



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Aperçu géologique de la macro-zone Fécamp-Grand-Large

Rapport final

BRGM/RP-73601-FR

Version B2 du 23 août 2024

Convention BRGM / MTE [DGEC] E 11 ° 220142604

Paquet F., Rusch R., Bertil D.

189 3740.46 -625.5

  
Christophe Didier  
Directeur  
Direction des Géoresources

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMqFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés :** Géologie marine, Plateau continental, Manche Orientale, Mer du Nord

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Paquet F., Rusch R., Bertil D.** 23 août 2024. Aperçu géologique de la macro-zone Fécamp-Grand-Large. Rapport final - A. BRGM/RP-73601-FR, 107 p.

© BRGM, 23 août 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-09/03/2023

## Synthèse

Ce rapport constitue la réponse à la sollicitation du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) par la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) relative à l'amélioration de la connaissance de la géologie du plateau continental français, dans le cadre de son programme de développement des Energies Marines Renouvelables (EMR).

A cet égard, la DGEC a confié au BRGM la réalisation d'études sur la connaissance géologique dans des zones ayant vocation à accueillir des projets éoliens en mer. Ces études, détaillées dans la convention BRGM / MTE [DGEC] n° EJ 2201426043, sont nécessaires au développement optimal de l'éolien en mer prévu par plusieurs textes législatifs nationaux et européens, dont la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de la période 2019-2028. Elles constituent une mise à disposition des connaissances géologiques dans la phase initiale de levée de risques pour les projets de parcs éoliens en mer.

L'action du BRGM se décline en plusieurs phases, incluant la rédaction d'un rapport offrant un aperçu de la connaissance géologique pour des zones d'intérêt ou macro-zones. Le présent rapport concerne la macro-zone « Fécamp-Grand-Large ».

Ce rapport constitue le livrable du Lot 1 de la convention pour les années 2023-2024.

Les thèmes abordés dans ce rapport sont :

- La cartographie bathymétrique issue des données disponibles sur la macro-zone Fécamp-Grand-Large, accompagnée d'une description des principaux traits géomorphologiques ;
- La cartographie des principaux ensembles sédimentaires superficiels meubles, incluant les dunes et bancs sableux, et les paléovallées et leur remplissage. Ce thème fait l'objet d'une mise à jour cartographique dans le cadre de la présente étude, sur la base de l'interprétation de la sismique réflexion récente disponible. La nature des fonds issue de la carte sédimentologique mondiale (SHOM) est proposée à titre indicatif ;
- L'état des lieux de la connaissance géologique incluant la cartographie et le détail des formations et ensembles géologiques identifiés sur la zone d'étude, et qui affleurent sur le fond marin ou sous les sédiments meubles (écorché). Ce thème fait également l'objet d'une mise à jour dans le cadre de la présente étude. La cartographie ainsi produite met en évidence la distribution spatiale des séries sédimentaires du substratum, ainsi que les structures tectoniques majeures. Elle est accompagnée d'une série de 28 coupes sismiques interprétées (dont 6 détaillées dans le manuscrit) couvrant la macro-zone et apportant un complément sur la géométrie des formations géologiques ;
- La description des lithologies principales attendues pour chaque ensemble stratigraphique ;
- Les aléas géologiques potentiels, incluant une étude sur la sismicité régionale et les failles actives et une discussion sur la présence potentielle de formation altérée et de karsts ;
- Les recommandations concernant la poursuite de l'amélioration de la connaissance géologique de la macro-zone FGL (géophysique, géologiques/géotechniques).



## Sommaire

1. Introduction .....	9
2. Géomorphologie des fonds marins de la macro-zone FGL .....	10
3. Nature des fonds et grands ensembles sédimentaires meubles .....	12
3.1.    nature des fonds .....	12
3.2.    Ensembles sédimentaires meubles .....	13
4. Ensembles géologiques, stratigraphie et structuration globale du substratum .....	18
4.1.    Ensembles géologiques et stratigraphie .....	18
4.2.    structures tectoniques majeures .....	25
5. Mise à jour de la cartographie .....	27
6. Lithologies du substratum rocheux .....	40
7. Aléas géologiques de la macro-zone FGL .....	47
7.1.    Contexte sismotectonique et aléas sismique .....	47
7.1.1.    Analyses des données sismologiques .....	47
a)    Catalogue de sismicité .....	47
b)    Description de la sismicité régionale .....	49
c)    Description de la sismicité à 50 km et 150 km de la macro-zone FGL .....	50
7.1.2.    Recommandations .....	56
7.1.3.    Conclusions sur la sismicité .....	56
7.2.    Effet des failles majeures sur le substratum .....	57
7.3.    Alteration des calcaires et Karsts .....	57
7.3.1.    Principe de l'altération des calcaires .....	57
7.3.2.    Altération des calcaires dans l'ouest du Bassin de Paris .....	58
7.3.3.    Hypothèses pour la macro-zone FGL .....	58
8. Recommandations pour la poursuite des études du substratum .....	60
8.1.    Bathymétrie très-haute-résolution .....	60
8.2.    Sismique très-haute-résolution .....	60
8.3.    Sondages géologiques .....	63
9. Conclusion .....	71
10. Références .....	72
11. Annexes .....	76

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la macro-zone Fécamp-Grand-Large (FGL) au sein de la façade Manche Est – Mer du Nord (MEMN), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023) .....	9
Figure 2 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone FGL, sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone FGL (cf. Figure 1) .....	11
Figure 3 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021), au niveau de la macro-zone FGL, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).....	13
Figure 4 : Reconstitution de la paléogéographie des façades de l'Atlantique et de la Manche au cours du dernier maximum glaciaire (DMG), il y a environ 20 000 ans. Une large portion du plateau continental actuel est alors émergée (vert clair). Les fleuves s'y prolongent jusqu'au littoral et se rejoignent parfois pour former de nouveaux cours d'eau comme le fleuve Manche (Seine, Somme, Tamise,...). Carte modifiée de Paquet (2022) et établie d'après Larsonneur et al. (1982), Ehlers et Gibbard (2004), Menier (2004), Thinon et al. (2008), Weber (2004), Lericolais et al. (2001).	14
Figure 5 : Carte d'isopaques (épaisseur) des sédiments meubles des paléovallées et des fosses (couleur jaune à vert), issue des travaux d'inventaires en granulats marins réalisés par l'Ifremer (Augris et al., 2006 ; Gautier et al., 2012), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).....	15
Figure 6 : Carte simplifiée montrant la distinction entre le réseau hydrographique de paléovallées immersées (NETWORK 1 - blanc pointillés) et du réseau de fosses (NETWORK 2- isopaques jaunes à rouges), dont la Fosse d'Antifer (An), les Fosses du Cotentin (Co), et le « Deep Groove » (DG). La macro-zone FGL est figurée en trait interrompu-court dans le coin NE. Fond de carte issu de la carte géologique simplifiée mise à jour (modifiée d'après Paquet et al., 2023).....	16
Figure 7 : Carte d'isopaques (épaisseur) des bancs sableux et prismes sédimentaires principaux issue des travaux d'inventaires en granulats marins réalisés par l'Ifremer (Augris et al., 2006, Gautier et al., 2012), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). La zone de présence de dunes sableuses dans la macro-zone FGL est localisée par le cercle rouge.....	17
Figure 8 : Carte des grands domaines géologiques autour de la Manche et de la macro-zone FGL.....	18
Figure 9 : Carte géologique de la façade MEMN simplifiée d'après Chantraine et al., (2003), indiquant la position de la macro-zone FGL. Le tracé de la coupe Figure 10 est figuré par un trait discontinu.....	19
Figure 10 : Coupe géologique régionale NE-SO à travers le haut structural Weald Artois et le Bassin de Dieppe Hampshire (modifiée d'après BGS-BRGM, 1988). Localisation de la coupe sur la Figure 9. On notera l'importante discordance entre Jurassique (bleu) et Crétacé (vert) .....	20
Figure 11 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL simplifiée d'après la carte géologique de la France de Chantraine et al. (2003). Légende identique à la Figure 9 et reprise dans le Tableau 1. Le point rouge correspond à la localisation du forage d'exploration pétrolière Nautilus-1 (cf. portail Minergies). .....	21
Figure 12 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL modifiée d'après la carte géologique de la Manche d'Auffret et Gruas-Cavagnetto (1975). Pour la légende, voir le Tableau 1 ci-dessous. Le point rouge correspond à la localisation du forage d'exploration pétrolière Nautilus-1.	
.....	22

Figure 13 : Carte géologique du Bassin de Dieppe-Hampshire (modifié d'après Jollivet-Castelot, en préparation) figurant l'emprise de la macro-zone FGL. Les triangles représentent la position des prélèvements datés issus de la campagne TREMOR 2 (Paquet et Gaullier, 2017).....	23
Figure 14 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL et montrant la portion couverte par la carte géologique de la Baie de Seine réalisée au 1/250 000 (Paquet et al. en préparation). Légende dans le Tableau 2.....	23
Figure 15 : Bloc diagramme tridimensionnel schématique, vu depuis le sud-ouest, illustrant la répartition des structures tectoniques principales du nord de la Baie de Seine incluant la Faille de Fécamp-Lillebonne (FFL) et la Faille Nord Baie de Seine (FNBS), qui distinguent deux blocs structuraux Sud et N-NE (Paquet, 2021). .....	25
Figure 16 : Carte des domaines structuraux ouest-européens relatifs à la chaîne varisque (Ballèvre et al., 2009). La zone d'étude (macro-zone FGL) est localisée par le cercle rouge....	26
Figure 17 : Plan de position des lignes sismiques disponibles (tracés noirs) et des lignes sismiques ayant fait l'objet d'interprétation dans le cadre de la présente étude (couleurs). Le dégradé de couleurs représente la valeur de bathymétrie déduite du pointé du fond marin sur les lignes interprétées. La macro-zone FGL est figurée par un trait interrompu noir.....	28
Figure 18 : Correspondance entre la Charte stratigraphique internationale (Cohen et al., 2013 mise à jour 2023), la stratigraphie locale de la macro-zone FGL telle que déterminée par l'étude bibliographique (cette étude et références citées au chapitre 4), et les horizons identifiés sur les profils sismiques.....	30
Figure 19 : Carte de localisation des 29 coupes sismiques interprétées et présentées dans le manuscrit (Figure 20 à Figure 25) et/ou en annexes, sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023) (légende en Figure 5). .....	31
Figure 20 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°01. ....	32
Figure 21 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°02.....	33
Figure 22 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°09.....	34
Figure 23 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°11.....	35
Figure 24 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°25.....	36
Figure 25 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°26.....	37
Figure 26 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités stratigraphiques du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) au Néogène et Quaternaire (fosses et paléovallees, dunes). Les sédiments meubles ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique.....	38
Figure 27 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, présentée en écorché sous-Néogène-Quaternaire, et montrant la répartition des unités stratigraphiques du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) à l'Eocène supérieur (Bartonien - e6). Les ensembles sédimentaires meubles ne sont pas représentés... .	39
Figure 28 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées au sein de chaque étage ou sous-étage identifiées dans la macro-zone FGL.....	45

Figure 29 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, montrant la répartition des unités stratigraphiques et les lithologies principales associées, en écorché sous-Néogène-Quaternaire, du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) à l'Eocène supérieur (Bartonien - e6). ....	46
Figure 30 : Sismicité historique et instrumentale de la France compilée à partir de plusieurs catalogues de sismicité contenant des séismes allant de 463 à septembre 2023. ....	48
Figure 31 : Zoom sur la sismicité régionale : la sismicité naturelle illustrée par des cercles de différentes couleurs et tailles correspondant à la magnitude. La sismicité anthropique est représentée par des points verts. Le réseau de stations sismiques (RESIF / EPOS-FR) est indiqué. ....	49
Figure 32 : Complétude du catalogue de sismicité instrumentale pour trois gammes de magnitude Mw [2,5- 3], [3-4] et Mw [4-5] : graphique en haut dans un rayon de 50 km et graphique en bas dans un rayon de 150 km à partir du centroïde de la zone d'étude. ....	51
Figure 33 : Sismicité localisée dans un rayon de 50 km autour du centroïde de la zone d'étude. Tracés des structures issues de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (Chantraine et al., 2003).....	53
Figure 34 : Sismicité localisée dans un rayon de 150 km autour du centroïde de la zone d'étude. Tracés des structures issues de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (Chantraine et al., 2003) et zonage sismique français (2011, article D.563-8-1 du code l'environnement). .	55
Figure 35 : Illustration de l'effet d'une densification du maillage de profils sismiques réflexion permettant de caractériser plus finement la complexité de la distribution des structures tectoniques. A : illustre la position de structures identifiées le long des profils sismiques ; B : proposition d'interprétation la plus simple à partir des positions obtenues en A ; C : illustre le cas d'une géométrie complexe en-échelon ne pouvant être validée que par un doublement des densités de profils sismiques selon les deux directions.....	61
Figure 36 : Carte montrant la localisation et l'espacement des profils sismiques des campagnes Chalkwave 2015 et 2016 (Paquet, 2015, 2016) ayant permis le tracé des structures tectoniques associées à la faille de Fécamp-Lillebonne. ....	62
Figure 37 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°01 et montrant une proposition d'implantation de 7 sondages carottés (01-01 à 01-07) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.....	65
Figure 38 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°02 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (02-01 à 02-06) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.....	66
Figure 39 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°09 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (09-01 à 09-18) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.....	67
Figure 40 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°11 et montrant une proposition d'implantation de 3 sondages carottés (11-01 à 11-03) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.....	68
Figure 41 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°26 et montrant une proposition d'implantation de 5 sondages carottés (26-01 à 26-05) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.....	69
Figure 42 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, montrant la répartition des unités et montrant une proposition d'implantation de 5 sondages carottés (26-01 à 26-05) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques. ....	70

## 1. Introduction

La macro-zone Fécamp-Grand-Large (FGL) est située au sein de la façade Manche Est – Mer du Nord (MEMN), au large de la Seine-Maritime. Elle s'étend au-delà des 12 miles nautiques, sur environ 75 km selon un axe ENE-OSO et environ 30 km selon un axe NNO-SSE, et sa superficie est d'environ 1850 km<sup>2</sup> (Figure 1). L'ensemble de la zone MEMN est en domaine de plateau continental (0 à environ -200 m ; Paquet, 2024), ainsi que la macro-zone FGL (-30 à -65 m).

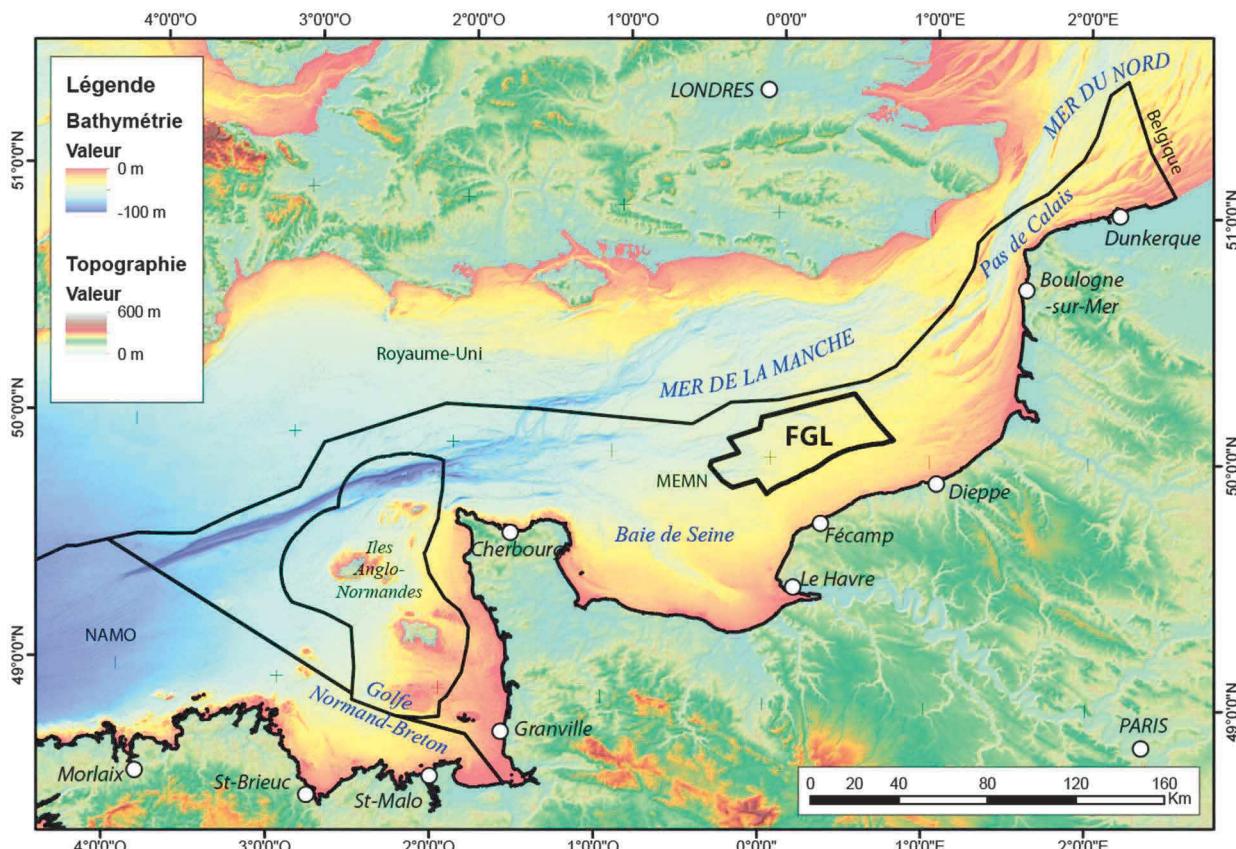


Figure 1 : Localisation de la macro-zone Fécamp-Grand-Large (FGL) au sein de la façade Manche Est – Mer du Nord (MEMN), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

Dans les sections suivantes, les détails sont apportés au niveau de la macro-zone FGL sur (i) la bathymétrie et la morphologie du fond, (ii) la distribution des grands types de sédiments superficiels, (iii) les grands ensembles et unités géologiques du substratum, ainsi que les principales structures tectoniques, qui recoupent et/ou déforment les formations géologiques. Les aléas géologiques potentiels associés sont abordés, et la sismicité régionale détaillée.

## 2. Géomorphologie des fonds marins de la macro-zone FGL

La description morphobathymétrique de la macro-zone FGL se base sur le modèle numérique de terrain (MNT) bathymétrique synthétique produit dans le cadre du projet européen EMODnet (2022 ; <https://emodnet.ec.europa.eu/en>), dont les données sources sont issues du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine ; <https://data.shom.fr/>). La résolution spatiale de ce MNT est de l'ordre de 90 m.

Les fonds marins de la macro-zone FGL (Figure 2) sont relativement peu profonds, entre -30 et -65 m et correspondent au premier ordre à un vaste plateau de faible pente (0.1 à 0.2°) orientée vers le NO. Les zones les moins profondes se situent le long de la limite SSE, à 12 Mm (Miles nautiques) des côtes. Les zones les plus profondes sont retrouvées dans deux dépressions isolées et allongées selon un axe E-O, et présentant des formes légèrement arquées. La moins profonde (environ -55 m) est située le long de la limite septentrionale de la macro-zone FGL et mesure 3 x 11 km. La plus profonde (environ -65 m) est située à cheval sur la bordure occidentale de la macro-zone FGL et mesure environ 3 x 25 km. Cette dernière est nommée creux ou fosse d'Antifer de manière informelle dans la littérature scientifique (Alduc, 1979 ; Paquet *et al.*, 2023). Ces deux dépressions sont 15 à 20 m plus profondes que les terrains environnants. Le reste de la macro-zone ne présente pas de reliefs marqués, mais on note néanmoins deux morphologies caractéristiques. La plus étendu, correspond à de vastes zones exemptes de rugosité à l'échelle d'observation. La deuxième est présente sur deux secteurs et montre une rugosité marquée et continue, caractérisée par des reliefs de 10 à 15 m de dénivellation et de dimensions inférieures à 300 m. Le secteur le plus vaste, d'environ 200 km<sup>2</sup>, couvre l'extrémité occidentale de la zone. Le second, d'une superficie plus réduite de l'ordre de 90 km<sup>2</sup>, est localisé au cœur de la macro-zone. Localement, des escarpements subparallèles et plus ou moins sinueux sont également visibles, notamment dans le NE de la macro-zone. Un léger escarpement d'orientation NE-SO et de dénivellation inférieure à 10 m, ouvre sur une vaste dépression associée à la paléovallée médiane au NO de la zone. De rares pointements sont identifiés dans l'angle SE de la macro-zone. Ces derniers pourraient correspondre à des dunes isolées.

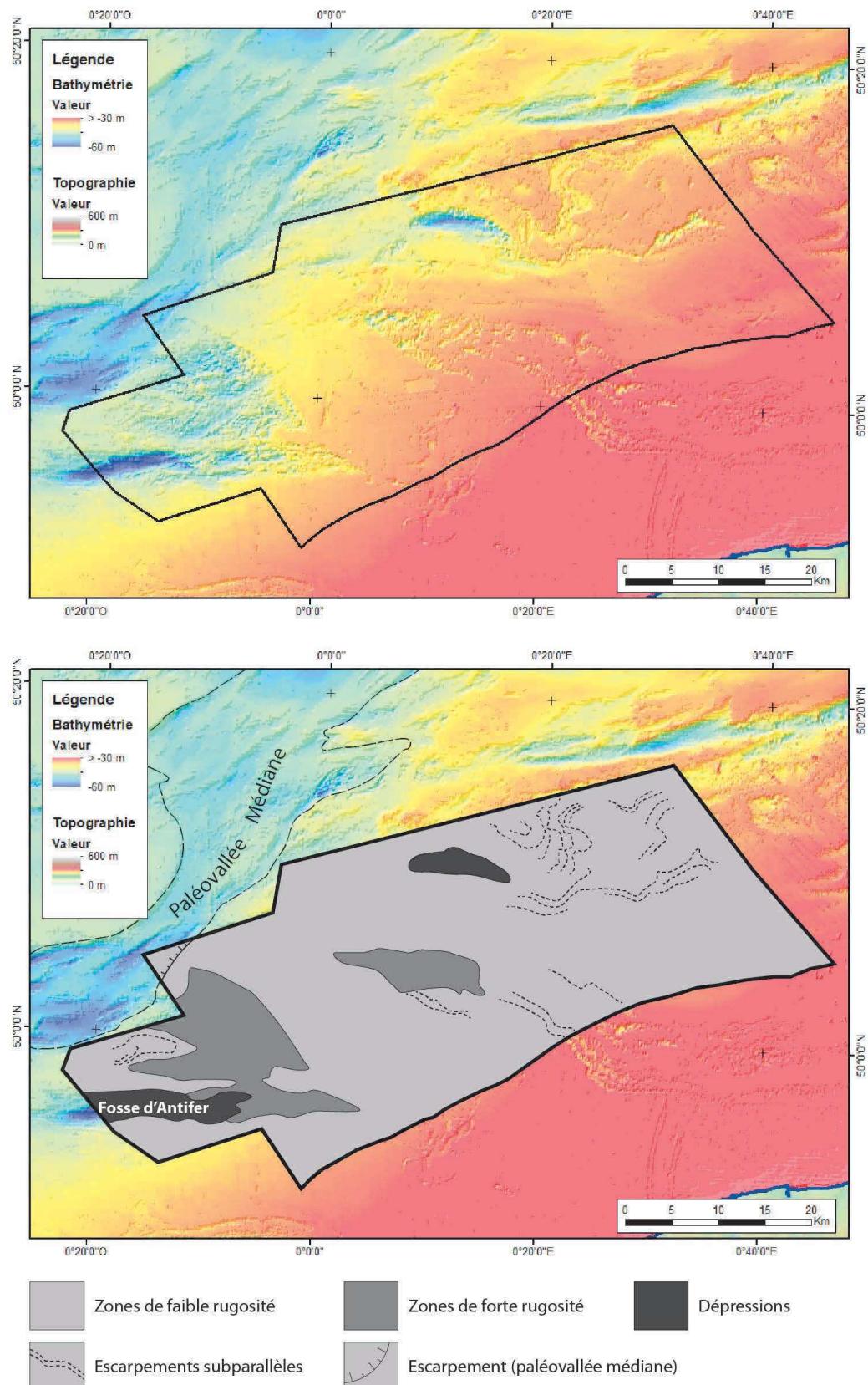


Figure 2 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone FGL, sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone FGL (cf. Figure 1)

### 3. Nature des fonds et grands ensembles sédimentaires meubles

#### 3.1. NATURE DES FONDS

En règle générale, les fonds marins peuvent être recouverts d'une épaisseur variable de sédiments plus ou moins grossiers, ou bien correspondre à des affleurements de roches. Au premier ordre, ce sont les mouvements verticaux de la croûte terrestre (surrection or subsidence) associés aux processus d'érosion, transport et sédimentation, qui déterminent la répartition des types de nature des fonds et ainsi la présence, la distribution, et le déplacement des vases (argiles et silts), des sables (fins, moyens, grossiers), des graviers, galets et blocs. On considère sous le terme « nature des fonds », la description du substrat marin sur les premiers centimètres.

Sur la macro-zone FGL, ainsi que sur l'ensemble du territoire français, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) est le référentiel sur la thématique « nature des fonds ». Il produit des cartes dédiées à différentes échelles, basées sur des données géologiques et géophysiques pertinentes et disponibles. Ces travaux sont intégrés dans la « Carte Sédimentologique Mondiale », accessible via le portail de données SHOM (<https://data.shom.fr/>).

La cartographie de la nature des fonds de la macro-zone FGL (Figure 3) rend compte de cette distribution des sédiments et zones de roches. Plusieurs méthodes de détermination du fond marin ont été utilisées, parfois de façon complémentaire, incluant les prélèvements (plombs suiffés, dragues, bennes et carottages) et les méthodes géophysiques (imagerie acoustique, bathymétrie mono- et multifaisceaux, sismique très-haute-résolution).

La macro-zone FGL montre ainsi des fonds dominés par des sédiments grossiers (cailloutis, graviers) et par les sables. Les sédiments fins (sables fins, silts, vases et argiles) sont principalement cantonnés aux zones proches du littoral. Des rares zones de roches affleurantes sont identifiées au niveau des platiers aux pieds des falaises côtières.

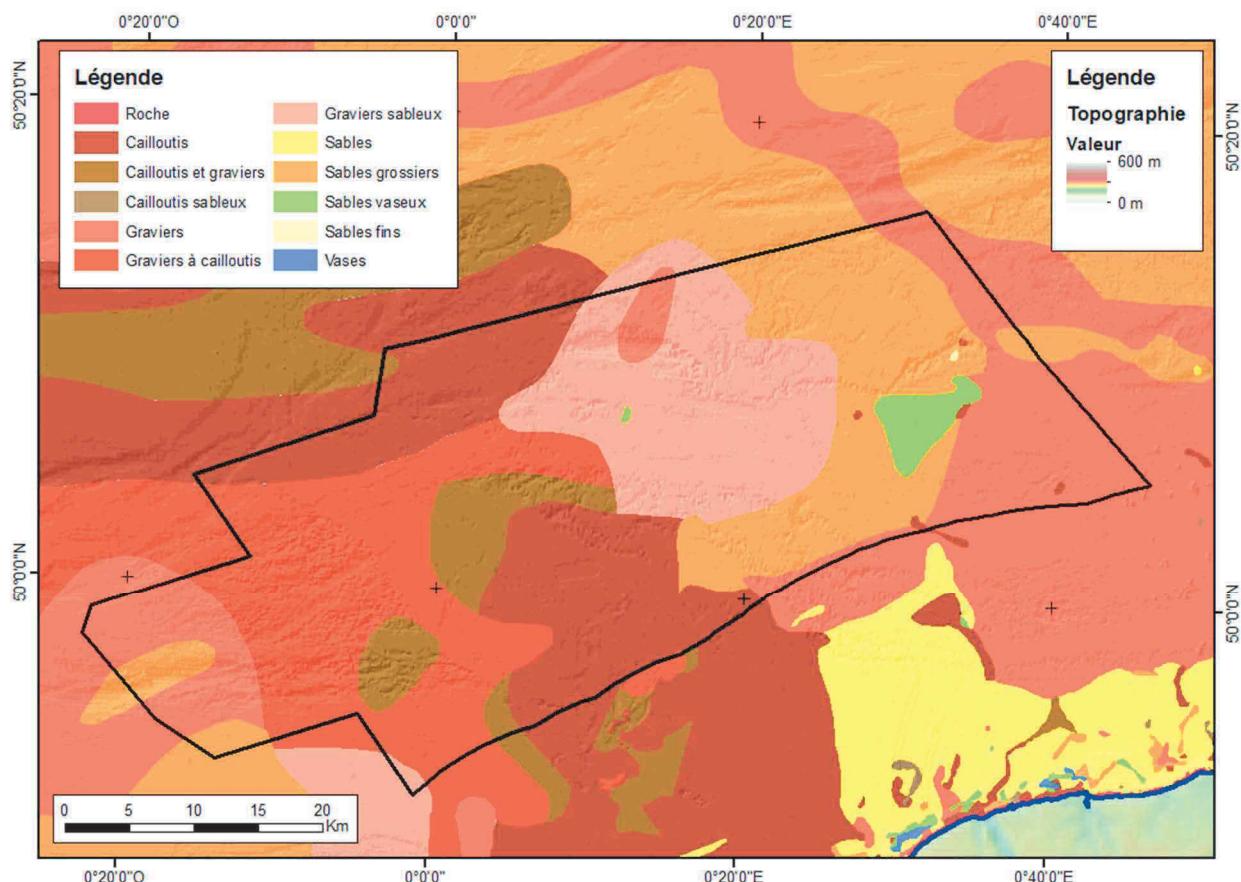


Figure 3 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021), au niveau de la macro-zone FGL, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

### 3.2. ENSEMBLES SEDIMENTAIRES MEUBLES

Au-delà de la nature des fonds, ce chapitre s'intéresse aux ensembles sédimentaires meubles présents sur le fond marin. Sont dénommés sédiments meubles, tous sédiments non consolidés en roche sédimentaire et potentiellement mobilisables. Sur le domaine marin, ils sont constitués par les sédiments superficiels décrits précédemment dans les cartes de nature de fonds, et par les dépôts non consolidés sous-jacents, et ce parfois sur plusieurs mètres à dizaines de mètres. A l'instar des roches sédimentaires, les sédiments sont caractérisés par leur(s) nature(s) (composition minéralogique, chimique, ...), leur(s) origine(s) (terrigènes, biogéniques, volcaniques, évaporitiques ...) et leur granulométrie (vases, sables, graviers, cailloutis, galets, et leurs assemblages (sables vaseux, ...)).

Ces ensembles sont également déterminés et caractérisés par des méthodes d'investigations géologiques (prélèvements) et géophysiques (bathymétrie, sismique).

Sur la macro-zone FGL, trois grands ensembles sont identifiés :

- Le remplissage des paléovallées
- Les dunes et bancs sableux

Le remplissage des paléovallées correspond à des dépôts d'origine fluviatile, tidale et marine remplissant tout ou partie des incisions fluviatiles ayant formé le réseau de paléovallées lors des bas niveaux marins. Le dernier bas niveau marin attesté remonte à environ 20 000 ans, lors du dernier maximum glaciaire. En effet, les études ont montré qu'au Pléistocène moyen et supérieur (depuis environ 800 000 ans), les variations du climat avec des alternances de périodes glaciaires

et interglaciaires sur des cycles de 100 000 ans ont provoqué des chutes et remontées du niveau marin global (eustatisme) de l'ordre de la centaine de mètres (Lisiecki et Raymo, 2005 ; Cohen et Gibbard, 2019). Le dernier cycle (Weichselien / Pléistocène supérieur) a débuté avec un niveau marin comparable à l'actuel, il y a environ 120 000 ans. Rapidement, avec le refroidissement et l'entrée en période glaciaire, le piégeage d'une quantité grandissante d'eau sous forme de glace (aux hautes latitudes et en altitude) a fait progressivement chuter le niveau marin. Cet abaissement s'est effectué sur environ 100 000 ans et le bas niveau marin, autour de -120 mètres par rapport à l'actuel, a été atteint il y a environ 20 000 ans, lors du dernier maximum glaciaire (DMG) dont une reconstitution paléogéographique est présentée en Figure 4. Les liens entre ensembles sédimentaires meubles et éléments géomorphologiques apparaissent clairement dans le cas des paléovalleyées.

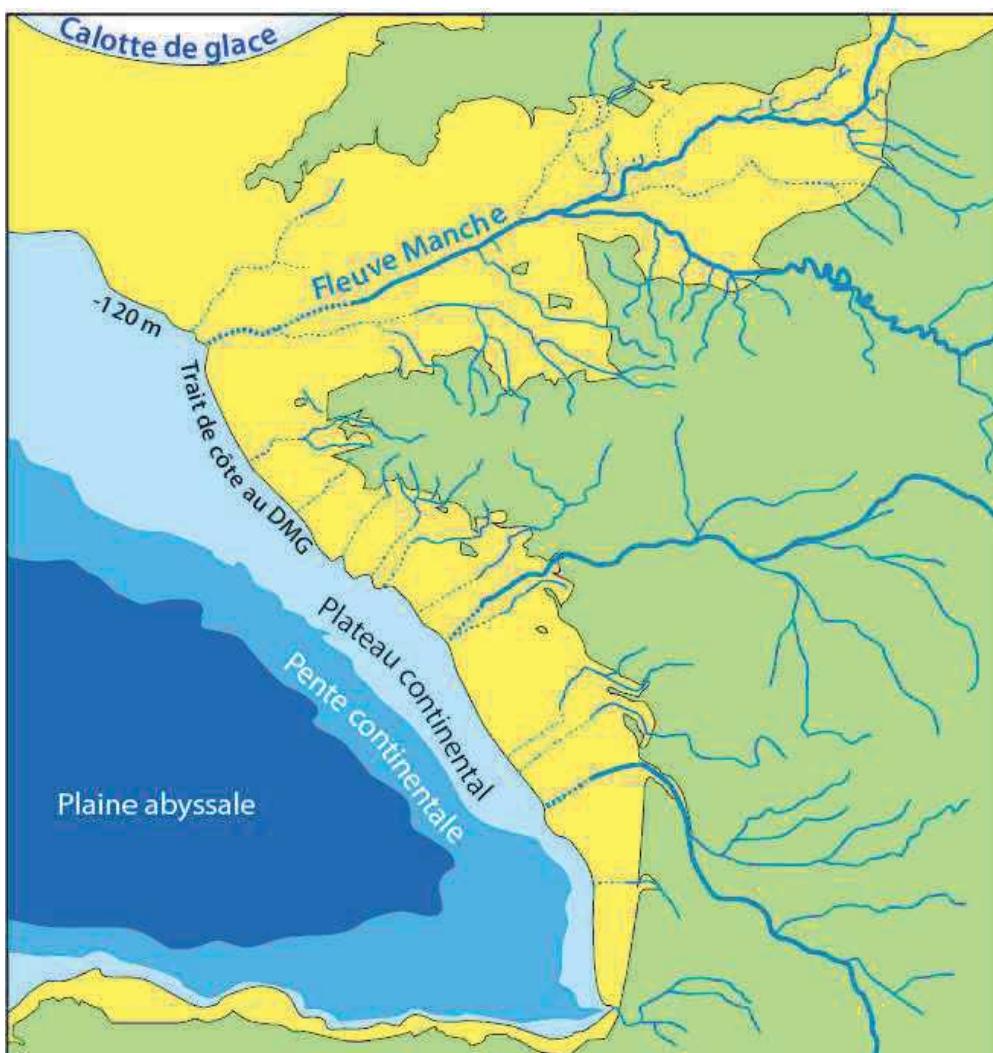


Figure 4 : Reconstitution de la paléogéographie des façades de l'Atlantique et de la Manche au cours du dernier maximum glaciaire (DMG), il y a environ 20 000 ans. Une large portion du plateau continental actuel est alors émergée (vert clair). Les fleuves s'y prolongent jusqu'au littoral et se rejoignent parfois pour former de nouveaux cours d'eau comme le fleuve Manche (Seine, Somme, Tamise,...). Carte modifiée de Paquet (2022) et établie d'après Larsonneur et al. (1982), Ehlers et Gibbard (2004), Menier (2004), Thinon et al. (2008), Weber (2004), Lericolais et al. (2001).

Au niveau de la macro-zone FGL, on observe que le plateau continental, actuellement immergé, se trouve totalement émergé. La Manche et la mer du Nord sont « asséchées », et les littoraux

sont repoussés soit vers le cœur de la Mer du Nord (partiellement englacée), ou au large du Finistère. Les différents fleuves que nous connaissons actuellement ont étiré leur cours sur ces terres progressivement émergées. Pour accompagner la chute du niveau marin, les rivières ont incisé le substratum pour maintenir leur profil à l'équilibre. Le tracé des rivières a été influencé par la morphologie préexistante du plateau continental et a souvent repris d'anciens tracés de vallées creusées pendant les bas niveaux marins antérieurs. Il faut ainsi imaginer qu'au droit des embouchures actuelles, les vallées fluviales se prolongent sous la mer jusqu'à atteindre le replat du plateau continental autour de -60 m NGF, où les rivières semblent ne plus inciser le substratum. C'est au sein de ces incisions que sont préservés les sédiments fluviatiles des périodes de bas niveaux, mais également les sédiments fluviatiles, tidaux d'embouchure (estuaires), puis marins, qui s'y sont accumulés lors des remontées et hauts niveaux marins.

Certaines paléovallées ne présentent pas de remplissage significatif mais celui-ci peut néanmoins atteindre plusieurs dizaines de mètres localement et combler entièrement la paléovallée (Figure 5 ; Augris *et al.*, 2006 ; Gautier *et al.*, 2012).

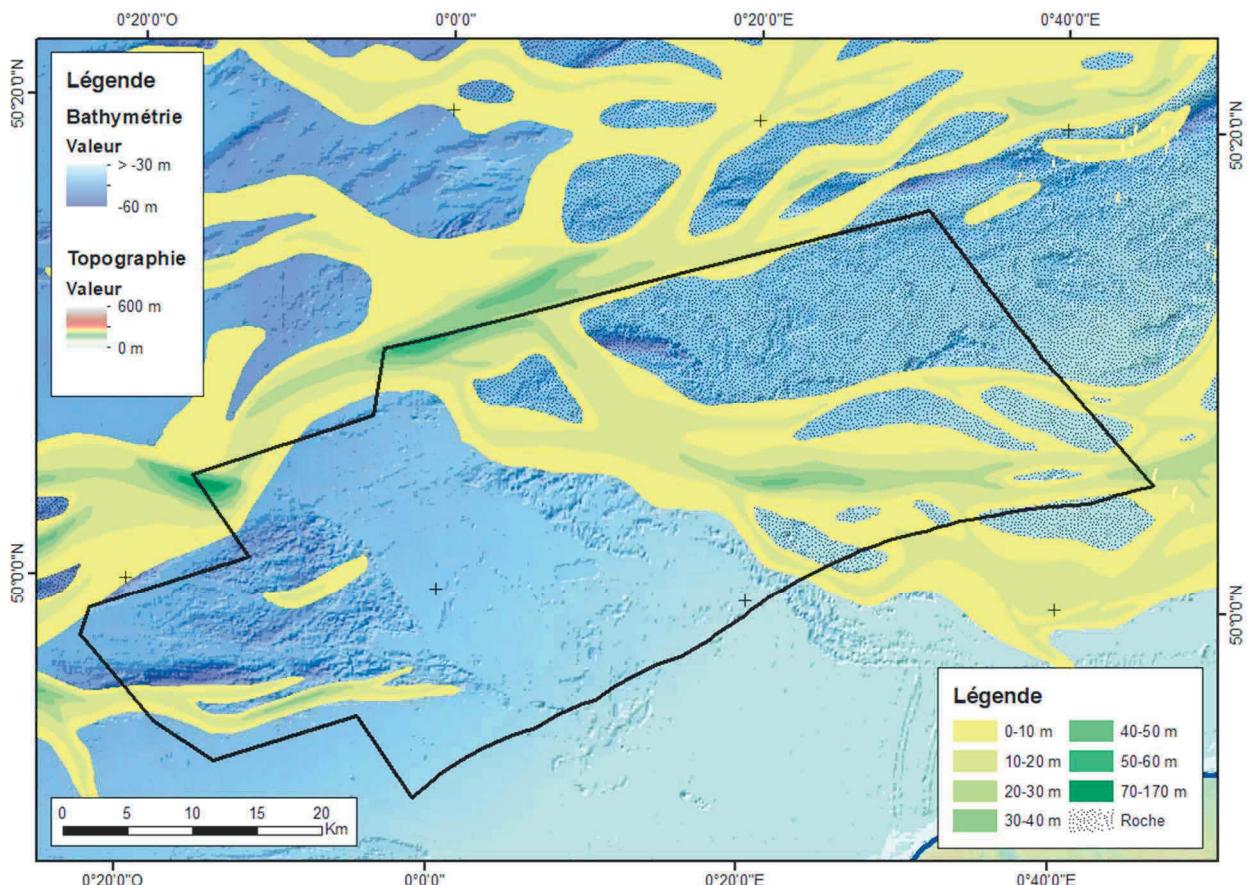


Figure 5 : Carte d'isopaques (épaisseur) des sédiments meubles des paléovallées et des fosses (couleur jaune à vert), issue des travaux d'inventaires en granulats marins réalisés par l'Ifremer (Augris *et al.*, 2006 ; Gautier *et al.*, 2012), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

Les incisions de type fosses et leur remplissage décrites dans la section « géomorphologie » sont régulièrement associés aux paléovallées, comme c'est le cas sur la Figure 5. L'origine des fosses et leur relation génétique avec les paléovallées sont débattues depuis leur découverte (Alduc, 1979, Gupta *et al.*, 2017). Cependant, les études récentes réalisées à l'ouest de la macro-zone FGL et basées sur des données nouvellement acquises, remettent en cause ce lien génétique en proposant une origine plus ancienne et possiblement marine à tidale pour leur creusement (Paquet *et al.*, 2023 ; Kaci, 2023 ; Figure 6). Certaines fosses présentent des morphologies en dépression (voir section géomorphologie) lorsqu'elles ne sont pas complètement comblées. La

profondeur d'incision de ces fosses et l'épaisseur de leur remplissage peuvent approcher aisément les 100 m sur la macro-zone FGL (Figure 5). Elles dépassent les 350 m dans le « Deep Groove », au nord de la Baie de Seine et directement à l'ouest de la macro-zone (Paquet *et al.*, 2023). L'âge de l'incision et du remplissage des fosses reste incertain mais est compris entre le Bartonien (40 Ma) et le Pléistocène (120 ka). L'induration de tout ou partie du remplissage est également un point de questionnement qui reste à adresser.

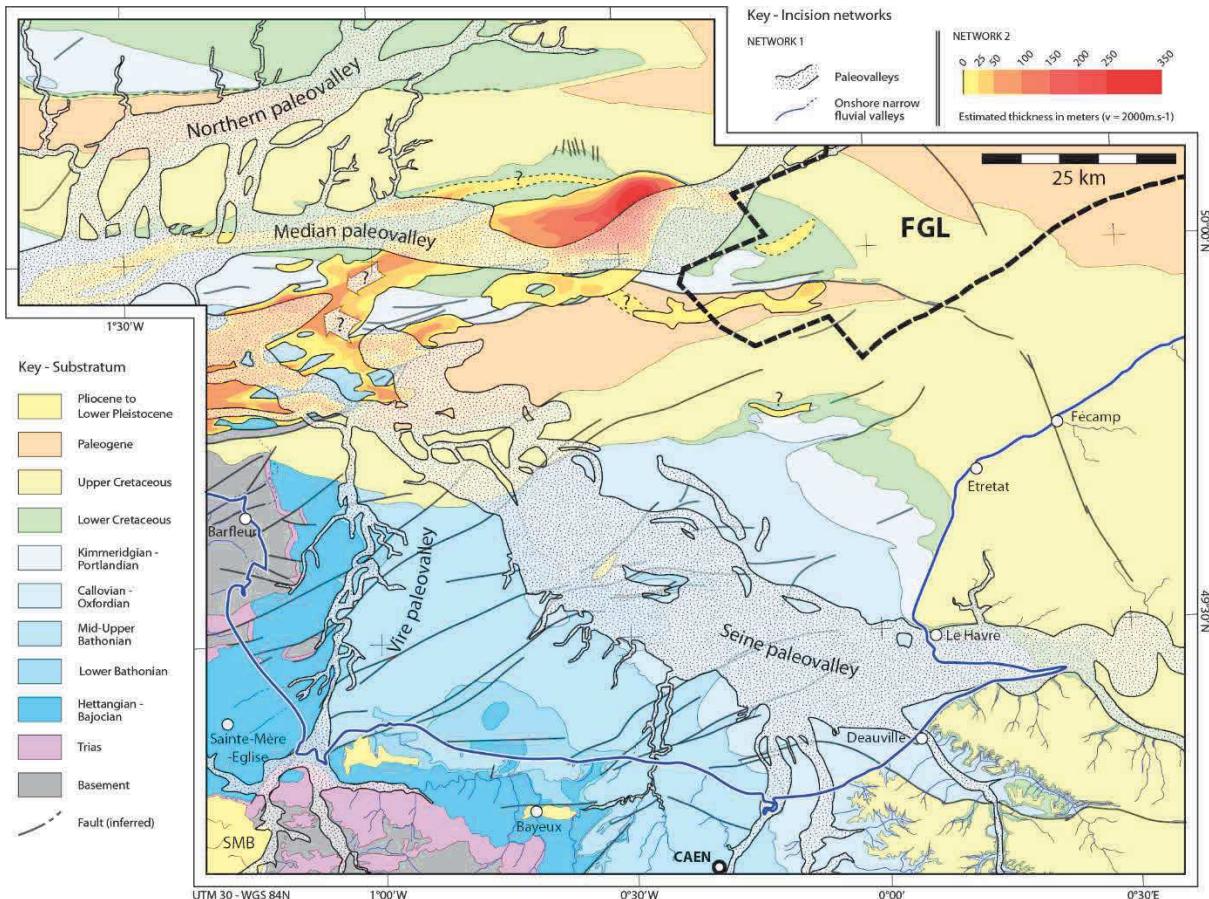


Figure 6 : Carte simplifiée montrant la distinction entre le réseau hydrographique de paléovalées immersées (NETWORK 1 - blanc pointillés) et du réseau de fosses (NETWORK 2- isopaques jaunes à rouges), dont la Fosse d'Antifer (An), les Fosses du Cotentin (Co), et le « Deep Groove » (DG). La macro-zone FGL est figurée en trait interrompu-court dans le coin NE. Fond de carte issu de la carte géologique simplifiée mise à jour (modifiée d'après Paquet *et al.*, 2023).

La géomorphologie, la nature du fond marin et les grands ensembles de sédiments meubles montrent une cohérence forte. La distribution des morphologies et des sédiments reflète l'évolution paléo-environnementale et hydrodynamique quaternaire et actuelle du plateau continental. Les alternances glaciaires-interglaciaires ont façonné le plateau en créant une vaste plaine actuellement immergée, et parcourue d'incisions (paléovalées et fosses) témoignant d'évolutions des reliefs lors des chutes ou remontées du niveau marin. Les sables sont actuellement mobilisés par l'hydrodynamisme important de ce secteur et forment dunes et bancs sableux qui évoluent sans cesse. Hormis ces ensembles sableux et le remplissage des incisions, le plateau est recouvert d'une épaisseur souvent infra-métrique de sédiments grossiers (graviers, galets), laissant parfois affleurer le substratum rocheux.

Les dunes et bancs majoritairement sableux sont cartographiés à l'est de la macro-zone (Figure 7 ; Augris *et al.*, 2006 ; Gautier *et al.*, 2012). Si les cartes disponibles ne font pas état de la présence de dunes ou bancs dans la macro-zone FGL, les données bathymétriques montrent des pointements dont les morphologies sont comparables à celles des dunes cartographiées

directement à l'est. Nous proposons que ces reliefs d'une hauteur de 5 à 10 mètres soient considérés comme des dunes isolées.

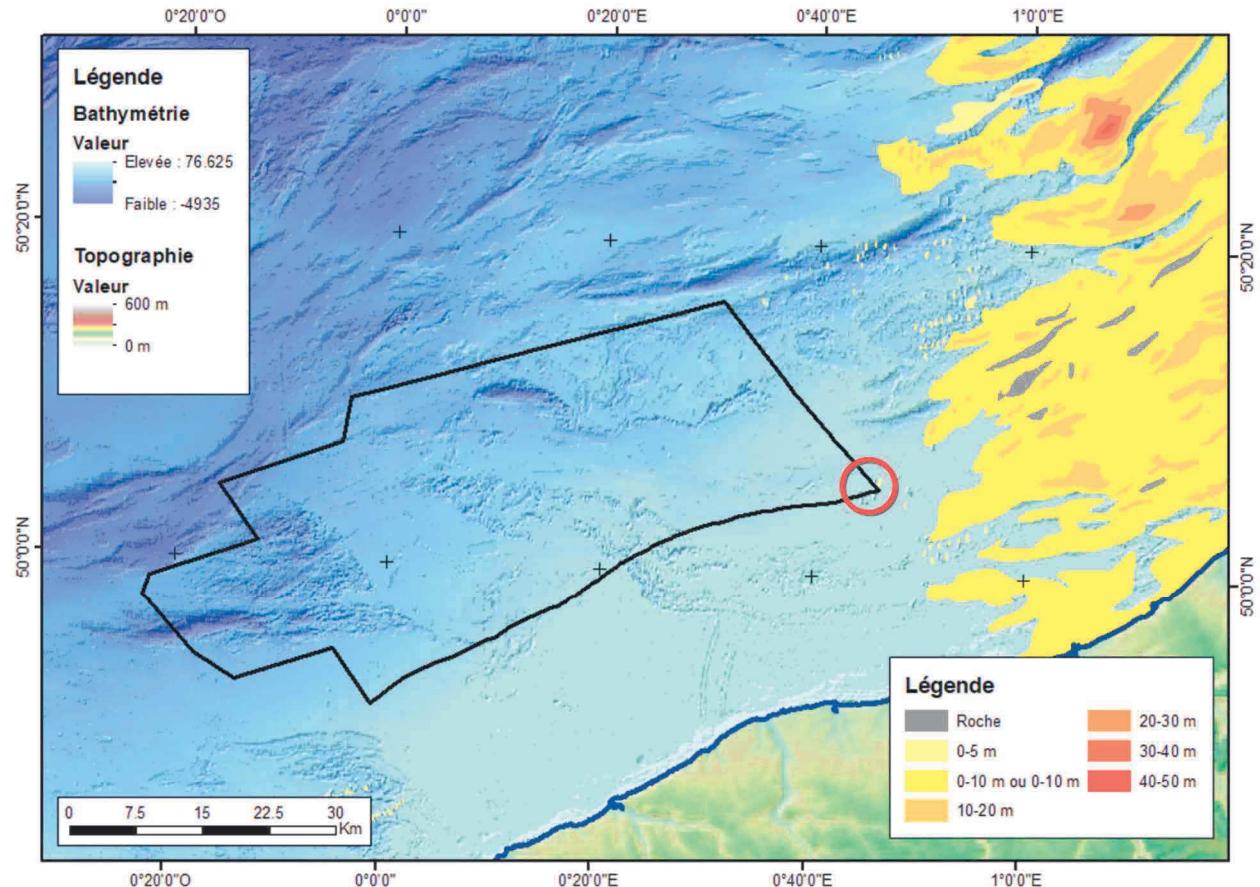


Figure 7 : Carte d'isopaques (épaisseur) des bancs sableux et prismes sédimentaires principaux issue des travaux d'inventaires en granulats marins réalisés par l'Ifremer (Augris et al., 2006, Gautier et al., 2012), sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). La zone de présence de dunes sableuses dans la macro-zone FGL est localisée par le cercle rouge.

## 4. Ensembles géologiques, stratigraphie et structuration globale du substratum

Les sédiments meubles reposent sur un soubassement induré communément appelé substratum, et qui est souvent sub-affleurant en Manche, hors des zones d'accumulation sédimentaires (dunes et bancs, paléovallées, prisme littoral). Les premiers travaux de géologie en Manche ont permis de caractériser les grands ensembles du substratum rocheux et ainsi de dessiner le prolongement des grands ensembles géologiques connus à terre, de part et d'autre du corridor maritime. Dans cette section, la description des grands ensembles géologiques (Figure 8), de la stratigraphie et des grandes structures est abordée de façon simplifiée, en se basant sur la carte géologique de la France à l'échelle du million (Chantraine *et al.*, 2003 ; Figure 9).

### 4.1. ENSEMBLES GEOLOGIQUES ET STRATIGRAPHIE

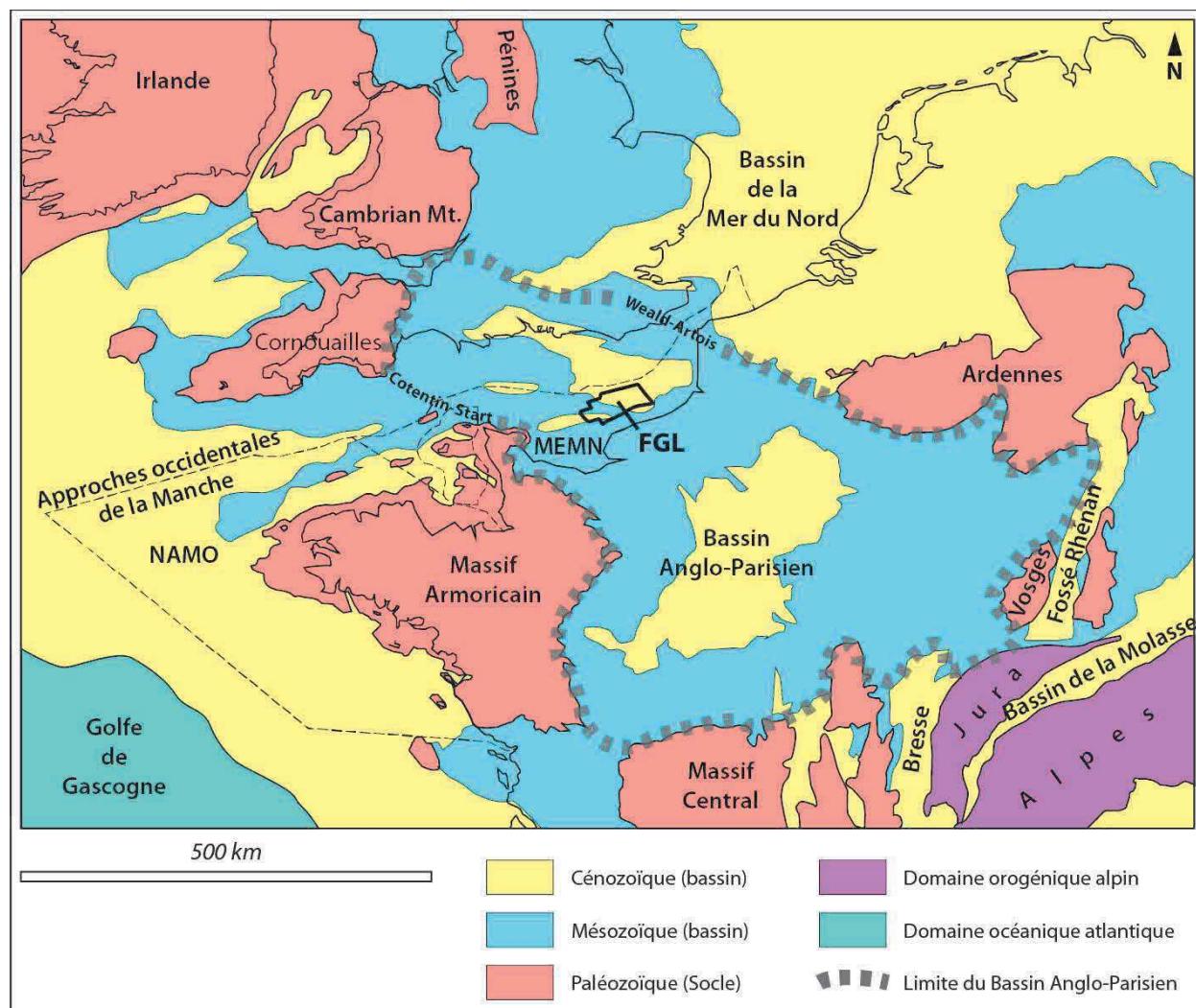
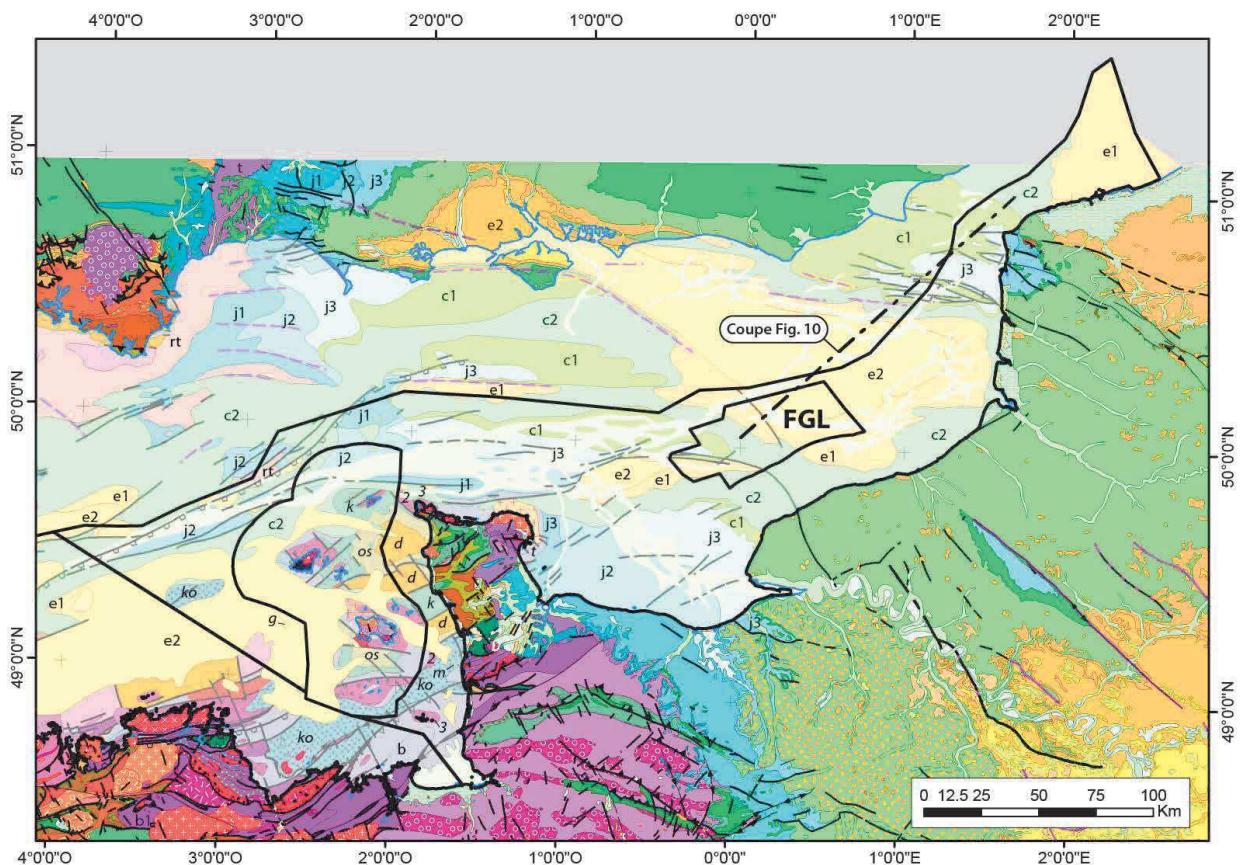


Figure 8 : Carte des grands domaines géologiques autour de la Manche et de la macro-zone FGL.



Légende des grandes ensembles stratigraphiques en mer (zone MEMN)

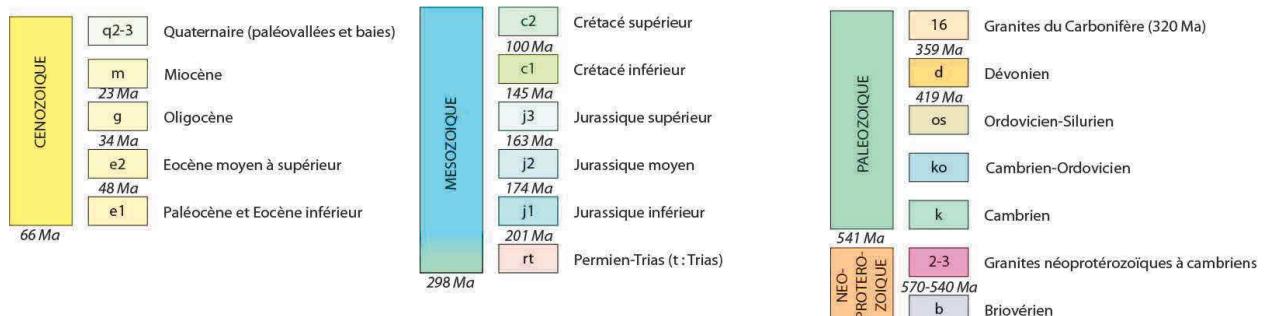


Figure 9 : Carte géologique de la façade MEMN simplifiée d'après Chantraine et al., (2003), indiquant la position de la macro-zone FGL. Le tracé de la coupe Figure 10 est figuré par un trait discontinu.

La macro-zone FGL est localisée au sein du Bassin Anglo-Parisien, à cheval sur des terrains mésozoïques et cénozoïques (Figure 8 et Figure 9). Le substratum rocheux de la macro-zone est donc de nature sédimentaire. D'après les informations cartographiques tirées de la carte géologique de la France à l'échelle du millionième (Chantraine et al., 2003) ainsi que la coupe géologique NE-SO tirée des travaux BGS-BRGM (1988), les terrains sub-affleurants les plus anciens sur l'emprise de la macro-zone FGL sont d'âge Jurassique supérieur (j3). Ils sont surmontés en discordance par des dépôts du Crétacé inférieur (c1). Cette discordance majeure (surface d'érosion) est bien visible sur la coupe géologique de la Figure 10, où elle sépare la série jurassique (bleu) de la série crétacée (vert). La suite de la série semble relativement conforme depuis le Crétacé inférieur, jusqu'à l'Eocène moyen à supérieur (e2) (Figure 10). Cette succession inclut le Crétacé supérieur (c2) et l'intervalle Paléocène-Eocène inférieur (e1) et est retrouvée dans le Bassin de Dieppe-Hampshire, ainsi que dans le Bassin Nord Baie de Seine (Figure 10 et Figure 11).

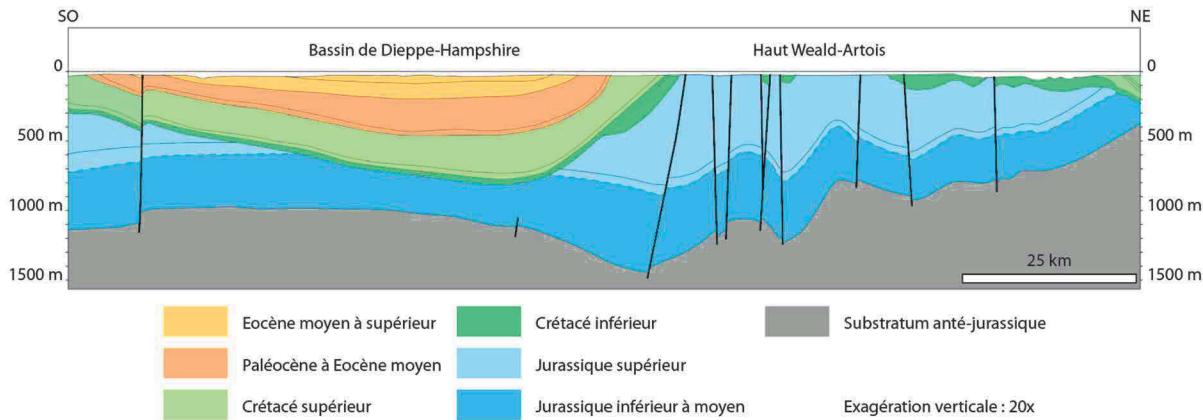


Figure 10 : Coupe géologique régionale NE-SO à travers le haut structural Weald Artois et le Bassin de Dieppe Hampshire (modifiée d'après BGS-BRGM, 1988). Localisation de la coupe sur la Figure 9. On notera l'importante discordance entre Jurassique (bleu) et Crétacé (vert)

Les bassins sédimentaires cénozoïques de Dieppe-Hampshire et Nord Baie de Seine correspondent à de larges synclinaux respectivement NO-SE et E-O, localement asymétriques et bordés par des structures tectoniques majeures (ex : Faille de Fécamp-Lillebonne). Si la coupe et la carte des Figures 10 et 11 donnent un aperçu général de la structuration et de l'organisation des séries sédimentaires au niveau de la macro-zone FGL, il est important de considérer les travaux originaux (Groupe Norois, 1972 ; Auffret, 1973 ; Auffret *et al.*, 1975 ; Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975), qui ont permis d'aboutir à ces visions d'ensemble ultérieures, tout en proposant un niveau de détail supérieur, notamment en termes de lithostratigraphie (Figure 12). Enfin, des travaux récents ont permis d'améliorer la cartographie et la compréhension générale de la géologie de la zone. Les travaux de doctorat de M. Benabdellouahed à l'Université de Caen – Basse Normandie (Benabdellouahed 2011 ; Benabdellouahed *et al.*, 2014) ont permis la mise à jour de la connaissance géologique au cœur de la Baie de Seine (hors macro-zone FGL). Les travaux de doctorat de M. Jollivet-Castelot à l'Université de Lille (Jollivet-Castelot, 2018 ; en préparation) se sont concentrés sur la révision de la stratigraphie des séries cénozoïques du Bassin de Dieppe-Hampshire à partir d'interprétation de la stratigraphie sismique des données des campagnes TREMOR (Gaullier, 2014) et TREMOR 2 (Paquet et Gaullier, 2017) et d'échantillonnages. Il propose entre-autre une révision des attributions stratigraphiques en abaissant la limite Lutétien-Bartonien, notamment sur la macro-zone FGL.

Parallèlement, des travaux de mise à jour de la cartographie géologique ont été entrepris par le BRGM sur la zone Manche, dans le cadre de plusieurs projets de recherche. Parmi eux, la mise à jour de la cartographie de la Baie de Seine a été initiée à la suite des travaux de Benabdellouahed (2011), et en parallèle de ceux de Jollivet-Castelot (2018). Cette mise à jour, basée sur l'interprétation de données sismiques récentes est en cours, notamment concernant la carte géologique de la Baie de Seine à l'échelle du 1/250 000 (Paquet *et al.*, en préparation) et intègre les résultats de la présente étude (Figure 14).

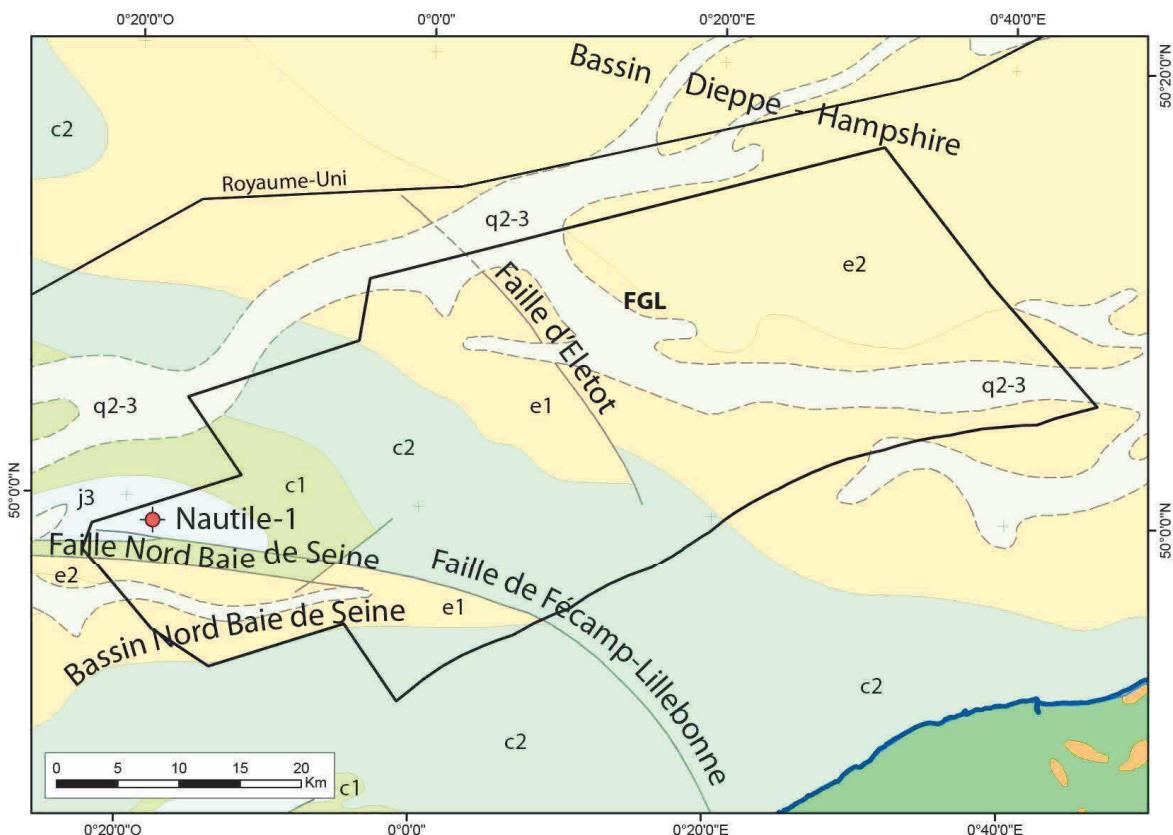


Figure 11 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL simplifiée d'après la carte géologique de la France de Chantraine et al. (2003). Légende identique à la Figure 9 et reprise dans le Tableau 1. Le point rouge correspond à la localisation du forage d'exploration pétrolière Nautile-1 (cf. portail [Minergies](#)).

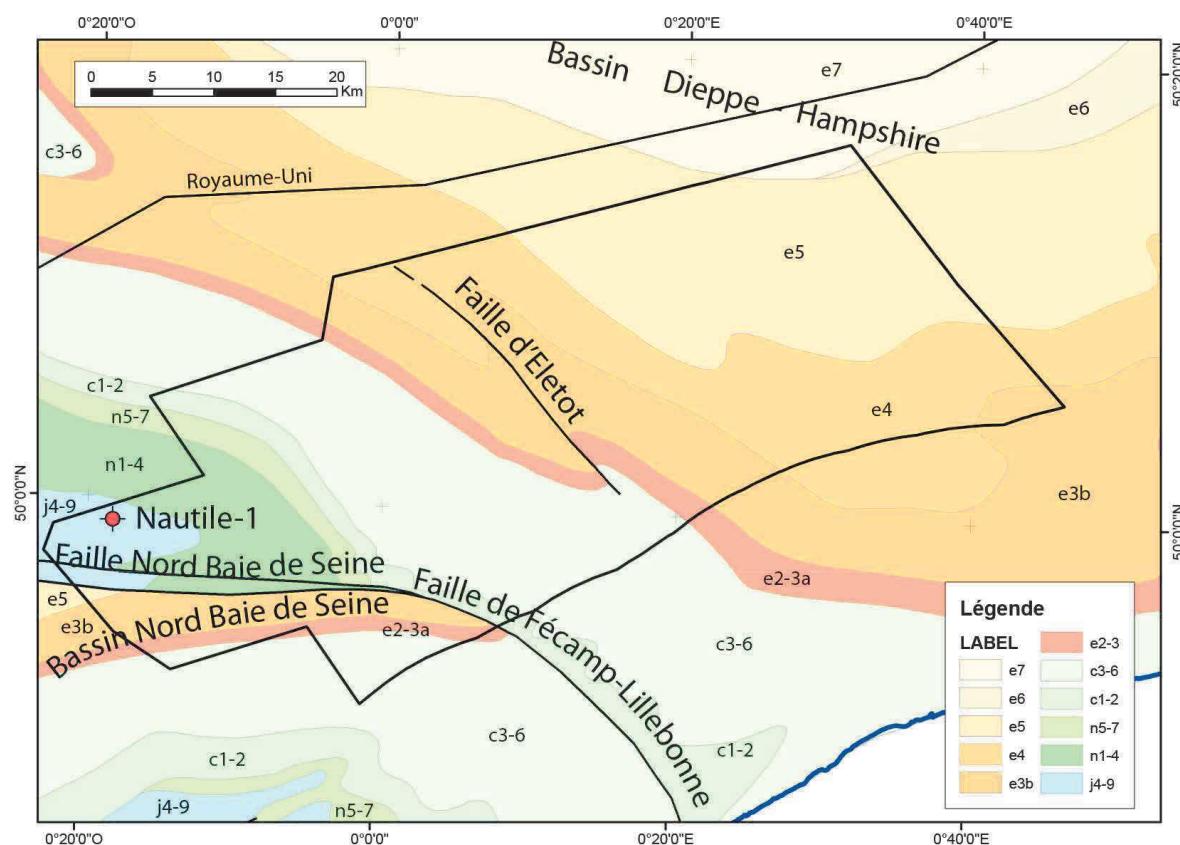


Figure 12 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL modifiée d'après la carte géologique de la Manche d'Auffret et Gruas-Cavagnetto (1975). Pour la légende, voir le Tableau 1 ci-dessous. Le point rouge correspond à la localisation du forage d'exploration pétrolière Nautile-1.

Tableau 1 : Comparaison et correspondance des légendes des cartes de Chantraine et al. (2003) et de Auffret et al. (1975) présentées en Figure 11 et Figure 12, respectivement.

Auffret et al., 1975	Chantraine et al., 2003
e7 – Eocène supérieur / Bartonien	e2 – Eocène moyen et supérieur
e6 – Eocène supérieur / Auversien	
e5 – Eocène moyen / Lutétien	
e4 – Eocène / Cuisien	e1 – Paléocène et Eocène inférieur
e3b – Eocène inférieur / Yprésien	
e2-3a – Paléocène / Thanétien – Sparnacien	
c3-6 – Crétacé supérieur / Turonien - Campanien	c2 – Crétacé supérieur
c1-2 – Crétacé supérieur / Cénomanien	
n5-7 – Crétacé inférieur / Aptien - Albien	c1 – Crétacé inférieur
n1-4 – Crétacé inférieur / Berrisien – Barrémien (Wealdien)	
j4-9 – Jurassique supérieur	j3 – Jurassique supérieur

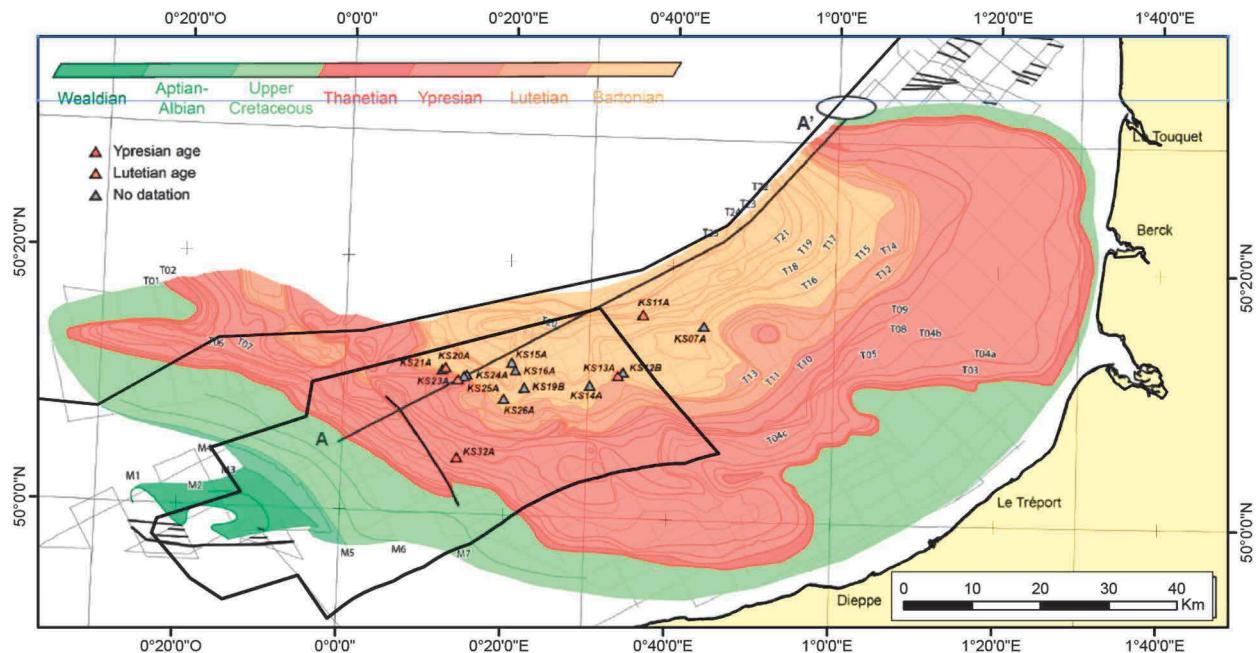


Figure 13 : Carte géologique du Bassin de Dieppe-Hampshire (modifié d'après Jollivet-Castelot, en préparation) figurant l'emprise de la macro-zone FGL. Les triangles représentent la position des prélèvements datés issus de la campagne TREMOR 2 (Paquet et Gaullier, 2017).

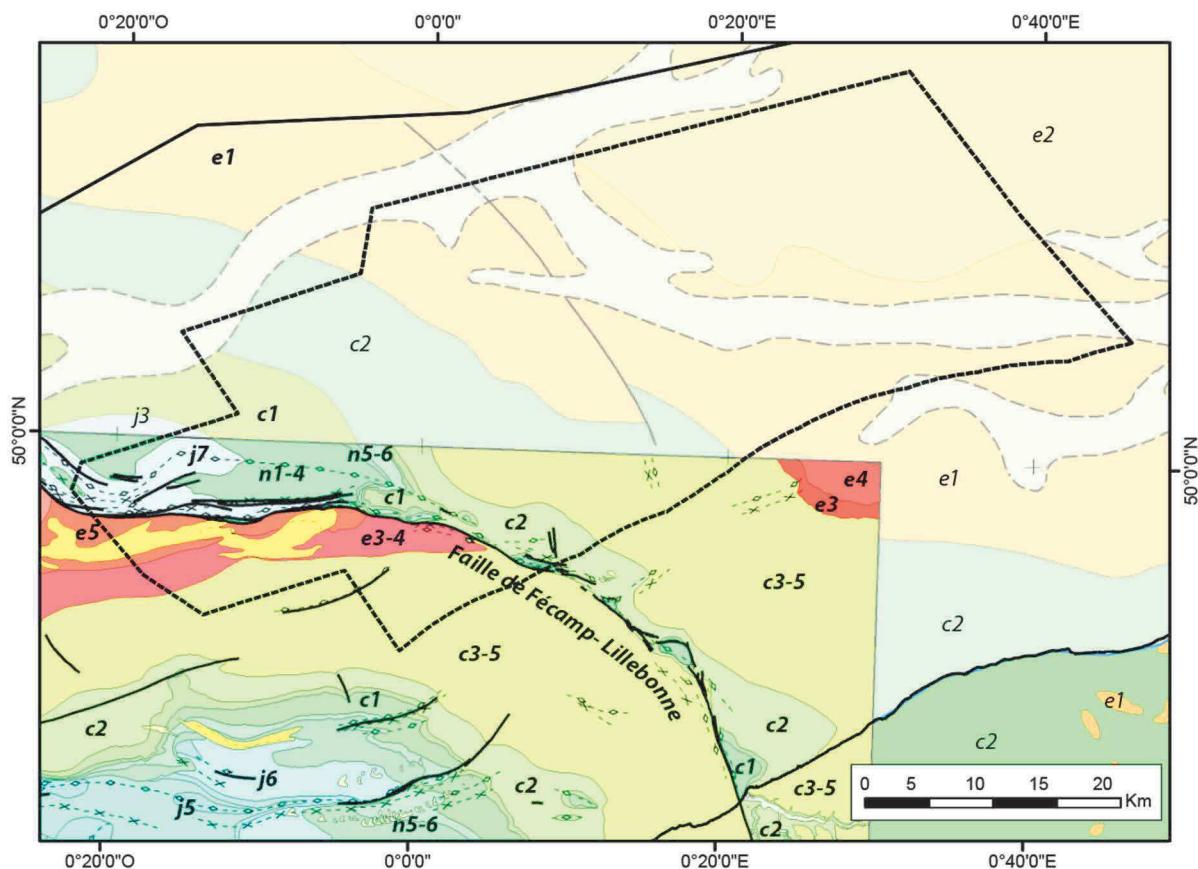


Figure 14 : Carte géologique centrée sur la macro-zone FGL et montrant la portion couverte par la carte géologique de la Baie de Seine réalisée au 1/250 000 (Paquet et al. en préparation). Légende dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison et correspondance des légendes des cartes de Chantraine et al. (2003) et de Paquet et al. (en préparation) présentées en Figure 11 et Figure 14, respectivement.

Paquet et al., en cours	Chantraine et al., 2003
e6 – Eocène supérieur / Bartonien	e2 – Eocène moyen et supérieur
e5 – Eocène moyen / Lutétien	
e4 - Yprésien	e1 – Paléocène et Eocène inférieur
e3 – Paléocène / Thanétien	
c3-5 – Crétacé supérieur / Coniacien - Campanien	c2 – Crétacé supérieur
c2 – Crétacé supérieur / Turonien	
c1 – Crétacé supérieur / Cénomanien	
n5-6 – Crétacé inférieur / Aptien – Albien – Cénomanien basal	c1 – Crétacé inférieur
n1-4 – Crétacé inférieur / Berriasien – Barrémien (Wealdien)	
j7 - Jurassique supérieur / Tithonien	j3 – Jurassique supérieur
j6 – Jurassique supérieur / Kimméridgien	
j5 – Jurassique supérieur / Oxfordien	

L'ensemble des travaux réalisés depuis le milieu du vingtième siècle apporte une connaissance des séries sédimentaires mésozoïques et cénozoïques autour de la macro-zone FGL.

## 4.2. STRUCTURES TECTONIQUES MAJEURES

La macro-zone FGL est située dans la partie immergée du Bassin Anglo-Parisien. Elle est traversée par deux structures tectoniques principales dont le jeu affecte clairement les séries sédimentaires méso-cénozoïques (Figure 10 à Figure 14). La première intéresse le SO de la macro-zone et correspond à la Faille de Fécamp-Lillebonne. Cette faille d'orientation NNO-SSE à terre se prolonge en mer sur environ 10 km, puis bifurque via un relais sur une NO-SE sur environ 15 km, avant d'entrer sur la macro-zone FGL. Dans la macro-zone, elle se réoriente ONO-ESE sur environ 15 km avant de prendre une direction E-O sur 20 km et de continuer ainsi hors de la macro-zone (Figure 12, Figure 14). Cet ensemble de structures d'orientation E-O prend le nom de Faille Nord Baie de Seine, qui limite le bassin sédimentaire cénozoïque du même nom. Les Failles de Fécamp-Lillebonne et Nord Baie de Seine constituent une succession de structures complexes constituées de failles principales, failles secondaires et de plis de part et d'autres des accidents principaux. Cette succession de structures abaisse le bloc au sud-ouest relativement au bloc nord-est d'une centaine de mètres au moins (Figure 15).

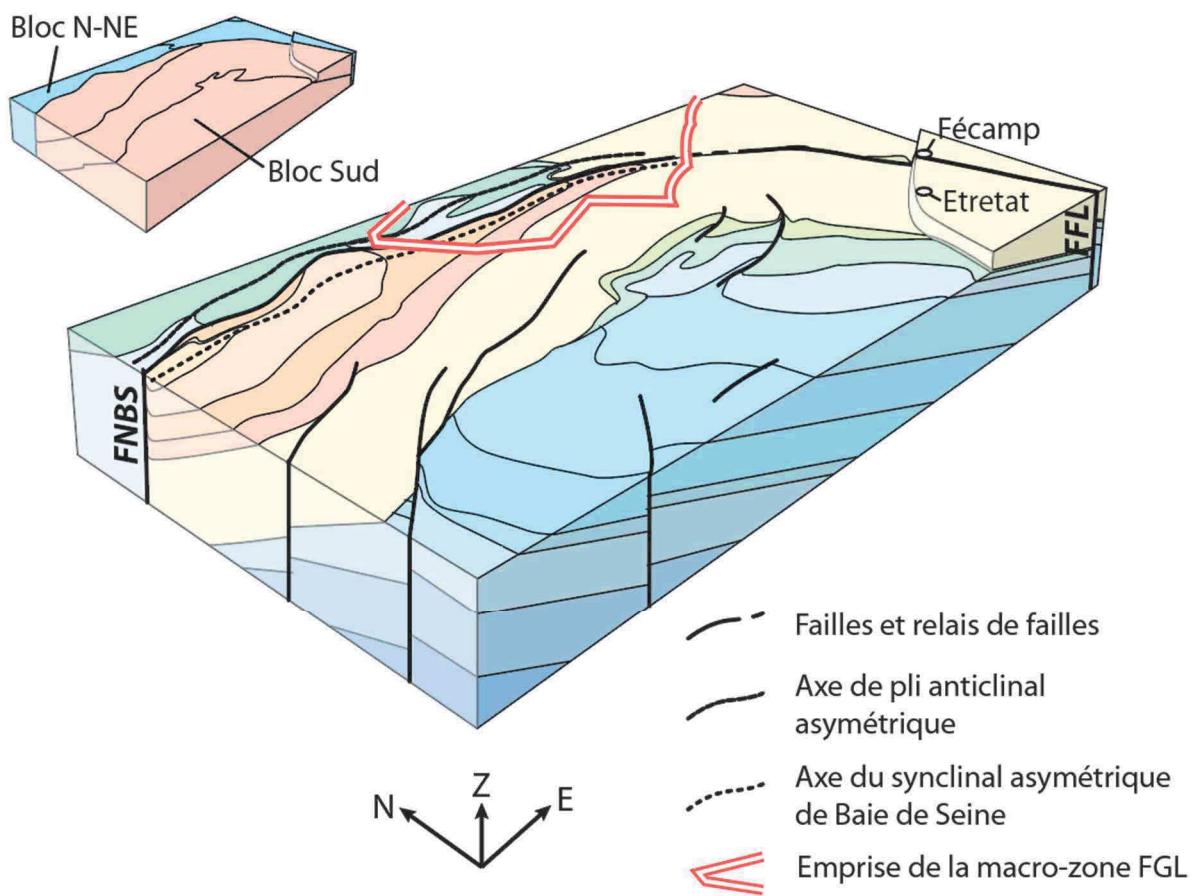


Figure 15 : Bloc diagramme tridimensionnel schématique, vu depuis le sud-ouest, illustrant la répartition des structures tectoniques principales du nord de la Baie de Seine incluant la Faille de Fécamp-Lillebonne (FFL) et la Faille Nord Baie de Seine (FNBS), qui distinguent deux blocs structuraux Sud et N-NE (Paquet, 2021).

L'ensemble Faille de Fécamp-Lillebonne et Faille Nord Baie de Seine sont actives au méso-cénozoïque et sont associées à la réactivation des structures anciennes limitant le Bloc Armorican du Bloc Saxo-Thuringien de l'orogenèse varisque (Ballèvre *et al.*, 2009 ; Figure 16).

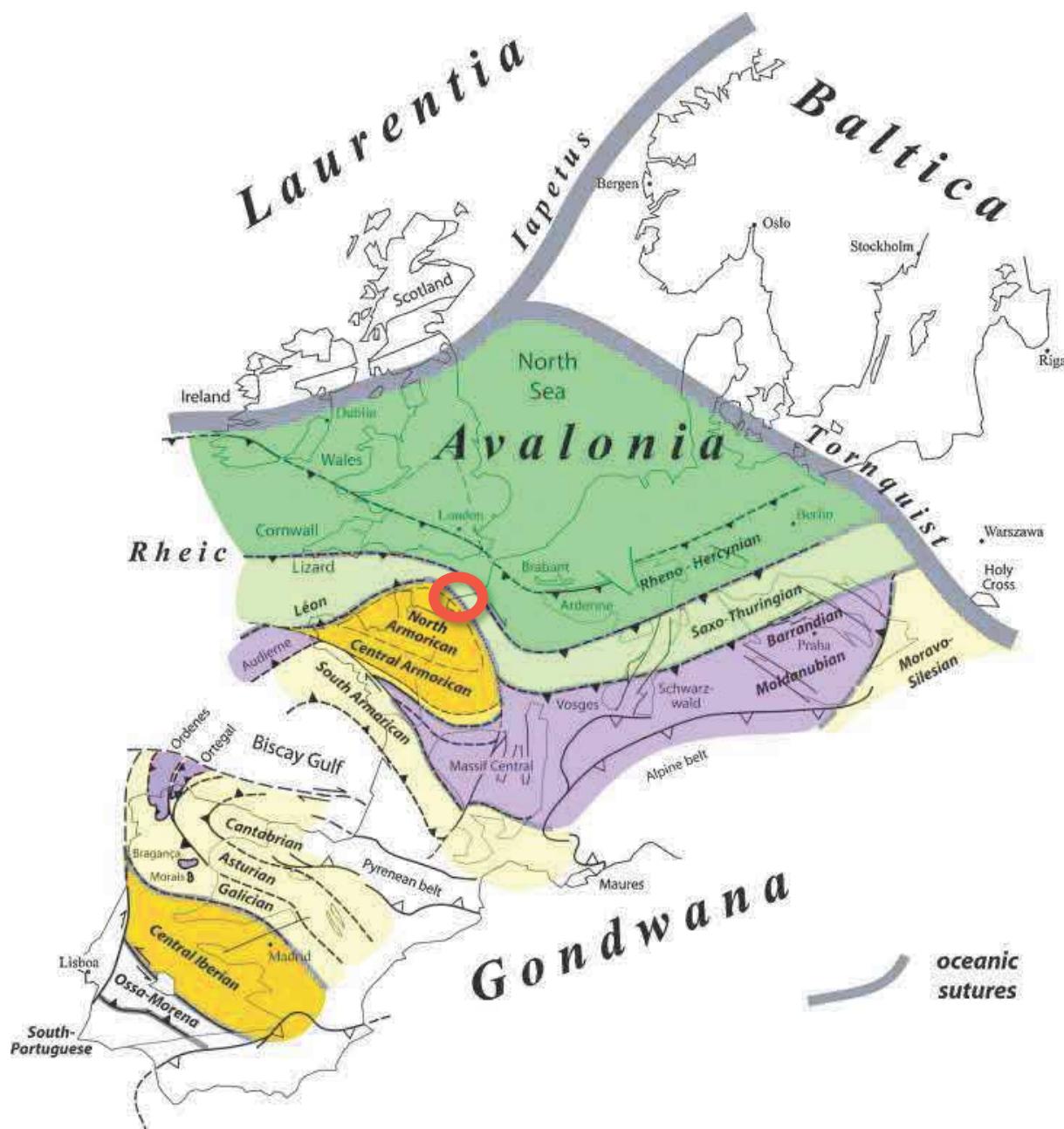


Figure 16 : Carte des domaines structuraux ouest-européens relatifs à la chaîne varisque (Ballèvre et al., 2009). La zone d'étude (macro-zone FGL) est localisée par le cercle rouge.

Les cartes géologiques existantes (Auffret et al., 1975 ; Chantraine et al., 2003 ; Jollivet-Castelot, 2018) indiquent la présence au cœur de la macro-zone FGL d'une faille d'orientation NO-SE (Figure 11 à Figure 13) et de jeu comparable à la Faille de Fécamp-Lillebonne (abaissement relatif du compartiment sud-ouest). Cette faille a été parfois considérée comme faisant partie de la structure Bray-Wight, elle-même considérée comme héritée de l'orogenèse varisque (Lagarde et al., 2003). Cette association reste néanmoins à confirmer. En effet, les derniers travaux (Jollivet-Castelot, 2018 et présente étude) indiquent (i) une discontinuité structurale entre la Faille du Bray et celle-ci, (ii) une terminaison sud se parallélise à la Faille de Fécamp-Lillebonne, et (iii) une réorientation progressive en E-O vers le nord, pour rejoindre le système de failles Centre Manche (eaux britanniques), plutôt que les structures de l'Île de Wight. Pour des raisons pratiques de références ultérieures à cette faille dans la suite de la présente étude, et de manière tout à fait informelle, nous proposons de nommer cette structure NO-SE, la « Faille d'Eletot » (commune située à l'est de Fécamp).

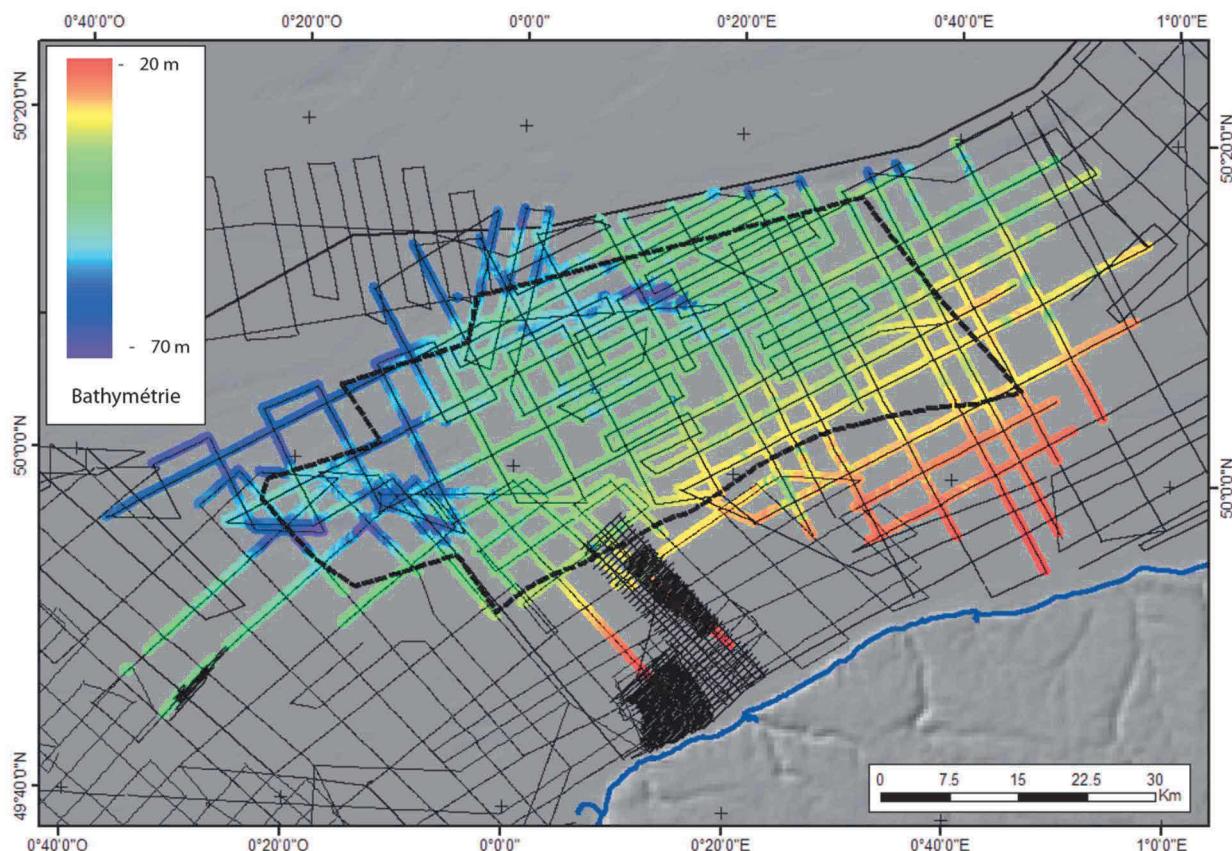
## 5. Mise à jour de la cartographie

L'état des connaissances géologiques en amont de cette étude est présenté dans le chapitre 4. Les travaux récents non-publiés du BRGM et de ses collaborateurs, ainsi que l'interprétation de données sismiques récentes dans le cadre de la présente étude permettent néanmoins de mettre à jour la connaissance sur la géométrie des formations géologiques, en carte et en coupes.

Afin de réaliser cette mise à jour, les données de sismique réflexion très-haute-résolution (Sparker) de trois campagnes (Tableau 3) ont été interprétées au niveau de la macro-zone FGL. Les profils sismiques interprétés sont localisés sur un plan de position (Figure 17). Les campagnes Mercaux 2013 (Paquet, 2013), Tremor (Gaullier, 2014) et Tremor 2 (Paquet et Gaullier, 2017) ont été réalisées dans le cadre d'appels d'offre de la Flotte Océanographique Française (FOF - <https://www.flotteoceanographique.fr/>).

*Tableau 3 : Liste des campagnes océanographiques dont les données ont fait l'objet d'interprétations sismiques*

Campagne	Année	Navire	Type de sismique	Chef de mission	Chef de mission Institution	Référence
Mercaux 2013	2013	NO Côte de la Manche	Sparker monotrace	F. Paquet	BRGM	<a href="https://doi.org/10.17600/13480060">https://doi.org/10.17600/13480060</a>
Tremor	2014	NO Côte de la Manche	Sparker monotrace	V. Gaullier	Université de Lille	<a href="https://doi.org/10.17600/14010400">https://doi.org/10.17600/14010400</a>
Tremor 2	2017	NO Thalia	Sparker monotrace	F. Paquet	BRGM	<a href="https://doi.org/10.17600/17006700">https://doi.org/10.17600/17006700</a>



*Figure 17 : Plan de position des lignes sismiques disponibles (tracés noirs) et des lignes sismiques ayant fait l'objet d'interprétation dans le cadre de la présente étude (couleurs). Le dégradé de couleurs représente la valeur de bathymétrie déduite du pointé du fond marin sur les lignes interprétées. La macro-zone FGL est figurée par un trait interrompu noir.*

#### • Méthodologie

L'interprétation sismique s'est appuyée (i) sur les principes de stratigraphie sismique édictés par Mitchum *et al.* (1977a et b) et (ii) sur les travaux antérieurs ayant déjà identifié des réflecteurs sismiques comme limites de formations (Bignot, 1972 ; Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975 ; Benabdellouahed, 2011 ; Jollivet-Castelot, 2018 ; Paquet *et al.*, 2023 ; Paquet *et al.*, en préparation).

Le travail d'interprétation de la présente étude aboutit au pointé de 15 horizons (dont le fond marin), qui ont pu être associés à autant de limites stratigraphiques et lithologiques majeures (Figure 18). L'attribution de chaque horizon à une limite stratigraphique particulière est basée sur les travaux préexistants ayant déjà proposé des corrélations entre stratigraphie sismique et lithostratigraphie régionale (Bignot, 1972 ; Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975 ; Benabdellouahed, 2011 ; Jollivet-Castelot, 2018 ; Paquet *et al.*, 2023). Elle s'appuie également sur les corrélations géométriques terre-mer. En effet, certains traits géologiques (discordances, surfaces d'incision, géométries sédimentaires) connus à terre à l'affleurement, notamment sur les falaises côtières, peuvent être retrouvés sur les données sismiques au droit de ces mêmes affleurements. On parle de continuum terre-mer des objets géologiques. Dans ce cas, la corrélation terre-mer peut être effectuée et un horizon sismique peut être identifié comme limite lithostratigraphique d'âge donné. Ces horizons calés servent alors de niveaux repères pour affiner le travail de corrélation sismique-stratigraphie sur le reste du remplissage sédimentaire, en se basant sur les caractéristiques des autres horizons pointés et des faciès sismiques.

Enfin, les corrélations sont appuyées par les prélèvements géologiques, qui permettent de caractériser la lithologie d'une unité, et de proposer ou valider un âge, grâce aux analyses biostratigraphiques (paléontologiques). Seuls vingt-et-un échantillons superficiels ont produit des informations sur la lithologie et la stratigraphie du substratum sub-affleurant au sein de la macro-zone FGL. Trente-huit sites prélevés et localisés autour de la macro-zone offrent également ces informations cruciales. Néanmoins, ces données demeurent insuffisantes pour

- (i) une attribution stratigraphique sans équivoque des unités sismiques, notamment quand les corrélations géométriques et les analogies avec la connaissance des séries à terre ne peuvent être réalisées, et pour
- (ii) une description détaillée des lithologies susceptibles d'être rencontrées, notamment lorsque la variabilité est importante sur un étage stratigraphique donné (voir chapitre 6).

Une nouvelle carte géologique a été construite sur la base des pointés sismiques des horizons identifiés sur les profils sismiques et également par l'interprétation de la morphologie du fond marin. En effet, comme indiqué au chapitre 2, la morphologie du fond marin révèle localement la structuration du substratum quand celui-ci est affleurant (érosion différentielle liée aux contrastes lithologiques). Cette approche géomorphologique apporte une aide cruciale au travail de cartographie en complément de l'interprétation sismique.

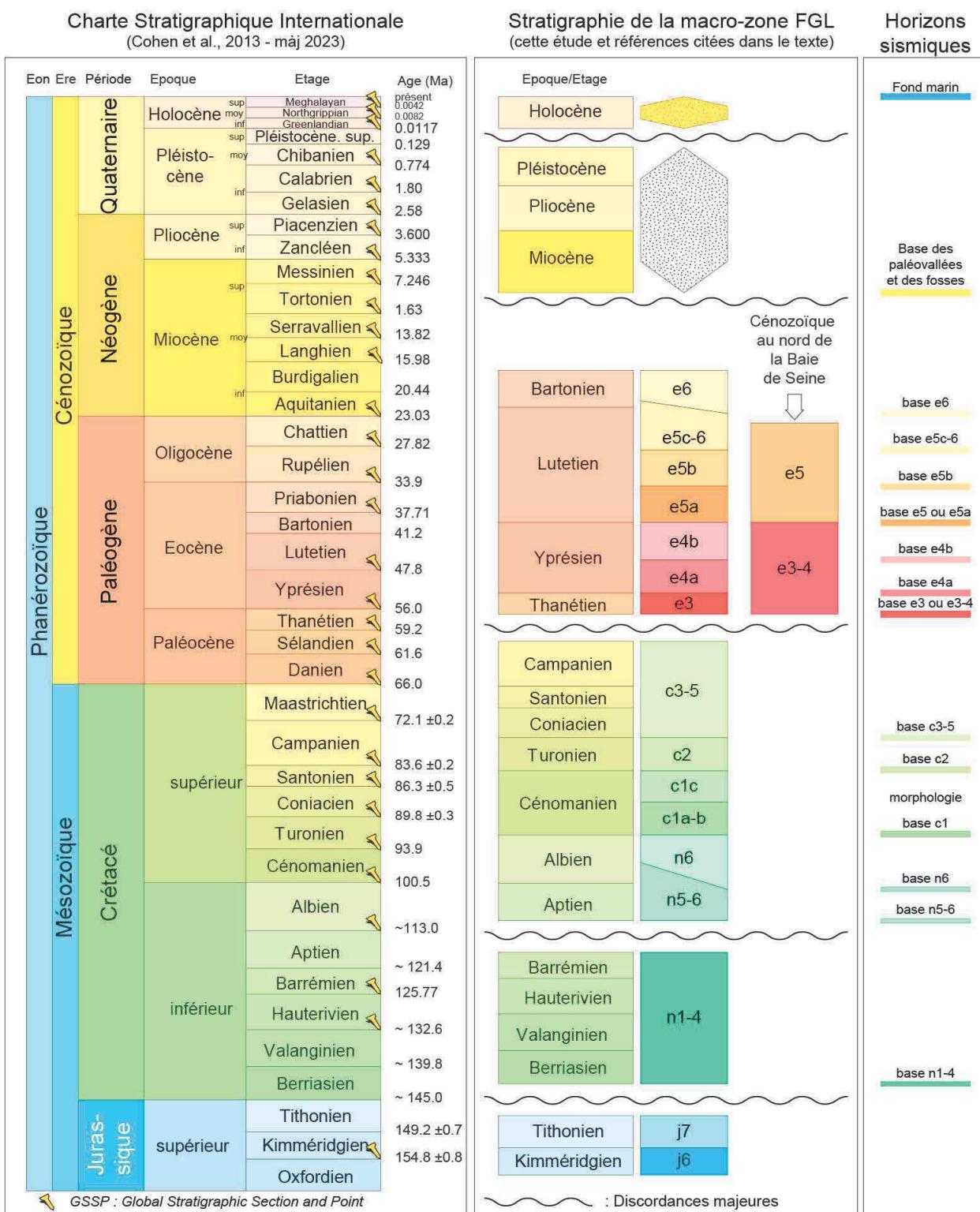
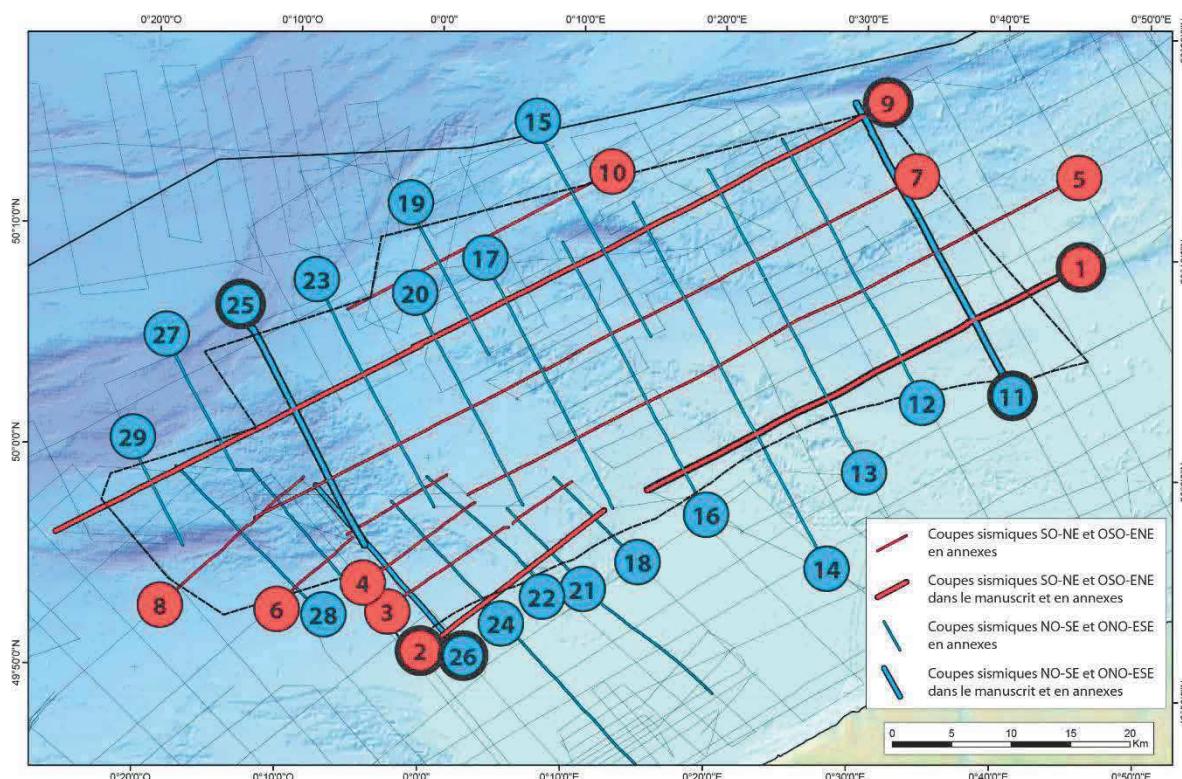


Figure 18 : Correspondance entre la Charte stratigraphique internationale (Cohen et al., 2013 mise à jour 2023), la stratigraphie locale de la macro-zone FGL telle que déterminée par l'étude bibliographique (cette étude et références citées au chapitre 4), et les horizons identifiés sur les profils sismiques.

- **Résultats**

La carte présentée en Figure 19 montre la distribution des grandes coupes sismiques interprétées traversant la macro-zone FGL et permettant d'appréhender la géométrie des formations sédimentaires en profondeur. Parmi ces coupes, six font l'objet d'un habillage (Figure 20 à Figure 25). La série complète des 29 coupes présentant les interprétations sismiques est proposées en annexes.

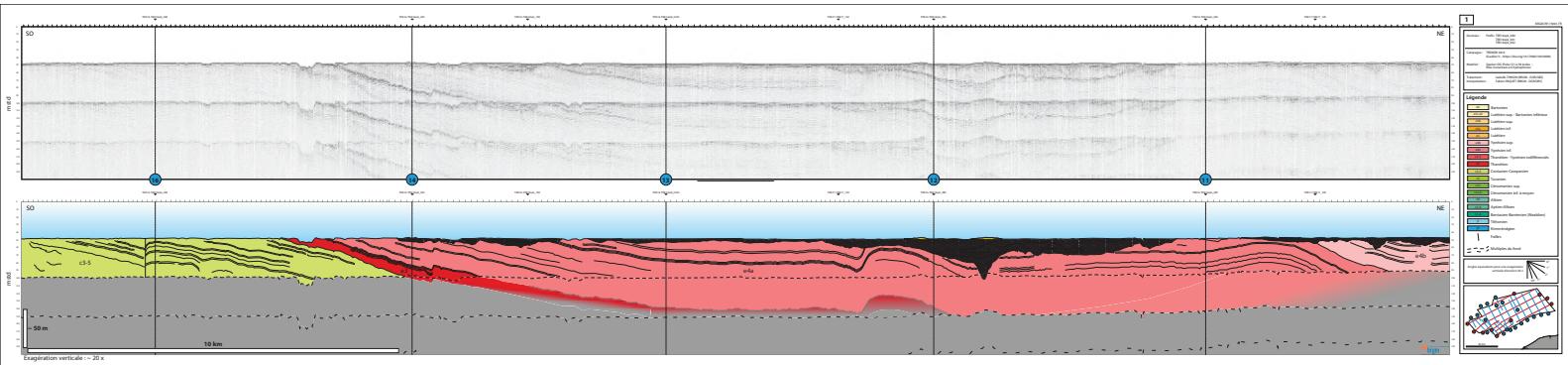
Enfin, la carte géologique révisée de la macro-zone FGL issue des travaux de la présente étude est présentée en Figure 26 et Figure 27. La carte présentée en Figure 26 représente l'ensemble des unités stratigraphiques et inclut les dépôts superficiels (paléovallees, fosses et dunes du Néogène et du Quaternaire). La carte présentée en Figure 27 est un écorché représentant les unités stratigraphiques sous le Néogène (intervalle Kimméridgien-Bartonien).



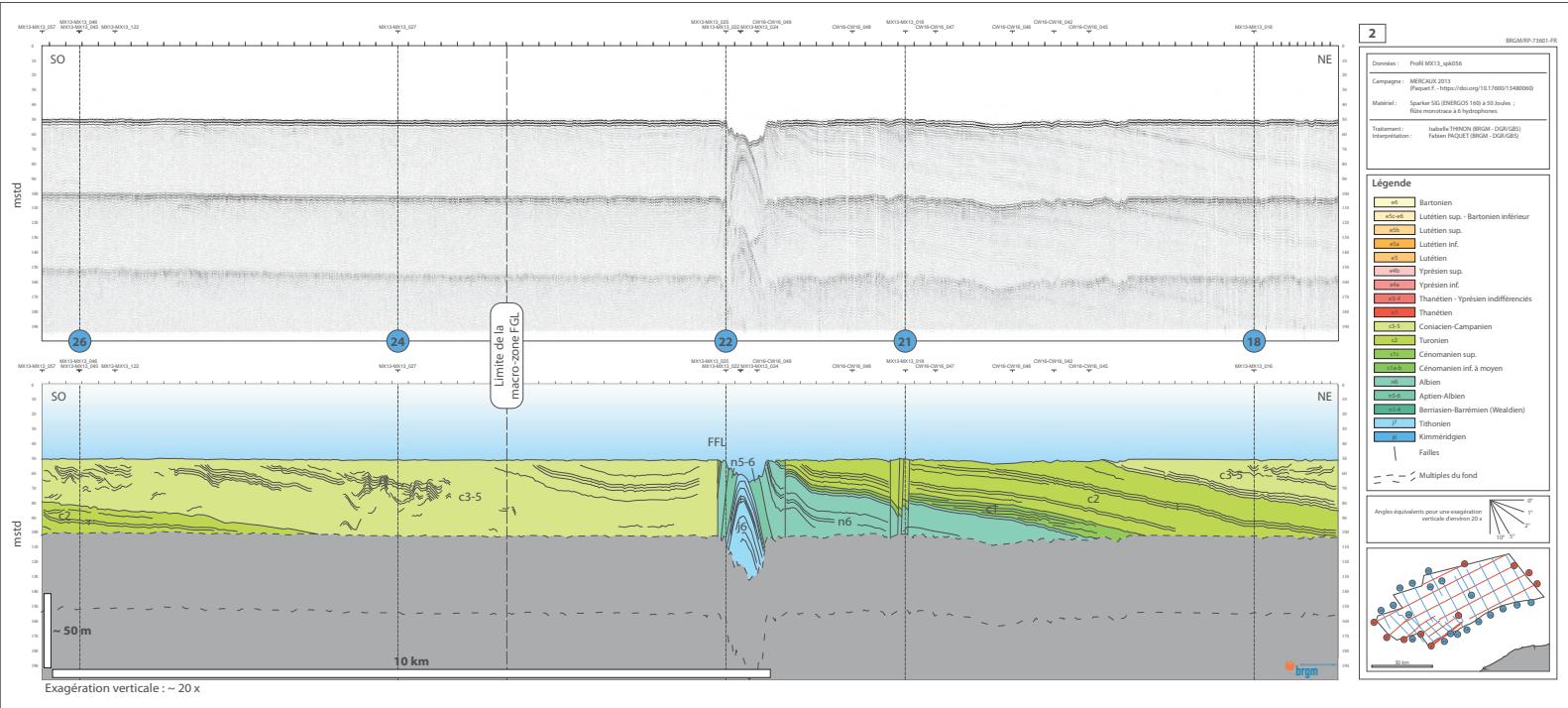
*Figure 19 : Carte de localisation des 29 coupes sismiques interprétées et présentées dans le manuscrit (Figure 20 à Figure 25) et/ou en annexes, sur fonds bathymétrique (©EMODNet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023) (légende en Figure 5).*

Sur chaque coupe sismique interprétée sont figurés les âges stratigraphiques estimés, les failles, et un dessin des horizons secondaires afin de mettre en évidence les géométries de la stratification. L'échelle horizontale est en distance de profil et l'échelle verticale est en millisecondes temps-double (mstd). Une correspondance temps-profondeur est proposée en se basant sur une vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol de 2000 m.s<sup>-1</sup>. Sur chaque profil, la zone grise correspond au domaine n'ayant pu être interprétés du fait de la présence des multiples se surimposant sur le signal, et pour lequel aucune attribution stratigraphique n'a pu être réalisée.

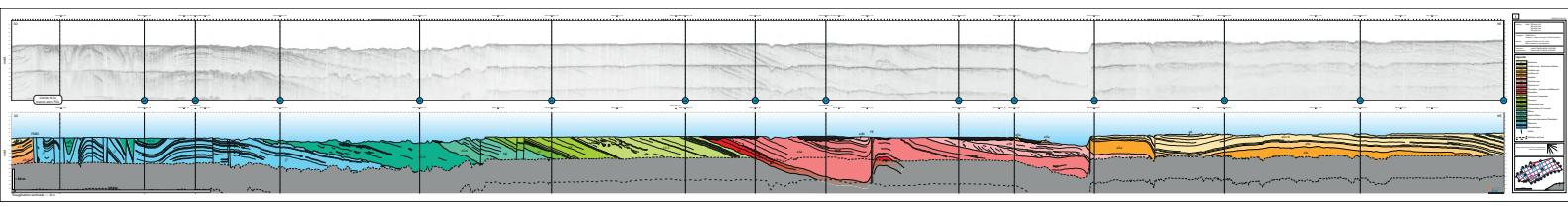
*Figure 20 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°01.*



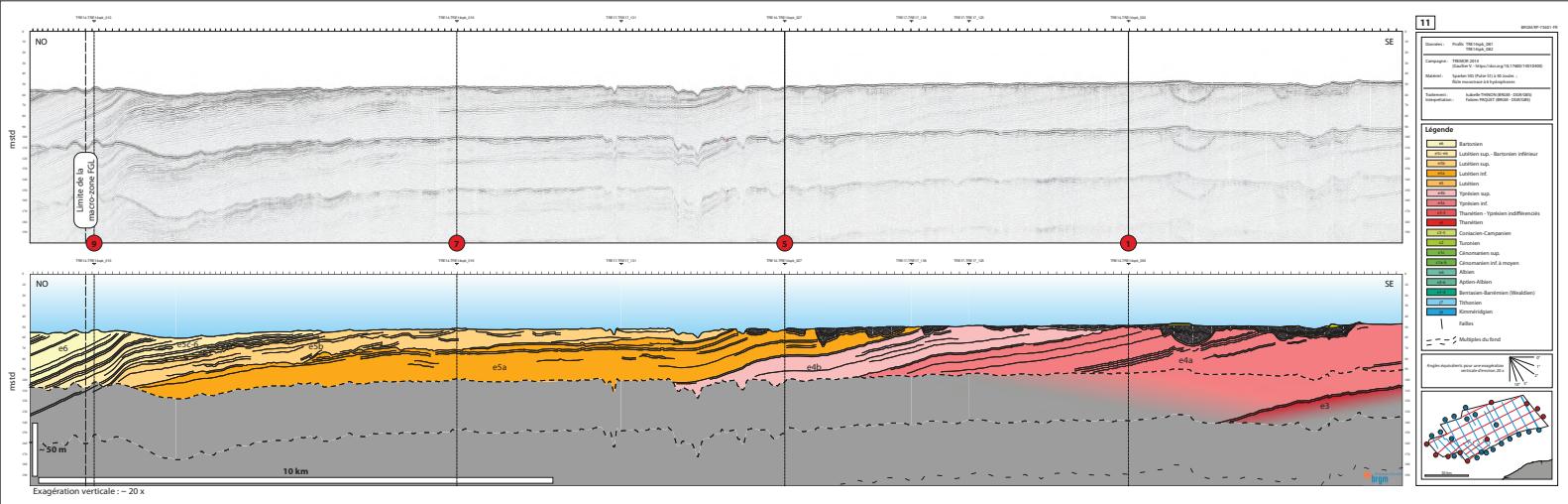
*Figure 21 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°02.*



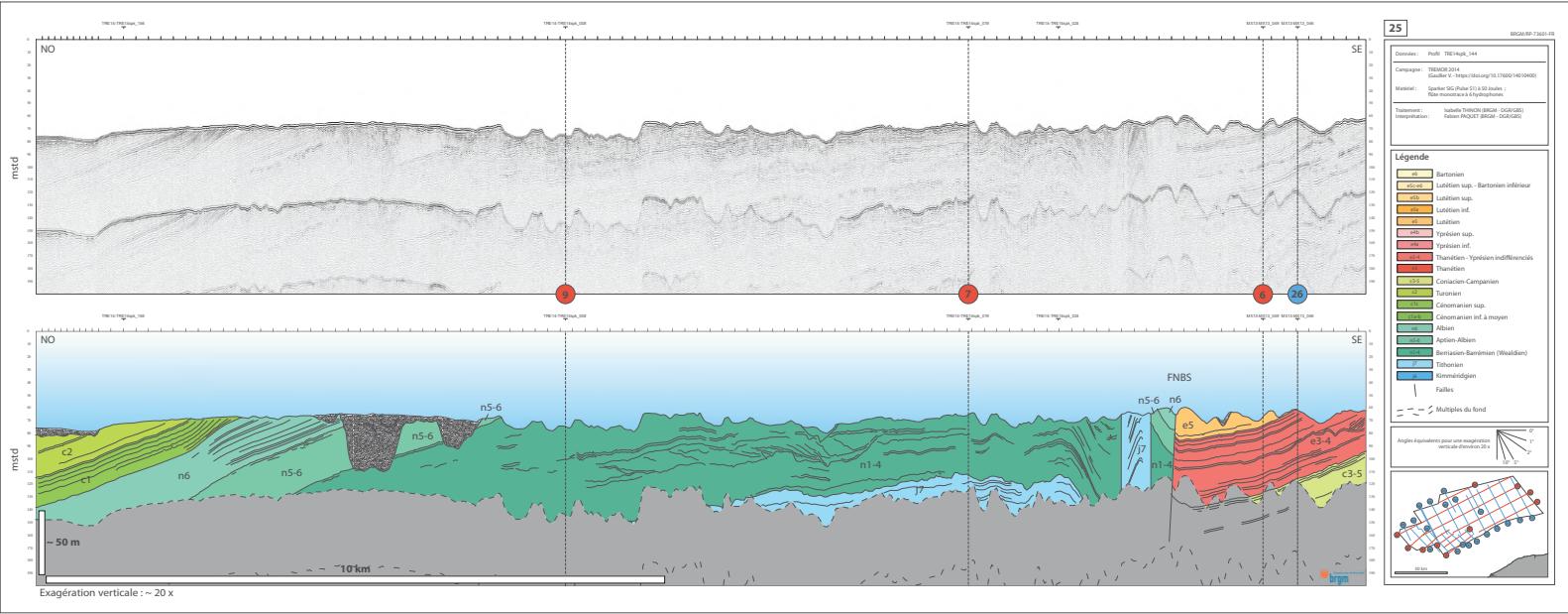
*Figure 22 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°09.*



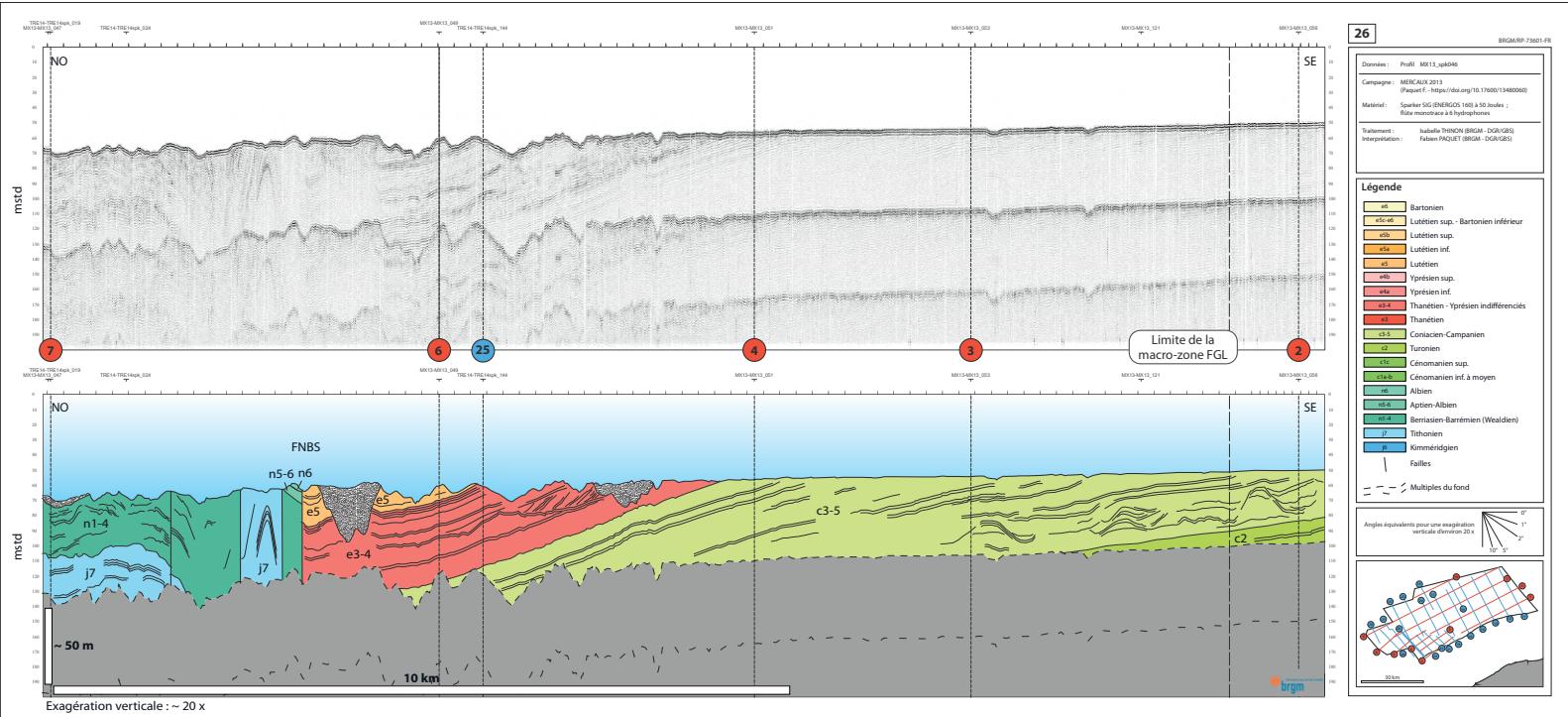
*Figure 23 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°11.*



*Figure 24 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°25.*

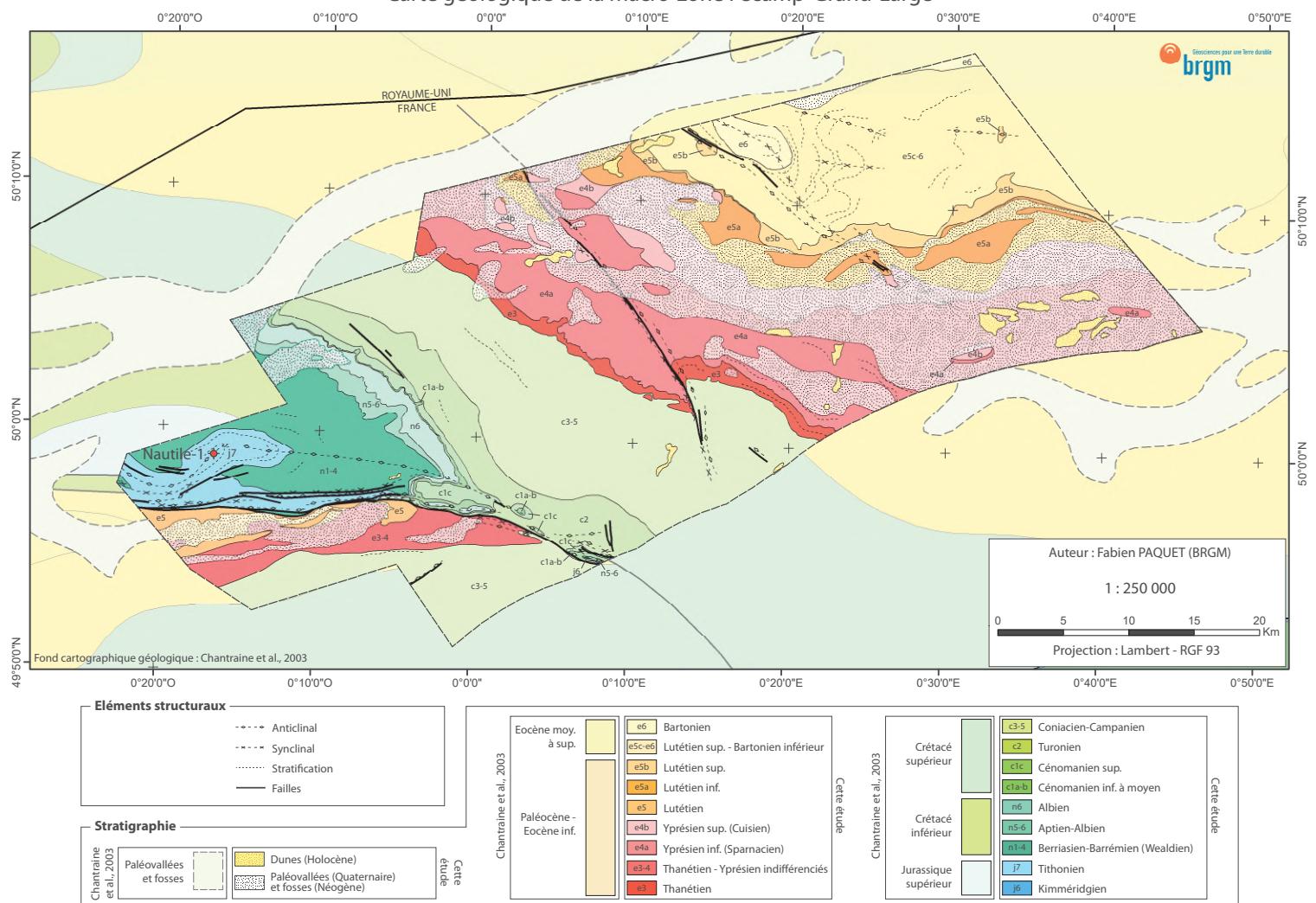


*Figure 25 : Profils sismiques bruts (haut) et interprétés en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe n°26.*



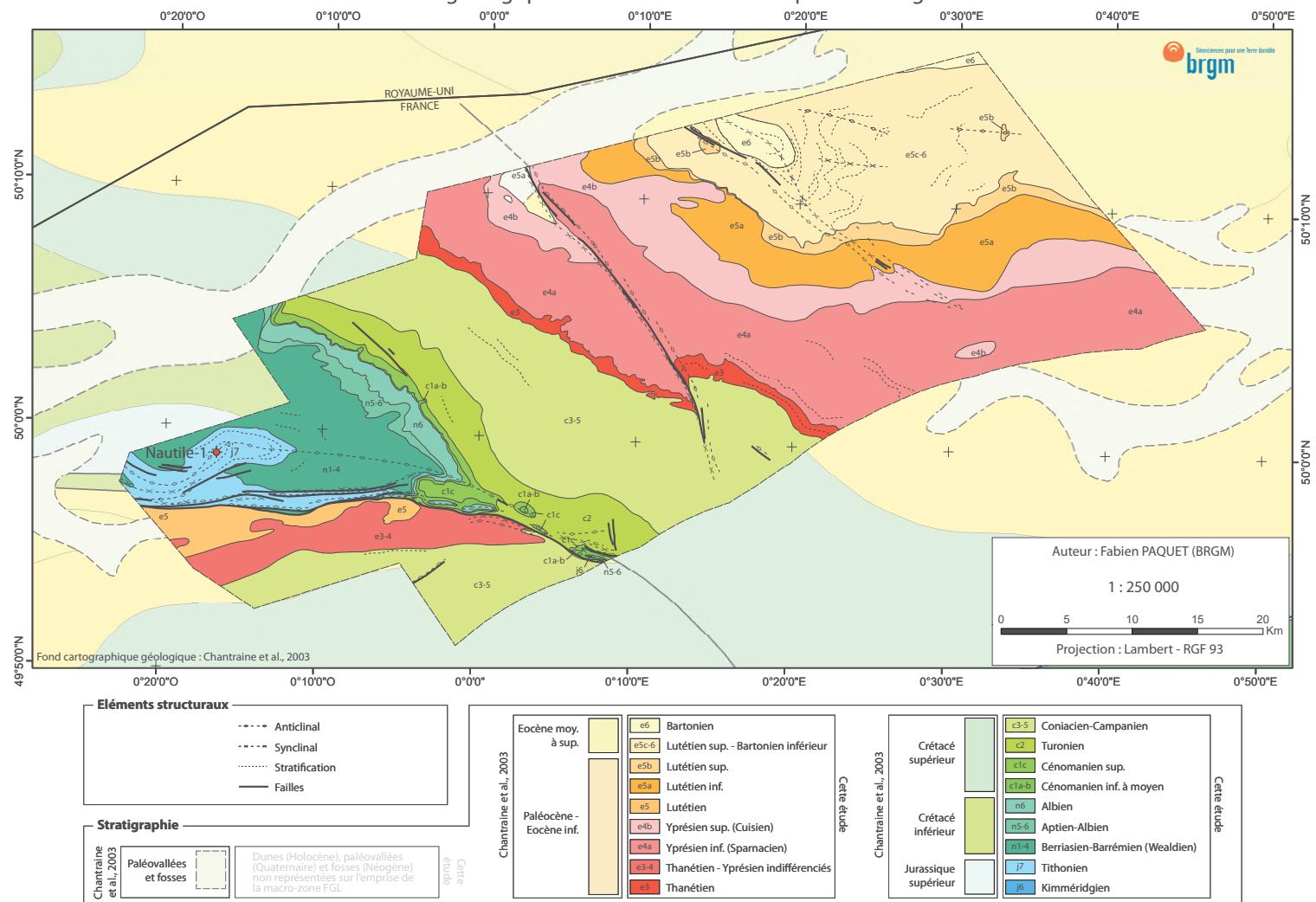
*Figure 26 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités stratigraphiques du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) au Néogène et Quaternaire (fosses et paléovallées, dunes). Les sédiments meubles ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique.*

## Carte géologique de la macro-zone Fécamp-Grand-Large



*Figure 27 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, présentée en écorché sous-Néogène-Quaternaire, et montrant la répartition des unités stratigraphiques du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) à l'Eocène supérieur (Bartonien - e6). Les ensembles sédimentaires meubles ne sont pas représentés.*

## Carte géologique de la macro-zone Fécamp-Grand-Large



## 6. Lithologies du substratum rocheux

Du point de vue géologique, et sur la base des travaux de synthèse présentés dans les chapitres 4 et 5, les terrains présents sur la macro-zone FGL sont d'origine sédimentaire.

Ce chapitre a pour objectif d'établir la variété des lithologies qui peuvent être rencontrées sur l'emprise de la macro-zone FGL sur les premières dizaines de mètres de substratum. Pour ce faire, les séries sédimentaires sont décrites par étages et/ou sous-étages stratigraphiques, tels que retenus dans le travail de cartographie du chapitre 5. Les lithologies associées à ces unités sont basées sur (i) les échantillons géologiques prélevés in-situ (ex : Groupe Norois, 1972), et (ii) sur la connaissance des lithologies rencontrées dans la même succession stratigraphique à terre. Les lithologies principales des différents niveaux stratigraphiques sont présentées sous forme d'une coupe, synthétisant les observations issues de la littérature scientifique (Figure 28). Enfin, la carte géologique réalisée lors de la présente étude est présentée dans une déclinaison lithostratigraphique, afin de mieux rendre compte de la répartition des lithologies pouvant être rencontrée sur le fond marin (Figure 29).

- **Phanérozoïque**
  - **Mésozoïque**
    - Le Jurassique supérieur est retrouvé sur l'ouest de la macro-zone FGL.
      - Le Kimméridgien (**j6**) affleure au niveau de l'axe d'un anticinal, le long de la faille de Fécamp-Lillebonne. Cette affleurement est documenté pour la première fois et n'a pas été prélevé. L'attribution au Kimméridgien est basée sur le faciès sismique semblable à celui retrouvé en Baie de Seine, où le Kimméridgien est documenté à l'affleurement sur la côte au niveau de l'Estuaire de la Seine. Il est constitué d'une alternance **d'argiles et de calcaires marneux**.
      - Le Tithonien (**j7**) est présent au nord de la Faille Nord Baie de Seine, du fait du jeu de cette dernière et des déformations associées. Il a été identifié dans le puits d'exploration Nautilus-1 (14-3577 - [www.minergies.fr](http://www.minergies.fr)) où il est décrit au sommet de l'ouvrage, comme une alternance de **marnes grises, de calcaires et d'argiles** d'âge portlandien (Maillard, 1983).
    - Le Crétacé est retrouvé à l'ouest de la Macro-zone FGL, de part et d'autre de l'alignement des failles Nord Baie de Seine et Fécamp-Lillebonne.
      - L'intervalle **Berriasien-Barrémien (n1-4)**, également connu sous la dénomination « wealdien », est présent uniquement au nord de la Faille Nord Baie de Seine, où il entoure le Jurassique supérieur d'âge Tithonien. Il n'a pas été prélevé sur la macro-zone FGL mais est identifié dans de nombreux sondages côté britannique (Hamblin *et al.*, 1992). C'est le cas du sondage BH75/37, localisé à 45 km à l'ONO de la macro-zone. Le « wealdien » y est décrit comme une alternance de **dépôts sableux (grès) et argileux** d'affinité parallique et continentale. Les sables sont rencontrés notamment

dans les **chenaux fluviatiles** où ils sont constitutifs des barres d'accrétion latérale de systèmes méandriformes. Des géométries de chenaux à barres d'accrétion sont bien retrouvées sur l'imagerie sismique des dépôts wealdiens (coupe 25 - Figure 24) sur la macro-zone FGL.

- L'intervalle **Aptien-Albien (n5-6)** affleure dans l'ouest de la macro-zone FGL. Il repose en discordance sur le n1-4 au nord de la Faille Nord Baie de Seine, et directement sur le Jurassique supérieur (Kimméridgien – j6) le long de la faille de Fécamp-Lillebonne, et vers le SO, sur le pourtour de la Baie de Seine. Il n'est pas échantillonné sur la macro-zone mais est documenté en Baie de Seine, notamment au niveau du Cap de La Hève (Le Havre). Il y est décrit comme un intervalle de **sables fins à moyens micacés localement glauconieux, ferrugineux ou ligniteux**, connu sous le nom de formation des « Sables ferrugineux ». Son épaisseur atteint ici la vingtaine de mètre, mais celle-ci est très variable régionalement.
- L'**Albien (n6)** est également présent dans l'ouest de la macro-zone FGL où il repose sur les sables ferrugineux de l'Aptien-Albien (n5-6). Il n'est pas échantillonné sur la macro-zone mais est documenté en Baie de Seine, notamment au niveau du Cap de La Hève (Le Havre). Il comprend trois formations dont le **Poudingue ferrugineux (poudingue à graviers et galets dans une matrice argilo-sableuse)**, les **Argiles du Gault (argiles et marnes glauconieuses)** et la **Gaize (Marnes silteuses glauconieuses)**, qui se succèdent sur une vingtaine de mètres. La limite entre Albien est peu claire du point de vue sismique. Il est possible que le sommet de l'Albien intègre une partie du Cénomanien inférieur (c1a).
- Le **Cénomanien (c1)** est présent à l'ouest de la macro-zone FGL et repose sur l'Albien (n6). Il affleure au nord de la Faille Nord Baie de Seine et à la faveur de plis anticlinaux le long de la faille Fécamp-Lillebonne. Il a été dissocié en deux sous-ensembles. La partie inférieure est constituée de **marnes glauconieuses** alors que la partie supérieure est constituée de craie à silex. La distinction de ces deux sous-ensemble reste délicate en sismique et cartographiquement.
- Le **Turonien (c2)** est présent dans l'ouest de la macro-zone, le long et au nord des failles de Fécamp-Lillebonne et Nord Baie de Seine. Il n'a pas été prélevé dans l'emprise de la macro-zone FGL mais affleure largement sur le littoral de Seine Maritime. Il a donc été propagé de façon géométrique en utilisant les profils de sismique réflexion. A terre, le Turonien est constitué de **craie blanche à silex**.
- L'intervalle **Coniacien-Campanien (c3-5)**, autrefois appelé Sénonien) est présent sur le fond marin dans la moitié ouest de la macro-zone FGL. Il affleure de part et d'autre des failles de Fécamp-Lillebonne et Nord Baie de Seine. Il n'est pas directement documenté dans la macro-zone mais a été prélevé en Baie de Seine et dans les eaux britanniques. Il est constitué de **craie**

**blanche à silex.** La particularité de cette intervalle est de présenter, au moins dans sa partie inférieure, de grandes ondulations dans la stratification (coupes 1, 9, et 26 des Figure 20, Figure 21 et Figure 25).

Le Maastrichtien, dernier étage du Crétacé supérieur, et l'intervalle Danien-Sélandien du début du Cénozoïque ne sont pas présents au niveau de la macro-zone FGL. Le Campanien est directement surmonté par les dépôts cénozoïques du Thanétien, dont il est séparé par une surface d'érosion.

- **Le Cénozoïque**

- **Le Paléogène** est présent (i) au SO de la macro-zone FGL dans le « Bassin Nord Baie de Seine », bordé au nord par la Faille Nord Baie de Seine, et (ii) il occupe la moitié NE de macro-zone, au niveau du « Bassin de Dieppe-Hampshire ». Les lithologies sont documentées par les analogues terrestres (Cap d'Ailly ; Bignot 1971) et par les prélèvements en mer (Bignot, 1972 ; Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975 ; Jollivet-Castelot, 2018). La série cénozoïque a une puissance d'environ 200 m au sein de la macro-zone FGL.
  - Le **Thanétien (e3)** est présent à la base de la série cénozoïque des deux bassins. Il repose en discordance sur la craie du Sénonien (Campanien). Cette discordance est liée à une période d'émersion, centrée sur la limite Crétacé-Paléogène, qui a entraîné des phénomènes d'altération-dissolution des craies sénoniennes. Non documentée en mer par prélèvement, la lithologie des dépôts thanétiens est déduite des affleurements étudiés à terre, au Cap d'Ailly, près de Dieppe (Bignot, 1971). Ces dépôts sont constitués d'une semelle **sableuse à base érosive, parfois grésifiée, incluant des silex remaniés** du Crétacé, et surmontée de **calcaires sableux lacustres**.
  - L'**Yprésien « inférieur » (e4a)** est présent au-dessus du Thanétien, au sein du Bassin de Dieppe-Hampshire. Il est constitué de **dépôts argileux (argiles grises plus ou moins glauconieuses)** et de **niveaux sableux** (Bignot, 1971, 1972 ; Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975 ; Jollivet-Castelot, 2018).
  - L'**Yprésien « supérieur » (e4b)** est présent au-dessus de l'Yprésien « inférieur » au sein du Bassin de Dieppe-Hampshire. Il est constitué de **sables argileux glauconieux** selon les prélèvements réalisés en mer (Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975).
  - Le **Thanétien-Yprésien indifférencié (e3-4)** est cartographié au niveau du Bassin Nord Baie de Seine, dans le sud-est de la macro-zone FGL. La distinction n'a pu être réalisée du fait d'un nombre trop restreint d'échantillons. Les attributions lithologiques ne se font que sur la base des faciès sismiques et leurs analogues sur des successions documentées. Ainsi nous proposons la présence de **dépôts sableux et argileux** sur cette intervalle. Ceci est conforté par le sondage BH75/27 réalisé dans les eaux britanniques (Hamblin *et al.*, 1992).
  - Le **Lutétien (e5)** est retrouvé au-dessus de l'Yprésien, dans les deux bassins cénozoïques de la macro-zone FGL. Il y est

documenté comme principalement constitué **de calcaires bioclastiques sableux et glauconieux**, dans lesquels sont retrouvées **milioles et nummulites** (Bignot, 1972 ; Benabdellouahed *et al.*, 2014 ; Jollivet-Castelot, 2018). Dans le Bassin de Dieppe-Hampshire, le Lutétien est distingué en deux sous-étages (e5a, e5b) sur critère sismique, sans qu'une distinction lithologique puisse être attribuée.

La transition Lutétien-Bartonien reste à préciser dans le Bassin de Dieppe-Hampshire. En effet, les cartes établies à partir des années 1970 (Auffret et Gruas-Cavagnetto, 1975) montrent un Lutétien plus développé que sur la cartographie établie par Jollivet-Castelot (2018) (voire cartes de la Figure 12 et de la Figure 13). La révision stratigraphique d'une partie de la pile résulte de l'analyse biostratigraphique (sur dynokystes, dinophycées, spores et pollens) réalisée lors des travaux de doctorat de Jollivet-Castelot (2018 et Jollivet-Castelot *et al.*, en préparation). Cependant, si l'incertitude d'attribution d'une partie de la pile sédimentaire à l'un ou l'autre des étages stratigraphiques est importante en termes de compréhension de l'évolution paléogéographique et géodynamique de la région, elle n'a que peu d'importance quant à la lithologie. Afin de conserver une dénomination traduisant cette incertitude, il a été choisi de nommer cette partie de la série cénozoïque en Lutétien-Bartonien (e5c-6)

- Le **Lutétien-Bartonien (e5c-6)** est retrouvé dans la partie NE de la macro-zone FGL. Les échantillons prélevés sur le fond marin traduisent une grande variabilité lithologique avec la présence de **calcaires bioclastiques sableux, de grès glauconieux carbonatés, de grès glauconieux argileux, et d'argiles variées**.
- Le **Bartonien (e6)** est présent dans l'angle le plus septentrionale de la macro-zone FGL, ainsi qu'au cœur d'un synclinal de faible amplitude environ 15 km vers le OSO. Les prélèvements de cette série ont produit des dépôts constitués de **siltites, plus ou moins argileuses et glauconieuses**, et un possible **niveau de grès fin à la base**. Le Bartonien constitue la série paléogène la plus récente du remplissage du Bassin de Dieppe-Hampshire au niveau des eaux françaises, et par extension, de la macro-zone FGL.
- Le **Néogène-Quaternaire (Miocène-Pliocène-Pléistocène-Holocène)** est proposé comme âge pour le remplissage des incisions de type fosses (Néogène supposé) et paléovallées (Quaternaire attesté). L'âge « Néogène supposé » attribué aux dépôts préservés dans les fosses (Paquet *et al.*, 2023) nécessite une validation par des prélèvements, qui permettront également d'en déterminer la ou les lithologies constitutives. Concernant les paléovallées, et en se basant sur des modèles théoriques documentés décrivant leur remplissage sédimentaire potentiel (Dalrymple et Chaoi, 2007), les dépôts associés aux paléovallées peuvent être **conglomératiques, sableux silicoclastiques ou bioclastiques et silto-argileux**.

Enfin, les dunes présentes sur le fond et dont l'âge proposé est Holocène, sont constituées de **sables bioclastiques et silicoclastiques** non consolidés et possiblement mobiles à l'instar des dunes elles-mêmes.

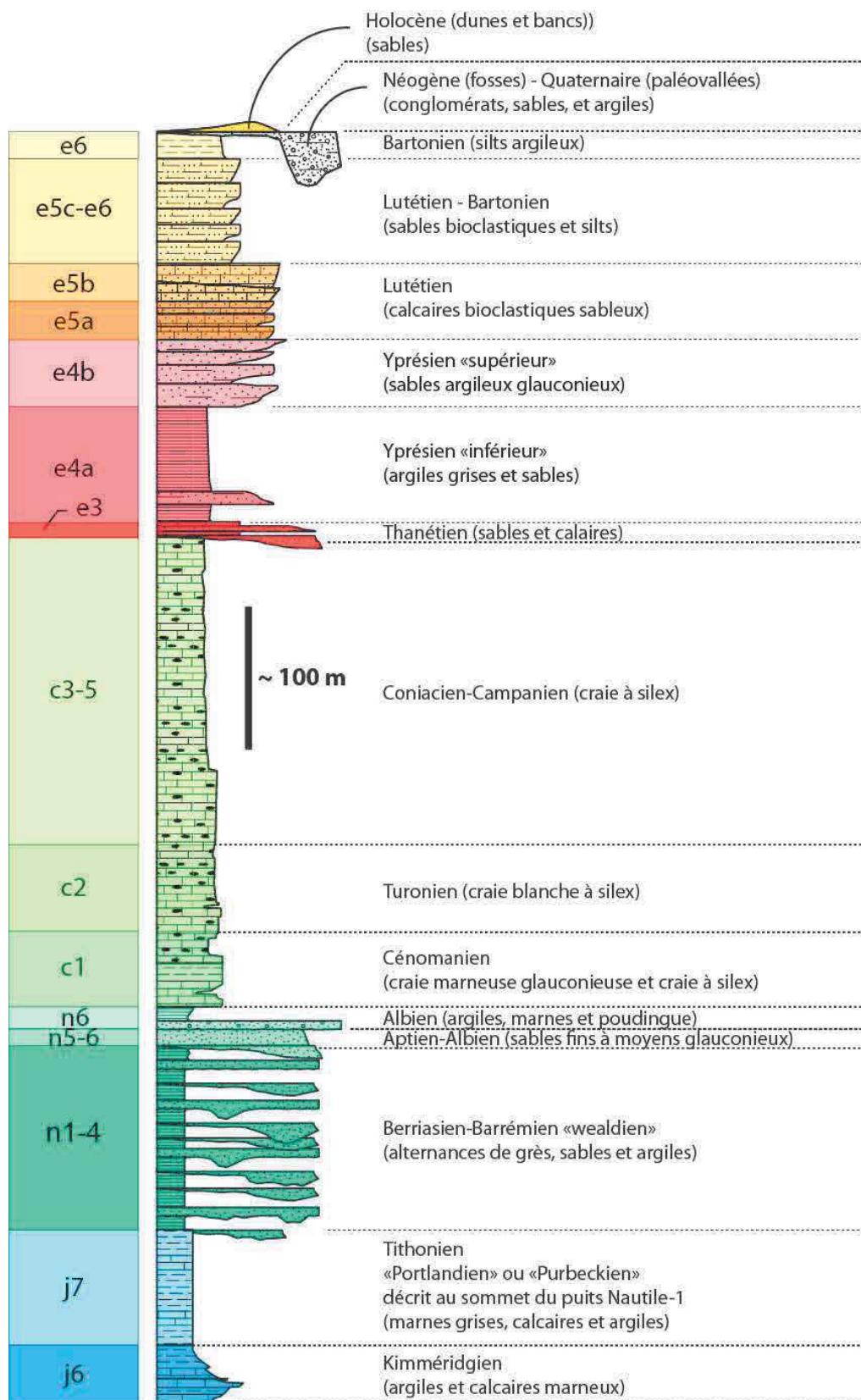
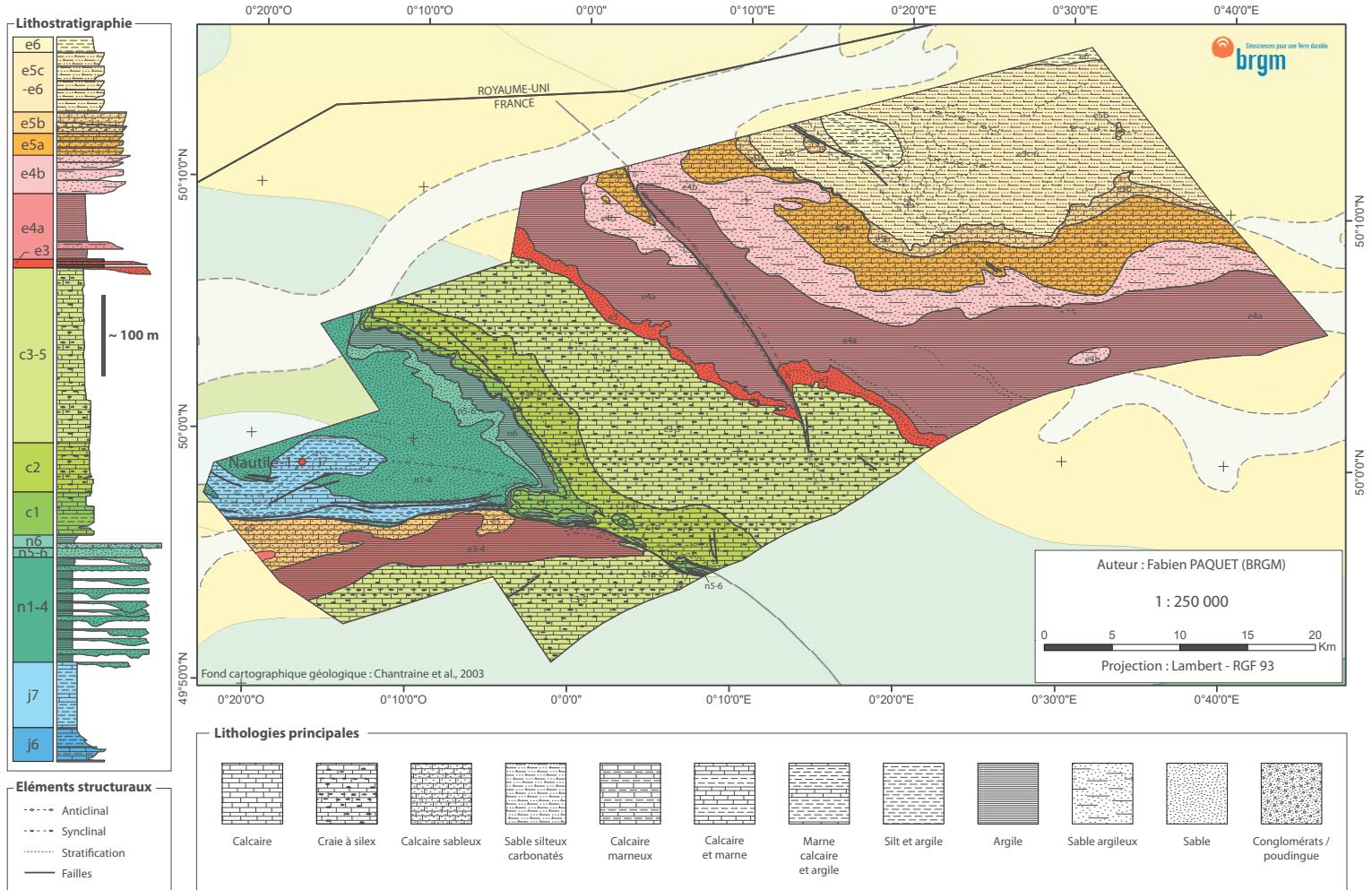


Figure 28 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées au sein de chaque étage ou sous-étage identifiées dans la macro-zone FGL.

Figure 29 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, montrant la répartition des unités stratigraphiques et les lithologies principales associées, en écorché sous-Néogène-Quaternaire, du Jurassique supérieur (Kimméridgien - j6 et Tithonien - j7) à l'Eocène supérieur (Bartonien - e6).

## Carte géologique de la macro-zone Fécamp-Grand-Large



## 7. Aléas géologiques de la macro-zone FGL

Dans cette section, nous nous intéressons aux possibles particularités géologiques qui pourraient être considérées comme aléas potentiels ayant un impact sur la mise en œuvre d'un parc éolien en mer au niveau de la macro-zone Fécamp-Grand-Large.

Nous avons identifié trois grands thèmes à considérer comme potentiels aléas géologiques vis-à-vis de la réalisation d'un parc éolien en mer :

- La sismicité des failles actives sur la macro-zone et alentours.
- La présence de karsts se traduisant par des cavités au sein de roches carbonatées.
- L'effet des failles majeures affectant le substratum sur la variabilité locale des propriétés mécaniques des roches.

Ils sont traités dans les parties ci-dessous et son accompagnés de recommandations.

### 7.1. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE ET ALEAS SISMIQUE

La macro-zone FGL est traversée par plusieurs structures tectoniques, dont deux systèmes principaux, qui affectent les séries sédimentaires méso-cénozoïques (4.2). Ces structures ne traversant pas les dépôts récents (Plio-Pléistocène), il est difficile d'identifier et de quantifier leur activité récente (sur les derniers 2.5 Ma) sur la base de critères géométriques ou cinématiques classiques (déformation des séries récentes). Pour cette raison, nous proposons une analyse de la sismicité historique et instrumentale afin d'apporter un éclairage sur l'activité des failles et le potentiel aléa sismique sur la zone.

#### 7.1.1. Analyses des données sismologiques

L'analyse de la sismicité autour de la macro-zone FGL est basée sur des catalogues de sismicité historique et instrumentale. Afin de ne conserver que la sismicité naturelle, la sismicité anthropique (destruction de munitions par explosions en mer, tirs de carrières) a été recherchée et filtrée. La sismicité régionale est ainsi décrite avant de se focaliser sur les séismes les plus forts localisés dans des rayons de 150 km et de 50 km pris à partir du centroïde de la macro-zone (Latitude - 0°10'29.77"E et Longitude - 50°4'9.528"N).

##### a) Catalogue de sismicité

Le catalogue FCAT-17 (Manchuel *et al.*, 2018) combine la base de données macroseismiques SISFRANCE (BRGM, EDF, IRSN : <https://www.sisfrance.net/>) et Jomard *et al.*, 2021) et le catalogue de sismicité instrumentale SI-Hex (Sismicité de l'HEXagone) publié par Cara *et al.*, (2015). Les catalogues SISFRANCE et SI-Hex incluent respectivement les séismes historiques d'avant 1962 issus des enregistrements passés (points rouges sur la Figure 30), et les séismes instrumentaux enregistrés par les sismomètres de 1962 à 2009 (points verts sur la Figure 30). Le catalogue FCAT-17 couvre l'ensemble du territoire français métropolitain jusqu'à 40 km au-delà de ses frontières et de son littoral.

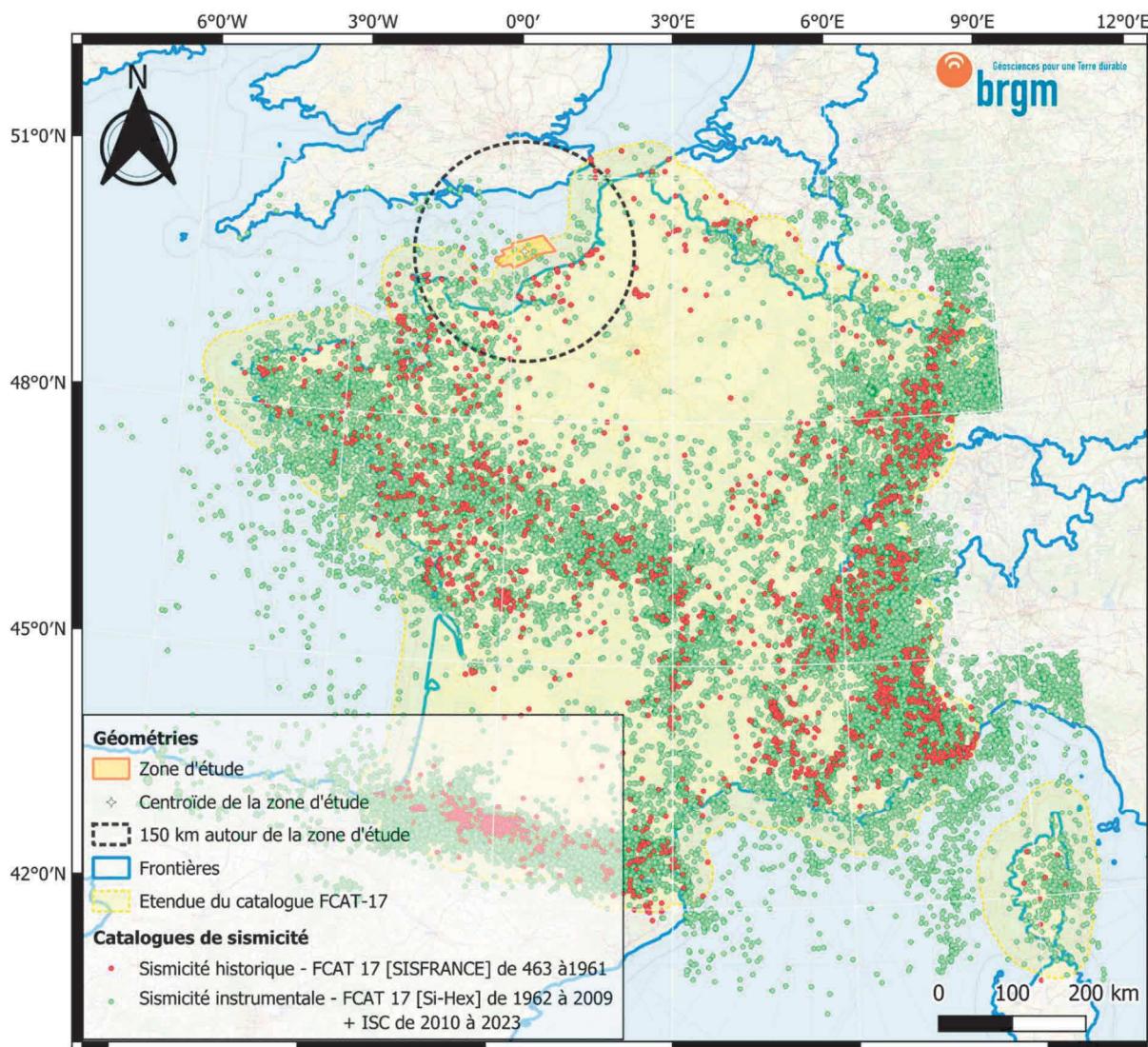


Figure 30 : Sismicité historique et instrumentale de la France compilée à partir de plusieurs catalogues de sismicité contenant des séismes allant de 463 à septembre 2023.

Il est nécessaire de compléter ce catalogue, au-delà de 2009, et également géographiquement au-delà de cette limite de 40 km de côtes et de frontières pour couvrir la zone offshore de la manche. Nous utilisons le catalogue du Centre Sismologique International (ISC-GEM, 2023) pour les séismes instrumentaux de 2010 à début septembre 2023 et la sismicité offshore de 1962 à début septembre 2023. La compilation des catalogues FCAT-17 (Manchuel *et al.*, 2018) et ISC-GEM (2023) permet d'obtenir un catalogue sismique composé de 58 089 séismes (Figure 30) datant de l'an 463 au 04/09/2023 et de magnitude de moment (Mw) allant de Mw 0 à Mw 6,7.

FCAT17 est un catalogue de sismicité naturelle. La sismicité anthropique (tirs de carrières, explosions en mer...) a été éliminée. Les compléments de 2010 à 2023 issus de l'ISC-GEM (2023) comportent à la fois de la sismicité naturelle et anthropique. Pour éliminer cette sismicité anthropique du catalogue, nous utilisons les identifications issues du catalogue français RENASS. Les explosions en mer (sur la période 2012-2024) sont reportées dans un catalogue distinct (voir points verts sur la Figure 31).

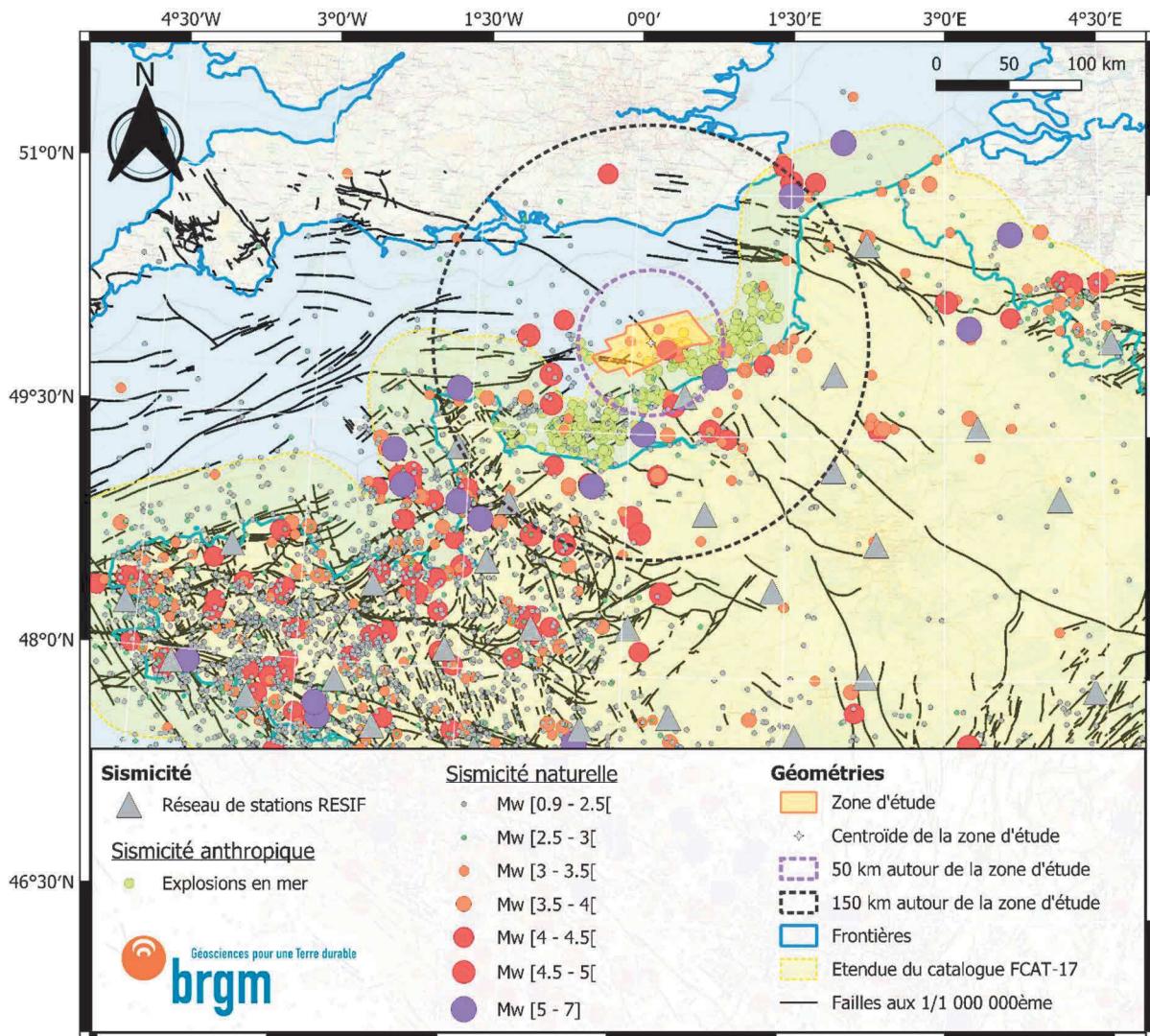


Figure 31 : Zoom sur la sismicité régionale : la sismicité naturelle illustrée par des cercles de différentes couleurs et tailles correspondant à la magnitude. La sismicité anthropique est représentée par des points verts. Le réseau de stations sismiques (RESIF / EPOS-FR) est indiqué.

## b) Description de la sismicité régionale

La sismicité au niveau de la zone d'étude est modérée et parsemée, comparée à ce que l'on observe vers le massif armoricain à l'ouest, les Alpes, ou les Pyrénées (Figure 30). La plupart des séismes référencés autour de la macro-zone FGL sont détectés de façon instrumentale (après 1962), dont une forte proportion est localisée en mer. Le traitement des informations et métadonnées des catalogues permet d'identifier qu'une partie de cette sismicité instrumentale provient d'explosions en mer, associées au déminage de munitions, et est donc considérée comme de la sismicité anthropique (Figure 31). Cette dernière est donc supprimée des catalogues afin de ne conserver que la sismicité naturelle pour la suite de l'évaluation. En domaine marin, en complément de la sismicité instrumentale, on retrouve des évènements issus de la sismicité historique (avant 1962). Celle dernière ne documente que les séismes les plus importants, car ressentis par la population.

La localisation des séismes naturels indiqués en Figure 31 montre que ceux-ci ne sont pas systématiquement localisés à proximité immédiate de structures tectoniques majeures du nord-ouest de la France métropolitaine. La position des séismes, et en particulier des séismes historiques et son interprétation est néanmoins à prendre avec précaution, car l'erreur de

positionnement peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres, en particulier pour les localisations en mer (réseau instrumental non adapté) et pour les séismes historiques.

### c) Description de la sismicité à 50 km et 150 km de la macro-zone FGL

Avant de pouvoir analyser la sismicité naturelle en détail, il est nécessaire de confirmer l'exhaustivité du catalogue sismique utilisé. Pour y parvenir, la somme cumulée du nombre d'événements sismiques (naturels et non anthropiques) a été calculée par an et pour plusieurs plages de magnitude (Figure 32). Cela a été réalisée pour deux rayons différents : un rayon de 50 km (Figure 32 - bas) et un rayon de 150 km (Figure 32 - haut) autour du centroïde du polygone de la macro-zone FGL.

La sismicité enregistrée dans un rayon de 50 km autour du centroïde (majoritairement en mer – Figure 31 et Figure 33), correspond à 10 séismes enregistrés de magnitude variant entre Mw2,5 à Mw 5. Ce nombre cumulé de séismes est insuffisant pour se prononcer sur la complétude du catalogue sismique dans ce rayon de 0 à 50 km (Figure 32).

La sismicité enregistrée dans un rayon de 150 km correspond à un total de 41 séismes enregistrés de magnitude variant entre Mw2,5 à Mw 5. 64% (26 séismes), 29% (12 séismes) et 7% (3 séismes) de ces séismes ont des magnitudes Mw variant respectivement entre [2,5-3], [3-4] et [4-5]. Le nombre de séismes de magnitude Mw [2,5-3] détectés augmente de façon constante à partir de 1972. Pour les séismes dans cette gamme de magnitude, le catalogue de sismicité est considéré complet depuis 1972. Pour les magnitudes supérieures, on suppose que le catalogue est également complet car il l'est pour les magnitudes inférieures et qu'il est seulement limité par le faible nombre d'occurrences.

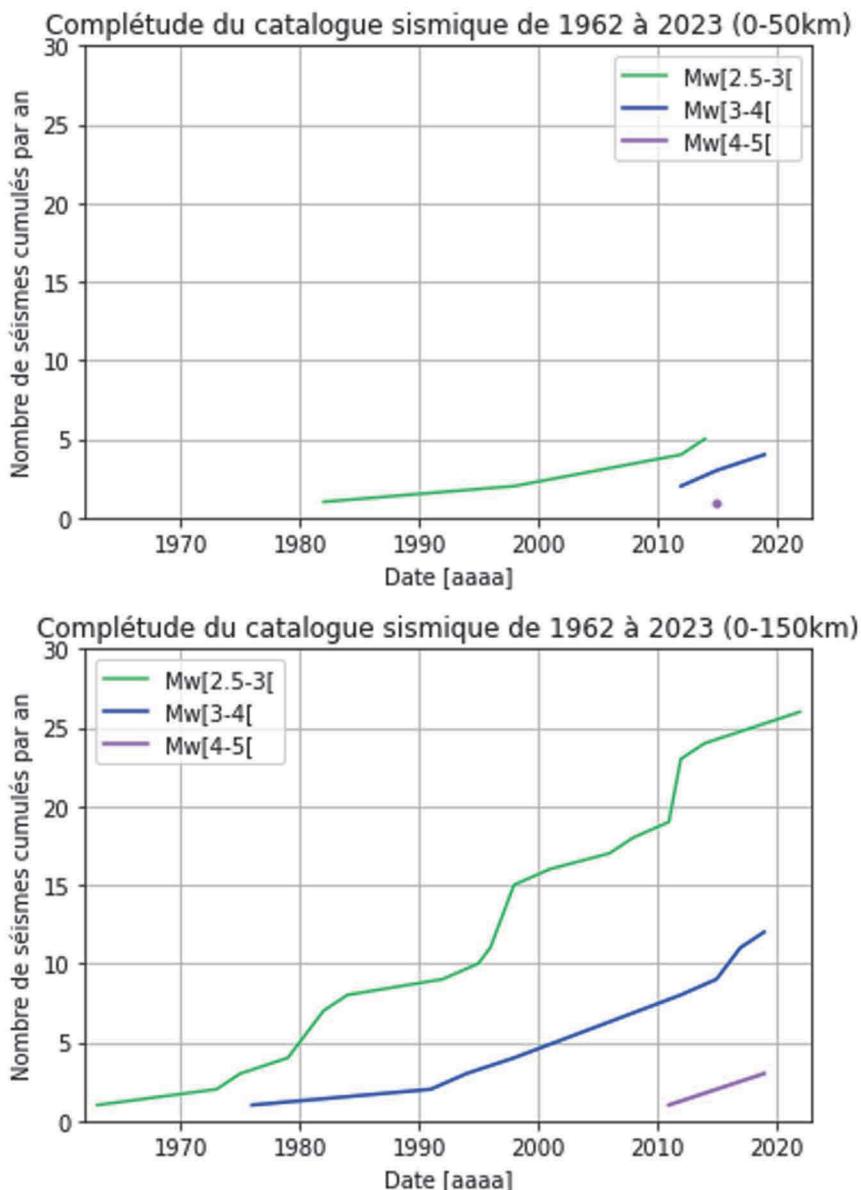


Figure 32 : Complétude du catalogue de sismicité instrumentale pour trois gammes de magnitude Mw [2,5- 3], [3-4] et Mw [4-5] : graphique en haut dans un rayon de 50 km et graphique en bas dans un rayon de 150 km à partir du centroïde de la zone d'étude.

#### a) Description de la sismicité 50 km autour de la macro-zone FGL

36 séismes du catalogue sismique sont localisés dans un rayon de 50 km à partir du centroïde de la zone d'étude (Figure 33). Cinq de ces neuf séismes ont été localisés en mer. Au vu de l'incertitude possible sur la localisation des séismes, les quatre séismes restant localisés à terre mais proche des côtes ont potentiellement eu lieu en mer. Les séismes de magnitude supérieure ou égale à Mw3,1 sont répertoriés dans le Tableau 4. Trois séismes ont une magnitude Mw>4,0.

Le plus important, celui de 1769 est à la limite des 50 km du centroïde de la zone d'étude mais à moins de 25 km de la limite sud de la zone. Il est situé à terre à l'ouest de Dieppe et atteint une magnitude de Mw5,1. Celui de 1847, atteint une magnitude Mw4,5 et il est localisé à terre au sud de Fécamp, à proximité du tracé de faille de Fécamp-Lillebonne. Les séismes de 1766 et 1833 sont également localisés sur ou à proximité de cette faille majeure régionale. Ces indices

d'activité récente de la Faille de Fécamp-Lillebonne rejoignent son classement en tant que faille active au Quaternaire par Jomard *et al.* (2017) et au sein de la BDFA (Base de Données des Failles Actives - <https://bdfa.irisn.fr/index.html>). Enfin, le troisième séisme ayant une magnitude  $Mw > 4.0$  est le séisme de 2015 avec une magnitude de  $Mw 4,2$ . Celui-ci a été détecté dans la zone d'étude, non loin de la Faille d'Eletot (dénomination informelle dans la présente étude) d'orientation NNO-SSE. C'est également le cas des autres séismes récents ayant eu lieu en 2012, 2015 et 2019.

Il reste que les événements sismiques enregistrés dans la zone d'étude ayant une magnitude inférieure à  $Mw < 3,5$  ont une forte incertitude quant à leur position ( $> 10$  km).

*Tableau 4 : Séismes avec les plus fortes valeurs de magnitudes ( $Mw \geq 3,1$ ) situés dans un rayon de 50 km autour du centroïde de la macro-zone FGL.*

ANNEE	MOIS	JOUR	HH	MN	LON (deg)	LAT (deg)	Mw	Prof (km)	Dist (km)
1769	12	1	18	30	0,800	49,867	5,1	14	50,173
1847	7	10	22	50	0,417	49,683	4,5	12	46,36
2015	6	4	19	24	0,329	50,028	4,2	10	11,97
2019	5	15	18	19	0,244	50,154	3,4	5	10,75
1833	6	22	7	--	0,467	49,667	3,3	14	49,43
2012	6	19	18	28	0,431	50,025	3,2	5	18,98
1766	12	2	21	--	0,367	49,750	3,2	14	38,10
2015	6	14	10	06	0,455	50,075	3,1	0	14,19
2012	5	30	7	50	-0,023	49,983	3,1	0	22,23

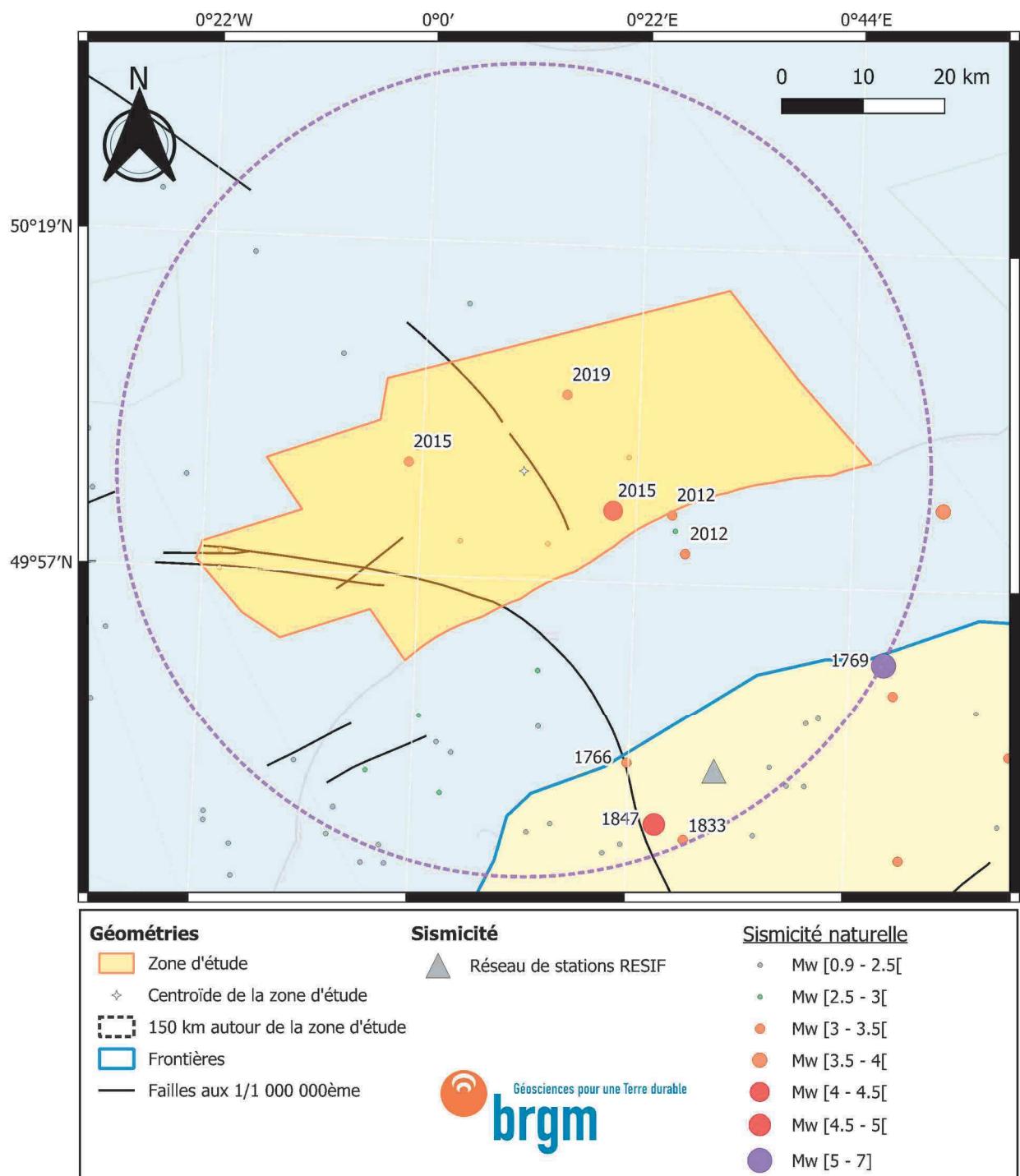


Figure 33 : Sismicité localisée dans un rayon de 50 km autour du centroïde de la zone d'étude. Tracés des structures issues de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (Chastraine et al., 2003).

#### b) Description de la sismicité 150 km autour de la macro-zone FGL

328 séismes du catalogue sismique sont localisés dans un rayon de 150 km à partir du centroïde de la zone d'étude (Figure 34). Ce nombre de séismes vient confirmer la présence d'une sismicité faible dans et autour de la zone d'étude. La majorité de ces séismes sont situés à l'ouest et au sud de la zone d'étude. Les séismes de magnitude supérieure ou égale à Mw4,6 sont répertoriés dans le Tableau 5. Ces dix séismes répertoriés sont des séismes historiques provenant du

catalogue FCAT17. Basé sur des témoignages « terrestres », les épicentres de certains séismes historiques sont localisés à terre ou sur la côte, alors qu'il est possible qu'ils aient eu lieu en mer. Ceux localisés en mer n'ont qu'une position indicative.

Cinq de ces séismes ont une magnitude  $Mw > 5,0$ . Le plus important, celui de 1580, atteint une magnitude  $Mw 5,8$ . Il est localisé au large de Calais où un système de faille correspond approximativement à sa position (Garcia-Moreno et al., 2015) et est indiqué comme étant actif au Quaternaire dans la BDFA (Jomard et al., 2017). Les séismes de 1757 et 1769 de  $Mw 5,1$  situés respectivement au Havre et à l'ouest de Dieppe sont avec des distances inférieures de 65 km, les séismes les plus proches de la macro-zone FGL. Le séisme du Havre de 1757 semble se localiser dans le prolongement d'une faille OSO-ENE traversant le SE de la Baie de Seine. Le séisme de 1822 ( $Mw 4,6$ ) peut également être associé à une faille SO-NE. Le séisme de 1889 ( $Mw 5,3$ ) est aussi localisé directement au large de Cherbourg, où la présence d'une faille E-O est attestée. Comme indiqué précédemment, la localisation de ces séismes est peu précise et leur association à une faille cartographiée à proximité pourrait être fortuite.

*Tableau 5 : Séismes avec les plus fortes valeurs de magnitudes ( $Mw \geq 4,6$ ) situés dans un rayon de 150 km autour du centroïde de la macro-zone FGL.*

ANNEE	MOIS	JOUR	HH	MN	LON(deg)	LAT(deg)	Mw	Prof(km)	Dist(km)
1580	4	6	16	--	1,500	51,000	5,8	15	139,794
1889	5	30	20	30	-1,633	49,733	5,3	20	135,162
1775	12	30	10	34	-0,333	49,167	5,2	11	106,858
1757	10	28	0	40	0,133	49,500	5,1	18	63,394
1769	12	1	18	30	0,800	49,867	5,1	14	50,173
1734	11	5	3	50	-1,000	50,083	4,9	17	84,118
1580	4	6	21	--	1,500	51,000	4,8	15	139,794
1291	2	14	--	--	0,050	48,983	4,7	14	121,158
1896	6	30	14	--	0,133	48,883	4,7	14	131,976
1822	6	16	16	15	-0,750	49,667	4,6	14	80,149

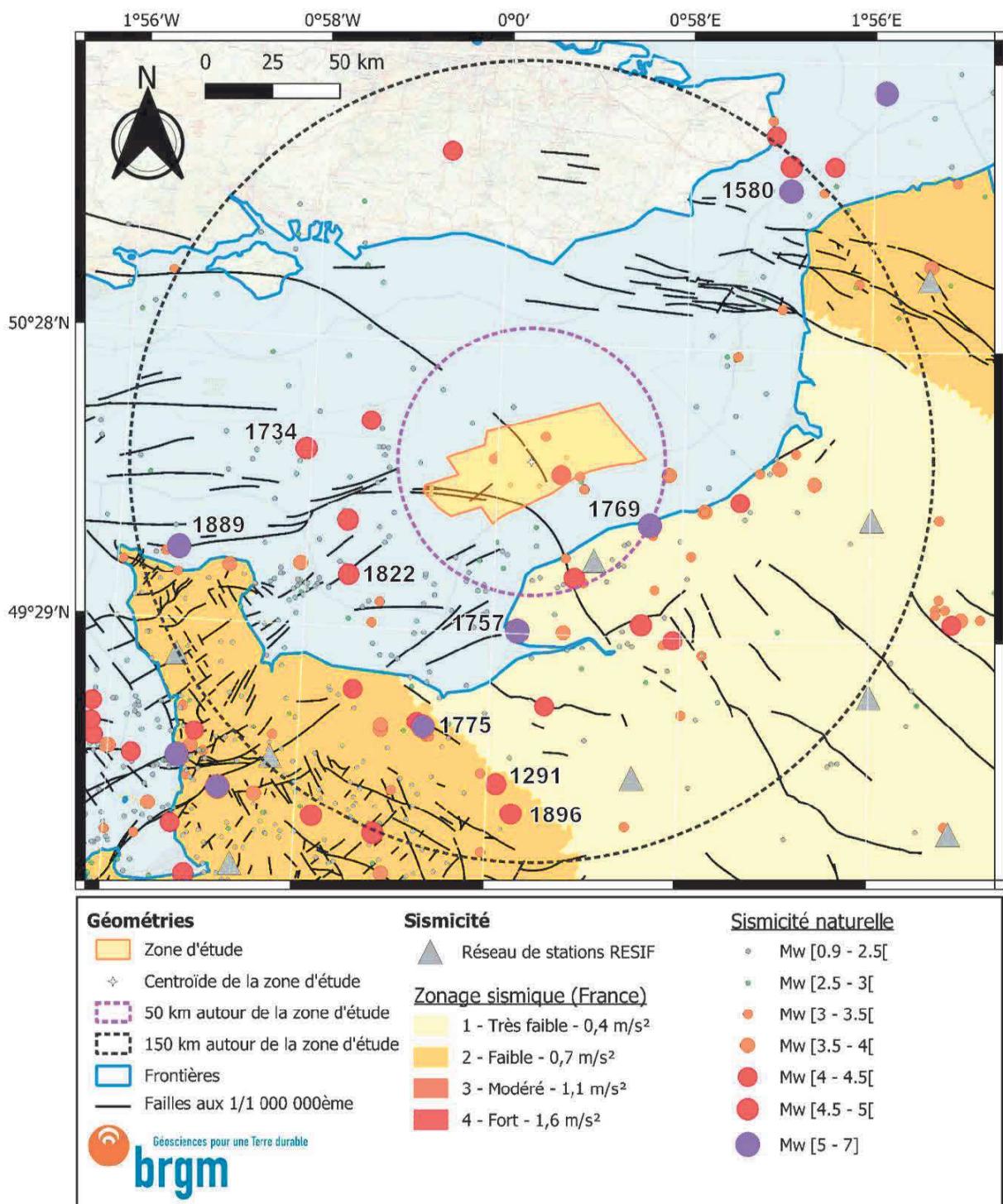


Figure 34 : Sismicité localisée dans un rayon de 150 km autour du centroïde de la zone d'étude. Tracés des structures issues de la Carte géologique de la France au 1/1 000 000ème (Chantraine et al., 2003) et zonage sismique français (2011, article D.563-8-1 du code l'environnement).

### 7.1.2. Recommandations

Le territoire français métropolitain à terre est soumis à la réglementation sismique (<https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-risques-sismiques>) avec des zones de sismicité qualifiées de « Très Faible » à « Moyenne » (zones de sismicité 1 à 4). La réglementation EC8 (Norme EuroCode 8 pour les recommandations appliquées à la construction parasismique) s'appuie sur ce zonage pour la France métropolitaine.

Comme l'illustre la Figure 34, le rayon de 150 km autour de macro-zone FGL englobe à terre deux zones de sismicité différentes définies comme « très faible » (zone 1) et « faible » (zone 2). La macro-zone FGL est située au large de la zone de sismicité « très faible ». Par ailleurs, l'analyse de la sismicité historique et instrumentale a montré que l'activité sismique :

- Est faible et épars ;
- Est majoritairement localisée à l'ouest et au sud de la macro-zone FGL avec des magnitudes maximales de Mw5.3 et Mw5.1 dans ces directions respectives (ouest et sud) ;

Ainsi, sur la base de ces éléments, la macro-zone FGL peut être considérée comme une zone de sismicité « très faible », analogue au domaine émergé classé comme zone 1. En l'absence de réglementation en domaine maritime, cette classification n'a à ce jour qu'une valeur indicative du point de vue réglementaire.

### 7.1.3. Conclusions sur la sismicité

L'analyse préliminaire de la sismicité au sein et autour de la macro-zone FGL a été réalisée en procédant à une première évaluation de l'activité sismique en tenant compte du modèle tectonique régional le plus réaliste. Les catalogues de sismicité ont été compilés et nettoyés de toute sismicité anthropique.

Le niveau de précision dans la localisation des épicentres et la durée limitée des observations et enregistrements (une cinquantaine d'années pour les magnitudes ~3.0) ne permettent pas d'établir des corrélations fines entre les séismes et les failles majeures avec certitude. Néanmoins, il apparaît que la Faille de Fécamp-Lillebonne et la Faille d'Eletot, qui constituent les failles les plus importantes traversant la macro-zone FGL, sont de bonnes candidates pour être associées à des séismes historiques et récents. Ainsi les failles de Fécamp-Lillebonne et la Faille d'Eletot peuvent être considérées comme des failles potentiellement actives avec des magnitudes pouvant atteindre les Mw4-4,5 selon les catalogues existants.

## 7.2. EFFET DES FAILLES MAJEURES SUR LE SUBSTRATUM

D'une manière générale, l'impact des failles majeures, qu'elles soient actives ou non, influence particulièrement le substratum. En effet, ces structures s'accompagnent d'une déformation et d'un possible endommagement local des séries sédimentaires, qui peut résulter en une modification profonde de leurs propriétés mécaniques (couloir de déformation et fracturation, brèche de faille, veines minéralisées...).

Les endommagements des roches constitutives du substratum peuvent favoriser la circulation d'eau, qui s'accompagne de phénomènes (i) de dissolution (voir 7.3) tels que les gouges de faille ou la karstification des zones endommagées, et/ou (ii) de minéralisation (veines et dépôts de calcite...).

Le cumul de déformation et de déplacement le long des failles s'accompagne également d'une modification de la distribution latérale des lithologies, en amenant des niveaux d'âges et natures différents à la même altitude, engendrant ainsi une complexité accrue de la variabilité latérale des propriétés mécaniques du substratum.

Il nous apparaît ainsi important, que de manière générale, les structures tectoniques majeures soient considérées comme susceptibles d'augmenter localement les aléas géologiques et qu'elles soient prises en compte dans la réflexion de délimitation de zones d'intérêt pour la localisation d'éoliennes en mer.

## 7.3. ALTERATION DES CALCAIRES ET KARSTS

### 7.3.1. Principe de l'altération des calcaires

Les calcaires sont constitués en grande partie de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). Ce minéral, et donc le calcaire qu'elle constitue, est sensible au phénomène de dissolution par attaque acide selon le processus chimique dont l'équation est donnée ci-dessous :



L'eau est particulièrement abondante dans le sous-sol, notamment par l'infiltration des eaux de pluie et sa circulation dans le sol puis le sous-sol par les réseaux de fracturation. Le  $\text{CO}_2$ , présent dans l'atmosphère et également produit dans le sol et le sous-sol par les phénomènes de respiration de certains organismes. L'incorporation du  $\text{CO}_2$  dans l'eau produit de l'acide carbonique, qui par dissociation aqueuse produit des ions oxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$ , qui a son tour interagit avec la calcite pour la dissoudre.

Le phénomène de dissolution des calcaires intervient donc au niveau du contact eau-roche et sa pénétration dans le volume rocheux est favorisée par la présence de fractures dans la roche, et par son émersion, qui favorise la circulation *per descensum*.

### 7.3.2. Altération des calcaires dans l'ouest du Bassin de Paris

Sur la macro-zone, les calcaires sont retrouvés principalement dans le Jurassique supérieur, en abondance dans le Crétacé supérieur sous la forme de craies, et dans le Lutétien. Les indices de karstification sont difficiles à identifier par imagerie de sismique réflexion ou sur la bathymétrie disponible qui est de trop faible résolution. La présence potentielle de karst sur la macro-zone FGL est donc déduite des observations d'analogues réalisées à terre.

Parmi les formations calcaires pouvant subir des phénomènes de dissolution-karstification, les craies à silex du Crétacé supérieur constituent les niveaux les plus propices. En effet, la craie du Bassin de Paris a connu une phase d'émergence entre la fin du Crétacé et le Thanétien, et une deuxième plus récente, conduisant à leur position actuelle. Les études ont montré qu'une grande partie de la dissolution et karstification de la craie s'est déroulée au début du Cénozoïque, avant le dépôt des séries thanétiennes (Quesnel, 1997 ; Laignel, 1997 ; Laignel *et al.*, 1999), et qu'il en a résulté une disparition de tout ou partie des craies maastrichtiennes et campaniennes dans l'ouest du Bassin de Paris. Cette dissolution a mené à la formation des argiles à silex (ou formation résiduelles à silex), qui couvrent une large partie des dépôts crétacés de l'ouest du Bassin de Paris et atteint une épaisseur de 0 à 30 m au niveau du Pays de Caux, face à la macro-zone FGL (Quesnel, 1997). Cette épaisseur résiduelle correspondrait à la dissolution de craie sur une épaisseur pouvant atteindre localement 40 à 50 m dans cette région (Quesnel, 1997 ; Laignel *et al.*, 1999). Les premiers dépôts thanétiens contiennent d'ailleurs des silex remaniés du profil d'altération antérieur, qui a pu être localement décapé.

En plus de cette dissolution régionale, des phénomènes de karstification pénétrative ont pu se développer et donner lieu à la formation de morphologies spécifiques (dolines, bêtoires, réseau karstique sous-terrain...). Ces phénomènes mis en pause lors du dépôt des séries cénozoïques ont été réactivés au Néogène et au Quaternaire, à la faveur d'une nouvelle phase de surrection et d'émergence du bâti crayeux. La dissolution et la karstification pénétrative ont repris, favorisées par la surrection et l'émergence, et par les chutes successives du niveau marin lors des glaciations quaternaires, qui se sont accompagnées du développement de vallées profondes (valleuses) puis de falaises côtières. Ces phénomènes ont abaissé le niveau de base local encourageant l'approfondissement du profil d'altération et le creusement des morphologies karstiques. Il est également intéressant de noter que la présence de karsts associés aux failles est proposée, notamment pour la Faille de Fécamp (David *et al.*, 2020).

### 7.3.3. Hypothèses pour la macro-zone FGL

D'après les grandes lignes des résultats des études réalisées à terre, il nous est possible d'imaginer plusieurs hypothèses quant à la présence de craies altérées, d'une formation résiduelle à silex et de la présence de karst.

Dans le cas de la macro-zone FGL, l'émergence des craies du Crétacé supérieur lors du début du Cénozoïque a vraisemblablement résulté en la formation d'un profil d'altération plus ou moins pénétratif et épais, et *in fine* en la présence d'une formation résiduelle à silex. La question demeure de la préservation de cette formation résiduelle à silex sous les formations de base thanétiennes, qui l'auraient possiblement partiellement ou totalement remaniée, comme c'est le cas au niveau du Cap d'Ailly.

Enfin, la présence de karsts plus ou moins profonds (dolines, bêtoires...), qu'ils soient d'âge paléogène ou néogène-quaternaire, doit être considérée.

En effet, en plus de la surrection régionale, les chutes successives du niveau marin lors des périodes des glaciations quaternaires ont émergé une grande partie de la Manche, incluant la totalité de la macro-zone FGL à plusieurs reprises. Les phénomènes de karstification ont ainsi pu

se développer sur l'ensemble du territoire où les craies affleurent ou sont à proximité du fond marin.

Ces phénomènes sont possiblement moins marqués qu'à terre du fait d'une plus grande profondeur au niveau de la macro-zone FGL (-30m à -60 m), limitant la différence d'altitude entre la paléosurface et le niveau de base.

Ces incertitudes sur la présence d'altération et de karsts pourraient-être levées par :

- (i) une étude approfondie de la morphobathymétrie au niveau du contact Crétacé-Paléogène des Bassins Nord Baie de Seine et Dieppe-Hampshire, afin de détecter des traits particuliers, en se basant sur la bathymétrie très haute résolution (multifaisceaux).
- (ii) une étude systématique du contact Crétacé-Paléogène en sismique réflexion pour détecter des singularités morphologiques attribuables à de la dissolution-karstification.
- (iii) la mise en œuvre de méthodes géophysiques adaptées (sismique réfraction sous-marine, tomographie de résistivité électrique sous-marine...) sur les zones de plus forte susceptibilité.
- (iv) un contrôle par la réalisation d'un ou plusieurs forages carottés ciblés sur les indices suspectés par les méthodes géophysiques.

Un aller-retour entre méthodes géophysiques et géologiques est encouragés afin de rationaliser les actions et les coûts.

Enfin, dès lors que la présence de formations et morphologies d'altération est confirmée, leur caractérisation géotechnique spécifique sera à considérer dans le cas d'une implantation locale d'infrastructures.

## 8. Recommandations pour la poursuite des études du substratum

La présente étude permet de fournir un cadre de connaissance géologique contraint par un jeu de données géologiques et géophysiques. Les résultats sont présentés sous forme de cartes et de coupes sismiques interprétées en géologie et par une description des lithologies principales rencontrées dans la pile sédimentaire.

Néanmoins, le faible nombre de prélèvements géologiques (vingt-et-un sur la macro-zone FGL), la faible résolution des données bathymétriques, et la densité relative du maillage sismique ne permettent pas de proposer des résultats atteignant un niveau de détail suffisant pour envisager les applications attendues de développement et installation de parc d'éoliennes en mer. L'apport de connaissance nécessaire implique des acquisitions et études supplémentaires en géologie et géophysique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous proposons quelques recommandations sur plusieurs aspects géologiques et géophysiques.

### 8.1. BATHYMETRIE TRES-HAUTE-RESOLUTION

L'acquisition de données bathymétriques multifaisceaux permet d'obtenir des modèles numériques bathymétriques d'une résolution d'ordre métrique, qui autorisent des interprétations morphobathymétriques fines.

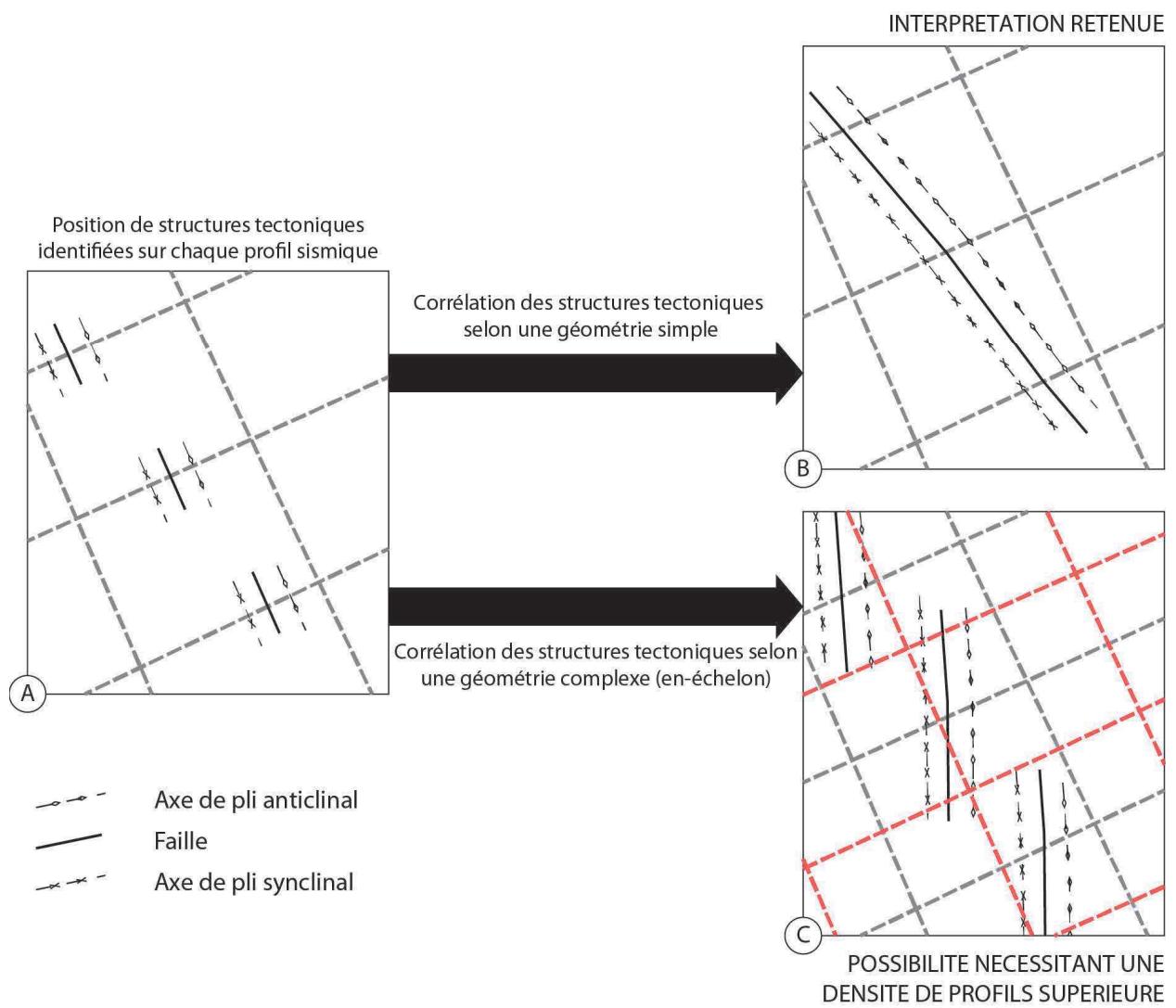
Les résultats obtenus dans la présente étude à partir d'un modèle numérique de résolution d'ordre hectométrique sont encourageants quant à l'amélioration apportée par une résolution métrique.

L'interprétation morphobathymétrique ciblée sur le substratum permettra de mettre en évidence :

- La géométrie des strates des séries sédimentaires du substratum et de mettre en évidence certains contacts stratigraphiques (contrastes morphologiques liées au variation de lithologie, discordances angulaires...).
- Des morphologies et géométries caractéristiques de certains niveaux stratigraphiques ou lithologiques (ex : ondulations de la craie de l'intervalle Coniacien-Campanien, paléochenaux gréseux du Berriasien-Barrémien...).
- Les géométries associées à des déformations tectoniques des séries sédimentaires (failles, plis, fracturation)
- La présence de morphologies atypiques pouvant être associée à la présence sous-jacente de figures karstiques liées à la dissolution des calcaires.

### 8.2. SISMIQUE TRES-HAUTE-RESOLUTION

Le maillage de sismique très-haute-résolution (THR) sparker utilisé pour cette étude se révèle parfois insuffisant pour (i) valider certaines interprétations et corrélations des unités sismiques, notamment dans les zones déformées, ainsi que de (ii) caractériser finement ces déformations. En effet, la compréhension de la géométrie d'un objet géologique nécessite que la densité d'échantillonnage des données soit inférieure à la dimension de l'objet en question. Ce principe est illustré en Figure 35.



*Figure 35 : Illustration de l'effet d'une densification du maillage de profils sismiques réflexion permettant de caractériser plus finement la complexité de la distribution des structures tectoniques. A : illustre la position de structures identifiées le long des profils sismiques ; B : proposition d'interprétation la plus simple à partir des positions obtenues en A ; C : illustre le cas d'une géométrie complexe en-échelon ne pouvant être validée que par un doublement des densités de profils sismiques selon les deux directions.*

Selon les observations réalisées lors de cette étude, nous proposons de réaliser des acquisitions de données de sismique réflexion UHR/THR avec un espacement inter profils compris entre 1 et 1,5 km, selon des directions approchant les axes OSO-ENE et NNO-SSE, proches des coupes réalisées dans cette étude. Ces orientations permettent d'obtenir des profils orthogonaux et parallèles à de nombreuses structures.

La densité et l'orientation des profils sont à adapter, notamment au niveau des structures tectoniques les plus complexes, que sont la Faille de Fécamp-Lillebonne, la Faille Nord Baie de Seine, et la « Faille d'Eletot ». A titre d'exemple, les travaux réalisés le long de la Faille de Fécamp-Lillebonne, entre la macro-zone FGL et la côte (Paquet *et al.*, 2017) ont utilisé les données des campagnes sismiques CHALKWAVE 2015 et 2016 (Paquet, 2015 ; Paquet, 2016) réalisées avec les moyens de la Flotte Océanographique Française. L'espacement inter profils sur ces campagnes varie de 1.2 km à 500 m pour les profils parallèles à la structure principale, et entre 600 m et 150 m pour les profils perpendiculaires (Figure 36). Seul un maillage d'une telle

densité permet de rendre de compte de la complexité des structures de la Faille de Fécamp-Lillebonne et d'en proposer une approche tridimensionnelle.

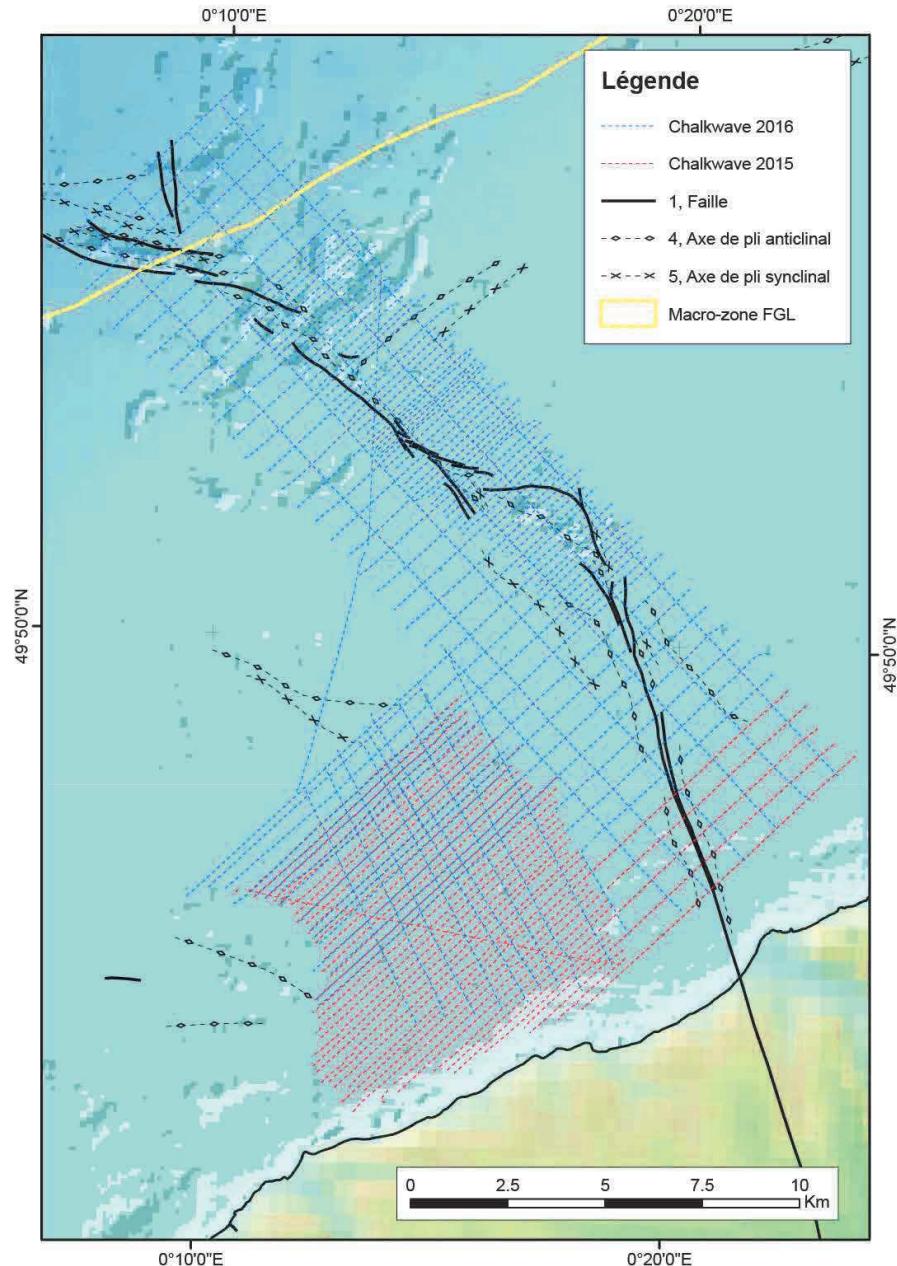


Figure 36 : Carte montrant la localisation et l'espacement des profils sismiques des campagnes Chalkwave 2015 et 2016 (Paquet, 2015, 2016) ayant permis le tracé des structures tectoniques associées à la faille de Fécamp-Lillebonne.

Dans le cas de la macro-zone FGL, la préconisation de distance d'espacement inter profils pour obtenir une bonne caractérisation des structures tectoniques majeures et complexes (Faille Nord Baie de Seine et Faille de Fécamp-Lillebonne, Faille d'Eletot), serait de 200 à 500 m, avec une orientation perpendiculaire aux structures.

Néanmoins, dans le cadre de projets d'installation d'infrastructures de parc éolien en mer, et au-delà des aléas sismiques associés aux failles majeures potentiellement actives, nous estimons que les zones de forte déformation devraient être évitées dans la mesure du possible. En effet, les structures tectoniques majeures ont pour effet de :

- (i) déformer les séries sédimentaires, de les endommager et d'en affecter les propriétés mécaniques (couloir de déformation et fracturation, brèche et gouge de faille, veines minéralisées, karstification des zones endommagées...), et de
- (ii) modifier la distribution latérale des lithologies en amenant des niveaux d'âges et natures différents à la même altitude, engendrant ainsi une complexité accrue de la variabilité latérale des propriétés mécaniques du substratum.

Enfin, si les données de sismiques réflexions utilisées dans la présente étude sont de type monotrace avec source sparker, il est probable que l'utilisation d'un système d'acquisition plus sophistiqué (multitraces) pourra améliorer la qualité de l'imagerie, notamment par l'amélioration du rapport signal/bruit et l'atténuation des multiples, et ainsi faciliter l'interprétation des données acquises.

### **8.3. SONDAGES GEOLOGIQUES**

Comme indiqué précédemment, la connaissance des lithologies et de la stratigraphie des séries sédimentaires du substratum repose sur une quantité relativement limitée de prélèvements. Les résultats de la présente étude peuvent être considérés comme insuffisant au regard du niveau de connaissance attendu.

Pour améliorer la connaissance lithostratigraphique, la réalisation de sondages carottés de plusieurs dizaines de mètres de pénétration représente la solution la plus adaptée. Il convient alors de déterminer l'emplacement de ces sondages afin d'obtenir une vision la plus complète des formations présentent dans les 50 à 100 premiers mètres de substratum.

Afin d'obtenir les informations lithostratigraphiques souhaitées, nous proposons qu'à minima, une série de sondages soit effectuée avec un espacement adapté pour que chaque niveau stratigraphique soit recoupé au moins une fois, depuis le Jurassique supérieur (j6 – j7), jusqu'au Bartonien (e6).

Ainsi, il apparaît que l'implantation d'une série de sondages le long de la coupe sismique n°9 permettrait de satisfaire les contraintes exposées ci-dessus, car celle-ci permet d'imager sur un même linéaire la quasi-totalité de la pile sédimentaire (j7-e6) et de vérifier que tous les niveaux stratigraphiques sont bien recoupés.

Si la coupe n°9 permet de déterminer des implantations pertinentes pour les sondages dans le compartiment structural au NE des Failles de Fécamp-Lillebonne et Nord Baie de Seine, il est néanmoins nécessaire de compléter pour le compartiment au SO.

Sur le compartiment au SO des Failles de Fécamp-Lillebonne et Nord Baie de Seine, une implantation de sondages le long de la coupe n°26 permettrait d'obtenir des informations sur les différents niveaux stratigraphiques.

A titre d'exemple, et en considérant la réalisation de sondages carottés d'une longueur de 50 m, la totalité des niveaux du compartiment structural NE serait traversée dans le cas de la réalisation de 18 sondages le long de la coupe n°9 (09-01 à 09-18). Le compartiment SO nécessiterait quant à lui la réalisation de 5 sondages (dont un dédié à la caractérisation du remplissage des fosses et paléovallées néogènes à quaternaires) le long de la coupe n°26 (26-01 à 26-05).

Enfin, la réalisation de sondages supplémentaires devrait être envisagée à travers l'ensemble de la macro-zone pour :

- (i) vérifier l'éventualité de variations latérales des faciès sédimentaires et donc des lithologies au sein d'un même étage ou sous-étage stratigraphique,
- (ii) accéder au Jurassique supérieur d'âge Kimméridgien (j6) suspecté au cœur de l'anticlinal situé le long de la Faille de Fécamp-Lillebonne (Coupe n°2 - Figure 21).
- (iii) vérifier la présence de figures de dissolution et karstification des niveaux carbonatés.

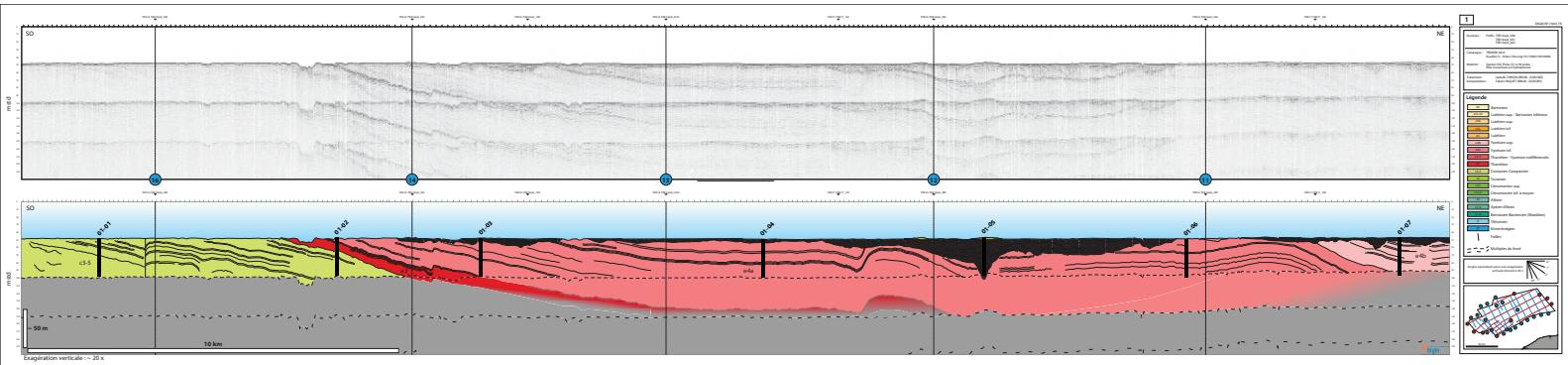
Les coupes n°1, n°2 et n°11 offriraient pour chaque niveau stratigraphique des sites de sondages complémentaires les plus éloignés de ceux des coupes n°9 et n°26, et donc susceptibles de présenter le maximum de variation latérale de lithologie. Nous proposons ainsi 7 sites de sondages sur la coupe n°1 (01-01 à 01-07), 6 sites pour la coupe n°2 (02-01 à 02-06), et 3 sites sur la coupe n°11 (11-01 à 11-03).

La distribution ou implantation des 39 sondages pour les coupes n°1, 2, 9, 11, 25 et 26 est illustrée dans les Figure 37 à Figure 41 respectivement, ainsi qu'en vue cartographique, en Figure 42.

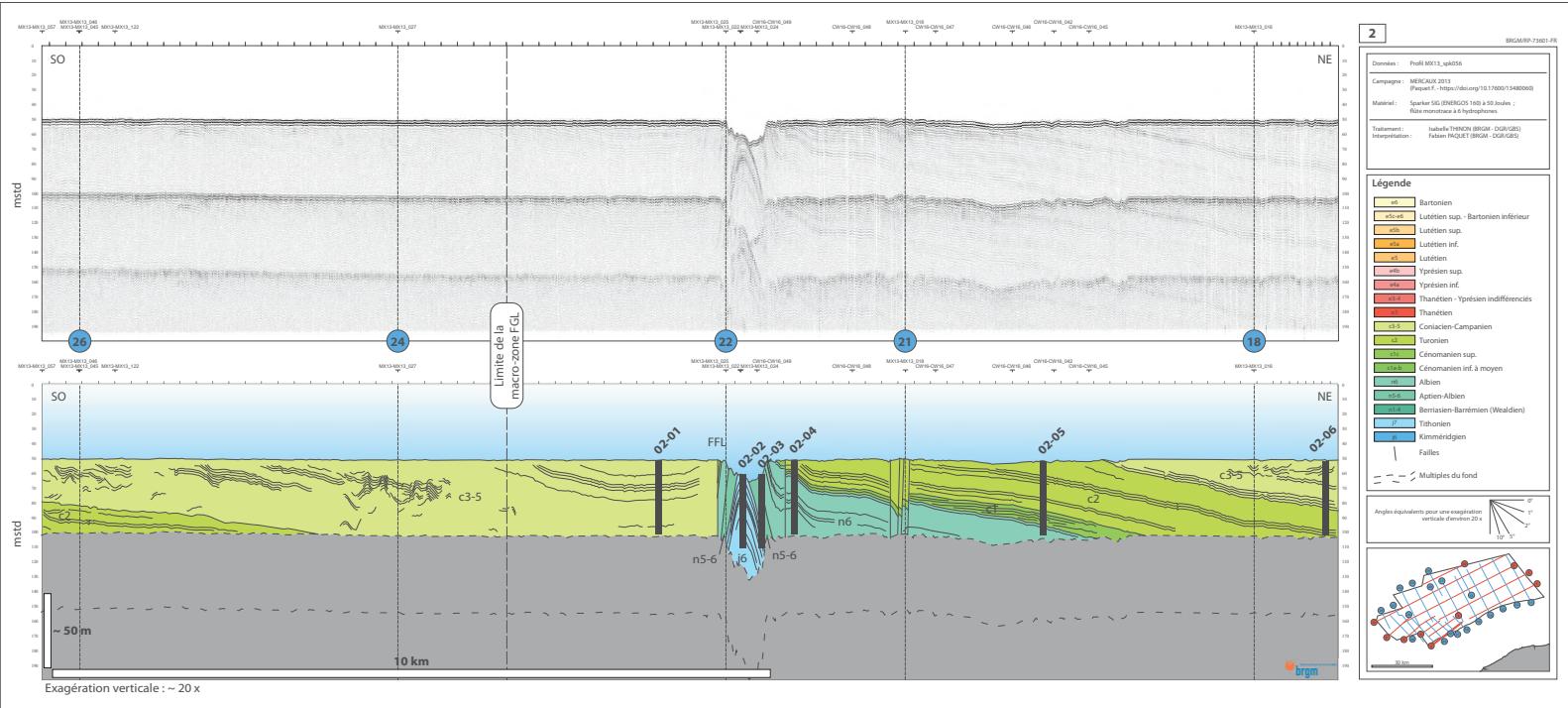
Ainsi un total de 39 sondages d'environ 50 m de longueur semblent nécessaires à une caractérisation lithostratigraphique correcte des différents niveaux rencontrés dans la série sédimentaire, et qui permettra alors de mettre en évidence les variations lithologiques verticales dans l'ensemble de la pile sédimentaire, mais également latérale au sein d'un même niveau.

Enfin, la réalisation de sondages carottés devra s'accompagner d'un échantillonnage sélectif afin de procéder à la caractérisation géotechnique des niveaux récupérés, et également de la réalisation en parallèle d'essais de pénétration au cône in situ (CPT – Cone Penetration Test). La caractérisation des propriétés géotechniques est en effet fondamentale pour évaluer le comportement des roches du substratum aux contraintes induites par les différents types de fondations des différentes infrastructures envisagées, afin d'en assurer l'intégrité et la pérennité.

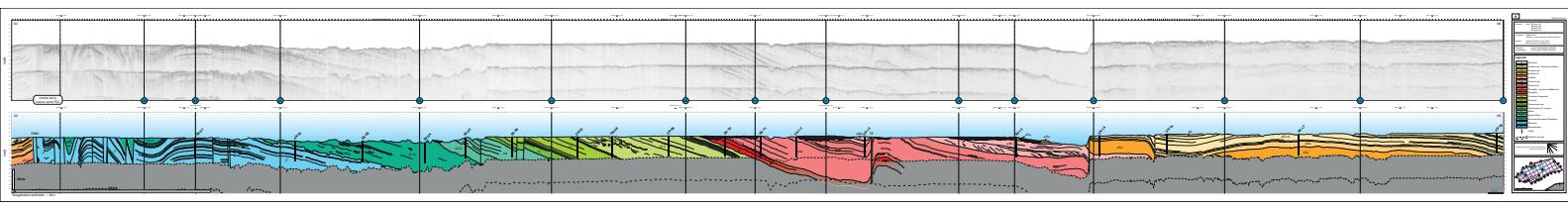
*Figure 37 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°01 et montrant une proposition d'implantation de 7 sondages carottés (01-01 à 01-07) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



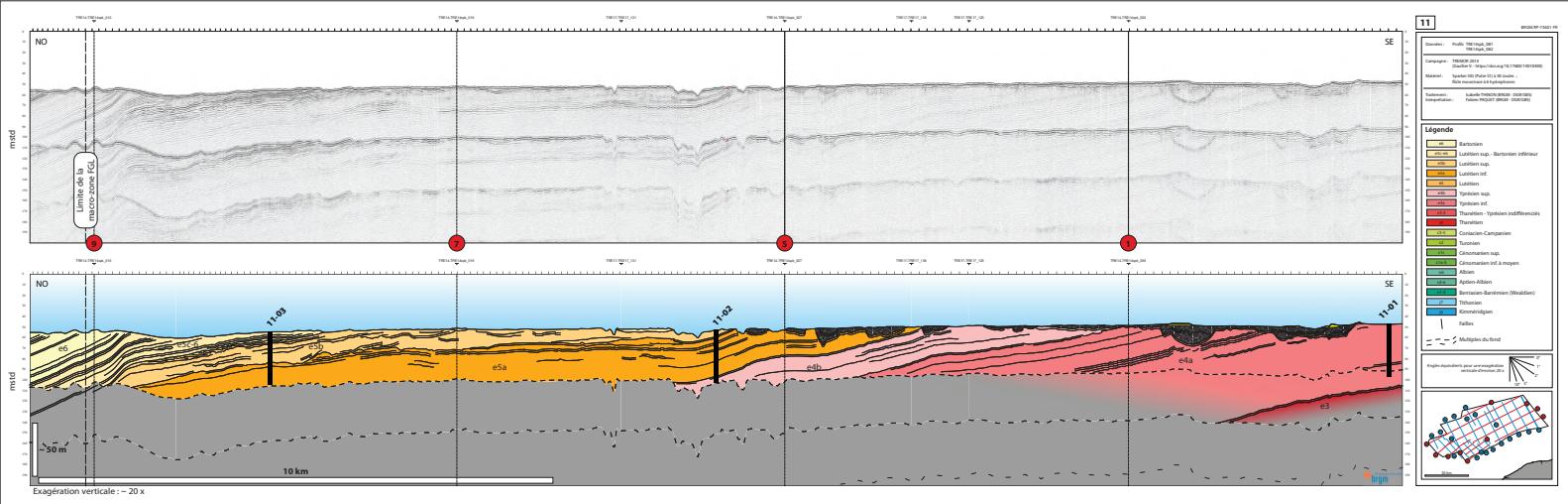
*Figure 38 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°02 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (02-01 à 02-06) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



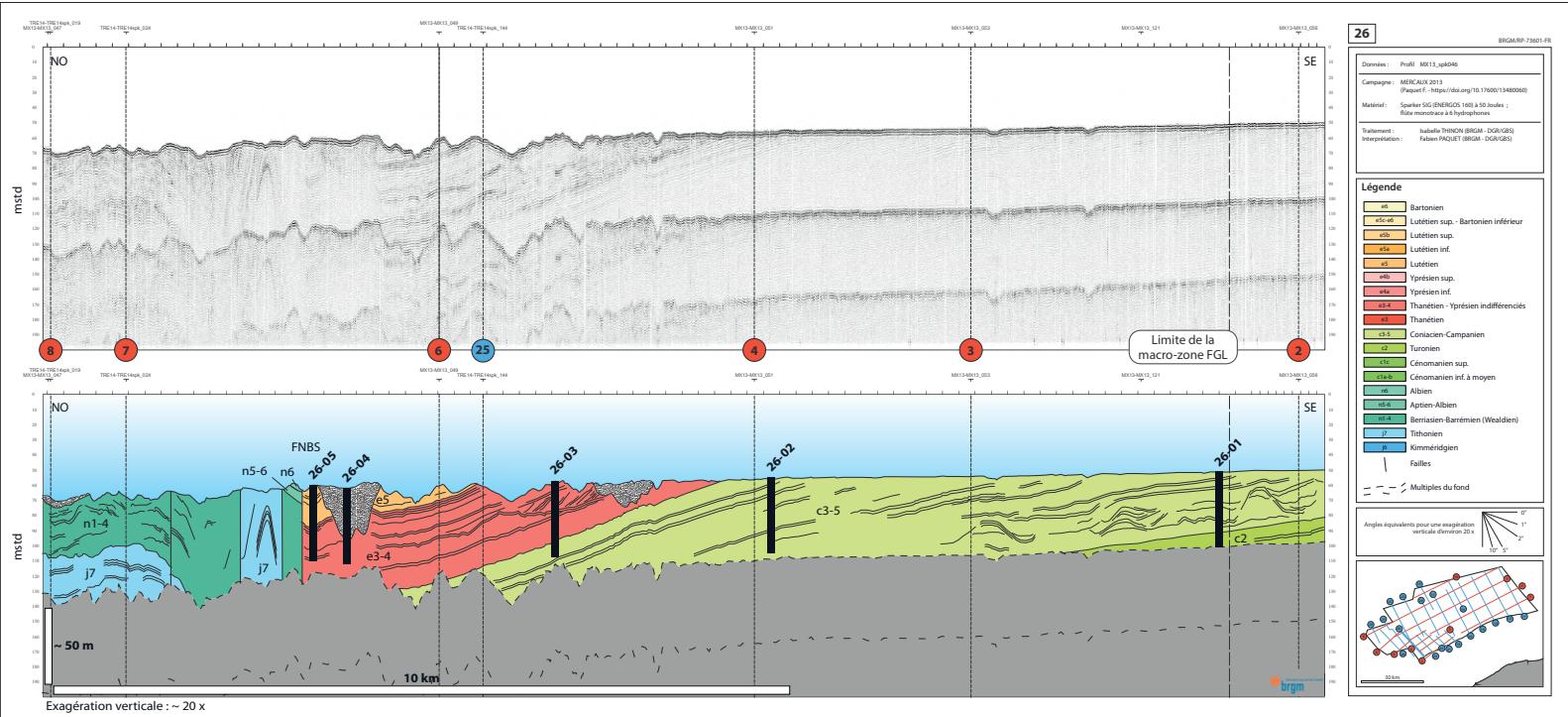
*Figure 39 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°09 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (09-01 à 09-18) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



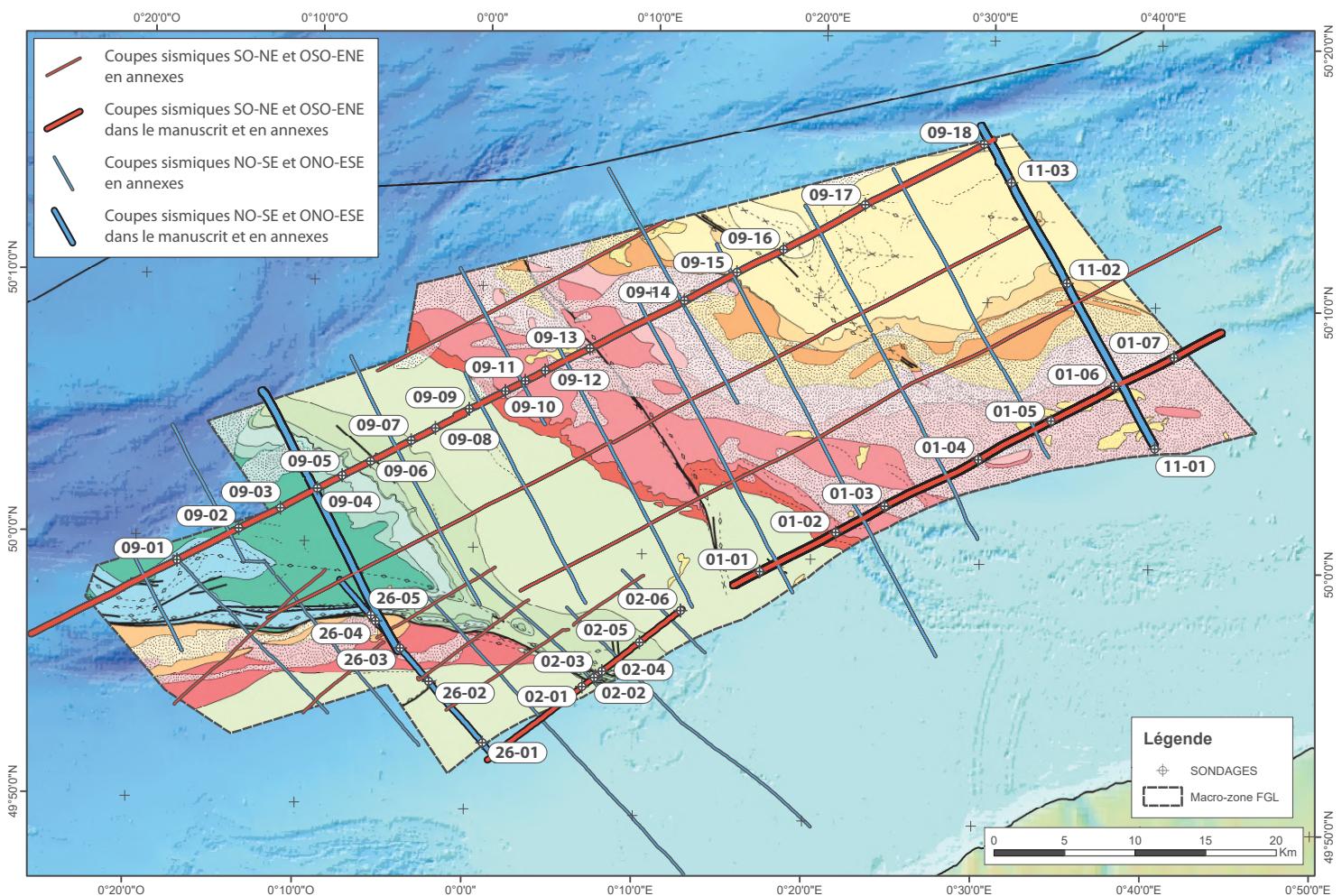
*Figure 40 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°11 et montrant une proposition d'implantation de 3 sondages carottés (11-01 à 11-03) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



*Figure 41 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°26 et montrant une proposition d'implantation de 5 sondages carottés (26-01 à 26-05) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



*Figure 42 : Carte géologique de la macro-zone FGL au 1/250 000, issue des travaux de la présente étude, montrant la répartition des unités et montrant une proposition d'implantation de 5 sondages carottés (26-01 à 26-05) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.*



## 9. Conclusion

La présente étude a permis d'affiner la connaissance géologique au niveau de la macro-zone FGL en réalisant un travail complet de réinterprétation d'un jeu de données de sismique réflexion THR, couplé à une interprétation de la bathymétrie disponible et en se basant sur les travaux et données antérieurs consultables.

La bathymétrie disponible a été interprétée en termes géomorphologiques et le lien entre relief local et érodabilité des lithologies du substratum affleurant est confirmé, ainsi que l'influence des évènements récents (Néogène-Quaternaire) dans le façonnement de la morphologie des fonds marins (fosses et paléovallees).

La nature des fonds marins et les grands ensembles sédimentaires meubles sont abordés et présentés par le biais de cartes préexistantes.

Les résultats confirment et précisent les travaux antérieurs et offrent une cartographie affinée à l'échelle du 1/250 000, ainsi qu'une série de coupes. L'ensemble permet de décrire la géométrie des grands ensembles stratigraphiques de la pile sédimentaire entre le Kimméridgien (Jurassique supérieur – j6) et le Bartonien (Eocène supérieur - e6). L'intégration des travaux antérieurs des années 1970 aux années 2010 permet d'obtenir une idée de la distribution des lithologies du substratum au sein de la macro-zone. Les principales structures tectoniques ont été cartographiées dont la Faille de Fécamp-Lillebonne, se prolongeant vers l'ouest en tant que Faille Nord Baie de Seine, ainsi que la Faille d'Eletot.

Les aléas géologiques associés (i) à la sismicité (estimation du niveau de sismicité en mer par analogie au zonage en vigueur à terre ; failles majeures proposées comme failles potentiellement actives), (ii) à l'influence de la déformation au niveau des failles majeures, et (iii) à l'altération et à la karstification sont abordés.

Les différents thèmes traités et les travaux spécifiques menés dans le cadre du présent travail permettent d'aboutir à une connaissance géologique mise à jour offrant une vision d'ensemble largement améliorée du point de vue géométrique et structural.

Enfin, nous proposons une série de recommandations sur la poursuite des travaux géophysiques et géologiques, ayant pour but d'obtenir un niveau de connaissance géologique de la macro-zone FGL adapté à la phase initiale de levée de risques, qui permettra ainsi de réaliser les objectifs de développement optimal des énergies marines renouvelables.

## 10. Références

Alduc D. (1979). La Manche Orientale, étude géomorphologique du réseau des paléovallées. Mémoire de thèse de doctorat, Université de Caen, 146 p.

Augris C., Simplet L., Maze J.-P., Morvan L., Satra Le Bris C., Fitamant N., Bourillet J.-F., Stephan M. (2006). Inventaire des ressources en matériaux marins : Façades « Manche-Est » et « Loire-Gironde ». <https://archimer.ifremer.fr/doc/00135/24577/>

Auffret J.-P. (1973). Géologie Sous-Marine. – Découverte du Bartonien en Manche orientale. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris - D, 276, 1962-1968.

Auffret J.-P., Bignot G., Blondeau A. (1975). Géologie du bassin tertiaire de la Manche orientale au large du Pays de Caux. Phil. Trans. Roy. Soc. London – A, 279-1288, 169-176.

Auffret J.-P. et Gruas-Cavagnetto C. (1975). Les formations paléogènes sous-marines de la Manche orientale ; données palynologiques. Bulletin de la Société Géologique de France 17, 641-655.

Ballèvre M., Bosse V., Ducassou C., Pitra P. (2009) Palaeozoic history of the Armorican Massif: Models for the tectonic evolution of the suture zones. CR Geosciences 341, 174-201.

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). Mémoire de Thèse de Doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie. 310p. et annexes.

Benabdellouahed M., Dugué O., Tessier B., Thimon 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. Géologie de la France 1, 21–45.

BGS-BRGM. (1988). Dungeness – Boulogne Sheet 50N – 00 Solid Geology. 1:250 000 UTM series of the United Kingdom and continental shelf. Crown copyright, contains British Geological Survey materials © UKRI.

Bignot G. (1971). Carte géologique de la France à l'échelle du 1/50 000, Feuille n°42 – Dieppe - ouest. BRGM.

Bignot G. (1972). Stratigraphie de la Manche Orientale : Etude biostratigraphique des prélèvements Eocènes. Colloque sur la Géologie de la Manche, Mémoire du BRGM 79, 153-156.

Cara M., Cansi Y., Schlupp A. (2015). SI-Hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France. Bull. Soc. géol. France 186-1, 3-19, <https://doi:10.2113/gssqfbull.186.1.3>

Chantraine J., Autran A., Cavelier C., (2003) Carte Géologique de la France à l'échelle du millionième. Sixième édition révisée. Editions BRGM.

Cohen K.M. & Gibbard, P., 2019, Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500. *Quaternary International*, 500, 20–31.

Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.X. (2023 – 2013 updated). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36, 199-204.

Dalrymple RW, Choi K. (2007). Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews* 81: 135–174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.10.002>

David P.-Y., Meire B., Pennequin D., Jallais N., Bault V., Idee E., Albinet R., Belbeze S., Ragot J. (2020). Fonctionnement de l'hydro-système, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la Faille de Lillebonne-Fécamp – Fécamp (76) – Volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-69139-FR, 443 p. 249 ill., 20 tabl., 14 ann.

Ehlers J., Gibbard P.L. (2004). Quaternary Glaciations-Extent and Chronology: Part I: Europe. *Quaternary Sciences*, vol. 1. Elsevier, Amsterdam, Developments, p. 475, 2.

Garcia-Moreno D., Verbeeck K., Camelbeeck T., De Batist M., Oggioni F., Zurita Hurtado O., Versteeg W., Jomard H., Collier J. S., Gupta S., Trentesaux A., et Vanneste K. (2015). Fault activity in the epicentral area of the 1580 Dover Strait (Pas-de-Calais) earthquake (northwestern Europe). *Geophysical Journal International* 201, 528-542.

Gaullier V. (2014). TREMOR cruise, RV Côtes De La Manche, <https://doi.org/10.17600/14010400>

Gautier E., Augris C., Simplet L., Prevot J., Drussel B., Abrieux E., Morvan L., de Chambure L., Maze J.-P. (2012). Inventaire des ressources en matériaux marins. Façades Bretagne et Sud-Gascogne. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00125/23646/>

Gupta S, Collier JS, García-Moreno D, Oggioni F, Trentesaux A, Vanneste K, De Batist M, Camelbeeck T, Potter G, Van Vliet-Lanoë B, Arthur JC. 2017. Two-stage opening of the Dover Strait and the origin of island Britain. *Nature Communications* 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms15101>.

Groupe Norois (1972) Contribution à l'étude stratigraphique des terrains affleurant en Manche Centrale et Orientale. Colloque sur la géologie de la Manche, Mémoires du B.R.G.M. 79, 123-170.

Hamblin R.J.O., Crosby A., Balson P.S., Jones S.M., Chadwick R.A., Penn I.E., Arthur M.J. (1992). United Kingdom Offshore Regional Report: The geology of the English Channel, British Geological Survey. Ed. HMSO, London.

ISC-GEM (2023). International Seismological Centre – Global Earthquake Model Foundation Earthquake Catalog, <https://doi.org/10.31905/d808b825>

Jollivet-Castelot M. (2018). Bassin de Dieppe-Hampshire (Manche orientale) : Evolution cénozoïque et enregistrement des évènements géodynamiques. Thèse de doctorat, Université de Lille. 296 p.

Jollivet-Castelot M., Briais J., Paquet F., Lasseur E., Gaullier V., Thinon I., Chanier F., Averbuch O., Châteauneuf J.-J. (en cours) The onset of the Dieppe-Hampshire syncline: sedimentary record of Paleogene far-field deformations in the Eastern English Channel and routing system implications.

Jomard H., Cushing E.M., Palumbo L., Baize S., David C., Chartier T. (2017) Transposing an active database into a seismic hazard fault model for nuclear facilities – Part 1: Building a database of potentially active faults (BDFA) for metropolitan France. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17, 1573-1584.

Jomard H., Scotti O., Auclair S., Dominique P., Manchuel K., Sicilia D. (2021). The SISFRANCE database of historical seismicity. State of the art and perspectives. Comptes Rendus Géoscience, 353 – S1, 257-280.

Kaci T. (2023). Tectonique du Nord-Ouest Cotentin par approche Terre-Mer et implications sismotectoniques. Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie. 249 p.

Lagarde J.-L., Amorese D., Font M., LaVille E., Dugué O. (2003). The structural evolution of the English Channel area. Journal of Quaternary Science 18, 201-213.

Laignel B. (1997). Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris : Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse de doctorat - Document du BRGM 264, 224 p.

Laignel B., Quesnel F., Meyer R., Bourdillon C. (1999). Reconstruction of the Upper Cretaceous chalks removed by dissolution during the Cenozoic in the western Paris Basin. International Journal of Earth Sciences, 88 (3), 467-474.

Larsonneur C., Auffret J.-P., Smith A.J. (1982). Carte des paléo-vallées et des bancs de la Manche orientale (1/50000). BRGM, Brest.

Lericolais G. et al. (2001). Seaward pinching out and internal stratigraphy of the Gironde incised valley on the shelf (Bay of Biscay). Marine Geology, 175, pp. 183-197.

Lisiecki LE, Raymo ME. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. Paleoceanography 20, 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>

Maillard J. 1983. Rapport de fin de sondage Nautile 1 - (NTL 1), Permis Manche Orientale (Bloc B). S.N.E.A.(P), Boussens. 8p.

(Manchuel K., Traversa P., Baumont D., Cara M., Nayman E., Durouchoux C. (2018). The French seismic CATalogue (FCAT-17). Bulletin of Earthquake Engineering 16, 2227-2251.

Menier D. (2004). Morphologie et remplissage des vallées fossiles Sud armoricaines : apport de la stratigraphie sismique. Thèse de l'Université de Rennes I.

Mitchum JR, Vail PR, Thompson S. (1977a). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit Stratigraphic Analysis. In Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration, Payton E (Ed). American Association of Petroleum Geologist Memoir 26, 53-62.

Mitchum JR, Vail PR, Sangree JB. )1977b.) Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns. In Depositional Sequences. In Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration, Payton E (Ed). American Association of Petroleum Geologist Memoir 26: 117-133.

Paquet F. (2013). MERCAUX 2013 cruise, RV Côtes De La Manche, <https://doi.org/10.17600/13480060>

Paquet F. (2015). CHALKWAVE 2015 cruise, RV Thalia, <https://doi.org/10.17600/15017300>

Paquet F. (2016). CHALWAVE 2016 cruise, RV Thalia, <https://doi.org/10.17600/16006700>

Paquet F. et Gaullier V. (2017). TREMOR 2 cruise, RV Thalia, <https://doi.org/10.17600/17006700>

Paquet F. et coll. (en préparation). Carte géologique de la France au 1/250 000 – Baie de Seine.

Paquet F., Allanic C., Lasseur E., Caline B., Thinon I. (2017). Reactivation and interactions of cadomian and variscan inherited structures within the intracratonic Anglo-Parisian Basin revealed by offshore studies: The Fécamp-Lillebonne and Nord-Baie-de-Seine faults. 33rd International Meeting of Sedimentology 2017, Toulouse. Poster

Paquet F. (2021). Aperçu géologique de la zone d'intérêt EMR-AO4 en Baie de Seine. Rapport Final BRGM/RP-71059-FR, 36 p., 24 Fig.

Paquet F. (2022). Littoral : géologie, évolution et risques – chapitre 3 : Paléovallées submergées. Géochronique 164, 38-39.

Paquet F., Thinon I., Dugue O., Tessier B., Benabdellouahed M., Lasseur E., Briais J., Coueffe R., Guennoc P., Gaullier V. (2023). The Central English Channel troughs: major source-to-sink remnants or giant tidal scours? Marine and Petroleum Geology 153, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106303

Paquet F. (2024) Aperçu géologique de la façade Manche Est – Mer du Nord. Rapport final – A. BRGM/RP-73268-FR, 51 p.

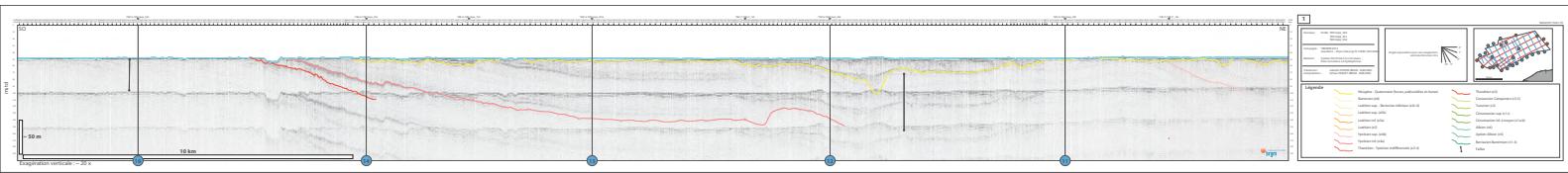
Quesnel F., (1997). Cartographie numérique en géologie de surface : application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Thèse de doctorat. Document du BRGM 263, 430 p. : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00739116/document>

Thinon I., Menier D., Guennoc P., Proust J.-N., Guillocheau F., Bonnet S., Le Roy P., Augris C., Bourillet J.-F., Baltzer A., Tessier B., Pastol Y., Garlan T., Bechennec F., Le Metour J., Graviou P., Alix A.S., Cornu S., Loget N., Scalliet F. (2008). Carte géologique de la France à 1/250 000 de la marge continentale, feuille Lorient (Bretagne Sud). Coordinateurs : J.N. Proust & P. Guennoc, Edition BRGM Orléans– CNRS. ISBN 978-2-7159 – 2170 -2  
<http://www.brgm.fr/cartegeol.jsp>.

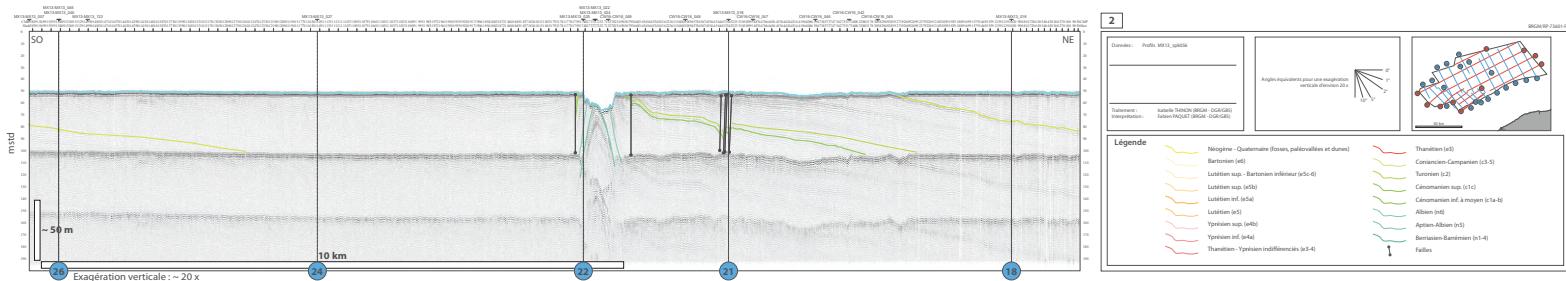
Weber N. (2004). Morphologie, architecture des dépôts, évolution séculaire et millénaire du littoral charentais : Apport de la sismique réflexion combinée à des suivis bathymétriques et validée par des vibro-carottages. Thèse Université de la Rochelle, 374 p.

## 11. Annexes

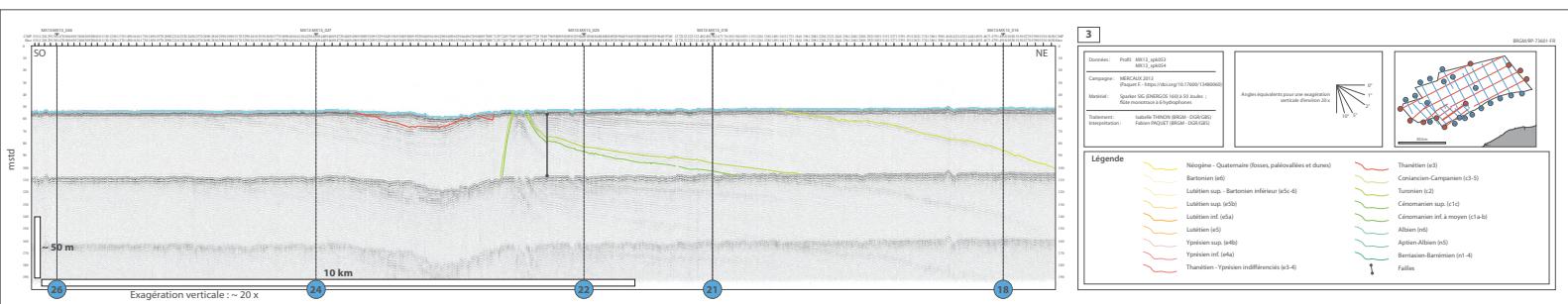
*Annexe 1 : Coupe sismique interprétée n°1.*



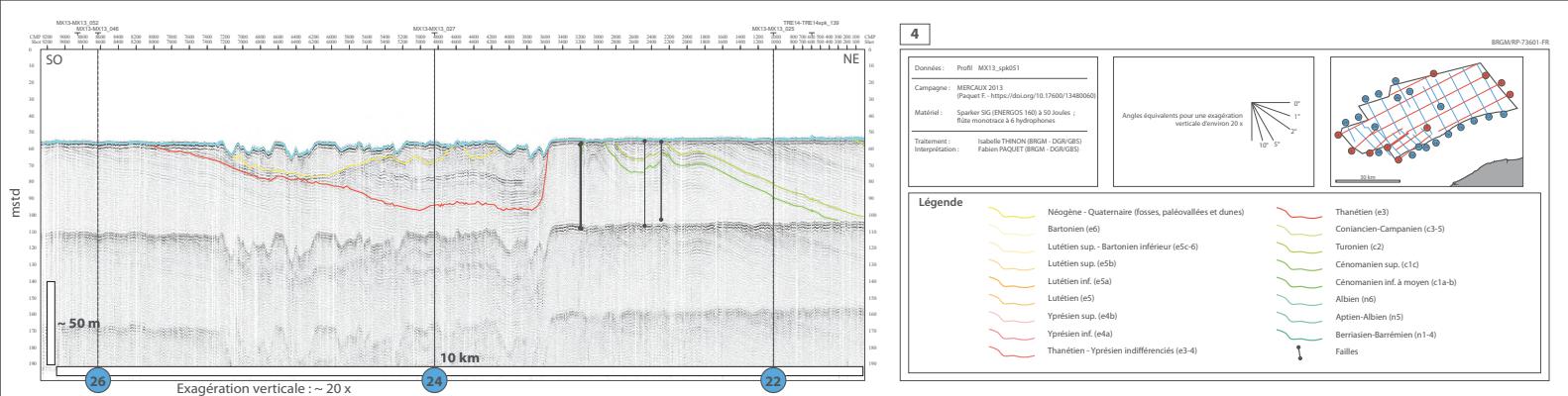
*Annexe 2 : Coupe sismique interprétée n°2.*



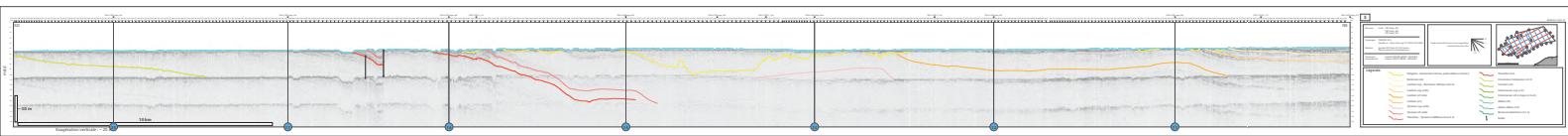
Annexe 3 : Coupe sismique interprétée n°3.



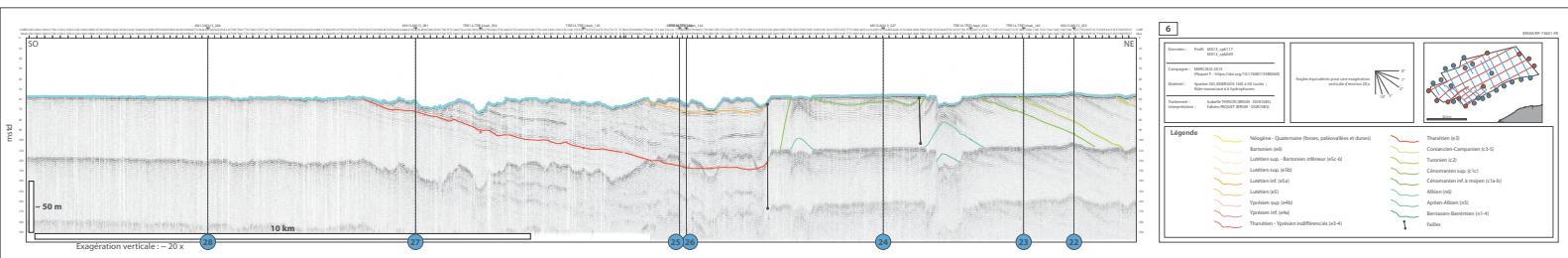
*Annexe 4 : Coupe sismique interprétée n°4.*



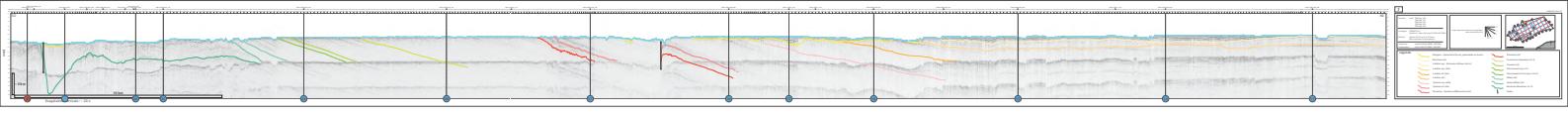
*Annexe 5 : Coupe sismique interprétée n°5.*



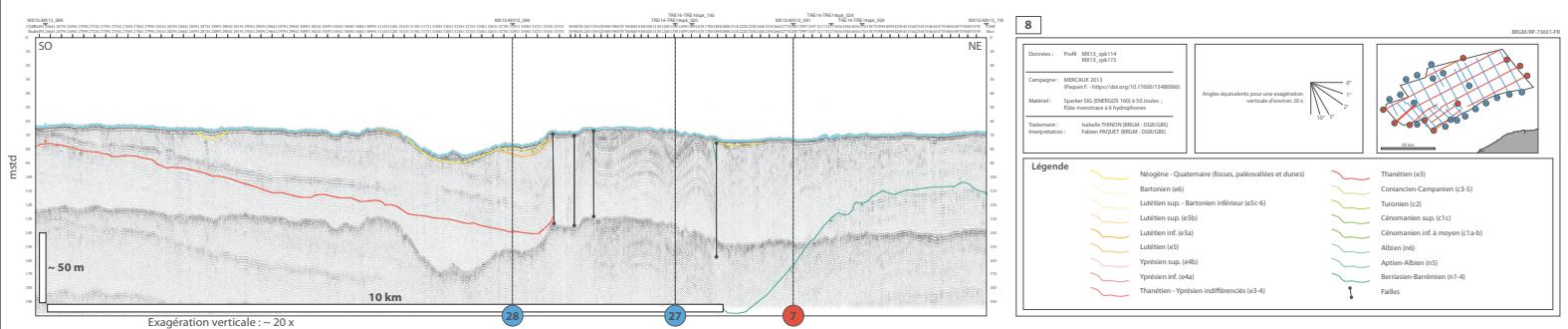
*Annexe 6 : Coupe sismique interprétée n°6.*



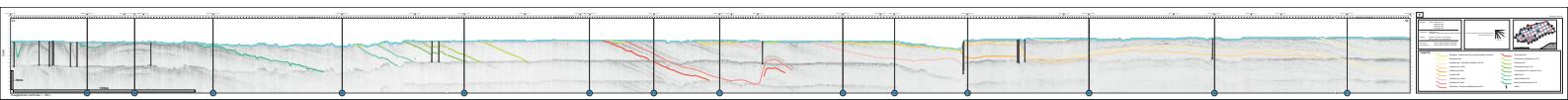
Annexe 7 : Coupe sismique interprétée n°7.



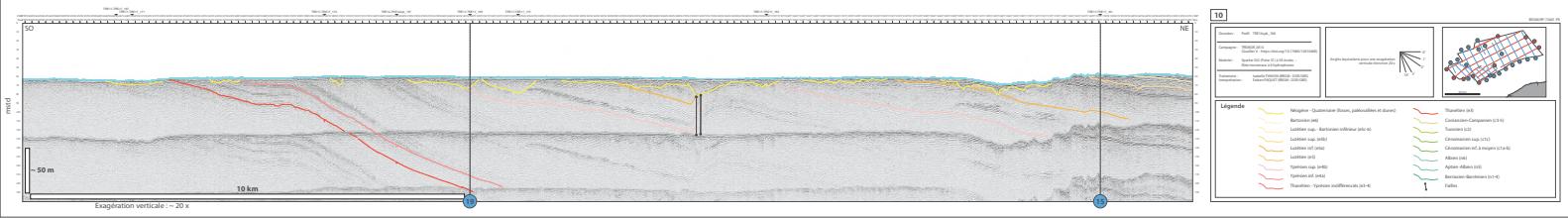
*Annexe 8 : Coupe sismique interprétée n°8.*



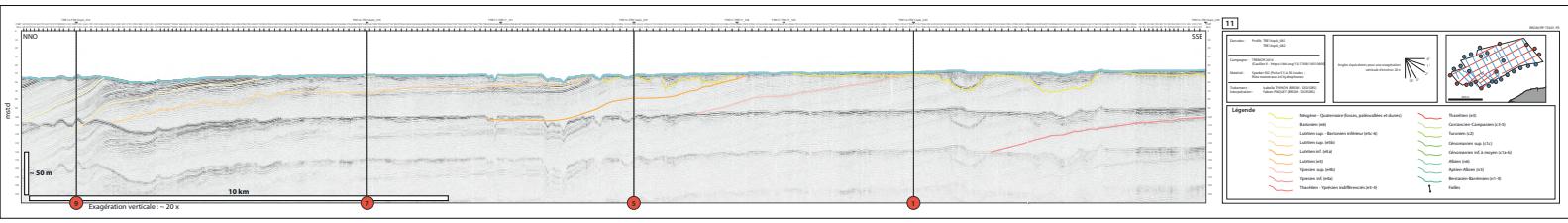
Annexe 9 : Coupe sismique interprétée n°9.



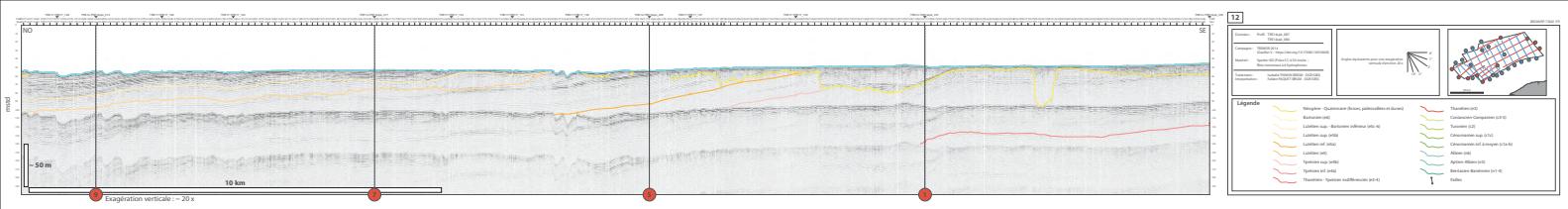
*Annexe 10 : Coupe sismique interprétée n°10.*



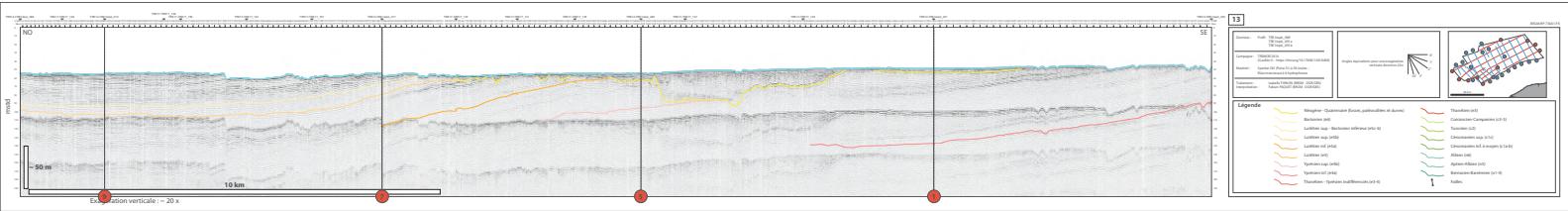
Annexe 11 : Coupe sismique interprétée n°11.



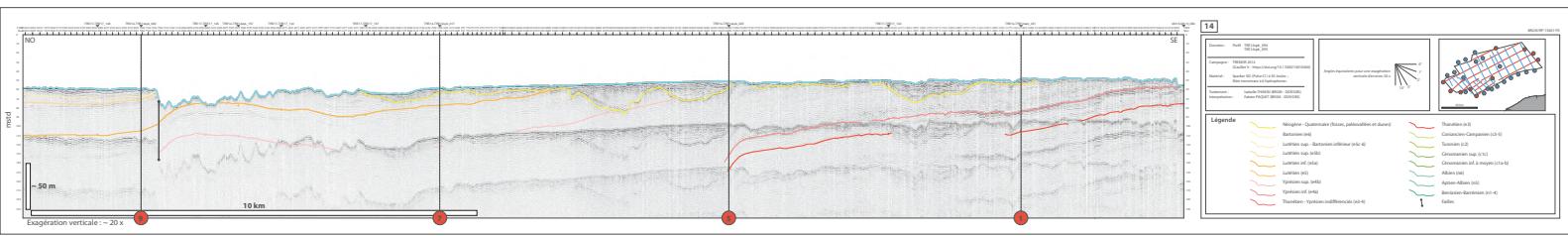
*Annexe 12 : Coupe sismique interprétée n°12.*



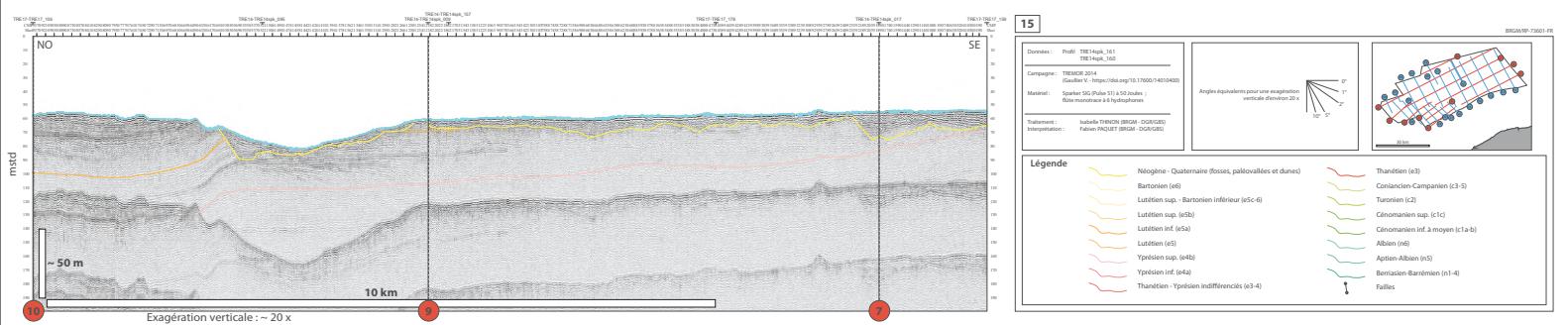
Annexe 13 : Coupe sismique interprétée n°6.



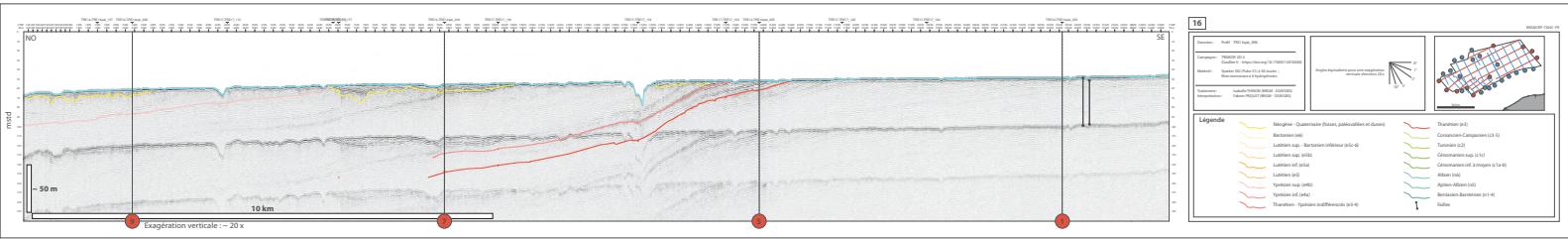
*Annexe 14 : Coupe sismique interprétée n°14.*



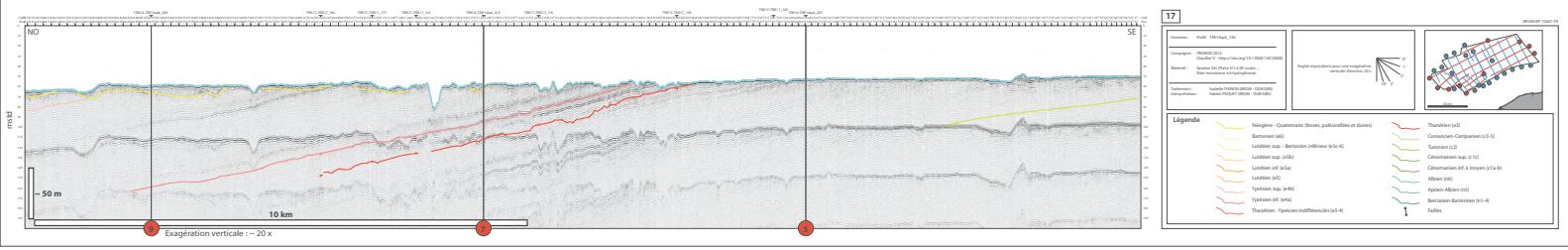
*Annexe 15 : Coupe sismique interprétée n°15.*



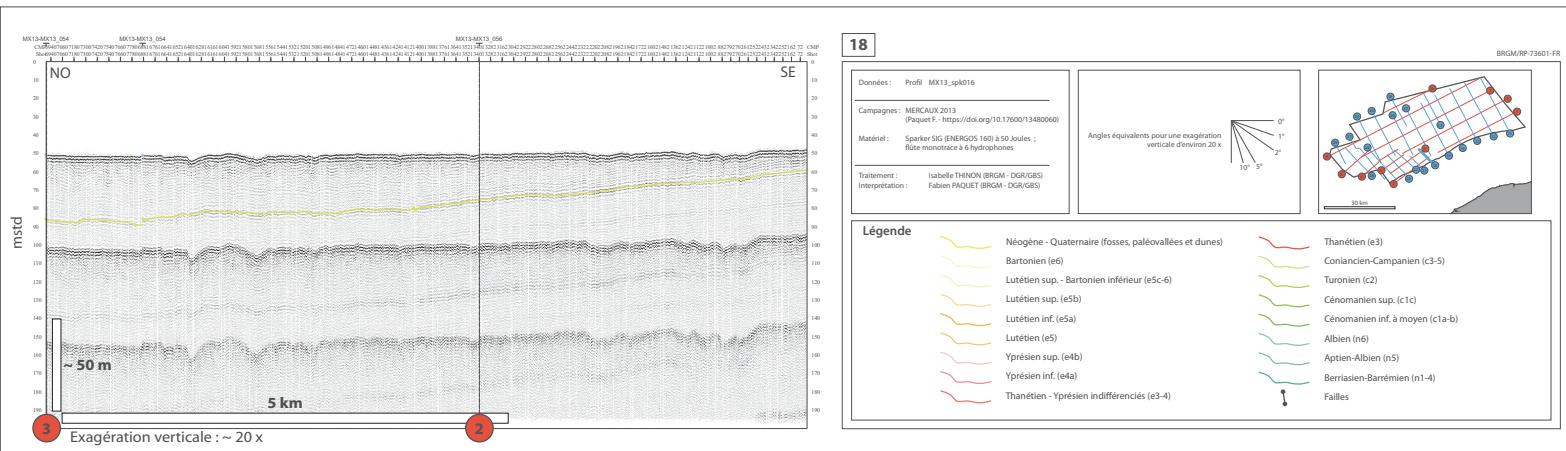
*Annexe 16 : Coupe sismique interprétée n°16.*



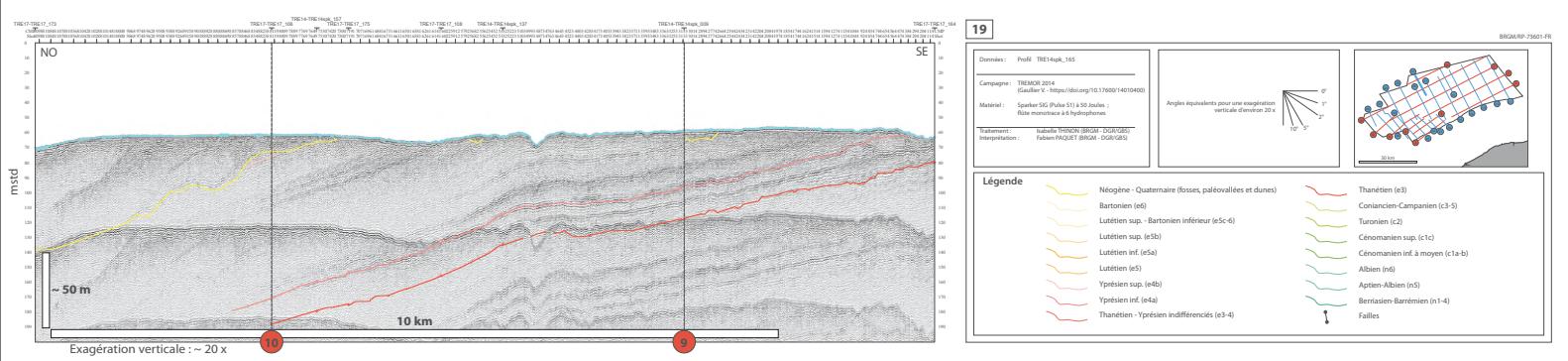
Annexe 17 : Coupe sismique interprétée n°17.



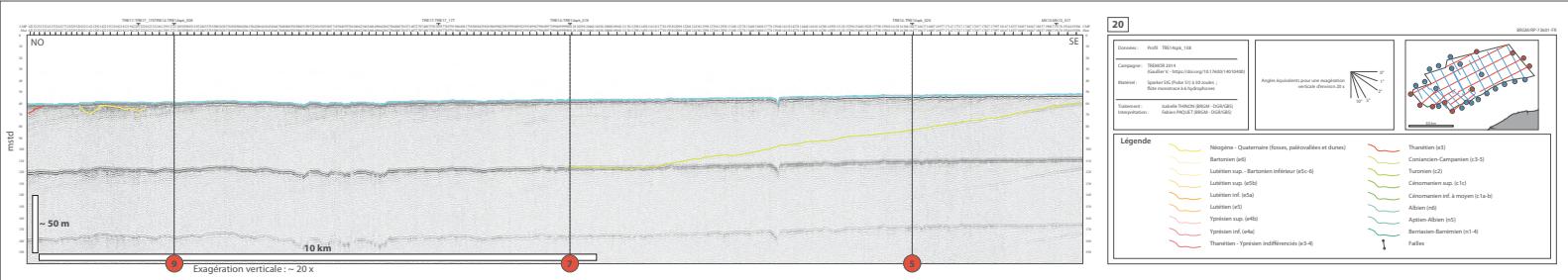
*Annexe 18 : Coupe sismique interprétée n°18.*



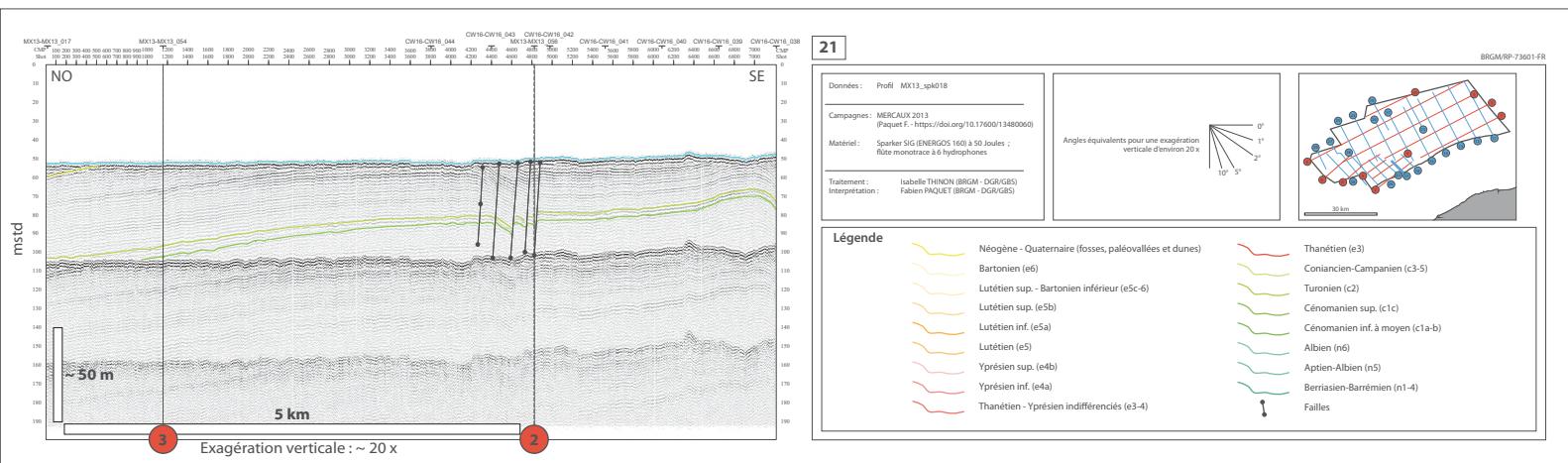
Annexe 19 : Coupe sismique interprétée n°19.



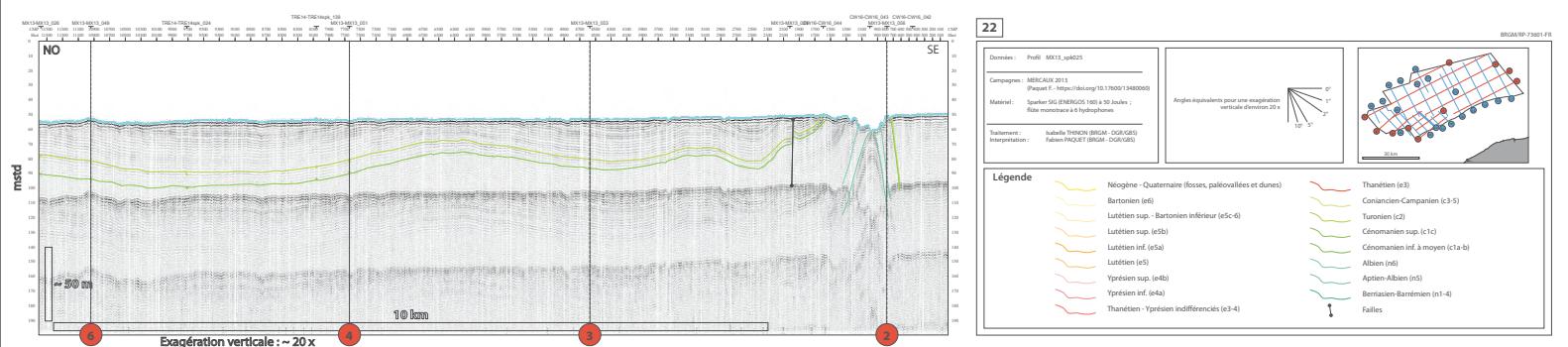
*Annexe 20 : Coupe sismique interprétée n°20.*



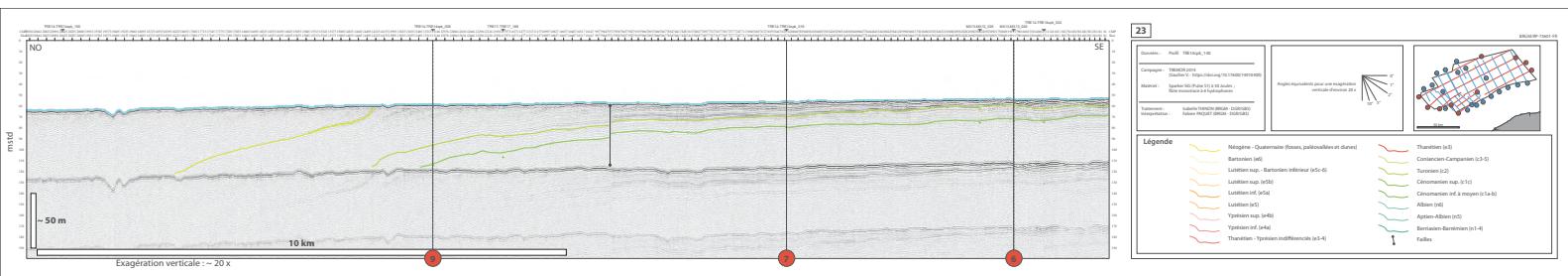
*Annexe 21 : Coupe sismique interprétée n°21.*



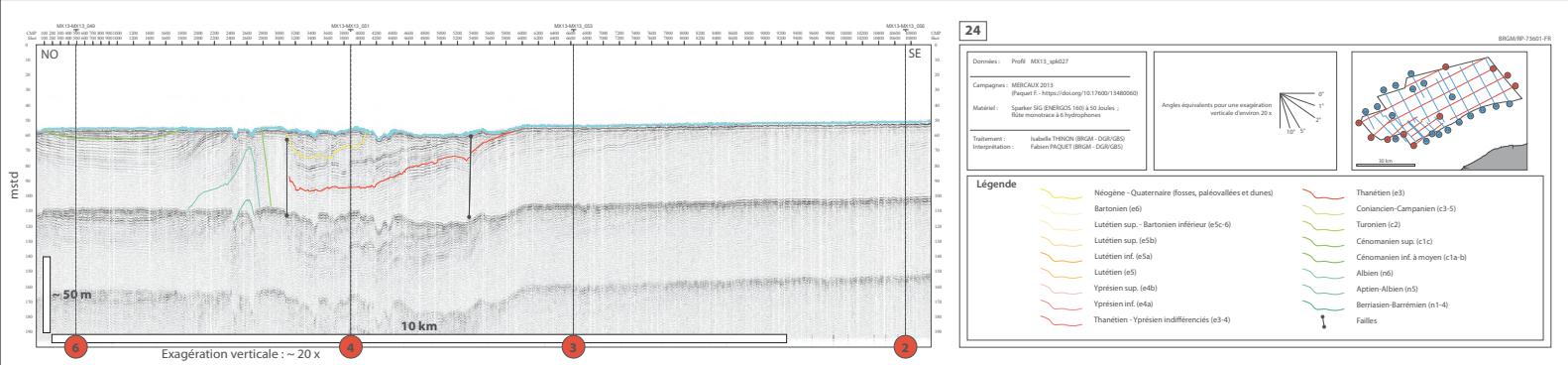
*Annexe 22 : Coupe sismique interprétée n°22.*



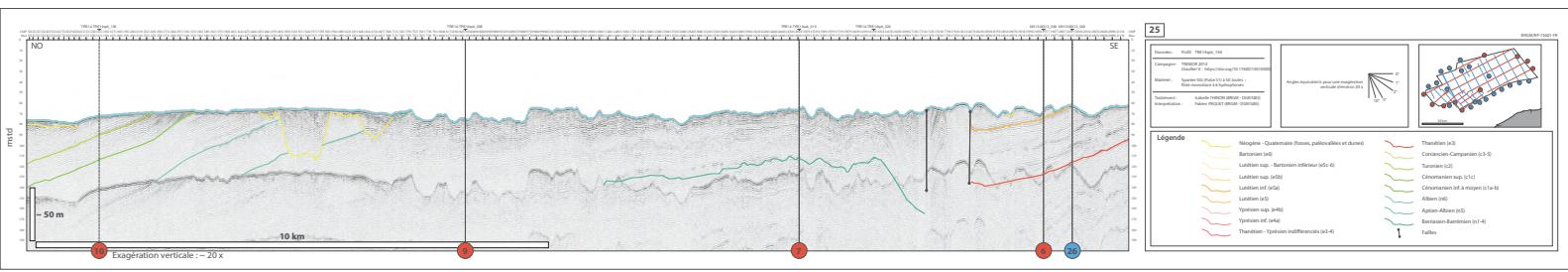
Annexe 23 : Coupe sismique interprétée n°23.



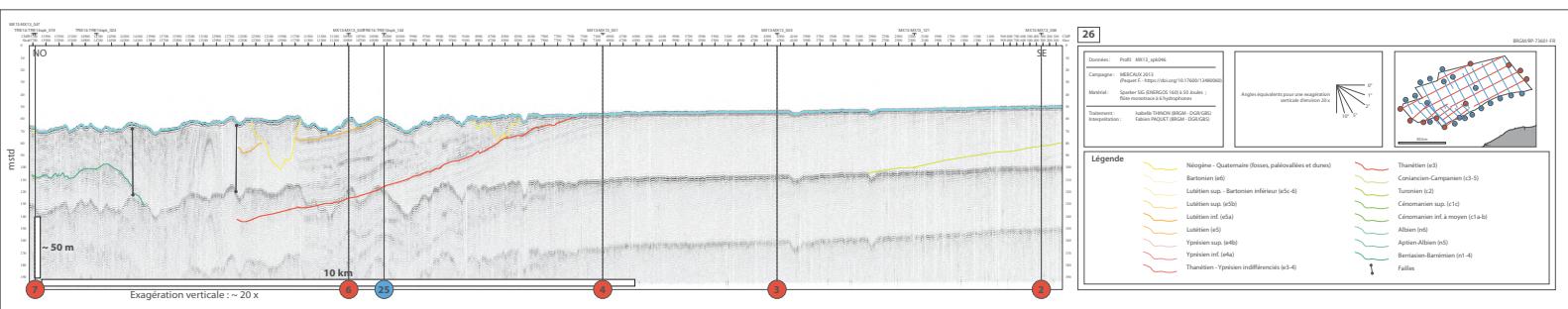
*Annexe 24 : Coupe sismique interprétée n°24.*



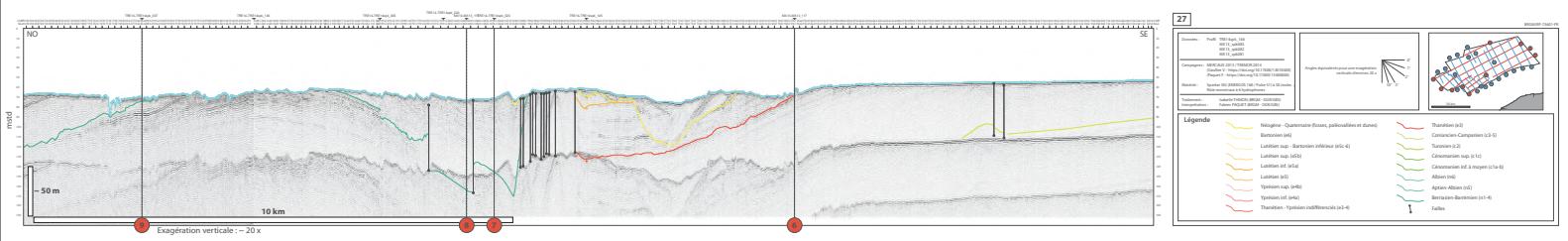
Annexe 25 : Coupe sismique interprétée n°25.



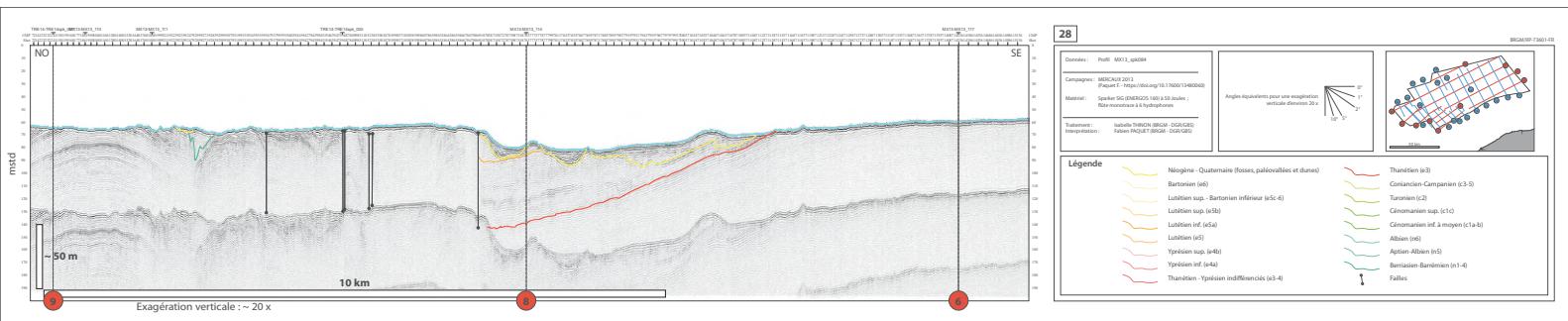
*Annexe 26 : Coupe sismique interprétée n°26.*



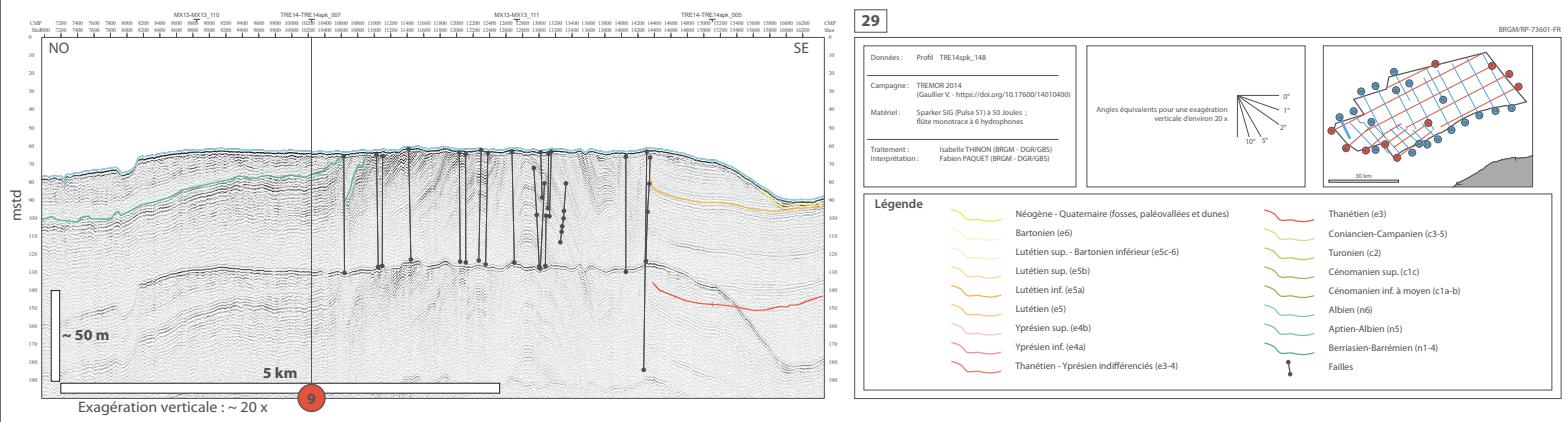
Annexe 27 : Coupe sismique interprétée n°27.



*Annexe 28 : Coupe sismique interprétée n°28.*



Annexe 29 : Coupe sismique interprétée n°29.







*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34  
**Direction régionale ou UTAM**  
Adresse  
Tél. :  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

