 1 000 µm
	Sables très grossiers	1 – 2 mm
Graviers, galets, cailloutis et blocs	Graviers	2 – 20 mm
	Galets / Cailloutis	20 – 200 mm
	Blocs	> 200 mm

Tableau 1 : classification granulométrique générale (Migniot, 1987)

Les couleurs dans le tableau renvoient aux couleurs des cartes sédimentaires.

Le SHOM donne également une définition quantitative pour ces cartes :

Sédiment :	Ensemble constitué par la réunion de particules, détritiques ou biogènes, plus ou moins grossières ayant subi un transport par un ou plusieurs agents de transport.
Cailloutis :	Sédiments contenant de 50 à 100% de particules supérieures à 20 millimètres.
Cailloutis graviers :	Sédiments contenant des cailloutis et de 15 à 50% de graviers.
Graviers :	Sédiments contenant de 50 à 100% de particules comprises entre 20 et 2 millimètres.
Sables graviers :	Sédiments contenant des sables et de 15 à 50% de graviers.
Sables :	Sédiments contenant de 50 à 100% de particules comprises entre 2 et 0,5 millimètres.
Sables vaseux :	Sables contenant entre 5 et 20% de particules inférieures à 0,05 millimètres.
Sables fins :	Sédiments contenant de 50 à 100% de particules comprises entre 0,5 et 0,05 millimètres.
Sables fins vaseux :	Sables fins contenant entre 5 et 20% de particules inférieures à 0,05 millimètres.
Vases :	Sédiments contenant de 20 à 100% de particules inférieures à 0,05 millimètres.

Tableau 2 : Notice des cartes de Natures de Fond (source SHOM)

5. CARACTERISTIQUE DU BASSIN SEDIMENTAIRE

5.1. CARACTERISATION GENERALE

Le substrat géologique consiste principalement en formations sédimentaires post-hercyniennes (vers la fin du Carbonifère de l'ère Primaire) s'appuyant sur le socle ancien de l'Armorique et de la Cornouaille. Les sédiments meubles sont en majeure partie d'origine continentale quaternaire. La subsidence étant négligeable, **ils ne forment qu'une nappe de quelques mètres d'épaisseur, sauf au niveau des fosses, partiellement remblayées, des paléovallées, des bancs et localement du prisme littoral.**

Planches 6A à 6C : Cartes sédimentaires (source SHOM)

Jean-Paul Aufret, et al., lors d'une communication de 1975, écrivait sur le modèle du bassin sédimentaire :

« Ce bassin est le siège d'une sédimentation litho-bioclastique établie depuis sa submersion par la transgression flandrienne. Le matériel siliceux est essentiellement anté-Holocène, apporté en régime périglaciaire par des agents variés. Il a été remanié et redistribué par la mer. Le matériel organogène, en majeure partie d'âge flandrien, est venu peu à peu contaminer les sédiments lithoclastiques donnant naissance à des dépôts biogènes sablo-graveleux. Ces derniers couvrent la plateforme externe en Manche occidentale, tandis que sur la plateforme interne, sous l'influence prépondérante des courants de marée, les dépôts s'ordonnent en séquences sédimentaires lithoclastiques ou litho-bioclustiques complètes ou non. Les houles n'interviennent que sur la frange littorale au-dessus d'un niveau d'énergie minimum. Aujourd'hui, bien adapté à son cadre morphologique, **le modèle sédimentaire est en équilibre avec les conditions hydrodynamiques ambiantes.** Aussi ne subit-il que des retouches dans sa composition et ses contours. Finalement, l'état présent et à priori éphémère du modèle s'intègre dans un état flandrien en cours de lente évolution. »

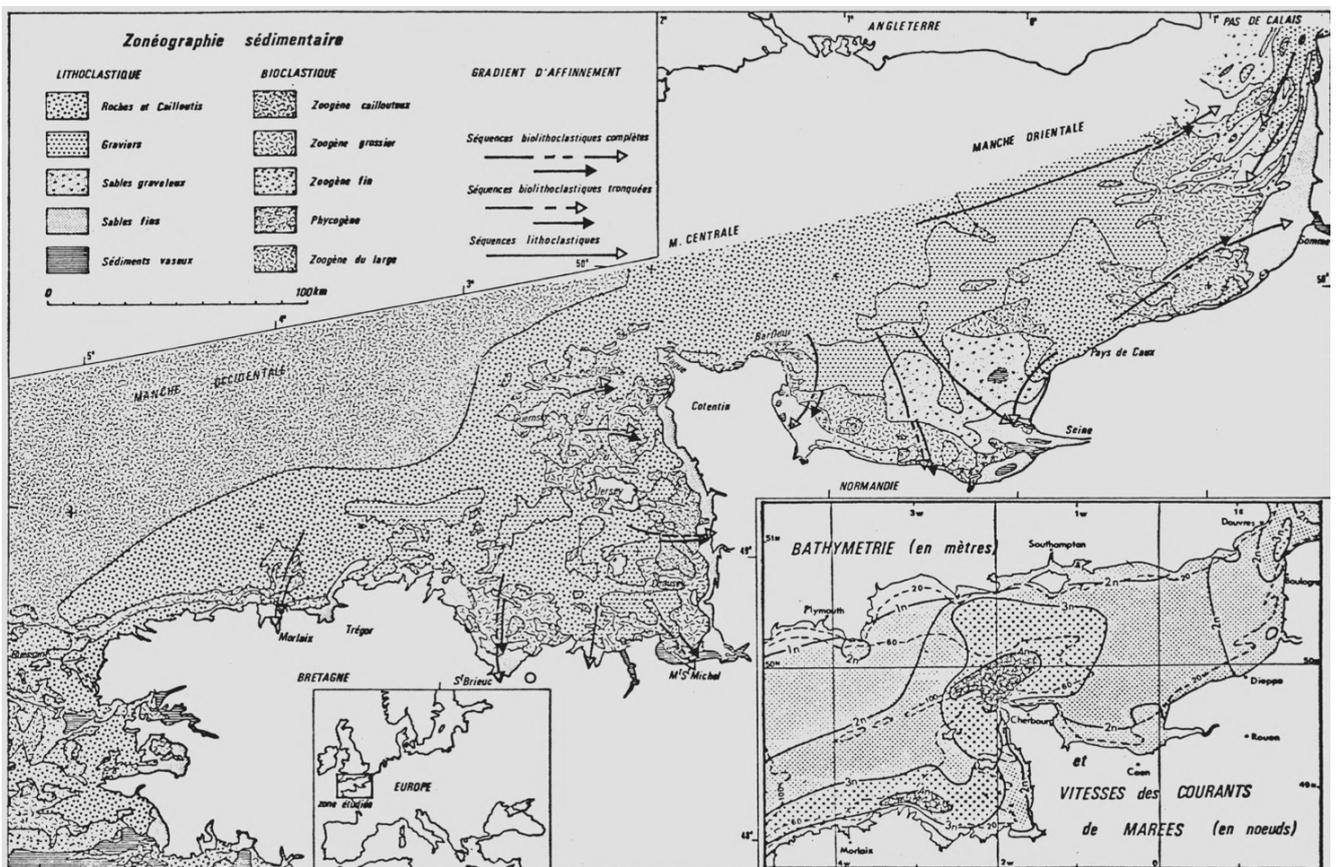


Figure 11 : Zonéographie sédimentaire (source Aufret, 1975)

5.2. CISAILLEMENT ET TRANSPORT

Le mélange dans la couverture superficielle est bien dû à la tension de cisaillement sur le fond, induit par les courants de marée (Cf. chapitre 4).

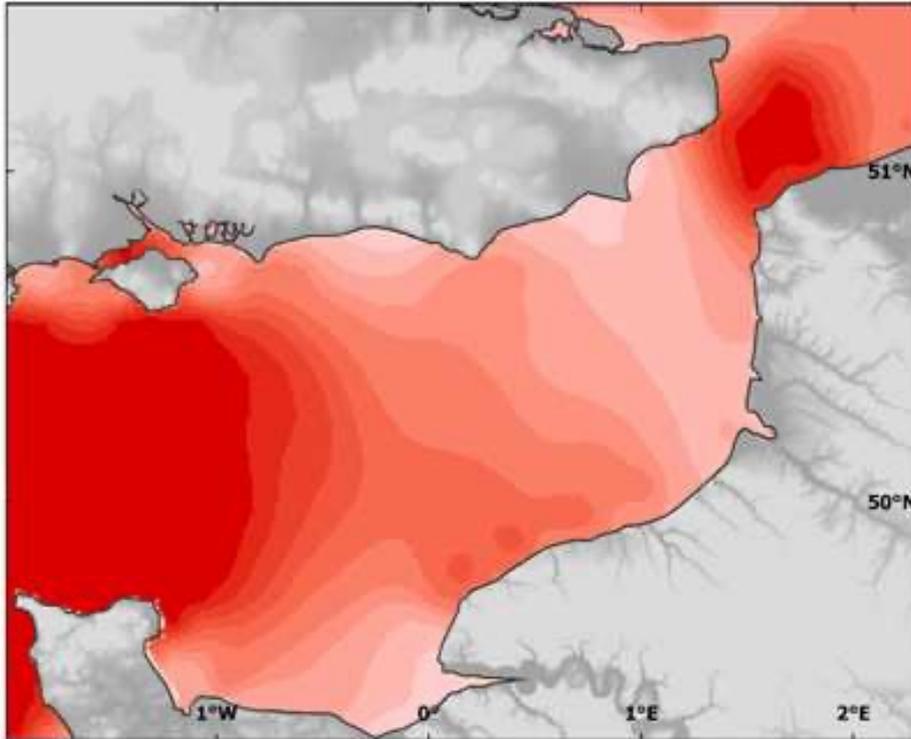


Figure 12 : Tension de cisaillement sur le fond d'après le modèle d'Aldridge et Davies (Carpentier *et al.*, 2009)

Les dépôts les plus grossiers associés aux forts courants de marée et à une tension de cisaillement importante s'étalent donc sur de grandes distances au niveau du détroit du Pas-de-Calais. **Les sédiments de type vase sont relativement rares** et sont **principalement observés en estuaire** et dans les parties internes des baies comme en Baie de Seine (Deloffre, 2005; Delsinne, 2005), Baie de Somme (Dupont, 1981) et pour les autres baies du nord de la France (Deloffre, 2005).

Des gradients d'affinement sont observés depuis le Cotentin jusqu'à l'estuaire de la Seine d'une part, et depuis le Cap d'Antifer à l'Ouest et le détroit du Pas-de-Calais à l'Est en direction de la Baie de Somme et du Sussex (Royaume-Uni) d'autre part.

Les sédiments marins en Bassin oriental de la Manche présentent également une organisation verticale. Au-dessus du substratum rocheux, un pavage de cailloutis, immobiles dans les conditions hydrodynamiques actuelles, peut être observé et surmonté, par endroits, d'une couche sablo-graveleuse mobile (Le Bot, 2001).

D'importants prismes sablo-graveleux, modelés de dunes et de bancs sableux, sont en particulier accolés à la Baie de Seine, à la Baie de Somme et aux autres petits estuaires de Picardie et du Nord de la France (Cf. Figure 3 et ci-dessous).

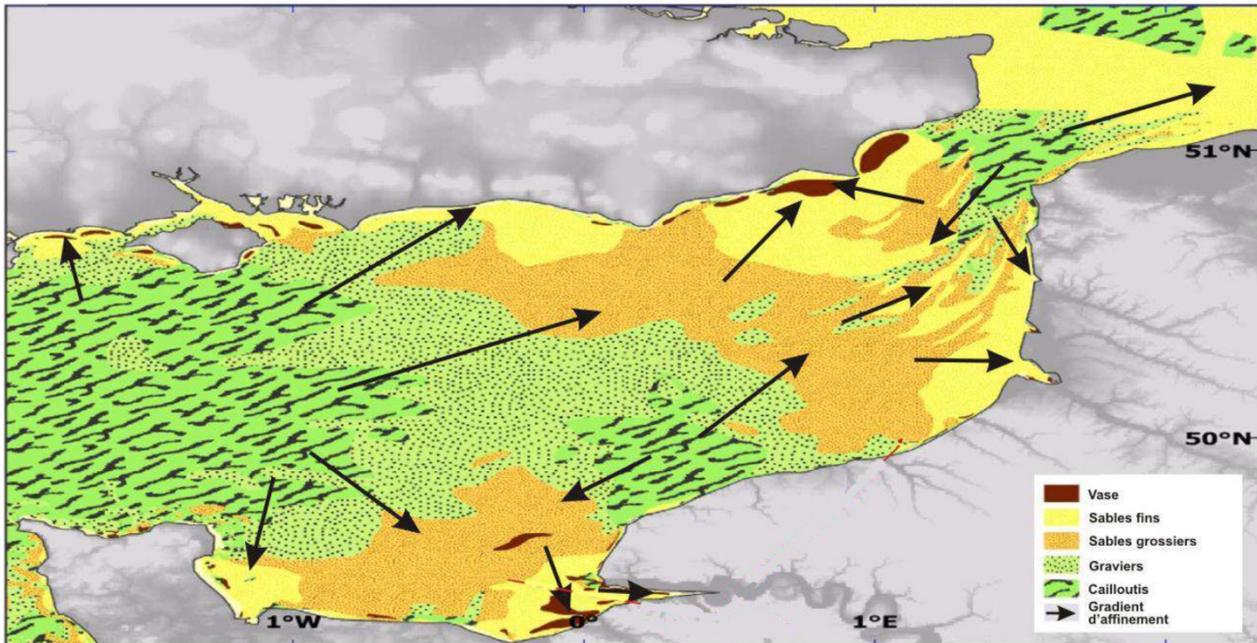


Figure 13 : Carte des sédiments superficiels du Bassin oriental de la Manche (modifiée par Carpentier et al., 2009 d'après Larsonneur et al., 1979 ; coordonnées WGS 84), des gradients d'affinement (Larsonneur et al., 1978).

Planche 7 : Sédiments superficiels de la Manche, dite Larsonneur (source Larsonneur)

5.3. PEUPELEMENTS BENTHIQUES

Le benthos regroupe les animaux qui vivent dans le sédiment. Ils sont donc étroitement associés à leur habitat (ou biotope), c'est-à-dire la taille des grains qui composent la couche sédimentaire. Ils vivent dans les 20 premiers centimètres de ces sédiments. Ces vingt premiers centimètres sont les sédiments qui peuvent être « mobiles » c'est-à-dire remaniés partiellement par des phénomènes extrêmes. Les peuplements benthiques donnent donc également une indication sur la stabilité sédimentaire et la nature sédimentaire.

Le peuplement benthique en Bassin oriental de la Manche est fortement lié à la profondeur d'eau, au type de sédiments superficiels et aux conditions hydrodynamiques.

Les peuplements benthiques sont définis aujourd'hui par certaines espèces communes, grâce à un référentiel d'habitat nommé EUNIS (European Nature Information System), mis en place depuis 1997 par l'Agence Européenne pour l'Environnement. Les travaux de synthèse de l'Ifremer ont permis de produire une carte des peuplements benthiques de la Bassin oriental de la Manche à partir de nombreux travaux anciens (Cf. figure 11 et planche n°6).

Les peuplements de cailloutis concernent plus de 70 % de la surface du bassin. Cependant la biomasse y est relativement faible. Un gradient des peuplements est observé en se rapprochant du littoral plus particulièrement en direction de l'estuaire de la Seine et de Newhaven (Royaume-Uni). Les peuplements infralittoraux et de sédiments fins y sont plus développés. Induite en partie par un contexte morfo- sédimentaire plus hétérogène, une plus grande variabilité des peuplements est observée à l'est, de Dieppe jusqu'au détroit du Pas-de-Calais.

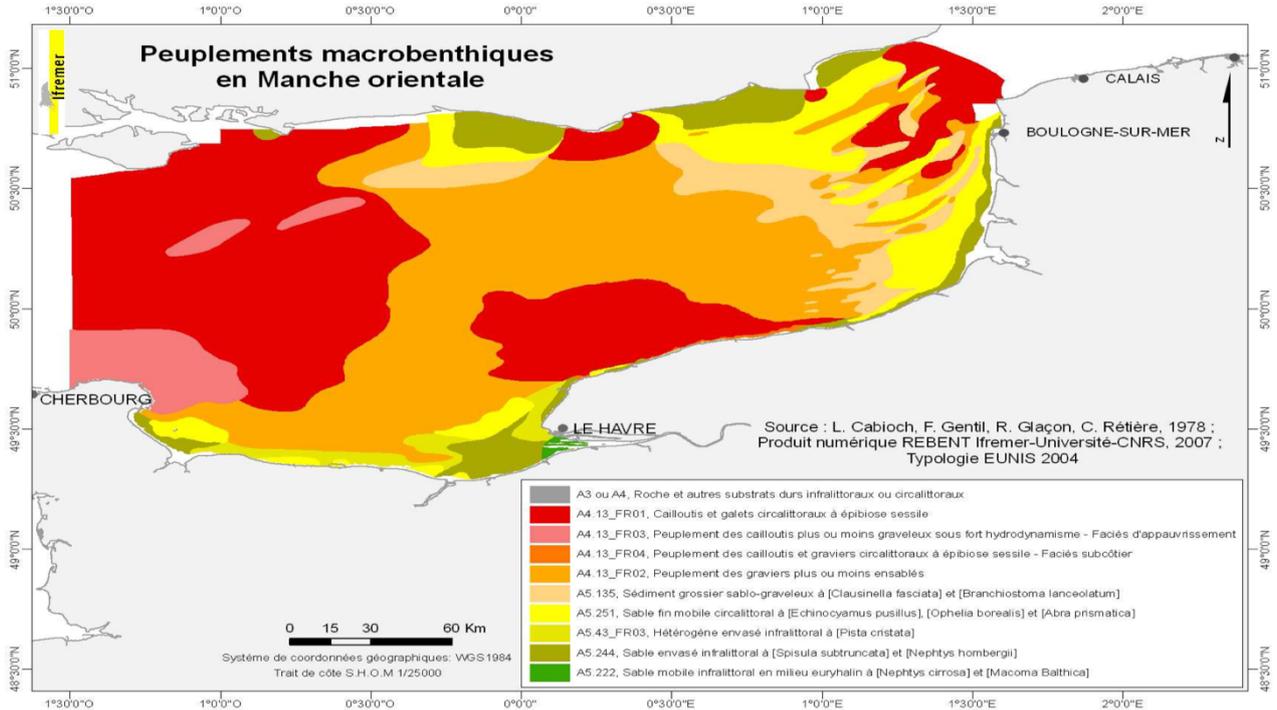


Figure 14 : Cartographie des peuplements benthiques (d'après Cabioch et al., 1978)

Planche 8 : Peuplements macrobenthiques (source SHOM)

Planche 9 : Carte d'habitats physiques (source SHOM/IFREMER)

6. ÉPAISSEUR DE SEDIMENT AU-DESSUS DU SUBSTRATUM

La caractérisation des épaisseurs de sédiments dans la Baie de Seine reste toujours issue des campagnes par sismique (sparker) de Larssonneur, Lericolaïs et Guenoc/Benabdellouhaed sur les dernières cinquante années. Certaines données ont été agrégées dans le cadre d'une mission de IFREMER pour la DGEC sur la recherche de sites potentiels d'extraction de granulats en mer.

Planches 10A et 10B : Épaisseurs de la couverture sédimentaire (source IFREMER)

Il est facilement constatable sur les cartes générales (Cf. Planches 10) que les épaisseurs de sédiments, au-dessus du substratum, dans la baie de Seine, sont de l'ordre de :

- ▷ 0 à < 5 m dans le proche côtier et sur la majorité des surfaces de la Baie de Seine
- ▷ 0 à 20 m pour la moitié de la surface du fuseau Ouest (entre la zone potentielle et la moitié du fuseau)
- ▷ 10 à 20 m sur le quart Sud-Ouest de la zone potentielle d'implantation du parc.

Cependant, cette vision très macro-échelle doit être relativisée par les cartes de synthèses des épaisseurs d'IFREMER de 2012.

Planche 11 : Zones d'intérêt pour l'exploitation des matériaux marins déterminées selon leurs potentiels extractifs

Planche 12 : Isoques des nappes alluviales

Planche 13 : Extraction de matériaux

Il apparaît que le paléo-réseau fluvial a profondément incisé le socle géologique, notamment au niveau de la zone potentielle d'implantation du parc (quart SW) et sur la partie terminale Est du fuseau allant vers l'Ouest (Barfleur). Il apparaît ainsi des inclusions de roches subaffleurant et des épaisseurs sédimentaires de 20 à 30 m, voire 30 à 40 m pour certaines zones plus au Nord.

7. SUBSTRATUM DE LA BAIE DE SEINE

Différentes cartes peuvent être étudiées pour présenter le substratum de la Baie de Seine. Il s'agit :

Planche 14 : carte géologique du BRGM au 1/1 000 000

Planche 15 : carte géologique du BRGM au 1/250 000 – Zone Est

Planches 16A et 16D : Cartes géologiques 1/50 000 du BRGM Littoral Est et Ouest

Planche 17 : Carte géologique de la Baie de Seine

7.1. STRATIGRAPHIE

Ces cartes établissent les principaux ensembles **stratigraphiques** du substratum géologique de la baie de Seine :

- ▷ Le socle armoricain et les terrains du Trias au large du Cotentin ;
- ▷ La couverture mésozoïque avec ses différentes auréoles, du Jurassique inférieur à l'Ouest, du Jurassique moyen au centre, du Jurassique supérieur à l'Est et du Crétacé au Nord de la baie (Larsonneur et al., 1974) ;
- ▷ La couverture tertiaire présente au Nord de la baie de Seine (Auffret et al., 1982) ;
- ▷ Quelques grandes failles et la présence d'une structure synclinale tertiaire au Nord de la baie.

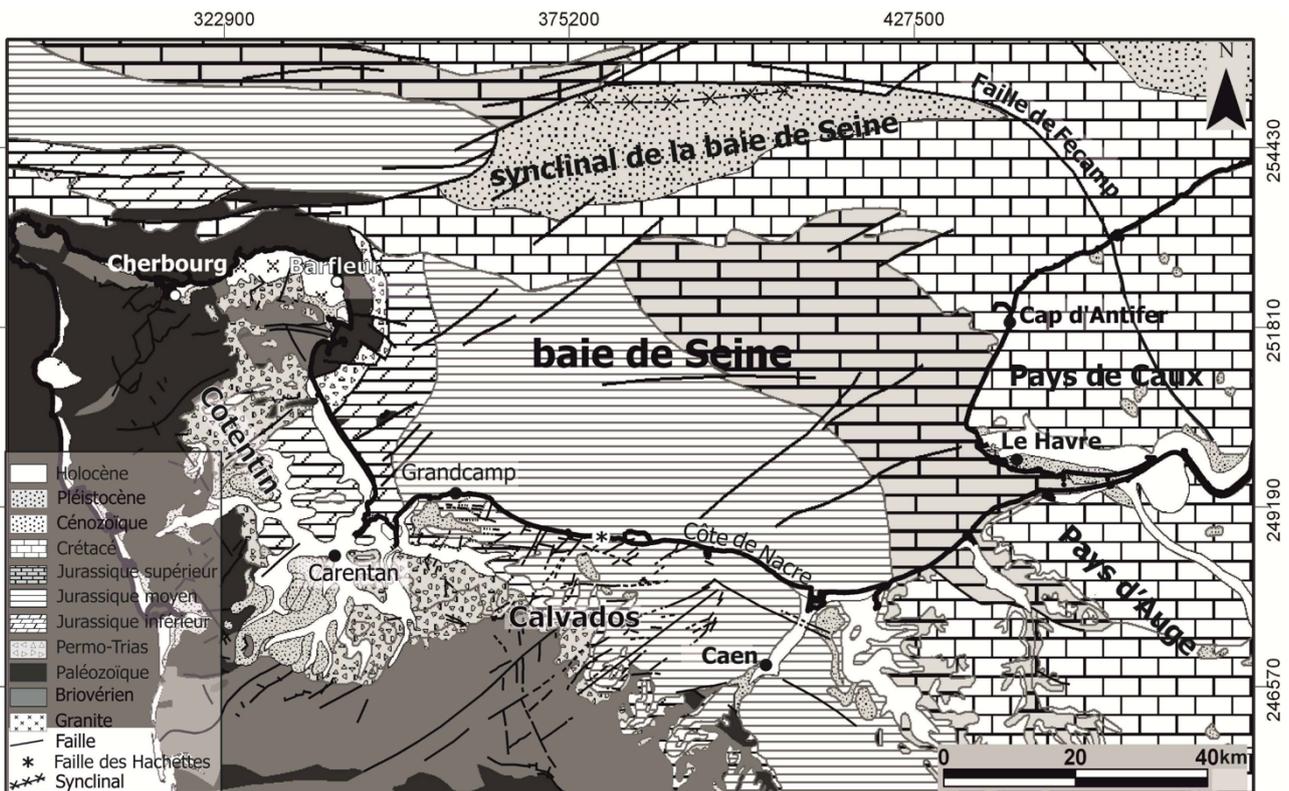


Figure 15 : Carte géologique de la baie de Seine (Auffret et al., 1982) et de son bassin versant (issu des cartes géologiques du BRGM)

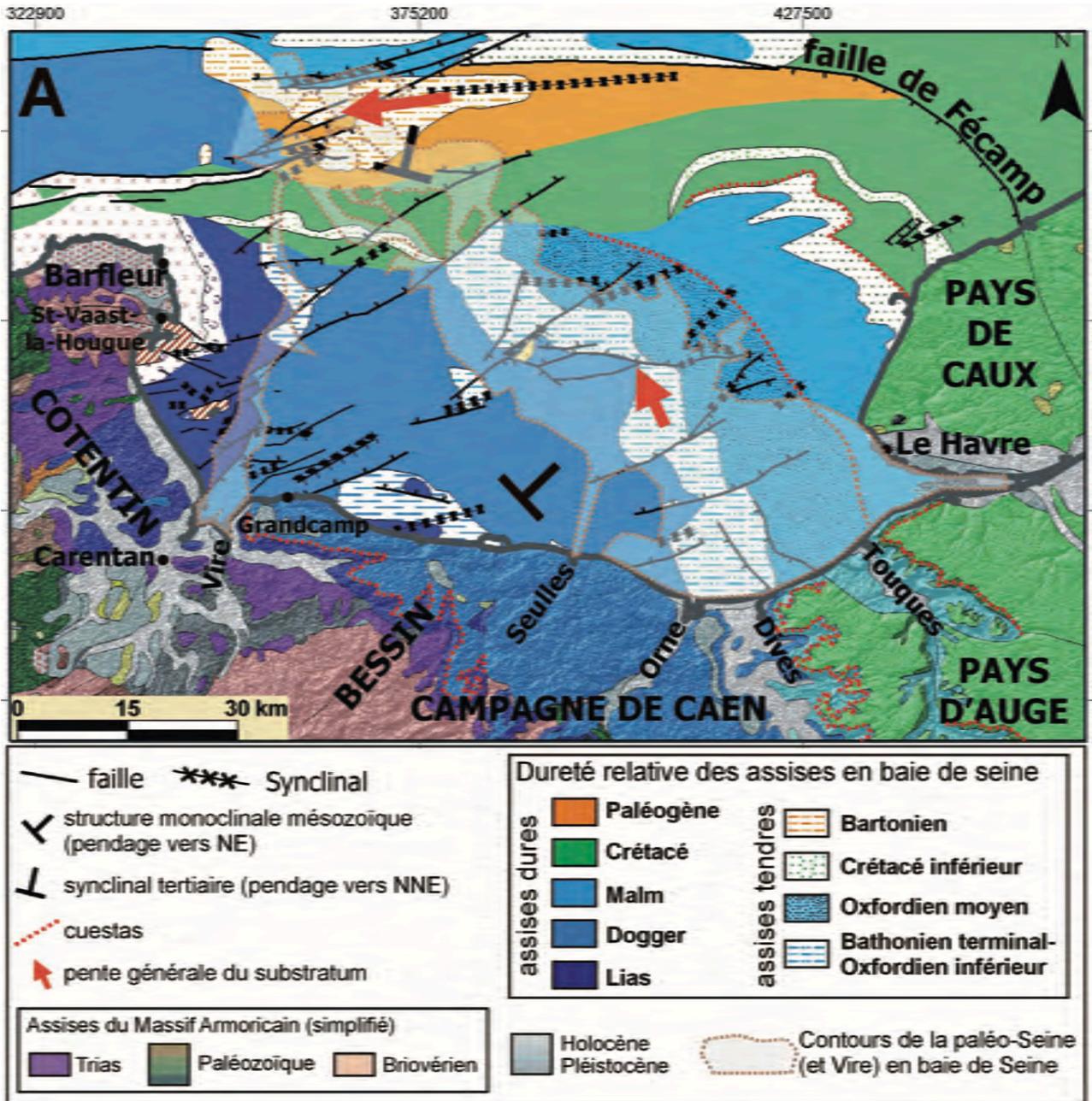


Figure 16 : Carte géologique simplifiée de la baie de Seine montrant les principaux ensembles structuraux et lithologiques et le contour de la paléo-Seine (Benabdellouahed, 2011).

Les figures 12 et 13 reprennent les données stratigraphiques.

7.2. DISCONTINUITES

Benabdellouahed écrivait dans son article de 2012 sur les trois discontinuités majeures de la Baie de Seine : « 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 hémigrabens. Cette structuration induit un approfondissement du substratum vers le NO, en direction de la Manche centrale (g. 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) sur le remplissage des fosses jusqu'à présent considéré comme d'âge principalement plio-quadernaire et associé à la paléo-Seine (Auffret et al., 1980; Lericolais et al., 2003). »

7.3. STRUCTURATION

Les terrains jurassiques de la baie de Seine sont organisés selon un monoclin à pendage vers le Nord-Est, s'ennoyant sous une couverture crétacée discordante et très légèrement inclinée vers le Nord (Larsonneur et al., 1974, Figure 12). Au large du Bessin, les terrains jurassiques sont affectés par de larges ondulations et par des failles présentant généralement un faible rejet (Larsonneur et al., 1974).

La baie de Seine présente donc des caractères structuraux identiques à ceux connus à terre. Au large du Bessin et de la campagne de Caen, les terrains du Jurassique moyen, inclinés vers le Nord-Est, sont affectés par de nombreuses failles, de direction NE-SW et localement par des ondulations à grand rayon de courbure. Les mêmes structures sont observées dans les falaises côtières du Bessin, entre Grandcamp et Ouistreham (Eudes-Deslongchamps, 1865 ; Guillaume, 1927 ; Mercier, 1932 ; Dangeard, 1951 ; Fily et al., 1989).

La baie des Veys, dans la partie occidentale de la baie de Seine, est affectée par des failles d'orientation générale SW-NE (Larsonneur, 1971), mettant en contact les terrains bathoniens du Calvados avec les terrains sinémuriens du Cotentin (Eudes-Deslongchamps, 1865). Selon Larsonneur (1971), les affleurements paléozoïques des Îles de Saint-Marcouf sont d'orientation Est-Ouest et bordés de part et d'autre par des failles, mettant en contact les terrains paléozoïques des Îles de Saint-Marcouf avec les terrains du Lias de la baie des Veys.

En revanche, en mer de la Manche centrale, les terrains crétacés à cénozoïques sont organisés selon un synclinal dissymétrique orienté W-E, appelé « synclinal de la baie de Seine » (Auffret et al., 1982). Ce synclinal est limité au Nord par le prolongement occidental de la faille de Fécamp et à l'Ouest, par un relais de failles d'orientation NE-SW, mettant en contact les séries crétacées à cénozoïques avec les terrains du Jurassique inférieur.

Larsonneur (1971) distingue deux principales périodes d'activité tectonique, en Manche centrale :

- ▷ mouvements anté-Crétacé supérieur : dans le Nord Cotentin, le Crétacé supérieur, non faillé, repose en "discordance angulaire" (Larsonneur, 1971, p 93, 94, 96) sur les couches du Jurassique supérieur faillées (phase tectonique Jurassique supérieur-Crétacé supérieur, Larsonneur, 1971) ;
- ▷ mouvements tertiaires : ils se matérialisent en Manche centrale par :
 - ▷ une disposition synclinale des couches du Crétacé supérieur et de l'Eocène inférieur ;
 - ▷ un Crétacé supérieur faillé discordant sur le socle armoricain ;
 - ▷ des contacts faillés entre le Crétacé supérieur et le Lias, entre le Crétacé supérieur et l'Eocène, puis entre le Jurassique et l'Eocène.

7.4. SYNTHÈSE ET REVISION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE

La synthèse bibliographique succincte sur le substratum géologique et la structuration de la baie de Seine, permet de souligner plusieurs points importants :

- ▷ **Stratigraphie** : des séries géologiques comparables à celles décrites dans le bassin versant côtier (Cotentin, Bessin, campagne de Caen, pays d'Auge et pays de Caux) affleurent sur les fonds de la baie de Seine. Les affleurements du socle armoricain et des formations triasiques sont cartographiés au large du Cotentin. Les terrains jurassiques, très légèrement inclinés vers le Nord sont recouverts par les formations crétacées discordantes.

- ▷ **Discontinuités** : d'après les travaux antérieurs, trois discontinuités majeures sont reconnues dans les interprétations des profils sismiques anciens :
 - Discordance du Crétacé sur le Jurassique, au Nord de la baie de Seine ;
 - Surface de transgression du Crétacé supérieur sur le socle armoricain, au Nord du Cotentin ;
 - Surface de transgression du Lutétien supérieur sur le Crétacé supérieur, au Nord de la baie de Seine et au Nord de la Hague.
- ▷ **Structuration** : les caractères structuraux des terrains géologiques de la baie de Seine sont identiques à ceux connus à terre, avec des directions principales d'orientation NE- SW et E-W (Larsonneur et al., 1974). Les terrains mésozoïques sont organisés selon un monoclin à pendage NE (Larsonneur et al., 1974), tandis que les terrains cénozoïques occupent un synclinal au Nord de la baie de Seine (Auffret et al., 1982).

Les travaux de thèse et de post-doctorat de Benabdellouahed de 2011 à 2014 ont permis de compléter et réviser cette carte géologique au moyen d'une plusieurs campagnes en mer par sismique réflexion (boomer et sparker).

Planche 18 : Carte géologique révisée de la Baie de Seine

Planche 19 : Carte géologique simplifiée de la baie de Seine (Auffret et al., 1982)

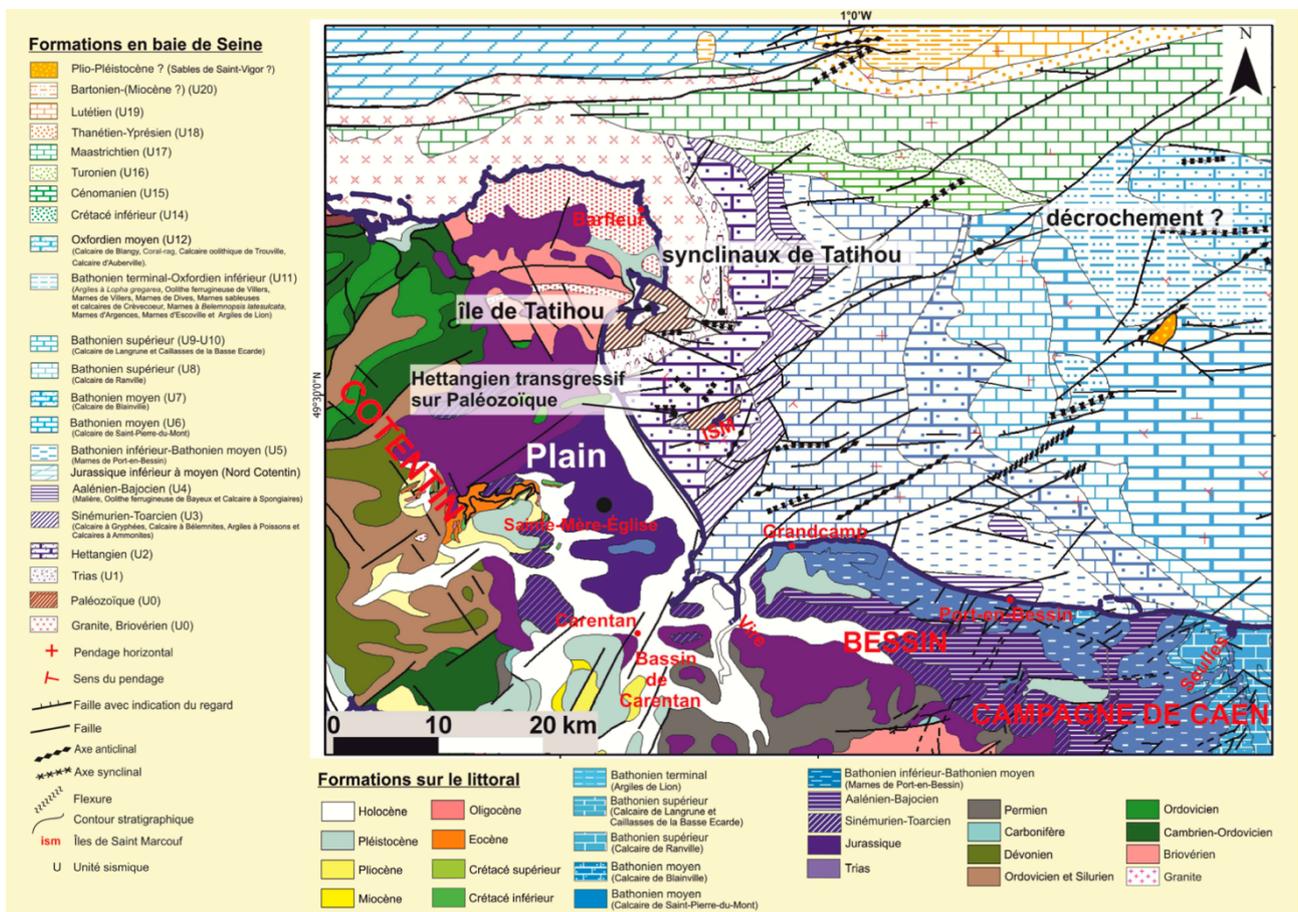


Figure 17 : Carte révisée du modèle géologique de la Baie de Seine (Benabdellouahed, 2011)

La carte géologique révisée de Benabdellouahed (Cf. Planche 17 et figure 14) 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 (Cf. publication de 2012), avec la présence de blocs glissés. Benabdellouahed suggère 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 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.

Pour la planche 18, les références des roches correspond à un âge géologique par rapport à une unité sismique. Le tableau ci-dessous permet de comprendre les correspondances (pour plus de détail, se rapporter à la thèse de Benabdellouahed de 2012).

Âge de la formation	Unité sismique	Type de roche
Bartonien-(Miocène ?)	U20	Sables marneux, quartzeux, coquilliers et fossilifères
Lutétien	U19	Sables calcaires à bryozoaires
Thanétien-Yprésien	U18	Dépôt argileux et sableux
Maastrichtien	U17	Craie blanchâtre du Sénonien.
Turonien	U16	Craie du Turonien.
Cénomaniens	U15	Craie du Cénomaniens
Crétacé inférieure	U14	Formations détritiques (sables fins et grossiers)
Oxfordien-Sup - Kimméridgien	U13	Série marneuse
Oxfordien moyen	U12	Série calcaire
Bathonien sup. – Oxfordien inf.	U11	Marnes (argiles et calcaires) du Callovo-Oxfordien inférieur
Bathonien sup.	U9 et U10	Caillasses de la Basse-Écarde et Calcaire de Langrune
Bathonien sup	U8	Calcaire de Ranville
Bathonien moyen	U7	Calcaire de Blainville
Bathonien moyen	U6	Calcaire de Saint-Pierre-du-Mont
Bathonien inf. et moy.	U5	Marnes de Port-en- Bessin (
Aalénien-Bajocien	U4	Série Calcaire aaléno-bajocienne
Sinemurien-Toarciens	U3	Marnes et calcaires du Sinémurien
Hettangien	U2	Calcaires gréseux hettangiens
Trias	U1	Conglomérats, grès, sables et argiles
Granite hercynien	U0	Granite de Barfleur
Briovérien, Paléozoïque	U0	Schistes noirs

Tableau 3 : Nature des formations géologiques et unités sismiques de la carte 18 (Sour Benabdellouahed, 2012)

7.5. LE FLEUVE SEINE PLIO-QUATÉNAIRE EN BAIE DE SEINE

Benabdellouahed, toujours dans ses travaux de thèse et de post-doc, a permis donc de réviser également la manière dont ce sont remplis les 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. (2012, 2014). 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 fluviales.

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 (Cf. figures 4 et 17) que celle établie par Auffret et al. (1980).

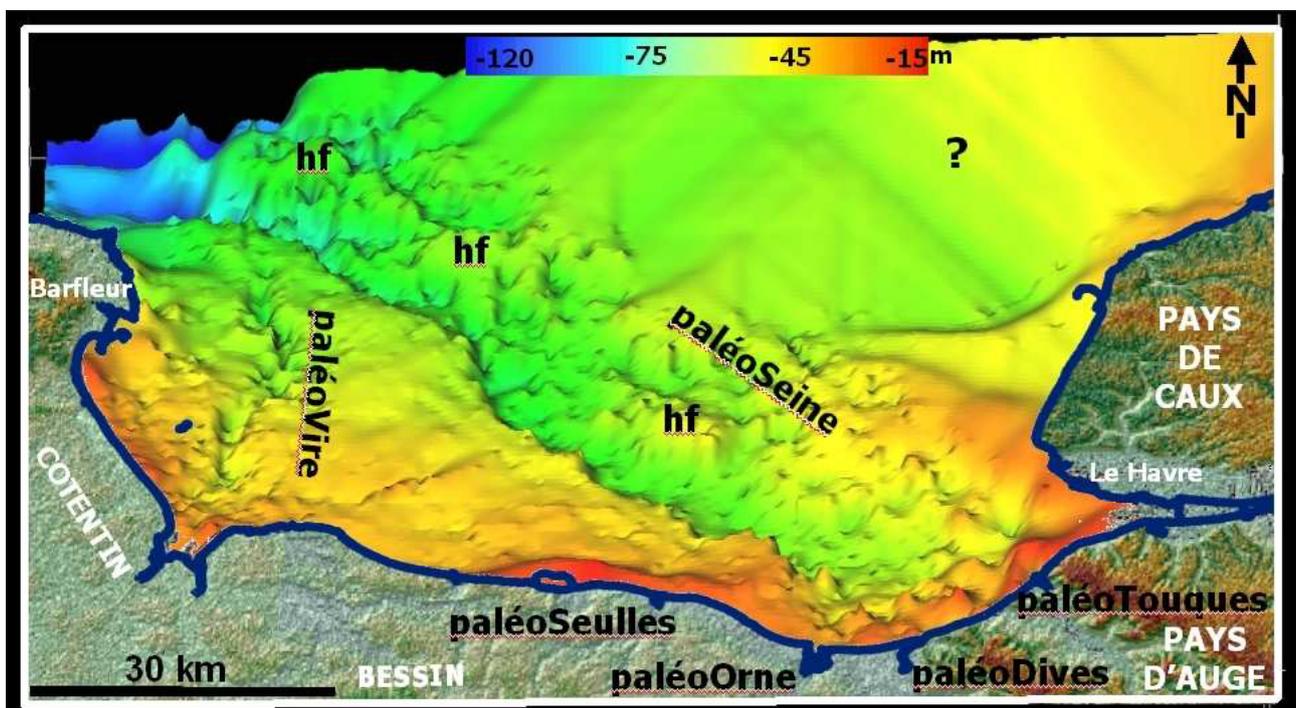


Figure 18 : Bloc diagramme en mètres du toit du substratum géologique établi à partir du Modèle Numérique de Terrain d'isohypse en temps double, montrant la paléoSeine, la paléoVire et les haut fonds (hf) (? lacune de données) (Benabdellouahed et al., 2009 ; 2011)

Dans le cas de la baie de Seine, l'incision au toit du substratum géologique est importante et bien conservée, ce qui a amené Benabdellouahed à proposer l'hypothèse d'une incision fluviale résultant d'une combinaison de plusieurs de ces mécanismes allocycliques. La carte géologique des fonds de la baie de Seine (Cf figures 16 et 17) permet de comprendre comment la lithologie et la structure du substratum géologique interviennent dans la morphologie des incisions fluviales plio-quaternaires.

L'interprétation des nouvelles données sismiques a permis à Benabdellouahed de construire un modèle numérique maillé des épaisseurs du remplissage de l'incision plio-quaternaire de la paléo-Seine (Cf. figure 18). 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 créacés 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.

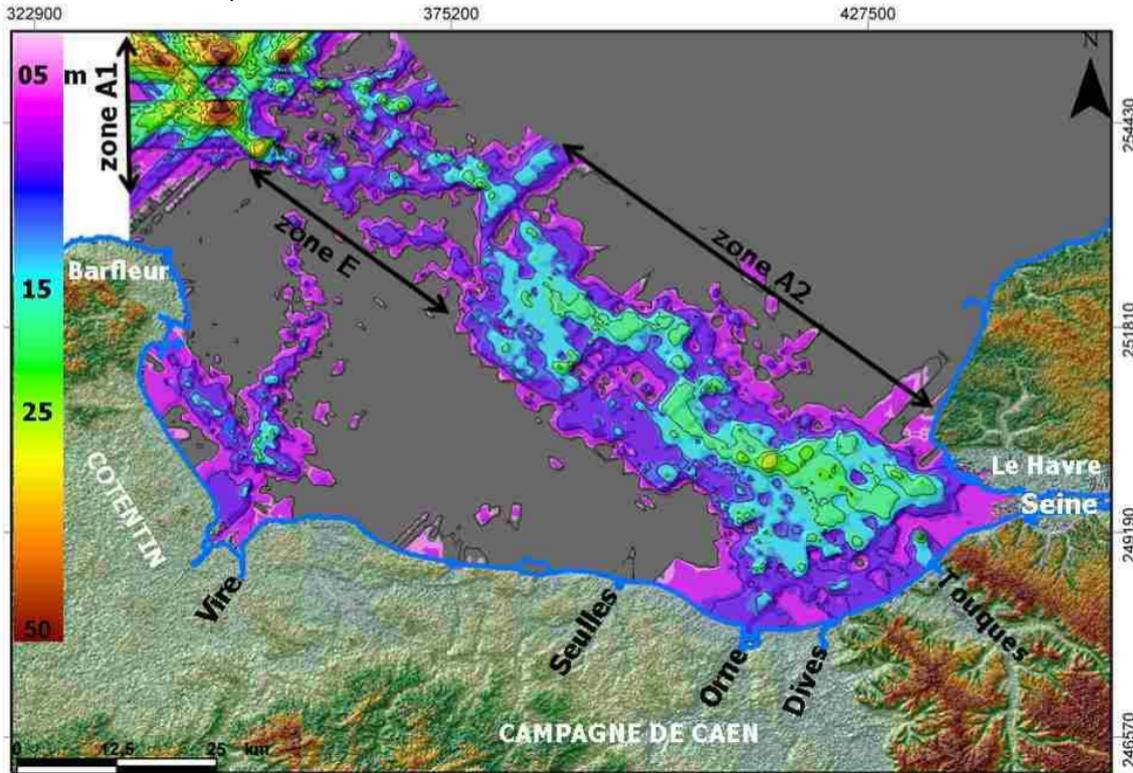


Figure 19 : Carte des isopaques des nappes alluviales pléistocènes et des dépôts holocènes en baie de Seine, montrant les deux zones d'accumulation sédimentaire (zones A1 et A2) et la zone en érosion (zone E) pour la paléoSeine) (Benabdellouahed, 2011)

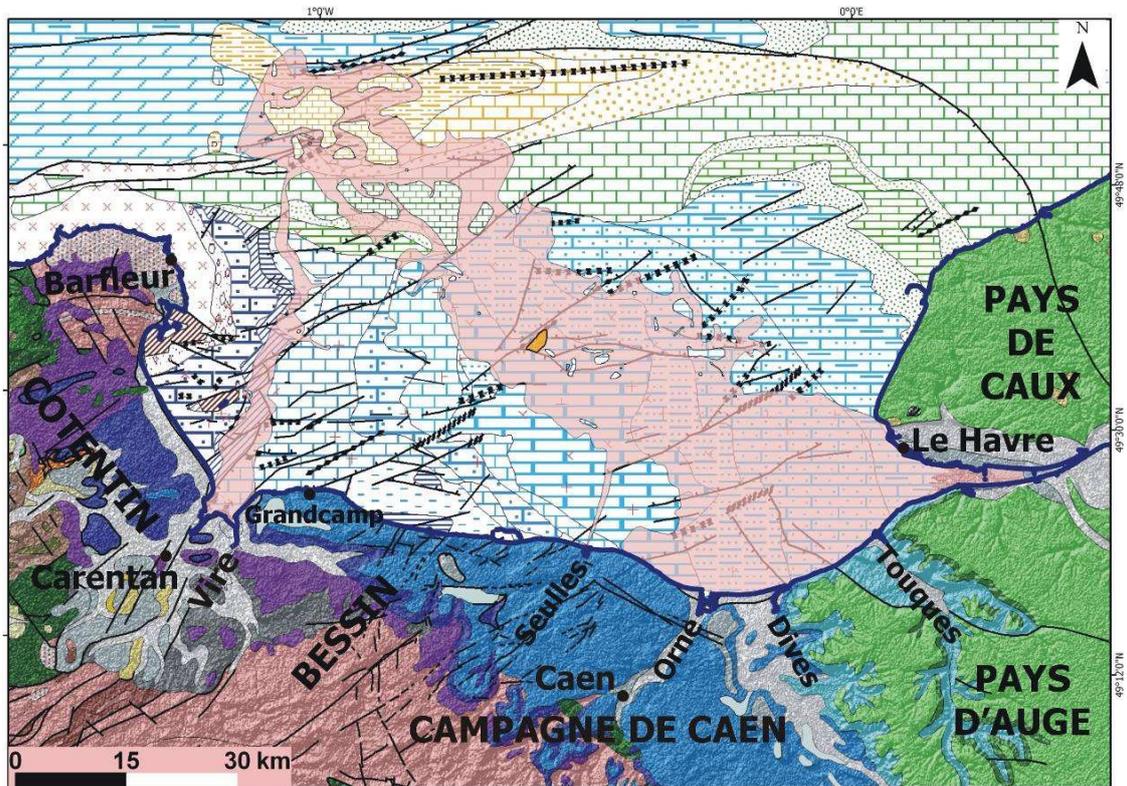
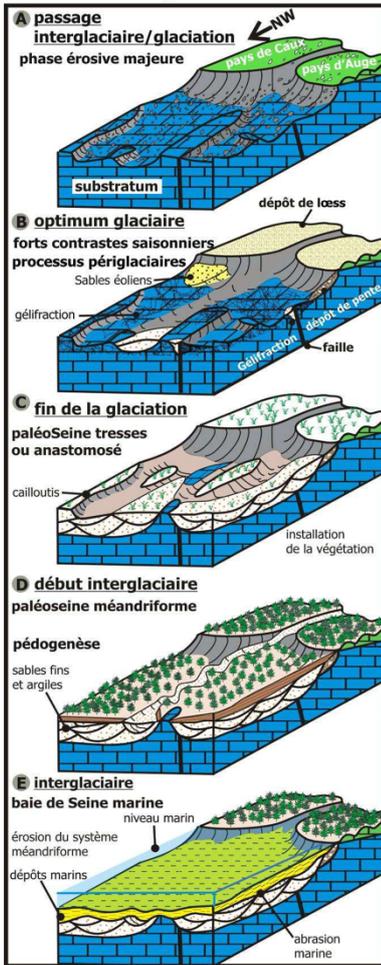


Figure 20 : Tracés de la paléoSeine et de ses affluents (en marron clair) superposés à la carte géologique revissée du substratum de la baie de Seine (Benabdellouahed, 2013)

Echelle interglaciaire-glaciaire



Echelle du Plio-Quaternaire

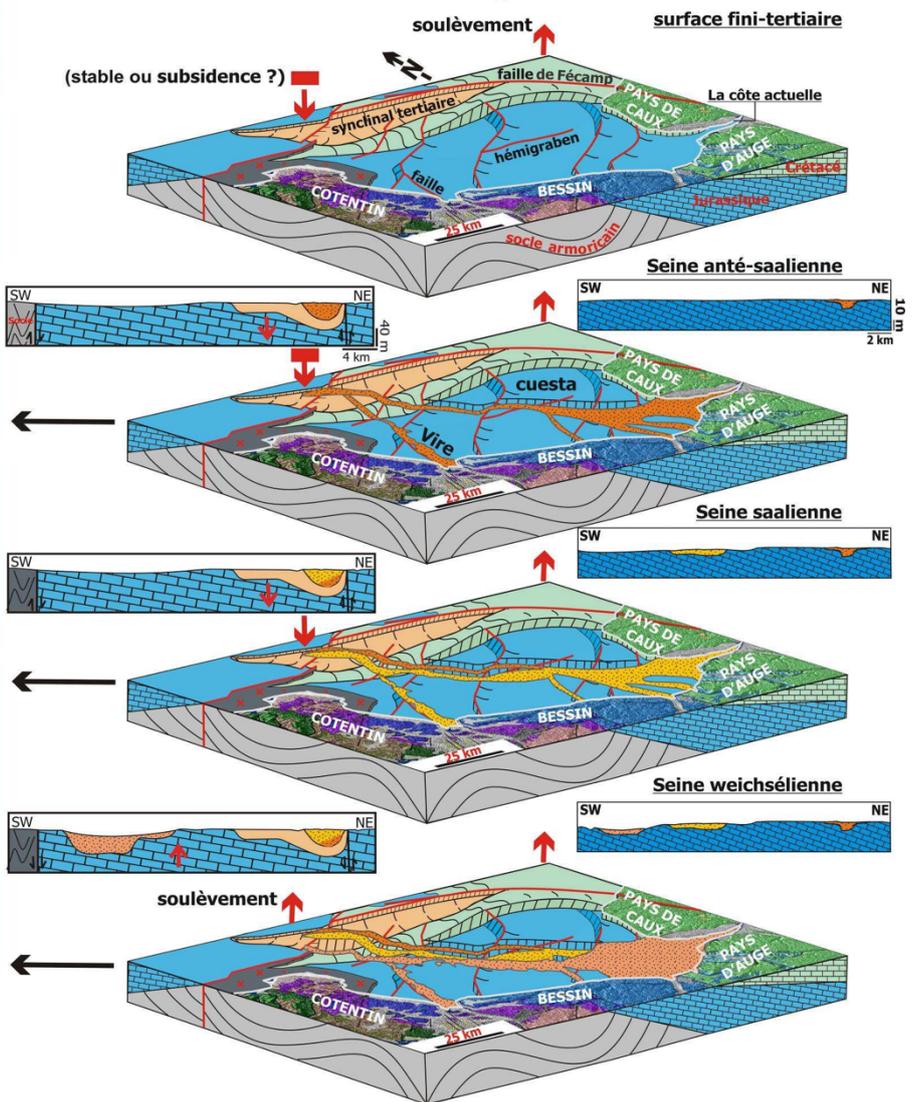


Figure 21 : Modèle de l'évolution de la paléoSeine périglaciaire au Plio-Quaternaire en réponse aux variations climatiques (A,B,C,D) et soulèvement pléistocène (Benabdellouahed, 2011)

Planche 20 : Isoques des nappes alluviales (Benabdellouahed, 2011)

Planche 21 : Tracé de la paléoSeine et de ses affluents (Benabdellouahed, 2011)

7.6. CONCLUSION SUR LA CARTE GEOLOGIQUE REVISEE ET LE REMPLISSAGE ALLUVIAL

L'interprétation de Benabdellouahed (2011) des données sismiques haute résolution 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'hémigrabens 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 monoclinal, 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 monoclinal 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.

Pour mieux connaître la nature des remplissages, il serait bon d'avoir accès aux données des carottes pointées sur les cartes jointes (22A et 22B) et en possession du BRGM.

Planches 22A et 22B : Base géologique marine du BRGM (carottages/forages)

8. CONCLUSION GENERALE

Les trois périodes de recherche sur la géologie de la baie de Seine et sur les apports successifs des trois chercheurs (Larsonneur, Lericolais, Benadhbellohaed) ont permis une très bonne compréhension du :

- ▷ Du modèle géologique et de la nature du substratum
- ▷ De la paléo-vallée fluviatile de la Seine et son incision dans le substratum, avec la compréhension de sa formation durant les événements du quaternaire
- ▷ De la nature des remplissages de cette paléo-vallée.

Il est évident que la zone d'installation potentielle du futur parc se trouve en plein cœur de cette paléo-vallée et également une bonne partie du fuseau Ouest vers Barfleur.

Il faut aussi rappeler que les lithologies calcaires qui composent l'essentiellement du substratum de la Baie de Seine peuvent localement présenter des dissolutions karstiques (en particulier dans la craie crétacée) qui ont pu être remplies également par des sédiments du Quaternaire.

Il est donc évident qu'une campagne sismique de haute résolution, associée à du carottage, doit permettre de comprendre les enjeux locaux et d'affiner le modèle géologique.

8.1. DETAIL SUR LE CORRIDOR OUEST

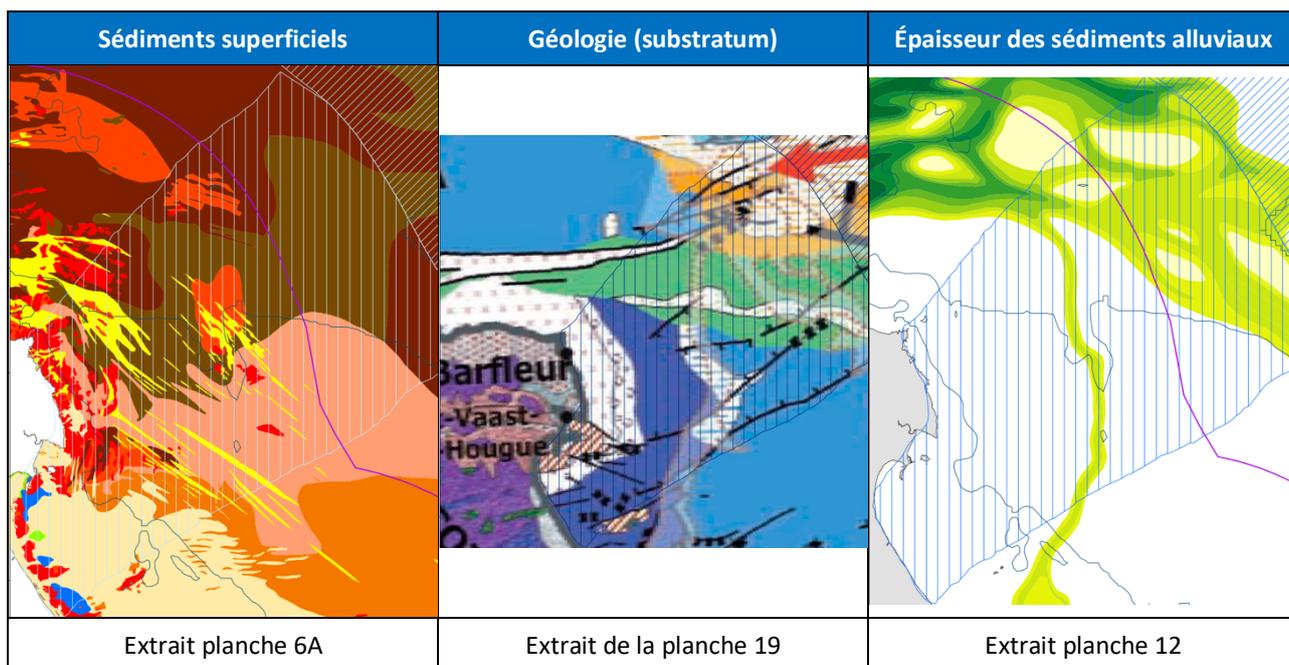


Figure 22 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour le corridor Ouest

Le corridor Ouest est caractérisé par une bathymétrie allant de la cote (à l'Ouest) vers la zone centrale jusqu'à 40 m CM avec quelques fosses plus profondes (56 m CM), trace des anciennes vallées fluviatiles, presque complètement comblées. Les courants de marée en vives eaux y sont forts, notamment dus au forçage créé par la presqu'île du Cotentin. Ces courants de fonds dont la résultante porte vers le SE, a trié les matériaux en surface qui datent principalement du Quaternaire et de la fin de la dernière glaciation. Plus proche de la côte, où les courants sont moindres, on trouve des sables mélangés avec des graviers qui sont remplacés en allant vers l'Est par des graviers puis du mélange cailloutis graveleux. Les épaisseurs de ces matériaux en dehors des anciennes vallées fluviatiles qui ont creusé profondément le substratum (le socle rocheux) sont peu importantes, entre 0 et 5 m. Il peut y avoir sur cette zone des affleurements du substratum.

Le substratum est composé de roche dure (Bleu foncé, bleu et vert sur l'extrait) essentiellement des calcaires (de Blainville en bleu foncé, de Saint-Pierre du Mont en bleu ciel et des faluns de Fresville en vert foncé) et des sablo-argiles indurés (en orange, Thanétien-Yprésien U18, Cf. planche 18). Entrecoupant ces roches dures, on trouve des assises tendres : de l'ère Bathonien terminal à Oxfordien inférieur (trait bleu et point bleu), correspondant à des marnes, argiles et calcaire tendre et Barthonienne (trait et point orange) correspondant à des marnes. Sur la partie NE et au milieu du corridor, on peut voir sur l'extrait de la planche 12, les traces laissées dans le substratum par les anciennes vallées fluviales, qui ont incisés le socle entre 10 et 30 m de profondeur et qui sont remplis actuellement par des sédiments graveleux à cailloutis provenant de la dernière glaciation et de la remontée des eaux.

8.2. DETAIL DE LA ZONE POTENTIELLE DU PARC EOLIEN

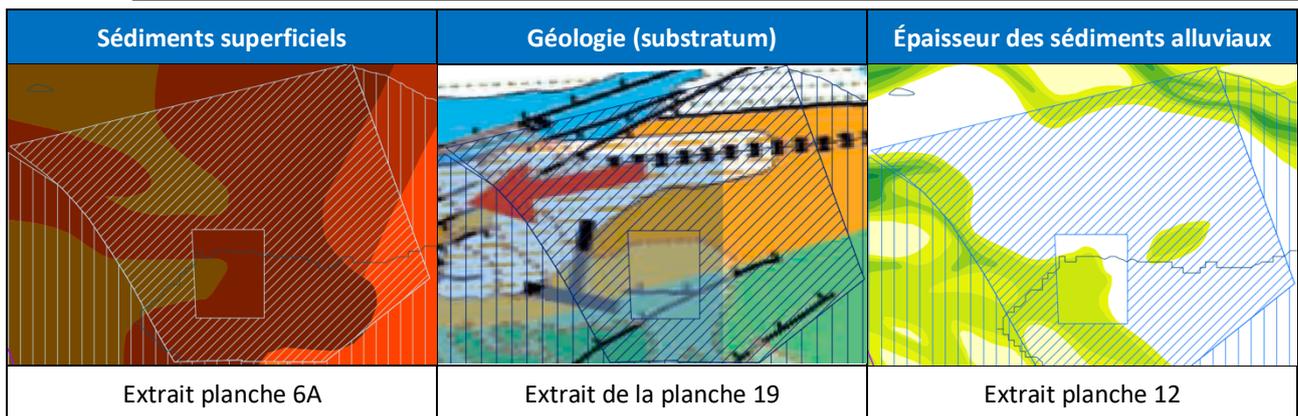


Figure 23 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour la zone centrale

La bathymétrie de la zone centrale varie entre 34 et 44 m CM avec un gradient de plus faible profondeur au Sud de la zone et plus importante au Nord de la zone. Les sédiments superficiels sont essentiellement des cailloutis et des cailloutis graveleux, c'est à dire des matériaux entre 2 et 200 mm de classe granulométrique.

Les épaisseurs de ces couches sédimentaires sont faibles entre 0 et 5 m sur la plupart de la zone (en blanc sur l'extrait de la planche 12), sauf sur le quart SW et NE de la zone, où l'on trouve les traces de l'ancienne vallée de la Seine qui a profondément creusé le socle rocheux et qui est rempli de ces sédiments sur une épaisseur allant entre 10 et 30 m.

Concernant la nature des assises, on trouve des calcaires durs (en vert foncé), des argiles indurées (U18) et des sables calcaires (U19) (en orange, mais Cf. carte 18) au milieu de la zone et des marnes du Barthonien (trait et point orange) sur la partie NW de la zone. L'angle NE de la zone possède une assise tendre datant du Crétacé inférieur et composé d'un mélange de sables (cette unité s'étend vers Antifer).

8.3. DETAIL DU CORRIDOR EST

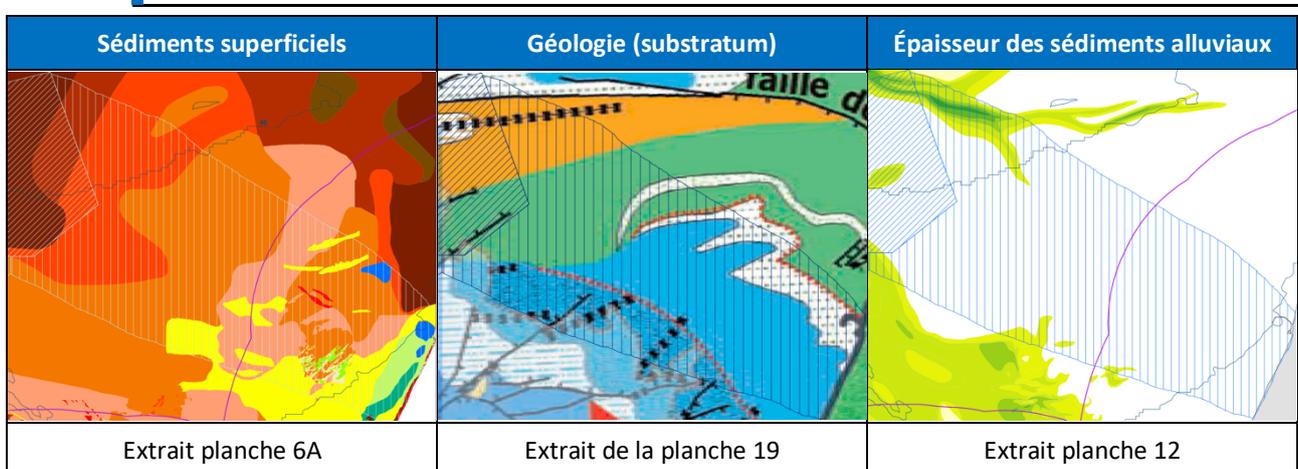


Figure 24 : Extraits des planches sur la nature sédimentaire superficielle, l'épaisseur du remplissage des paléovallées et la nature du substratum pour le corridor Est



La bathymétrie, du corridor Est, varie selon un gradient du plus profond vers l'Ouest (40 m CM), en passant vers un plateau dans les 30 m CM, puis en décroissant rapidement proche de la côte (vers les 5 milles environ). Les vitesses des courants de marée suivent également ce gradient avec des vitesses plus fortes vers l'Ouest et décroissant en s'approchant de la côte. Ces vitesses ont modelé la nature des sédiments superficiels que l'on trouve, avec des sédiments plus grossiers vers l'Ouest (cailloutis, graviers) qui s'affinent vers l'Est (sables et même sables envasés vers la côte).

L'épaisseur de cette couche sédimentaire de surface est faible entre 0 et 5 m sur la plupart de la zone, sauf dans le coin NW de la zone, où le substratum a été creusé par les fleuves du quaternaire, et l'on peut trouver de 10 à 50 m d'épaisseur de cailloutis et graviers essentiellement.

Les assises rocheuses se répartissent en assises dures : calcaires (en bleu et vert) et des sablo-argiles indurés (en orange), avec une assise tendre datant du Crétacé inférieur et composé d'un mélange de sables (cette unité s'étend vers Antifer).

9. BIBLIOGRAPHIE

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., 2011 - La Seine fluviatile plio-quadernaire en baie de Seine: évolution morphologique et sédimentaire (rôle du substratum géologique et des cycles climato-eustatiques). Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 300 p.

BENABDELLOUAHED M., DUGUE O., TESSIER B., THINON I & GUENNOC P., 2013. Évolution pléistocène de la Seine fluviatile préservée en Baie de Seine. Quaternaire, 24 (3), p267-277.

BENABDELLOUAHED M., DUGUE O., TESSIER B., THINON I, GUENNOC P. & BOURDILLON C., 2014. Nouvelle cartographie du substratum de la baie de Seine et synthèse géologique terre-mer : apports de nouvelles données sismiques et biostratigraphiques.

DUCLOS P.A., 2012. Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins - application au bassin oriental de la Manche. Interfaces continentales, environnement. Université de Rouen.

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.

LE GALL J. & DUGUE O., 2003. La Normandie physique, Chap. I : une longue histoire mouvementée. In : Guérin A. (Coord.) : La Normandie, bibliothèque du Naturaliste, Delachaux et Niestlé Ed. pp. 10-11.

LERICOLAIS G., 1997 - Évolution plio-quadernaire du fleuve Manche: Stratigraphie et Géomorphologie d'une plateforme continentale en régime périglaciaire. Thèse de Doctorat Université Bordeaux 1, Bordeaux, 265 p.

LERICOLAIS G., AUFFRET J.-P., BOURILLET J.-F., BERNÉ S., GUENNOC P., LE DREZEN E., NORMAND A. & GUILLO-CHEAU 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.

LERICOLAIS 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.

10. GLOSSAIRE

- ▷ **Bathymétrie** : Équivalent sous-marin de la topographie, c'est-à-dire description du relief immergé grâce aux mesures de profondeurs.
- ▷ **Benthique** : Adjectif qui qualifie l'interface eau-sédiment (interface eau-lithosphère) d'un écosystème aquatique, quelle qu'en soit la profondeur. Qualifie un organisme vivant libre (vagile) sur le fond ou fixé (sessile).
- ▷ **Biocénose** : Ensemble des organismes vivants (animaux et végétaux - dont microorganismes) qui occupent un écosystème donné.
- ▷ **Biotope** : Espace caractérisé par des facteurs climatiques, géographiques, physiques, morphologiques et géologiques, en équilibre constant ou cyclique et occupé par des organismes qui vivent en association spécifique (biocénose). C'est la composante non vivante (abiotique) de l'écosystème.
- ▷ **B.P** : Before present. Avant l'ère actuelle
- ▷ **Circalittoral** : Étage du domaine benthique néritique qui s'étend depuis 40 m de profondeur environ (limite inférieure de vie des algues photophiles) jusqu'à la limite de la zone euphotique, laquelle dépend de la plus ou moins grande transparence des eaux, en général une centaine de mètres (limite des algues les plus tolérantes aux faibles éclaircissements, les sciaphiles).
- ▷ **CM ou Cote marine** : accompagne une profondeur d'eau par rapport au zéro hydrographique. 2 m CM correspond à une cote bathymétrique de 2 m en dessous du zéro hydrographique. Par convention, comme sur les cartes marines du SHOM, il n'y a jamais de moins (-) devant le chiffre. Quand la sonde est au-dessus du zéro hydrographique, elle est alors notée par un plus (+) dans un corps de texte ou alors soulignée les une cartes (2).
- ▷ **Démersal** : Qualifie une espèce vivant libre à proximité du fond, c'est-à-dire sans être véritablement lié à celui-ci de façon permanente.
- ▷ **Estran** : Partie du littoral alternativement couverte et découverte par la mer (zone de balancement des marées).
- ▷ **Étale** : Phase du cycle de marée au cours de laquelle le niveau de la mer atteint sa valeur extrême (haute ou basse) et reste approximativement stable pendant une courte durée.
- ▷ **Flot** : Courant de marée dans le sens de la marée montante.
- ▷ **Géomorphologie** : Étude des formes du relief.
- ▷ **Géophysique** : Science ayant pour objet l'étude et la connaissance des propriétés physiques du globe terrestre.
- ▷ **Habitats** : Milieu dans lequel vit une espèce ou un groupe d'espèces animales ou végétales. Ce sont des zones terrestres ou aquatiques possédant des caractéristiques biogéographiques et géologiques particulières et uniques.
- ▷ **Houle** : Mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui se propage sur de longues distances, indépendamment du vent local qui lui a donné naissance.
- ▷ **Infralittoral (étage)** : Étage du domaine benthique littoral dont la limite supérieure est marquée par les peuplements qui sont soit toujours immergés soit très rarement émergés. Sa limite inférieure est celle qui est compatible avec la vie des algues photophiles.
- ▷ **Isobathe** : Sur une carte marine, ligne joignant entre eux les points de même profondeur.
- ▷ **Isopaque** : Ligne stratigraphique correspondant au lieu de tous les points d'épaisseur égale, notamment d'une couche sédimentaire.
- ▷ **Jusant** : Courant de marée portant dans le sens de la marée descendante.
- ▷ **Marnage** : Différence entre les hauteurs d'une pleine mer et d'une basse mer consécutives.
- ▷ **Mers de vent** : Système de vagues observé en un point situé dans le champ de vent qui les engendre.
- ▷ **Paléovallée** : Vallée dont la formation géologique remonte à des temps anciens.
- ▷ **Sédimentologie** : Discipline qui étudie les caractéristiques, les processus de mise en place et la disposition des particules meubles soit pendant leurs déplacements, soit une fois déposées.

- ▷ **Topographie** : Discipline technique qui fixe les règles à suivre pour mesurer et décrire objectivement les formes du terrain à terre et sur l'estran. Par extension, ces formes elles-mêmes.
- ▷ **Transect** : Levé ou relevé, réalisé transversalement par rapport à un espace souvent étiré longitudinalement. Il est constitué d'une série cohérente d'observations qui ont pour but de déterminer s'il existe dans l'espace concerné une zonation disposée parallèlement à son grand axe.
- ▷ **Zéro hydrographique** : Le zéro hydrographique (ou zéro des cartes du SHOM) est la référence de niveau commune pour les mesures de profondeur en mer (ou plan de référence des sondes) sur une carte marine ainsi que pour les prédictions de marée des annuaires de marée. Sur les cartes marines françaises, le zéro hydrographique est adopté au voisinage du niveau théoriquement atteint par les plus basses mers astronomiques (marée de coefficient 120 - ou basse mer astronomique extrême ; en anglais LAT : Lowest Astronomical Tide). Le niveau des plus basses mers astronomiques est obtenu par calcul à partir des données des marégraphes. Le niveau de la mer peut être très exceptionnellement inférieur (par exemple par situation anticyclonique et vent soufflant de terre lors de coefficient de marée maximums). Le choix du zéro hydrographique au voisinage de ce niveau garantit ainsi quasiment toujours au navigateur une profondeur supérieure à la sonde indiquée sur la carte.

11. ÉCHELLES STRATIGRAPHIQUE DES TEMPS GEOLOGIQUES

Eon	Ere	Période	Epoque	Début	Evénements
PHANEROZOÏQUE	CENOZOÏQUE	Quaternaire	Holocène	-10300 ans	20 glaciations (tous les 100 000 ans environ)
			Pléistocène	-1,9 millions	
		Néogène	Pliocène	-5,5 millions	homo sapiens
			Miocène	-23 millions	Séparation de la lignée humaine et de la lignée des chimpanzés
			Oligocène	-33 millions	
		Paléogène	Eocène	-53 millions	
			Paléocène	-65 millions	50% d'extinction des êtres vivants
			Crétacé	-130 millions	extinction des dinosaures
		MESOZOÏQUE	Jurassique	-205 millions	apparition des dinosaures
	Trias		-245 millions		
	Permien		-250 millions	90% d'extinction des êtres vivants éruptions volcaniques importantes continents regroupés	
	PALEOZOÏQUE	Carbonifère	-360 millions		
		Devonien	-400 millions	60% d'extinction des êtres vivants	
		Silurien	-420 millions	sortie des eaux	
		Ordovicien	-500 millions	60% d'extinction des êtres vivants	
		Cambrien	-570 millions	explosion du cambrien Faune de Burgess	
		PRECAMBRIEN			

Figure 25 : Échelle stratigraphique des temps géologiques (source Web)

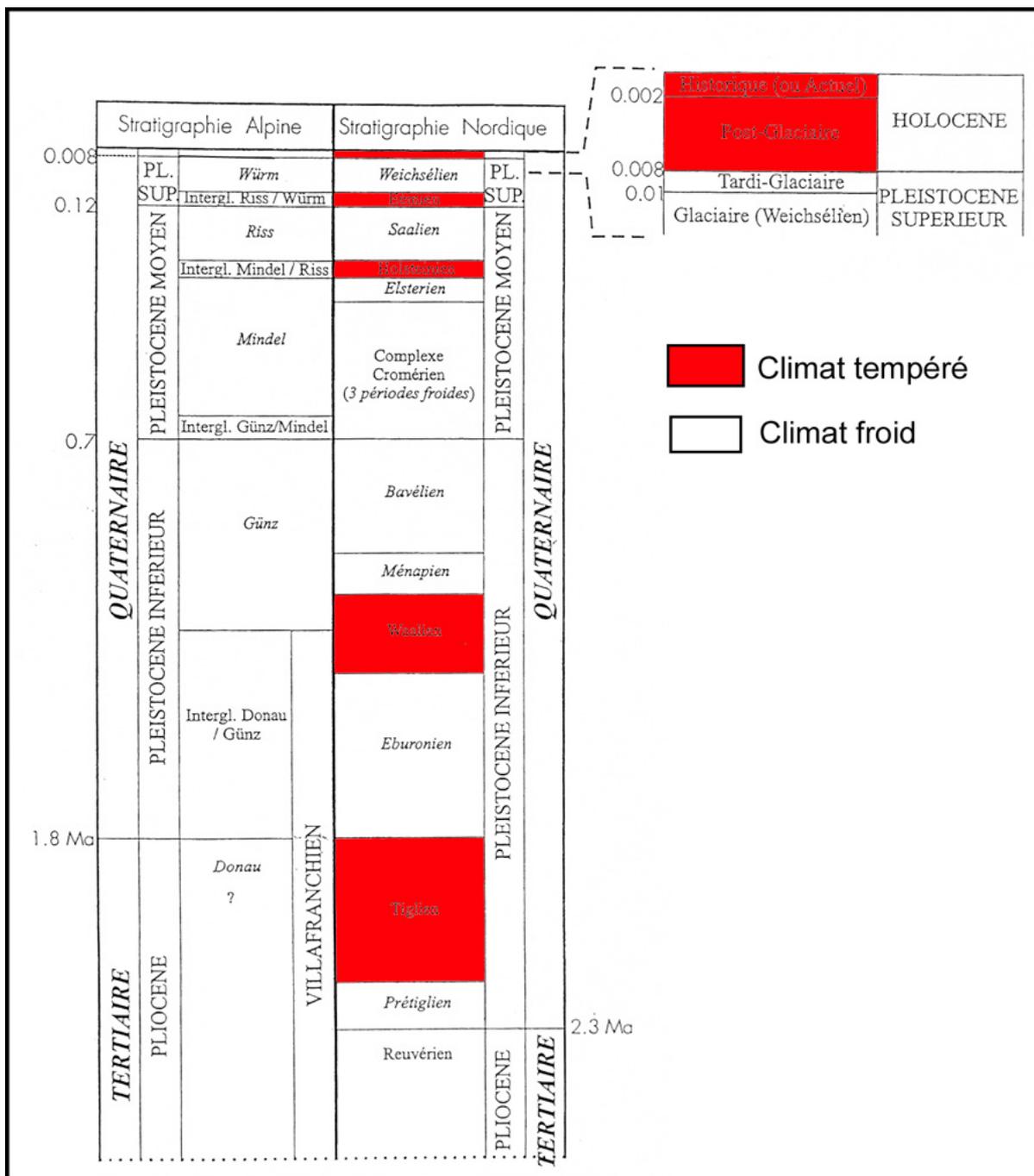


Figure 27 : Échelle stratigraphique du Quaternaire (inspiré de Zagwijn 1985 et de Grellet et al. 1993)