RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès réservé

Aperçu géologique des macro-zones Bretagne Nord-Ouest et Roches Douvres - Bretagne Nord-Est

Rapport final

BRGM/RP-74348-FR

Version A du 12 novembre 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques
Convention BRGM / MTE [DGEC] EJ n° 2201426043

Paquet F., Hoste Colomer R., Lemoine A.

Ce rapport a été vérifié le 05/08/2025 et approuvé le **Cliquez ou appuyez ici pour entrer une date.** *selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

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

Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé 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/yMgFcU6Ctq** ou par ce code :

Mots clés :

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

Paquet F., Hoste Colomer R., Lemoine A. 2025. Aperçu géologique des macro-zones Bretagne Nord-Ouest et Roches Douvres - Bretagne Nord-Est. Rapport final A**.** BRGM/RP-74348-FR, 112 p.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 13/03/2025

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 les macro-zones « Bretagne Nord-Ouest » et « Roches Douvres - Bretagne Nord-Est ».

Ce rapport constitue un livrable du Lot 1 de la convention pour les années 2024-2025.

Les thèmes abordés dans ce rapport sont :

- La cartographie bathymétrique issue des données disponibles sur les macro-zones Bretagne Nord-Ouest (BNO) et Roches Douvres - Bretagne Nord-Est (RD-BNE), 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, 2021a) 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 formations géologiques du substratum, ainsi que les structures tectoniques majeures. Elle est accompagnée d'une série de 6 coupes sismiques interprétées couvrant les macro-zones et apportant un complément sur la géométrie de ces 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 formations altérées et de karsts ;
- Les recommandations concernant la poursuite de l'amélioration de la connaissance géologique des macro-zones BNO et RD-BNE (géophysiques, géologiques et géotechniques).

Sommaire

1. Introduction 10

2. Géomorphologie générale des fonds marins des macro-zones BNO et RD-BNE 11
2.1. Macro-zone BNO 11
2.2. Macro-zone RD-BNE 13

3. Nature des fonds et grands ensembles sédimentaires meubles 15
3.1. nature des fonds 15
3.1.1. Nature des fonds de la macro-zone BNO 15
3.1.2. Nature des fonds de la macro-zone RD-BNE 16
3.2. Ensembles sédimentaires meubles 17
3.2.1. Dunes et bancs sableux 18
3.2.2. Paléovallées 18

4. Ensembles géologiques, stratigraphie et structuration globale du substratum 21
4.1. Ensembles géologiques et stratigraphie 21
4.1.1. Substratum de la macro-zone BNO 24
4.1.2. Substratum de la macro-zone RD-BNE 26
4.2. structures tectoniques majeures 31

5. Mise à jour de la cartographie 33
5.1. Données 33
5.2. Méthodologie 36
5.3. Résultats 44
5.3.1. Interprétation sismique 44

6. Lithologies du substratum rocheux 65
6.1. Macro-zone BNO 65
6.1.1. Socle 65
6.1.2. Couverture méso-cénozoïque 66
6.2. Macro-zone RD-BNE 68
6.2.1. Socle 68
6.2.2. Couverture méso-cénozoïque 70

7. Aléas géologiques des macro-zones BNO et RD-BNE 73
7.1. Contexte sismotectonique et aléas sismique 73
7.1.1. Analyses des données sismologiques 73
a) Compilation et catalogue de sismicité régionale 73
b) Description de la sismicité régionale 77
c) Description de la sismicité à proximité de la zone d'étude 79
d) Description des zones sismotectoniques à proximité des zones d'études 81
7.1.2. Rôle de l'héritage structural, de la tectonique et des autres processus dans l'activité sismique contemporaine 85
7.1.3. Recommandations 86
7.2. Effet des failles majeures sur le substratum 88
7.3. Alteration des calcaires et Karsts 88
7.3.1. Principe de l'altération des calcaires 88
7.3.2. Altération des calcaires au nord de la Bretagne 89

8. Recommandations pour la poursuite des études du substratum 92
8.1. Bathymétrie très-haute-résolution 92
8.2. Sismique très-haute-résolution 92
8.3. Sondages géologiques 94

8.3.1. Sondages dans la macro-zone BNO 95
8.3.2. Sondages dans la Macro-zone RD-BNE 101

9. Conclusion 102

10. Références 103

11. Annexes 109

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des macro-zones Bretagne Nord-Ouest (BNO) et Roches Douvres – Bretagne Nord-Est (RD-BNE) au sein des façades Manche Est – Mer du Nord (MEMN) et Nord Atlantique Manche Occidentale (NAMO), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). 10

Figure 2 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone BNO, sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone BNO (cf. Figure 1). 12

Figure 3 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone RD-BNE, sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone RD-BNE (cf. Figure 1). Le trait noir pointillé correspond à la limite entre les eaux françaises et des Îles Anglo-Normandes. 14

Figure 4 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021a), au niveau de la macro-zone BNO, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). 16

Figure 5 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021a), au niveau de la macro-zone RD-BNE, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). La ligne noire épaisse correspond à la limite entre les eaux françaises et des Îles Anglo-Normandes et la ligne noire fine NO-SE traversant la macro-zone RD-BNE correspond à la limite entre les façades NAMO et MEMN. . 17

Figure 6 : 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). 19

Figure 7 : Cartes des paléovallées en Baie de Lannion établies par (a) Chantraine et al. (1999b) montrant l'épaisseur (isopaques) des dépôts de remplissage de ces paléovallées, et par (b) Augris et Simplet (2011) montrant la profondeur d'incision des paléovallées sous la forme d'un écorché du toit du substratum. 20

Figure 8 : Carte des grands domaines géologiques autour des macro-zones BNO et RD-BNE, d'après Chantraine et al., 2003. 21

Figure 9 : Carte géologique de la Manche au nord de la Bretagne simplifiée d'après Chantraine et al., (2003), indiquant la position des macro-zones BNO et RD-BNE. Le tracé des trois coupes interprétatives SWAT 8 à 10 détaillées en Figure 10 est figuré par un trait continu rouge. La portion méridionale de la coupe SWAT 9 de la Figure 12 apparaît en bleu. 22

Figure 10 : Coupes géologiques régionales trans-Manche (modifiée d'après Bois et al., 1991 et BGS-BRGM, 2000). Les cadres en rouge correspondent à la projection approximative des emprises des macro-zones BNO et RD-BNE. Localisation des coupes en Figure 9. 23

Figure 11 : Carte géologique centrée sur la macro-zone BNO modifiée d'après la carte géologique de la France de Chantraine et al. (2003). Légende de la carte identique à la Figure 9. Les symboles ponctuels correspondent aux échantillons sélectionnés dans la BSSmer (infoterre.fr) 25

Figure 12 : Coupe géologique interprétative du profil SWAT 9 (modifiée d'après BGS-BRGM, 2000). Le cadre rouge correspond à la projection approximative de l'emprise de la macro-zone BNO. Localisation de la coupe en Figure 9..... 26

Figure 13 : Cartes géologiques centrées sur la macro-zone RD-BNE modifiées et adaptées d'après la carte géologique de la France au millionième (Haut ; Chantraine et al., 2003) et d'après la carte géologique au 1/250 000 de Guernesey (Bas ; BGS-BRGM, 2000). Légende identique à la Figure 9, sauf PP et NP signifiant respectivement Paléoprotérozoïque et Néoprotérozoïque. Les symboles ponctuels correspondent aux échantillons sélectionnés dans la BSSmer (infoterre.fr). 28

Figure 14 : Ecorché géologique autour des macro-zones BNO et RD-BNE proposant une distribution des ensembles du socle armoricain sous couverture méso-cénozoïque (modifié d'après Lefort, 1975a, 1977). Les traits noirs épais continus et discontinus correspondent aux structures tectoniques (failles), qui sont déduites des discontinuités géophysiques..... 29

Figure 15 : Carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle montrant la signature des filons de dolérites (anomalies linéaires ONO-ESE à NO-SE apparaissant en nuances de rouge à orange) visibles au sud de la macro-zone RD-BNE (emprise noire), au nord de la Baie de Saint-Brieuc (modifiée d'après Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019). 30

Figure 16 : Carte synthétique des sous-domaines structuraux cadomiens au sein du Massif Armoricain, limités par les accidents majeurs (CSA : Cisaillement Sud-Armoricain ; CNA : Cisaillement Nord-Armoricain ; E : Faille de l'Elorn ; T-B : Faille de Trédrez-Beauport ; F-C : Faille de Fresnay-Coutances ; G-C : Faille de Granville-Cancale). Les âges associés aux sous-domaines correspondent aux ages moyens des intrusions (granitiques, gabbro-dioritiques, …) du cycle orogénique cadomien propres à chaque sous-domaine. Les points noirs du sous-domaine Trégor-Hague correspondent aux occurrences de reliques paléoprotérozoïques icartiennes. Modifiée d'après Ballèvre et al., 2001 ; Ballèvre et al., 2013..... 31

Figure 17 : Carte synthétique des domaines structuraux varisques du Massif Armoricain, séparés par les grands cisaillements carbonifères (Ballèvre et al., 2009). 32

Figure 18 : Carte de localisation des 6 coupes sismiques interprétées provenant des campagnes ASTROLABE (en vert), GEOMANCHE 71 (orange) et GEOBREST 2003 (en rouge), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). 34

Figure 19 : Carte de l'emprise des 9 lots de sondes bathymétriques du SHOM (voir Tableau 2) au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE (emprises en trait rouge pointillés), et indiquant les résolutions obtenues après interpolation et production des MNT (aperçu en Figure 20)..... 35

Figure 20 : Carte d'aperçu des MNT produits à partir des lots de sondes bathymétriques du SHOM (voir Tableau 2) au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE (emprises en trait rouge pointillés).Le dégradé de couleur est indicatif et diffère d'un MNT à l'autre..... 36

Figure 21 : Carte de localisation des zooms sur les données bathymétriques de la Figure 22 à la 38

Figure 22 : Zooms sur les morphologies de socle magmatique-métamorphique (A, B et C), et de socle sédimentaire plissé et faillé (D). Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour de la macro-zone RD-BNE. Localisation des zooms en Figure 21. 39

Figure 23 : Zooms sur les morphologies de séries sédimentaires montrant la stratification fruste plissée et faillée (A) et des figures de dissolution-karstification (dépressions décamétriques à hectométriques en B). Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour de la macro-zone RD-BNE. Localisation des zooms en Figure 21. 40

Figure 24 : Zoom sur les morphologies filoniennes (hors macro-zones) se traduisant ici par des linéaments subméridiens (A) coïncidant avec les anomalies magnétiques linéaires (B ; Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019). Dégradé de couleur relatif à l'altitude en A (voir Figure 20) et à l'anomalie magnétique réduite au pôle (voir Figure 15). Les cercles indiquent la position de l'épave du vraquier SS Helge (SHOM, 2022). Localisation du zoom en Figure 21..... 41

Figure 25 : Zoom sur les morphologies d'incisions sinueuses interprétées comme le tracé d'une paléovallée (fleuve Normand-Breton). Dégradé de couleur relatif à l'altitude en A (voir Figure 20). Le trait noir correspond à la limite de la macro-zone RD-BNE. Localisation du zoom en Figure 21. 42

Figure 26 : Zooms sur les morphologies des sédiments superficiels meubles de types dunes et bancs sableux (A) : alignement NO-SE de dunes méridiennes kilométriques ; (B) : alignement NNO-SSE à NO-SE de dunes NE-SO plurikilométriques ; (C) : banc sableux E-O à l'ouest d'un pointement de socle ; (D) : banc NO-SE et alignement NO-SE de dunes NE-SO. Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour des macro-zones BNO (C) et RD-BNE (D). Localisation des zooms en Figure 21..... 43

Figure 27 : Carte de localisation des 6 coupes sismiques interprétées provenant des campagnes ASTROLABE (en vert), GEOMANCHE 71 (orange) et GEOBREST 2003 (en rouge), et présentées dans les figures 28 à 29. Fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). 45

Figure 28 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 53. 46

Figure 29 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 54. 48

Figure 30 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 55. 50

Figure 31 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 59. 52

Figure 32 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe A76. 54

Figure 33 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe J12..... 56

Figure 34 : Carte géologique de la macro-zone BNO au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux dépôts superficiels holocènes. Les sédiments superficiels ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique. 58

Figure 35 : Carte géologique de la macro-zone BNO au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux formation du Néogène. 60

Figure 36 : Carte géologique de la macro-zone RD-BNE au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux dépôts superficiels holocènes. Les sédiments superficiels ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique. 62

Figure 37 : Carte géologique de la macro-zone RD-BNE au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux formations du Néogène. 64

Figure 38 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées dans la macro-zone BNO au sein de chaque étage et sous-étage de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque, ainsi que dans les unités de socle. 68

Figure 39 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées dans la macro-zone RD-BNE, au sein de chaque étage et sous-étage de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque, ainsi que dans les unités de socle. 72

Figure 40 : Evolution temporelle de la complétude du catalogue de sismicité en fonction de la magnitude. 74

Figure 41 : Sismicité naturelle 1091-2024 et structures extraites des compilations régionales (Chantraine et al., 2003), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). Les mécanismes au foyer sont issus de la compilation menée par Mazotti et al. (2021). 75

Figure 42 : Sismicité naturelle de la zone d'intérêt. Les épicentres sont représentés en fonction de la profondeur des séismes. Les séismes historiques sont identifiés par un cercle noir épais. Fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023)..... 76

Figure 43 : Sismicité anthropique associée à des tirs de carrières et des explosions et répertoriée entre 2021 et 2024 par le BCSF-RENASS. Le fond de carte représente la carte géologique au millionième (Chantraine et al., 2003). 77

Figure 44 : activité sismique du nord-ouest de la France, d'après Beucler et al. (2021)..... 78

Figure 45 : Observations macrosismiques et épicentre macrosismique du séisme du 30/07/1926 (Mw=5.2) extrait de la base de données SISFRANCE..... 80

Figure 46 : Observations macrosismiques et épicentre macrosismique du séisme du 23/04/1773 (Mw=5.2) extrait de la base de données SISFRANCE..... 81

Figure 47 : Zonage sismotectonique extrait de Baize et al. (2013). Les limites des zones sont hiérarchisées (1r ordre à 4ème ordre) et les failles potentiellement actives, en vert, aussi (d'avérée à très peu probablement active). 82

Figure 48 : Sismicité au voisinage des zones BNE et BNO, et structures répertoriées dans la carte géologique au million. Les structures en trait rouge épais représentent les failles potentiellement actives de la BDFA (Jomard et al., 2017). 83

Figure 49 : D'après Mazzotti et al. (2020). (a) Mécanismes au foyer, (b) faulting style moyenné par grille, (c) et (d) orientation moyenne des axes quasi-horizontaux P et T..... 84

Figure 50 : Sismicité au voisinage des zones BNE et BNO représentées en fonction de la profondeur des événements. Les séismes associés à un contour noir épais sont issus du catalogue de sismicité historique. Structures répertoriées dans la carte géologique au million. Les structures en trait rouge épais représentent les failles potentiellement actives de la BDFA (Jomard et al., 2017). 85

Figure 51 : Zonage de la sismicité métropolitaine en vigueur. 87

Figure 52 : Carte de distribution de dépressions d'origine karstique probable, détectée à partir des données de bathymétrie multifaisceaux disponibles (emprise blanche). Les macro-zones BNO et RD-BNE sont représentées par des emprise ne pointillés noirs. Sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023)..... 90

Figure 53 : 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. 93

Figure 54 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°53 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (53-01 à 53-06) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques. 95

Figure 55 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°54 et montrant une proposition d'implantation de 7 sondages carottés (54-01 à 54-07) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques. 97

Figure 56 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°55 et montrant une proposition d'implantation de 10 sondages carottés (10-01 à 55-10) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques. 99

Figure 57 : Carte géologique de la macro-zone BNO montrant la répartition des unités et montrant une proposition d'implantation de 23 sondages carottés réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques. 100

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des campagnes océanographiques dont les données ont fait l'objet d'interprétations sismiques (* : nom actuel de l'institution) 33

Tableau 2 : Liste des campagnes océanographiques dont les données ont fait l'objet d'interprétations morpho-bathymétriques (* : nom actuel de l'institution) 35

Tableau 3 : Liste des séismes de magnitude Mw≥5.0 dans un rayon de 200 km autour des macro-zones BNE et BNO. 79

Liste des annexes

Annexe 1 : Charte chronostratigraphique (Cohen et al., 2013 – mise à jour 2024). 111

1. Introduction

Les macro-zones Bretagne Nord-Ouest (BNO) et Bretagne Nord-Est (RD-BNE) sont situés en Manche Occidentale, au nord de la région Bretagne et à l'ouest des Îles Anglo-Normandes (Figure 1), sur le domaine de plateau continental (0 à environ -200 m).

La macro-zone BNO est localisée au sein de la façade Nord Atlantique-Manche Occidentale (NAMO). Elle s'étend au-delà des 8 mn (milles nautiques) des côtes nord du Finistère, sur environ 75 km sur un axe ENE-OSO et environ 25 km sur un axe NNO-SSE. Sa superficie avoisine les 920 km² et le fond marin se situe entre 65 et 95 m de profondeur.
La macro-zone RD-BNE est localisée à cheval sur les façades Nord Atlantique-Manche Occidentale (NAMO) et Manche Est – Mer du Nord (MEMN), et le long de la délimitation maritime entre les eaux françaises et celles des Îles Anglo-Normandes. Elle s'étend au-delà des 12 mn (milles nautiques) du littoral des Côtes d'Armor, sur environ 65 km sur un axe NO-SE et environ 40 km sur un axe NE-SO. Sa superficie avoisine les 1230 km² et le fond marin se situe entre 30 et 70 m de profondeur.

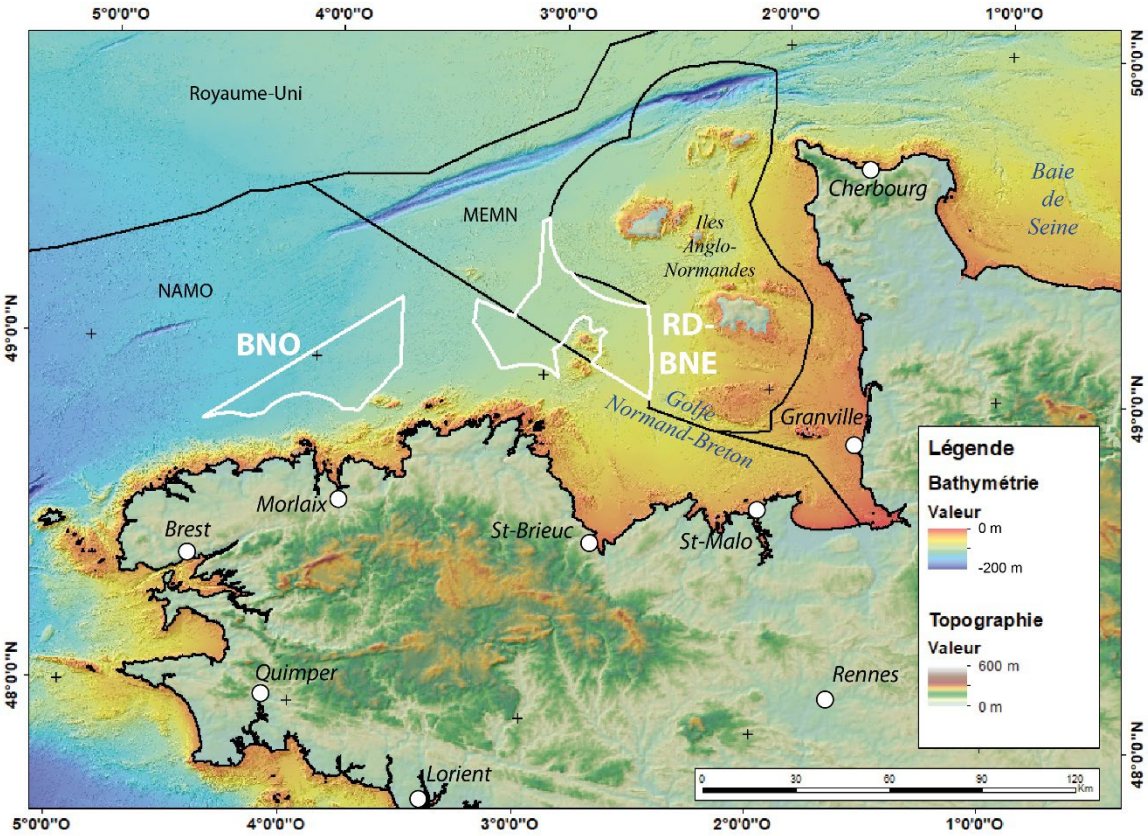


Figure 1 : Localisation des macro-zones Bretagne Nord-Ouest (BNO) et Roches Douvres – Bretagne Nord-Est (RD-BNE) au sein des façades Manche Est – Mer du Nord (MEMN) et Nord Atlantique Manche Occidentale (NAMO), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

Dans les sections suivantes, les détails sont apportés au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE sur (i) la bathymétrie et la morphologie du fond marin, (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 générale des fonds marins des macro-zones BNO et RD-BNE

La description morphobathymétrique globale des macro-zones BNO et RD-BNE 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 principalement 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 données bathymétriques de meilleures résolutions et leur interprétation sont abordées dans la section de mise à jour de la cartographie géologique.

2.1. MACRO-ZONE BNO

Les fonds marins de la macro-zone BNO (Figure 2) sont relativement peu profonds, entre -65 m et -95 m et correspondent au premier ordre à une vaste plaine immergée de faible pente (0.1 à 0.2°) orientée vers l'ouest. Les zones les moins profondes se situent le long de la limite SE, à proximité d'un haut-fond adjacent du Plateau des Triagoz. Les zones les plus profondes sont retrouvées à l'ouest et le long de la bordure NO. La morphologie globale est celle d'un vaste plateau de faible rugosité à l'échelle considérée.

Un petit relief, situé le long de la bordure SE de la macro-zone BNO, s'élève d'environ 5 m au-dessus de la plaine environnante. Il s'étire en E-O sur environ 2 km et est au contact des hauts-fonds du Plateau des Triagoz à l'est.

Des linéaments se dessinent sur la bathymétrie avec des direction OSO-ENE, N-S et NO-SE. Ces linéaments sont néanmoins interprétés ici comme des artefacts liés aux données de références bathymétriques utilisées. D'autres linéaments existent sur la macro-zone BNO sans qu'il soit possible de leur donner une interprétation morphologique concrète à cette échelle.

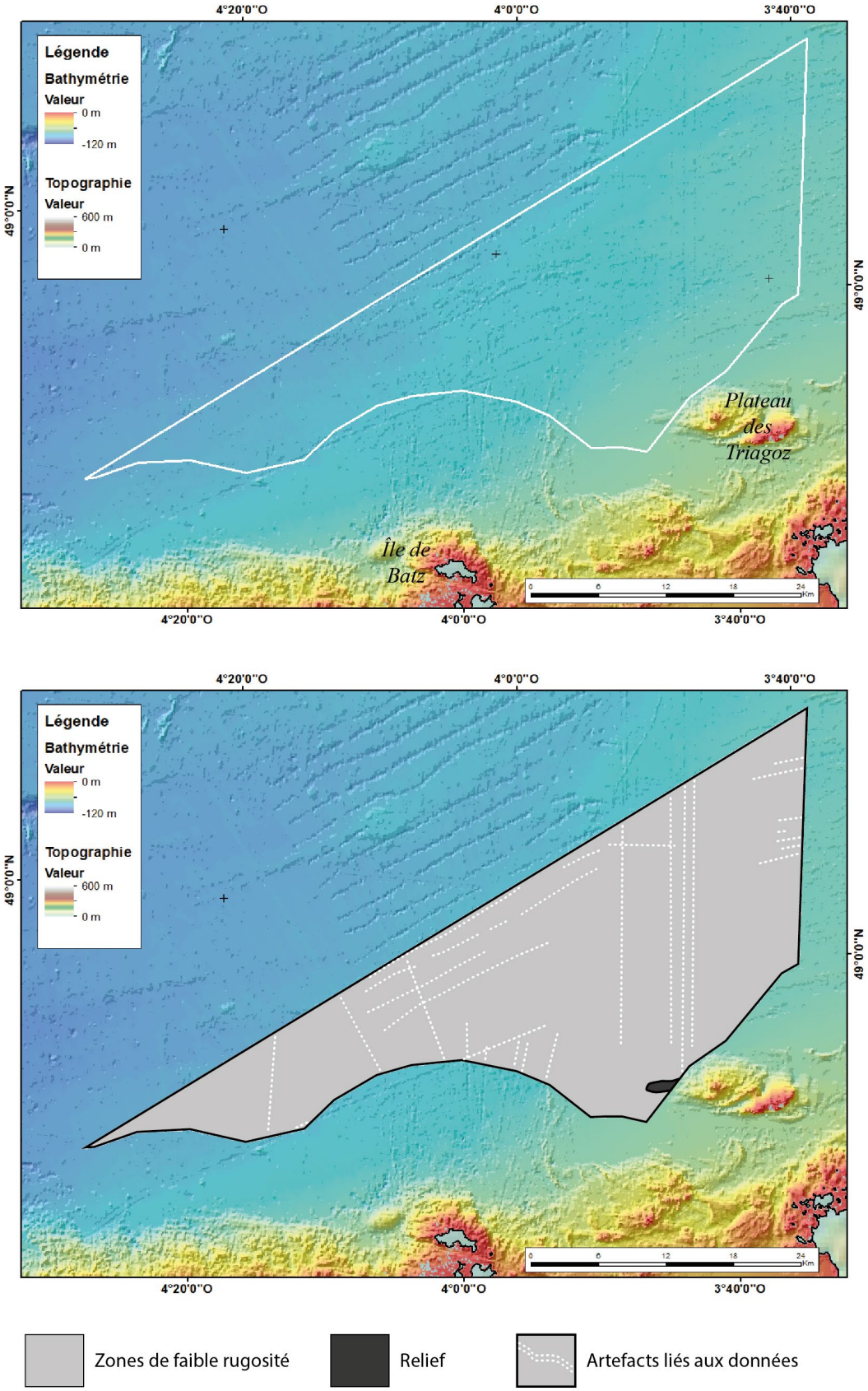


Figure 2 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone BNO, sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone BNO (cf. Figure 1)

2.2. MACRO-ZONE RD-BNE

Les fonds marins de la macro-zone RD-BNE (Figure 3) sont relativement peu profonds, entre -35 m et -70 m et correspondent au premier ordre à une vaste plaine immergée de faible pente (0.1 à 0.2°) orientée vers l'ouest. Les zones les moins profondes se situent le long de la limite SE. Les zones les plus profondes sont retrouvées à l'ouest et au nord. La morphologie globale est celle d'un vaste plateau de faible rugosité à l'échelle considérée.

Des reliefs de 5 à 10m d'élévation s'individualisent en limite de macro-zone, autour des hauts-fonds des Roches Douvres et du Plateau de Barnouic. Ils présentent une rugosité généralement supérieure au reste de la macro-zone.

Des reliefs positifs linéaires subparallèles de l'ordre du kilomètre et d'orientation N-S à NE-SO forment des alignements NO-SE. Leur élévation par rapport à la plaine environnante dépasse rarement les 5m. Ils sont principalement retrouvés à l'ouest des Roches Douvres et sont interprétés comme des ensembles dunaires (sédiment meubles).

La macro-zone RD-BNE présente également deux zones de rugosité plus élevée sur le domaine de plaine immergée. La rugosité correspond à des dépressions irrégulières de moins de 5m de profondeur. La plus importante de ces zones est localisée au nord des Roches Douvres.

Enfin, des escarpements subparallèles orientés NO-SE décrivent une dépression d'une vingtaine de kilomètres de long sur 2 à 4 km de large, qui traverse la partie orientale de la macro-zone RD-BNE. Elle semble s'atténuer vers le NO, à l'est du plateau des Roches Douvres, mais se continue clairement vers le SE hors de la macro-zone, dans les eaux des Îles Anglo-Normandes. Ces caractéristiques et son orientation moyenne parallèle à la ligne de plus grande pente sont compatibles avec une morphologie de paléovallée. Ces escarpements coïncident à ceux identifiés lors d'études précédentes (Graindor et Roblot, 1976 ; Quesney, 1983) ou dans l'aperçu morphologique de Paquet (2024), et interprétés comme paléovallées.

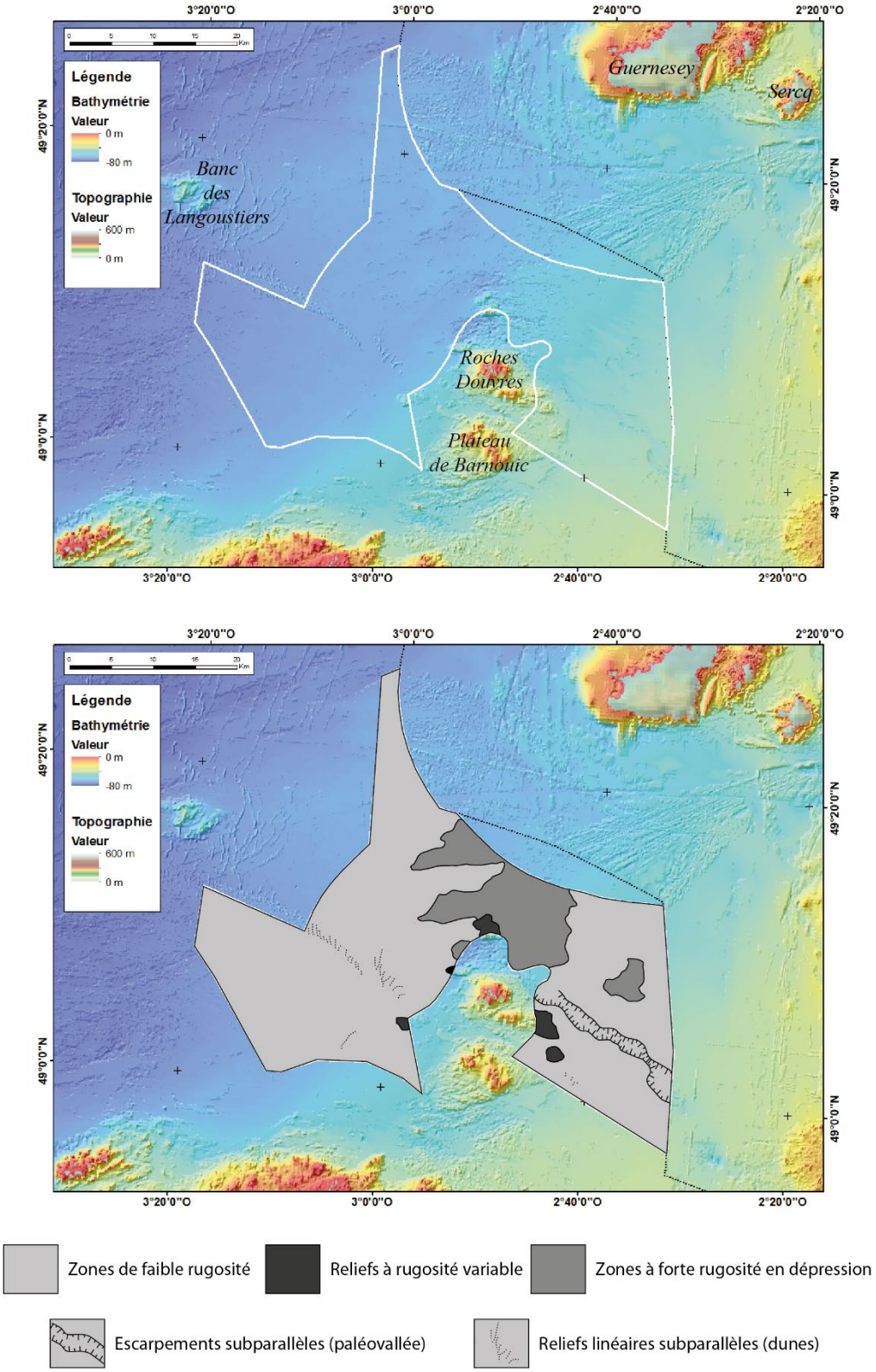


Figure 3 : Carte bathymétrique (haut) au niveau de la macro-zone RD-BNE, sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023), et carte d'interprétation morphologique simplifiée (bas). Localisation de la macro-zone RD-BNE (cf. Figure 1). Le trait noir pointillé correspond à la limite entre les eaux françaises et des Îles Anglo-Normandes.

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 ou 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 les macro-zones BNO et RD-BNE, ainsi que sur l'ensemble du territoire français, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) est le référent national 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 » (SHOM, 2021a), accessible via le portail de données SHOM (https://data.shom.fr/).

3.1.1. Nature des fonds de la macro-zone BNO

La cartographie de la nature des fonds de la macro-zone BNO (Figure 4) rend compte de la 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 BNO montre ainsi des fonds marins dominés par des sédiments grossiers (cailloutis, graviers). Quelques zones restreintes présentent des sables (sables et sables grossiers à graviers). Il est à noter que les sables sont principalement cantonnés aux zones proches du littoral. La zone de sables (en jaune sur la carte de la figure 4) est localisée à proximité du relief localisé à l'ouest du Plateau des Triagoz et identifié dans l'analyse morphologique à grande échelle. Nous proposons d'interpréter ce relief en banc sableux.

Aucune zone de roches affleurantes n'est identifiée sur la zone à l'échelle de la Carte sédimentologique mondiale (SHOM, 2021a).

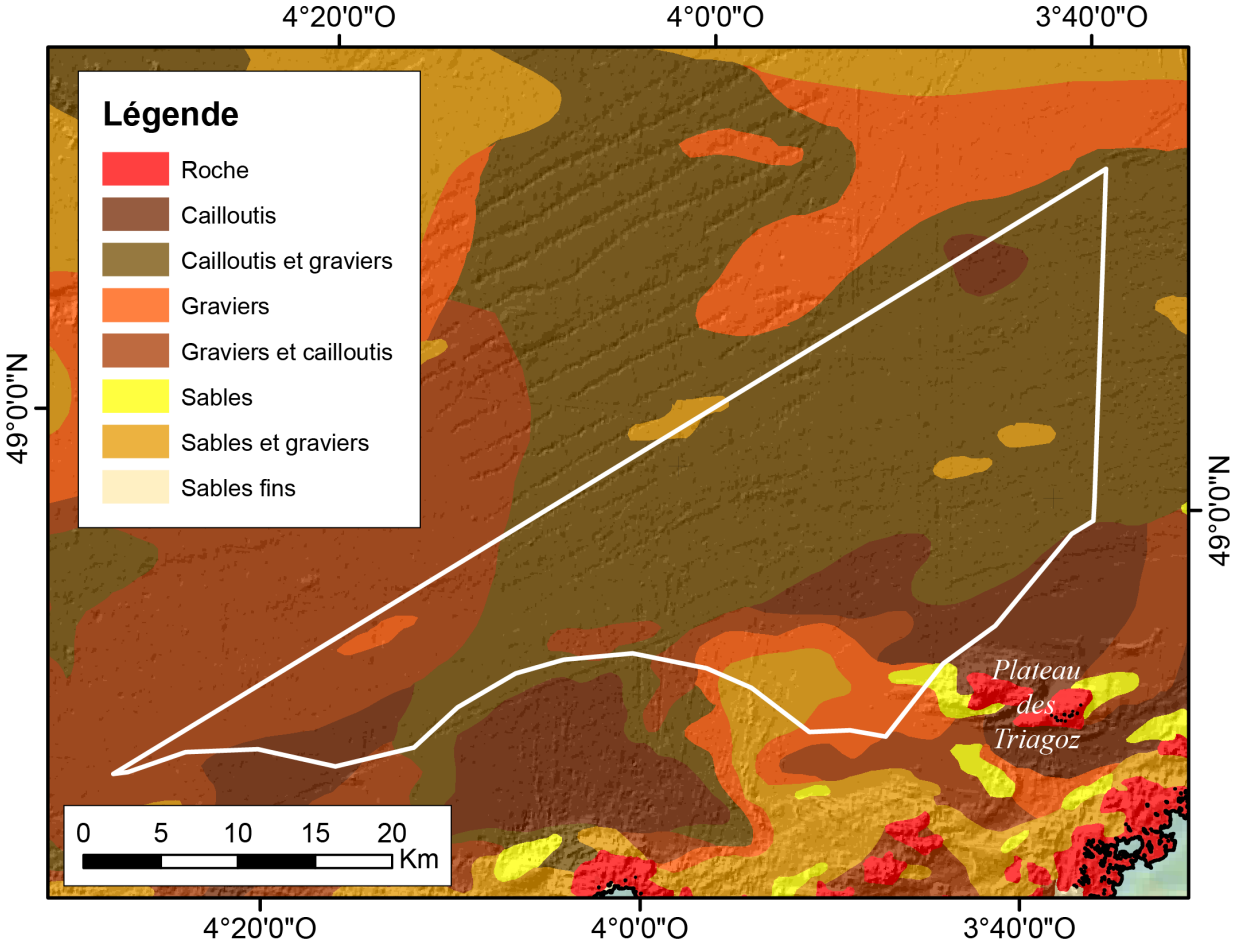


Figure 4 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021a), au niveau de la macro-zone BNO, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

3.1.2. Nature des fonds de la macro-zone RD-BNE

La cartographie de la nature des fonds de la macro-zone RD-BNE (Figure 5) rend compte de la 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 RD-BNE montre ainsi des fonds dominés par des sédiments grossiers (cailloutis, graviers). Quelques zones restreintes présentent des sables (sables et sables grossiers à graviers). Il est à noter que des sables sont identifiés à l'ouest des Roches Douvres sous la forme de langues subparallèles s'étirant en N-S et NE-SO sur des distances d'ordre kilométrique. Ces dépôts sableux coïncident avec les morphologies décrites en section 2.2. Nous confirmons ainsi l'interprétation de ces reliefs constitués de sables en dunes.

La carte de nature des fonds indique également la présence de fond marin rocheux, en bordure de macro-zone, autour des Roches Douvres et du Plateau de Barnouic. Ces pointements rocheux correspondent à certains reliefs identifiés en section 2.2.

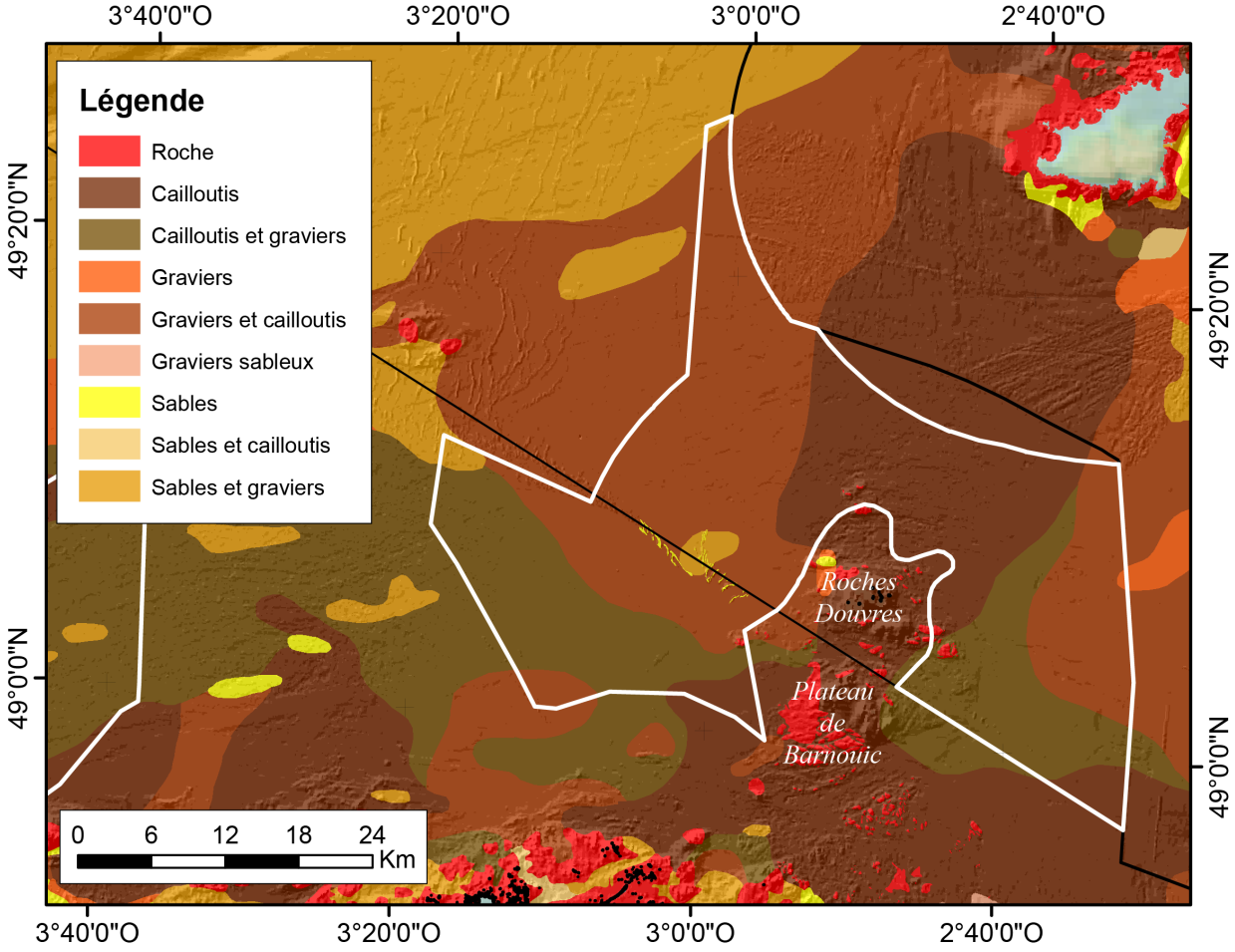


Figure 5 : Cartographie de la nature des fonds issue de la Carte Sédimentologique Mondiale (©SHOM, 2021a), au niveau de la macro-zone RD-BNE, sur fonds bathymétrique (ombrage seul ; ©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). La ligne noire épaisse correspond à la limite entre les eaux françaises et des Îles Anglo-Normandes et la ligne noire fine NO-SE traversant la macro-zone RD-BNE correspond à la limite entre les façades NAMO et MEMN.

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 les macro-zones BNO et RD-BNE, deux grands ensembles sont identifiés ou attendus :

- Les dunes et bancs sableux
- Le remplissage des paléovallées

3.2.1. Dunes et bancs sableux

Les dunes et bancs sableux sont identifiés via la morphologie et la nature des fonds. A ce stade des interprétations sur la base de données basse-résolution, ces dunes et bancs sableux semblent ne représenter qu'une faible superficie au regard des emprises des deux macro-zones. Les épaisseurs caractéristiques de ces corps sableux estimées grâce aux données bathymétriques sont d'ordre métrique à pluri-métrique, sans toutefois dépasser la quinzaine de mètres.

3.2.2. Paléovallées

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 6. Les liens entre ensembles sédimentaires meubles et éléments géomorphologiques apparaissent clairement dans le cas des paléovallées.

Au niveau de la macro-zone RD-BNE et BNO, on observe que le plateau continental, actuellement immergé, se trouvait totalement émergé lors du Dernier Maximum Glaciaire (Figure 6). La Manche est « asséchée », et le littoral est repoussé au large du Finistère. Les différents fleuves que nous connaissons actuellement ont étiré leur cours sur ces terres progressivement émergées lors de la baisse du niveau marin. 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 du niveau marin.

-

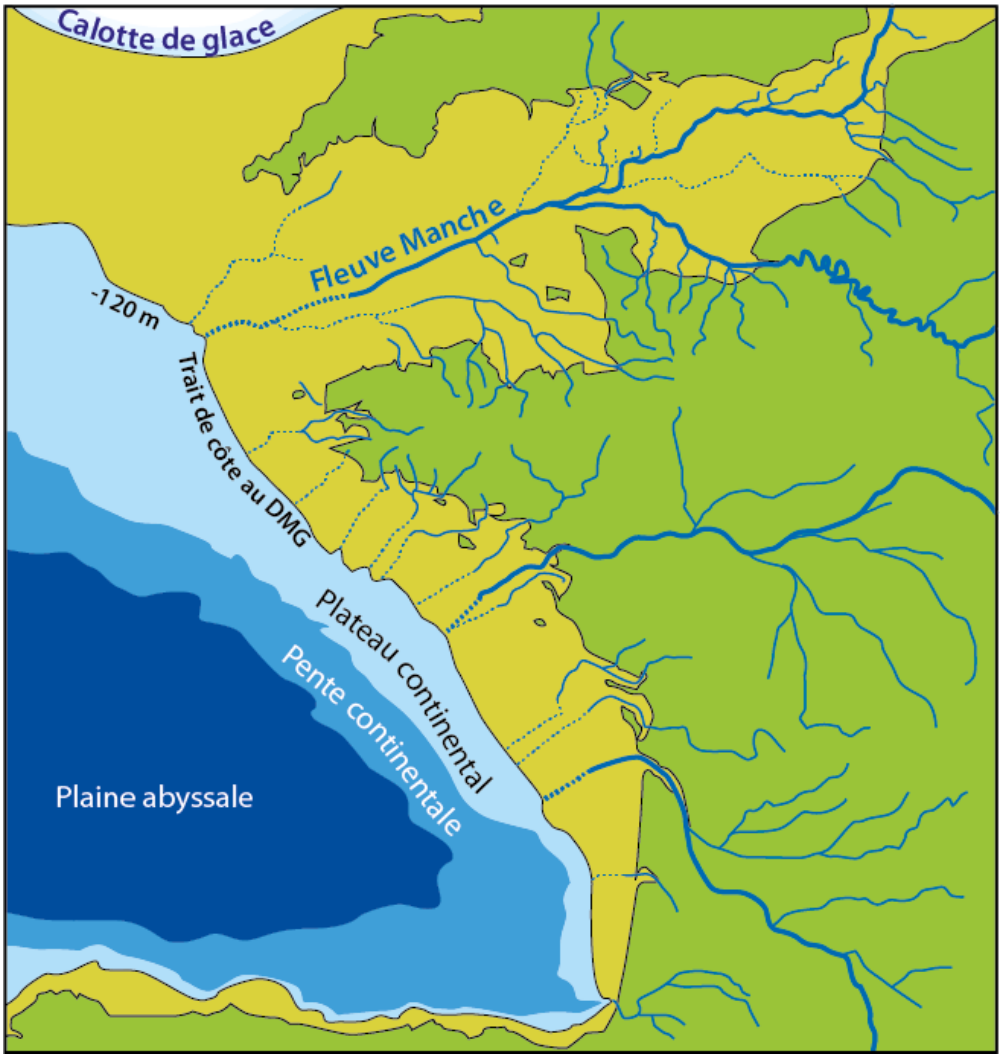


Figure 6 : Reconstitution de la paléogéographie des façades de l'Atlantique et de la Manche au cours du dernier maximum glaciaire (DMG), il y a environ 20 000 ans. Une large portion du plateau continental actuel est alors émergée (vert clair). Les fleuves s'y prolongent jusqu'au littoral et se rejoignent 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).

L'identification d'une paléovallée SE-NO en morphologie sur la partie SE de la macro-zone RD-BNE implique que des dépôts d'origine fluviatile, tidale ou marine pourraient y être préservés. A ce stade, et compte-tenu de la résolution des données disponibles, il n'est pas possible de confirmer ou infirmer la présence de tels dépôts au sein de la paléovallée, ni la présence d'autres paléovallées comblées n'ayant pas d'expression morphologique évidente.

Les travaux antérieurs sur le tracé des paléovallées en nord Bretagne sont relativement limités et essentiellement restreints aux zones proches littorales. On notera l'identification :

- (i) d'un thalweg N120° par Graindor et Roblot (1976) au nord de Cancale, en exutoire de la Baie du Mont-Saint-Michel, également décrit par Quesney (1983).
- (ii) d'une autre paléovallée correspondant à la Rance (Quesney, 1983) et,
- (iii) d'un réseau d'incisions en Baie de Lannion mis en évidence une première fois par C. Larsonneur lors des travaux d'établissement de la carte géologique au 1/50 000 (Feuille Lannion ; Chantraine et al., 1999a ; Notice : Chantraine et al., 1999b) et les travaux

récents en Baie de Lannion (Augris et Simplet, 2011). Dans ce réseau spécifique de la Baie de Lannion, les paléovallées présentent des creusements et des remplissages propres atteignant la vingtaine de mètres (Figure 7).

-

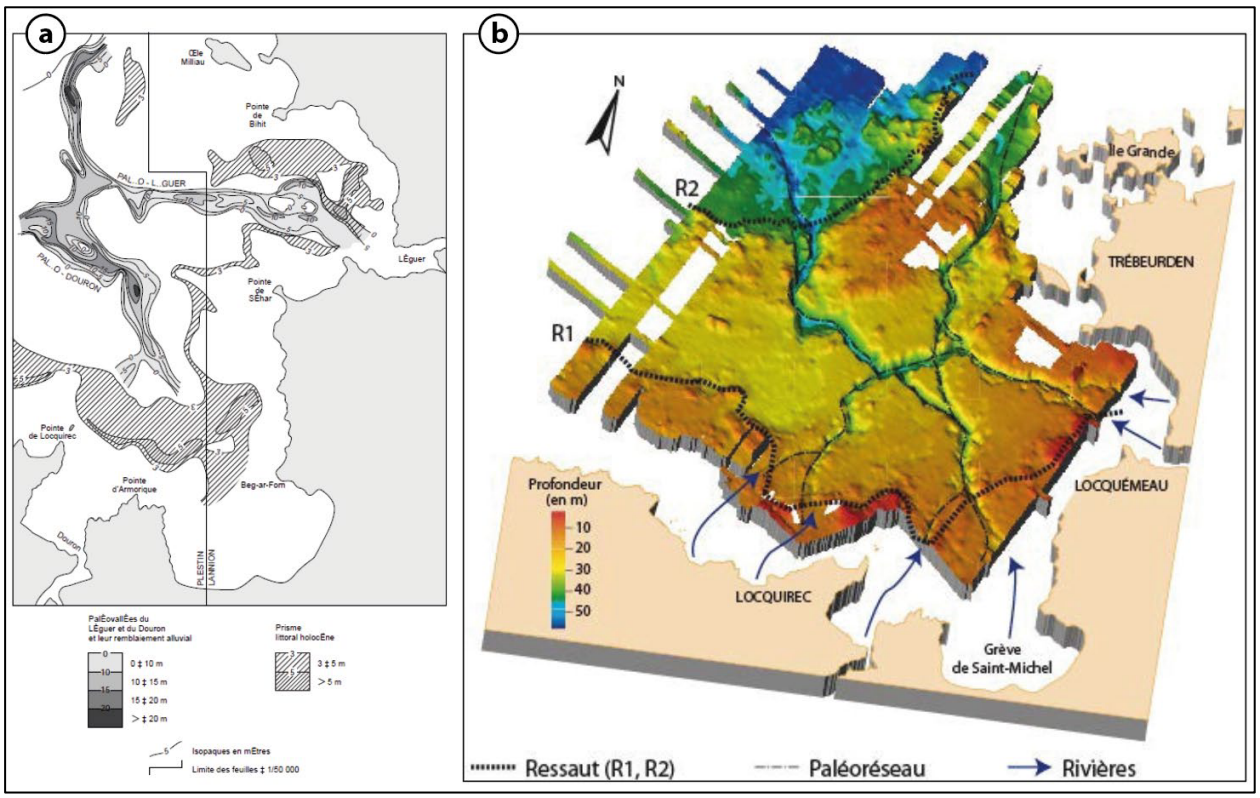


Figure 7 : Cartes des paléovallées en Baie de Lannion établies par (a) Chantraine et al. (1999b) montrant l'épaisseur (isopaques) des dépôts de remplissage de ces paléovallées, et par (b) Augris et Simplet (2011) montrant la profondeur d'incision des paléovallées sous la forme d'un écorché du toit du substratum.

L'identification de paléovallées suggèrent une présence systématique de ces ensembles morphologiques et sédimentaires au droit de tous les fleuves côtiers du nord de la Bretagne. Cependant, et d'une manière générale, les paléovallées semblent n'avoir incisé, ni déposé de manière significative au-delà des 60 m de bathymétrie sur le plateau continental péri-armoricain (Bouysse et Horn, 1968 ; Menier, 2004 ; Paquet et al., 2023). Cette observation implique que la présence de paléovallées dans la macro-zone BNO est moins probable du fait d'une profondeur minimale de 65 m. A contrario, la présence de paléovallées (incision et remplissage) est fortement probable sur la macro-zone RD-BNE, comme déjà suggéré dans l'analyse morphologique de grande échelle (section 2.2 ; Figure 3). Ce point justifie une attention particulière quant à l'interprétation des données bathymétriques de haute résolution (1-5 m) dans le cadre de la révision cartographique de la macro-zone RD-BNE (voir chapitre 5).

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. 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 8).

4.1. ENSEMBLES GEOLOGIQUES ET STRATIGRAPHIE

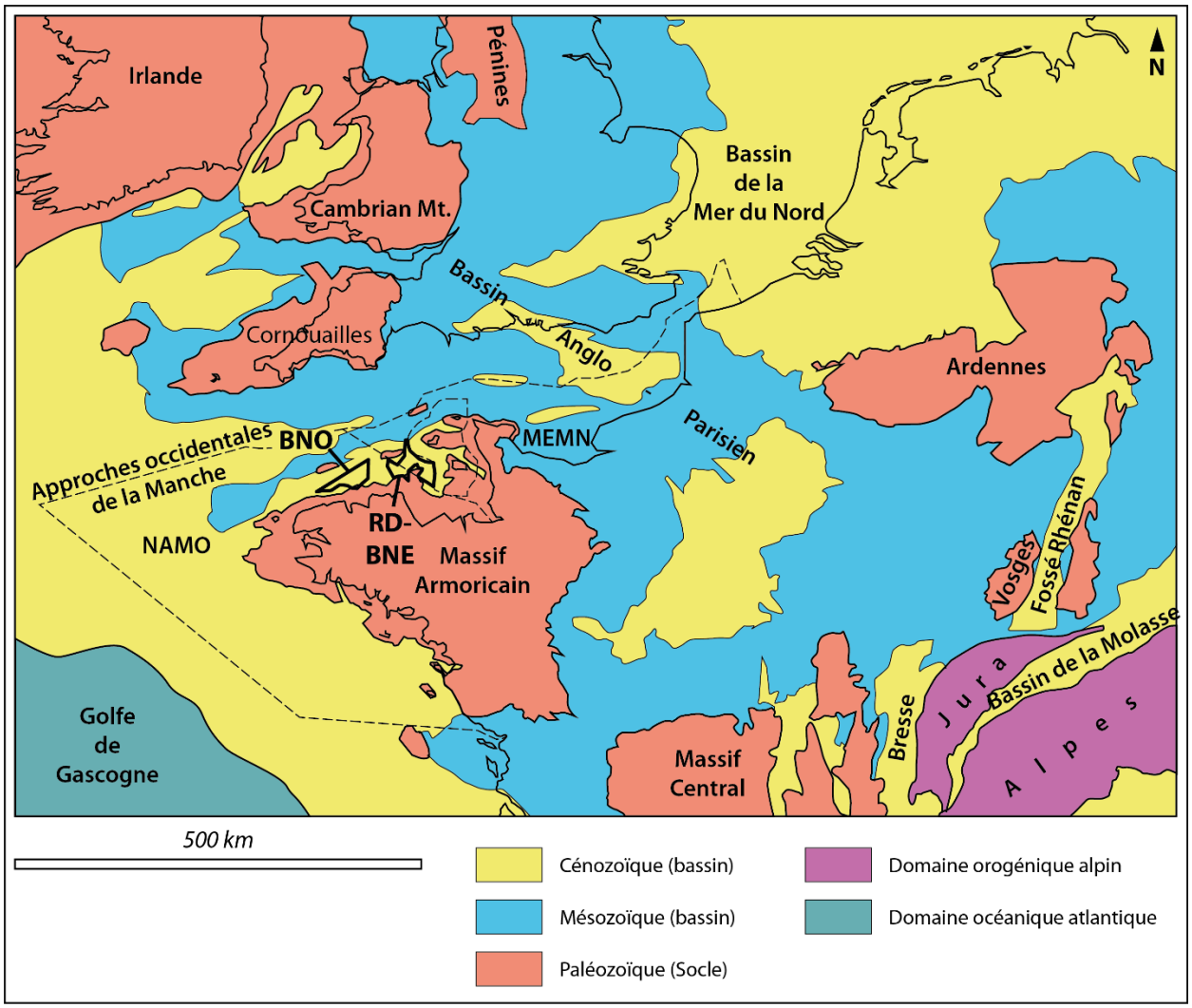


Figure 8 : Carte des grands domaines géologiques autour des macro-zones BNO et RD-BNE, d'après Chantraine et al., 2003.

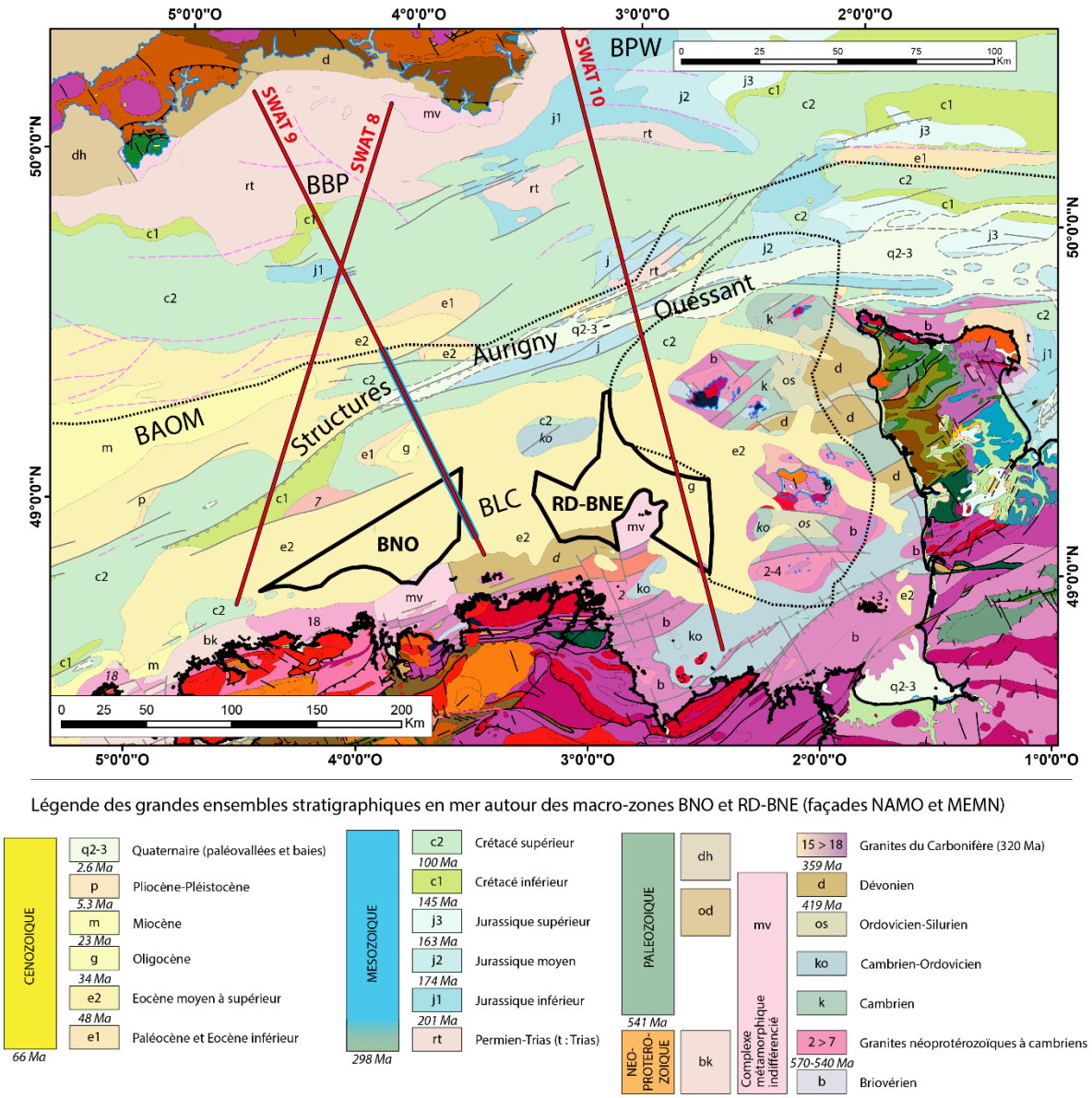


Figure 9 : Carte géologique de la Manche au nord de la Bretagne simplifiée d'après Chantraine et al., (2003), indiquant la position des macro-zones BNO et RD-BNE. Le tracé des trois coupes interprétatives SWAT 8 à 10 détaillées en Figure 10 est figuré par un trait continu rouge. La portion méridionale de la coupe SWAT 9 de la Figure 12 apparaît en bleu.

Les macro-zones BNO et RD-BNE sont principalement localisées au sein du Bassin Léon-Cotentin (BLC, voir Figure 9). Ce Bassin correspond à une zone de préservation des dépôts du Crétacé supérieur à l'Oligocène (Figure 10). Elle est limitée au NNO par les structures Aurigny-Ouessant, qui font remonter les dépôts du Crétacé supérieur (c2) et antérieurs (b, 7, ko à c1) au niveau du fond marin, déconnectant ainsi les dépôts cénozoïques du BLC de ceux du Bassin des Approches Occidentales de la Manche (BAOM). Vers le sud, les séries du BLC montrent un biseau progressif sur les formations de socle du Massif Armoricain (roches sédimentaires, métamorphiques, et magmatiques d'âges paléoprotérozoïques à paléozoïques - Figure 9 et Figure 10). Ainsi, d'après les informations cartographiques tirées des cartes géologiques existantes (Lefort, 1970a ; Lefort, 1970b ; Lefort, 1970c ; Auvray et Lefort, 1971 ; Andreieff et

Lefort, 1972 ; Boillot et al., 1972 ; Giresse et al., 1972 ; Lefort et Deunff, 1974 ; Andreieff et al., 1975 ; Boillot et Musselec, 1975 ; Bouysse et al., 1975 ; Lefort, 1975a ; Lefort, 1975b ; Smith et Curry, 1975 ; Lefort, 1977 ; BGS-BRGM, 2000) et synthétisées dans la carte de la France à l'échelle du millionième (Chantraine *et al.*, 2003), et d'après les coupes géologiques trans-Manche (Bois et al., 1991 ; BGS-BRGM, 2000), il apparaît que le substratum des macro-zones BNO est constitué de roches de socle et de roches sédimentaires du Crétacé supérieur (c2), de l'Eocène supérieur (e2) et de l'Oligocène (g).

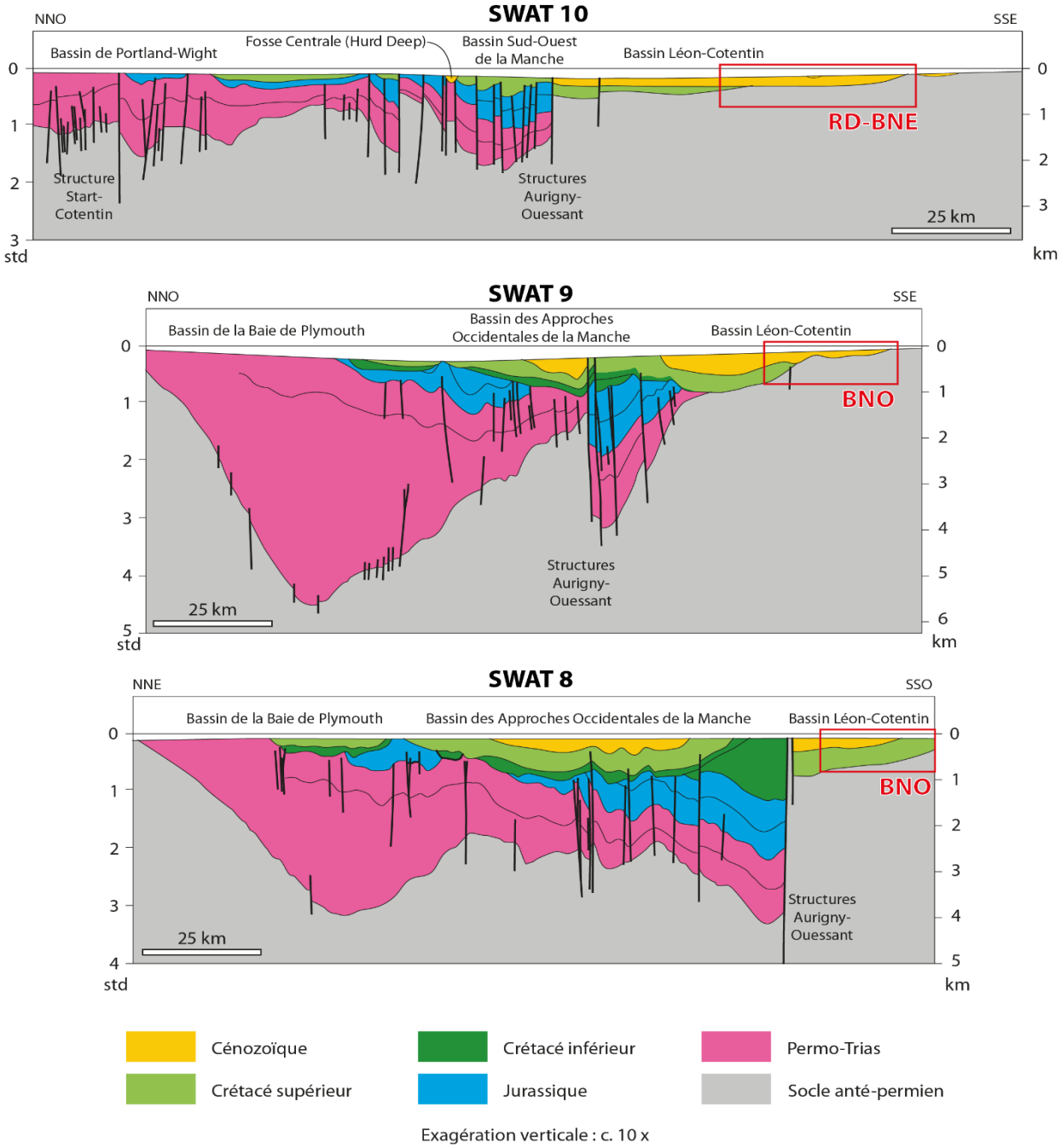


Figure 10 : Coupes géologiques régionales trans-Manche (modifiée d'après Bois et al., 1991 et BGS-BRGM, 2000). Les cadres en rouge correspondent à la projection approximative des emprises des macro-zones BNO et RD-BNE. Localisation des coupes en Figure 9.

Dans les sections suivantes, nous proposons de regarder les informations disponibles pour chaque macro-zone, afin de décrire le plus finement possible le niveau de connaissance de leur substratum.

4.1.1. Substratum de la macro-zone BNO

Les travaux de cartographie géologique préexistants sur et autour de la macro-zone BNO (prélèvements, sismique…) ont été synthétisés dans la carte de Chantraine et al. (2003), qui fait ainsi référence. La Figure 11 montre l'état des connaissances cartographiques autour de la macro-zones BNO ainsi qu'une sélection des prélèvements géologiques issus de la BSSmer[1] et fournissant des descriptions lithologiques succinctes et des attributions stratigraphiques initiales. La comparaison entre la carte et les données de prélèvement montre une cohérence d'ensemble et quelques imprécisions pouvant être notamment interprétées comme des erreurs de localisation des données en l'absence de positionnement par satellite. D'autres incohérences peuvent être attribuées à une simplification des tracés des contours des unités lithostratigraphiques ou des structures tectoniques à l'échelle de restitution (millionième). Enfin, certains prélèvements erratiques dont un calcaire crétacé, au centre de la BNO sur l'emprise de l'Eocène supérieur (e2) posent question. Ils ont pu être considérés comme stratigraphiquement erronées ou non-représentatifs et n'ont pas impliqué d'adaptation cartographique. Ils sont considérés dans cette étude et traités dans le chapitre de mise à jour cartographique.

La macro-zone BNO s'étend principalement sur des terrains de **l'Eocène supérieur (e2)** identifiés en majeure partie comme des **calcaires du Lutétien supérieur**. Lefort (1970a) précise qu'il s'agit de « calcaires crayeux, des calcaires coquilliers, avec de rares grains de quartz, plus rarement des grès calcaires peu coquilliers, à quartz usés, enfin des calcaires dolomitiques compacts et bien cristallisés ». Des travaux récents de déterminations et de réévaluations biostratigraphiques réalisés par C. Bourdillon dans le cadre de l'établissement de la carte géologique au 1/50 000 de la Feuille Perros-Guirec (Guennoc et al., 2015) indiquent une plus grande plage stratigraphique aux dépôts tertiaires. L'âge de ces derniers pourrait s'étaler du **Lutétien inférieur au Bartonien**. Il est à noter qu'au sud de l'extrémité ouest de la macro-zone BNO, les dépôts éocènes disparaissent localement et font apparaître les dépôts sous-jacents de **craie du Crétacé supérieur (c2)**. Ceci implique la présence sous-jacente du Crétacé supérieur crayeux sous les carbonates éocènes à l'ouest de la macro-zone BNO, comme également mis en évidence sur la coupe géologique interprétative SWAT 8 (Figure 10). Cette configuration semble évoluer sensiblement vers l'est comme l'indiquent les coupes géologiques SWAT 9 et SWAT 10 (Figure 10), qui montrent que le biseau des dépôts du Crétacé supérieur se décale progressivement vers le nord-est sous les dépôts cénozoïques. Au sud de la macro-zone BNO, les dépôts éocènes se biseautent également et laissent apparaître les unités magmatiques, métamorphiques, et sédimentaires sous-jacentes du socle du Massif Armoricain (Protérozoïque à Paléozoïque-Dévonien (18, mv, d)). La cartographie géologique et les échantillons de la BSSmer n'indiquent pas la présence de Crétacé supérieur intercalé entre la série éocène et le socle armoricain. Des amoncellements de craies du Crétacé supérieur dans les baies du nord Bretagne avaient été interprétés comme des lambeaux préservés de la transgression du Crétacé (Bourcart, 1945 ; Guilcher et al., 1951). Néanmoins, l'analyse des échantillons et des affleurements eux-mêmes incite à conclure qu'il s'agit de délestages volontaires ou accidentels de navires (Deunff, 1985). Ainsi, **les roches métamorphiques gneissiques néoprotérozoïques (mv)** sont présentent à l'affleurement sur le fond marin ou sous les dépôts

[1] BSS mer : Base du Sous-Sol des sondages marins consultable sur le portail InfoTerre

superficiels dans l'angle SSE de la macro-zone BNO. Enfin, il est à noter que la présence de dépôts **calcaires du Danien (Paléocène – e1)** intercalés entre la craie du Crétacé et les calcaires du Lutétien supérieur est proposée sur la coupe géologique interprétative de la moitié méridionale de la ligne SWAT 9 associée à la carte géologique au 1/250 000 de Guernesey éditée par le BGS-BRGM (2000) et passant sur l'extrémité orientale de la macro-zone BNO (Figure 12).

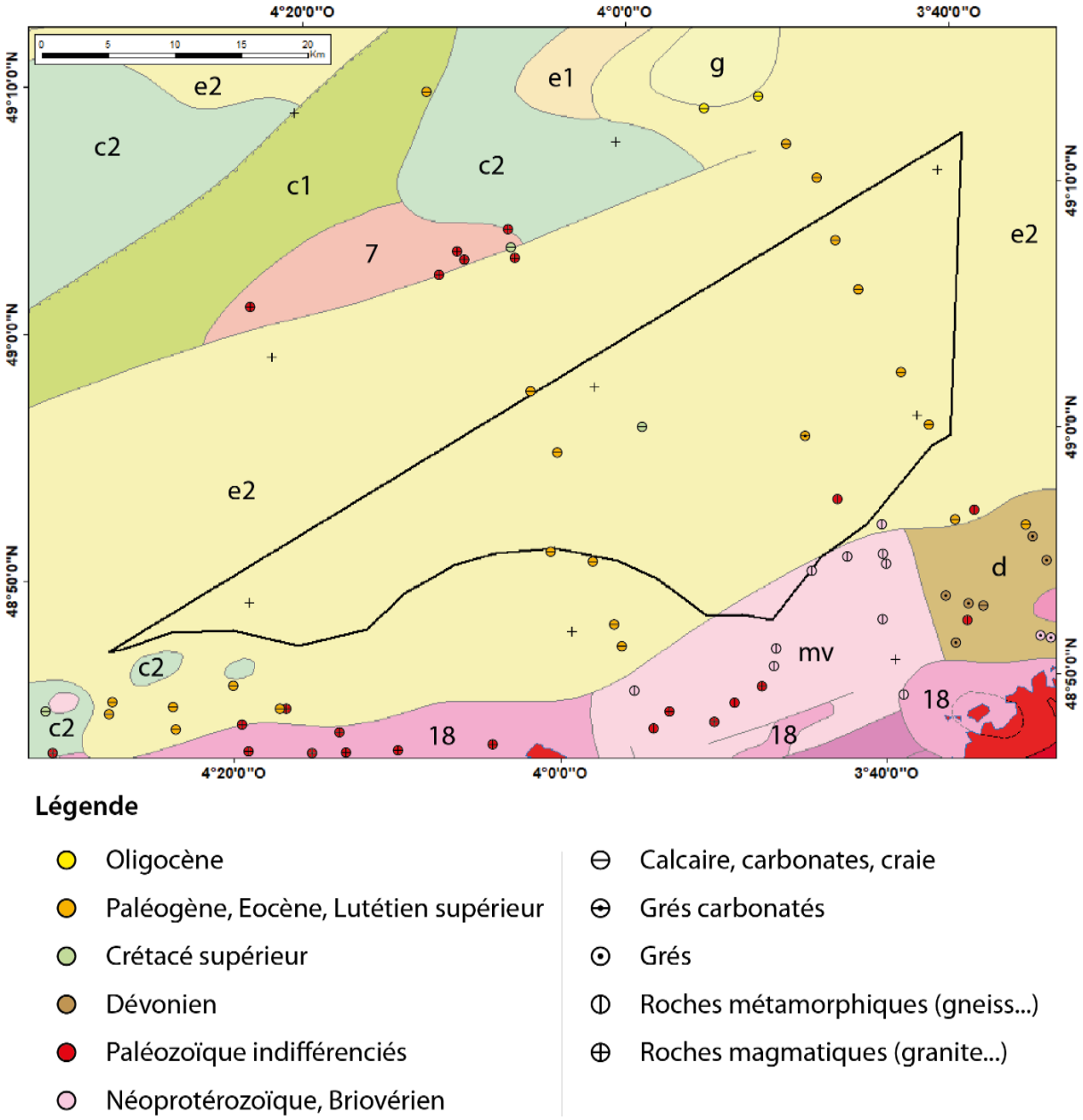


Figure 11 : Carte géologique centrée sur la macro-zone BNO modifiée d'après la carte géologique de la France de Chantraine et al. (2003). Légende de la carte identique à la Figure 9. Les symboles ponctuels correspondent aux échantillons sélectionnés dans la BSSmer (infoterre.fr)

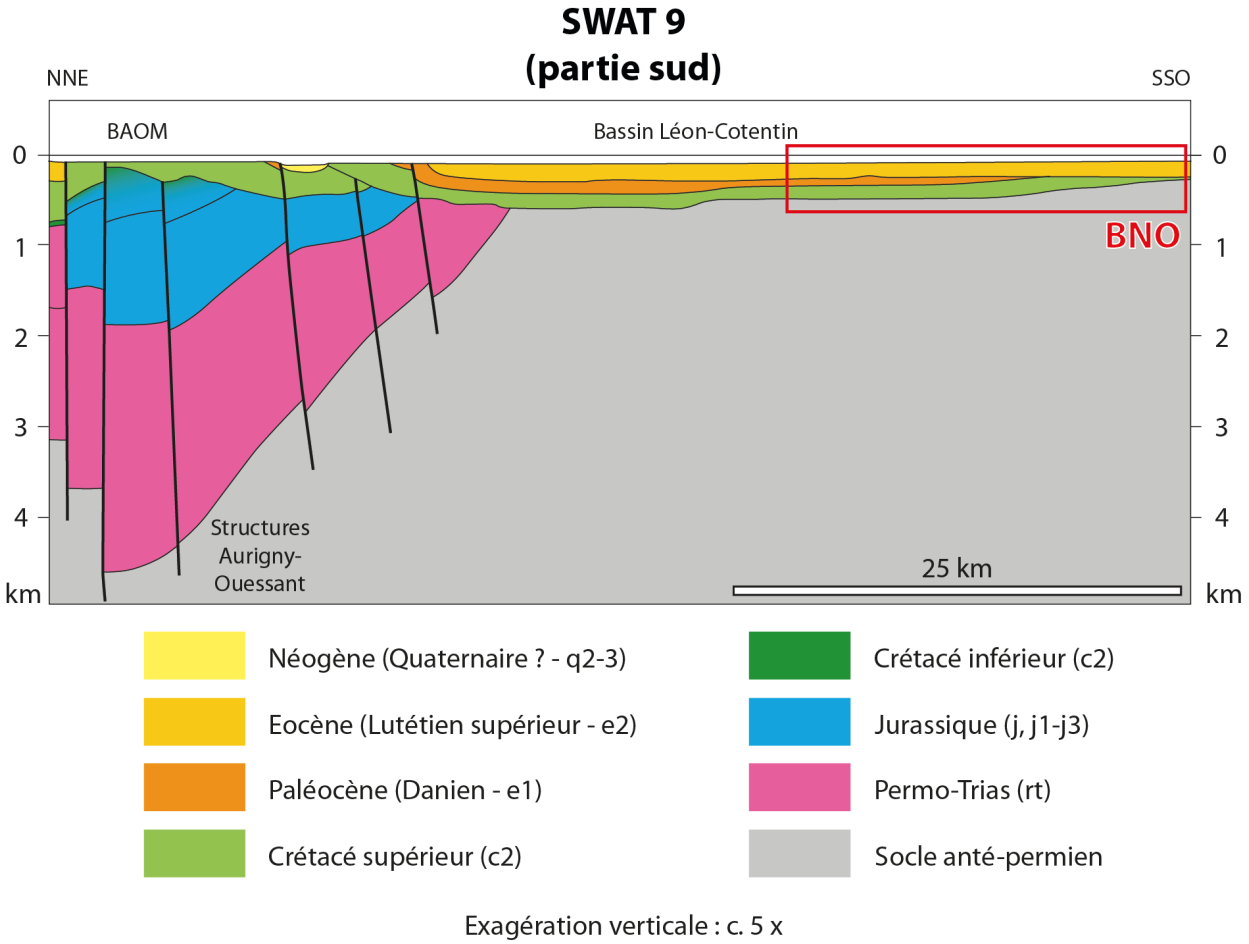
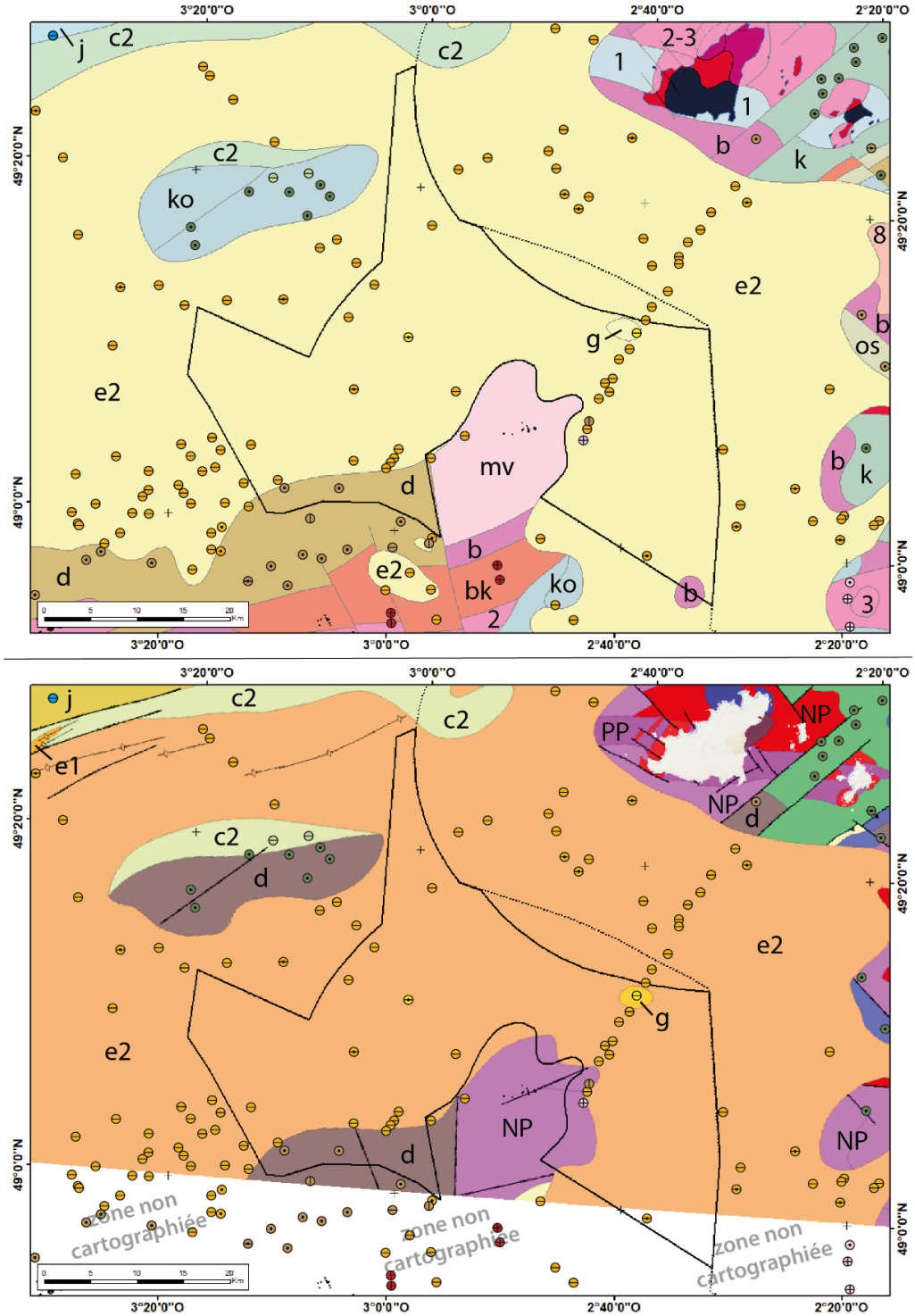


Figure 12 : Coupe géologique interprétative du profil SWAT 9 (modifiée d'après BGS-BRGM, 2000). Le cadre rouge correspond à la projection approximative de l'emprise de la macro-zone BNO. Localisation de la coupe en Figure 9.

4.1.2. Substratum de la macro-zone RD-BNE

Les travaux de cartographie géologique préexistants sur et autour de la macro-zone RD-BNE (prélèvements, sismique…) ont également été synthétisés dans la carte de Chantraine et al. (2003), qui fait ainsi référence. Néanmoins, la carte géologique au 1/250 000 du BGS-BRGM (2000), propose une alternative quant-au tracé des limites des unités lithostratigraphiques. Nous proposons donc les deux représentations dans la Figure 13, ainsi qu'une sélection des prélèvements géologiques issus de la BSSmer et du BGS. La comparaison entre les deux cartes et les données de prélèvement montre une cohérence d'ensemble et quelques imprécisions pouvant être notamment interprétées comme des erreurs de localisation des données en l'absence de positionnement par satellite. D'autres incohérences peuvent être attribuées à une simplification des tracés des contours des unités lithostratigraphiques ou des structures tectoniques à l'échelle de restitution (millionième).



- Oligocène
- Paléogène, Eocène, Lutétien, Bartonien
- Crétacé supérieur
- Jurassique
- Dévonien
- Cambrien, Ordovicien, Silurien
- Paléozoïque indifférenciés
- Néoprotérozoïque, Briovérien

- Calcaire, carbonates, craie
- Grés carbonatés
- Grés
- Roches métamorphiques (gneiss...)
- Roches magmatiques (granite...)

Figure 13 : Cartes géologiques centrées sur la macro-zone RD-BNE modifiées et adaptées d'après la carte géologique de la France au millionième (Haut ; Chantraine et al., 2003) et d'après la carte géologique au 1/250 000 de Guernesey (Bas ; BGS-BRGM, 2000). Légende identique à la Figure 9, sauf PP et NP signifiant respectivement Paléoprotérozoïque et Néoprotérozoïque. Les symboles ponctuels correspondent aux échantillons sélectionnés dans la BSSmer (infoterre.fr).

A l'instar de la macro-zone BNO, la macro-zone RD-BNE s'étend principalement sur des terrains de **l'Eocène supérieur (e2)** identifiés en majeure partie comme des **calcaires du Lutétien supérieur**. Lefort (1970a) précise qu'il s'agit également de « calcaires crayeux, des calcaires coquilliers, avec de rares grains de quartz, plus rarement des grès calcaires peu coquilliers, à quartz usés, enfin des calcaires dolomitiques compacts et bien cristallisés ». Les travaux récents de déterminations et de réévaluations biostratigraphiques réalisés par C. Bourdillon dans le cadre de l'établissement de la carte géologique au 1/50 000 de la Feuille Perros-Guirec (Guennoc et al., 2015) peuvent également s'appliquer et impliquer une plus grande plage stratigraphique aux dépôts tertiaires. L'âge de ces derniers pourraient ainsi s'étaler du **Lutétien inférieur au Bartonien**. Il est à noter que cette proposition est supportée par quelques échantillons provenant de la campagne GEOMANCHE 72 (Bouysse et al., 1972) pour lesquels un âge Lutétien-Bartonien, voir Bartonien-Oligocène est proposé. A l'est de la macro-zone RD-BNE, un échantillon de **marne bleue calcaire** attribué à **l'Oligocène (g)** (Lefort, 1970a) a justifié le dessin d'une emprise d'environ 6 km² mais dont les contours sont néanmoins mal contraints (Figure 13). Les cartes géologiques et échantillons font état de la présence de **craie du Crétacé supérieur (c2)** à l'affleurement de part et d'autre de l'extrémité septentrionale de la macro-zone, notamment en bordure du Banc des Langoustiers (Figure 3). Ceci implique la présence sous-jacente du Crétacé supérieur crayeux sous les carbonates éocènes au moins dans la partie nord de la macro-zone RD-BNE. A l'instar de la macro-zone BNO, le Crétacé n'est pas documenté au sud de la RD-BNE et se biseaute donc entre série cénozoïque et socle sous-jacent. Cette géométrie est mise en avant sur la coupe interprétative du profil sismique SWAT 10 (Figure 10). La position et le tracé cartographique du biseau crétacé sous couverture cénozoïque n'est cependant pas connue avec précision. Au sud de la macro-zone RD-BNE, les dépôts Eocènes se biseautent également et laissent apparaître les unités magmatiques, métamorphiques, et sédimentaires sous-jacentes du socle du Massif Armoricain. Cinq grands ensembles constitutifs du socle sont distingués autour de la macro-zone. Selon la carte géologique prise en compte (Figure 13), trois ensembles sont présents à l'affleurement au sein même de la macro-zone. Le premier correspond à des **gneiss néoprotérozoïques leptynitiques à plagioclases et micaschistes (mv ou NP)**, qui constituent les lithologies des Roches Douvres. Si la limite de la macro-zone RD-BNE contourne les affleurements de gneiss des Roches Douvres tels que représentés sur la carte de Chantraine et al. (2003), ces derniers seraient néanmoins présents selon la carte du BGS-BRGM (2000) (Figure 13). La prise en compte des données d'échantillonnage (Figure 13) semble favoriser le tracé de la carte géologique de Guernesey (BGS-BRGM, 2000). Ce point d'incertitude est à traiter dans la mise à jour cartographique de la présente étude (Chapitre 5). Le deuxième ensemble affleurant dans l'emprise de la macro-zone correspond à un pointement d'environ 9 km² de **grès du Briovérien (Néoprotérozoïque, b)** localisé à l'extrémité sud-est (Figure 13). Cette unité géologique est retrouvée latéralement à l'affleurement hors macro-zone vers le sud-ouest, l'ouest et l'est, en limite du contact socle-couverture. Cette configuration est en faveur d'une présence de ces grès du Briovérien sous la couverture cénozoïque au cœur de la macro-zone. Le troisième ensemble de socle affleurant sur le fond marin du sud-ouest de l'emprise de la macro-zone RD-BNE correspond à une série sédimentaire plus ou moins métamorphisée en faciès schistes verts et comprend des **grès, arkoses, ardoises et schistes noirs plus ou moins gréseux (phyllades), et des quartzites du Dévonien (d)**. Cette série est également retrouvée au nord-ouest de la macro-zone, au niveau du Banc des Langoustiers (BGS-BRGM, 2000) impliquant une possible continuité sous couverture cénozoïque dans la macro-zone RD-BNE. L'interprétation figurée dans la carte de Chantraine et al (2003) retient un âge cambro-ordovicien pour ces grès et arkoses du Banc des Langoustiers. Les deux derniers ensembles de socle

identifiés autour de la macro-zone RD-BNE et pouvant être présents sous-couverture en son sein correspondent aux **rhyolites, rhyodacites (volcanisme acide) du Néoprotérozoïques ou du Paléozoïque-Cambrien (bk)** au sud, et aux **grés, arkoses et schistes du Paléozoïque (Cambrien à Ordovicien** localement jusqu'au **Silurien-Dévonien – k et ko)**. La distribution de ces ensembles de socle sous couverture n'est pas clairement déterminée. Cependant, Lefort (1975a, 1977) propose un écorché sous couverture méso-cénozoïque sur la base des données géophysiques (dont anomalie magnétique) et géologiques (Figure 14). Cette cartographie reste néanmoins hautement spéculative.

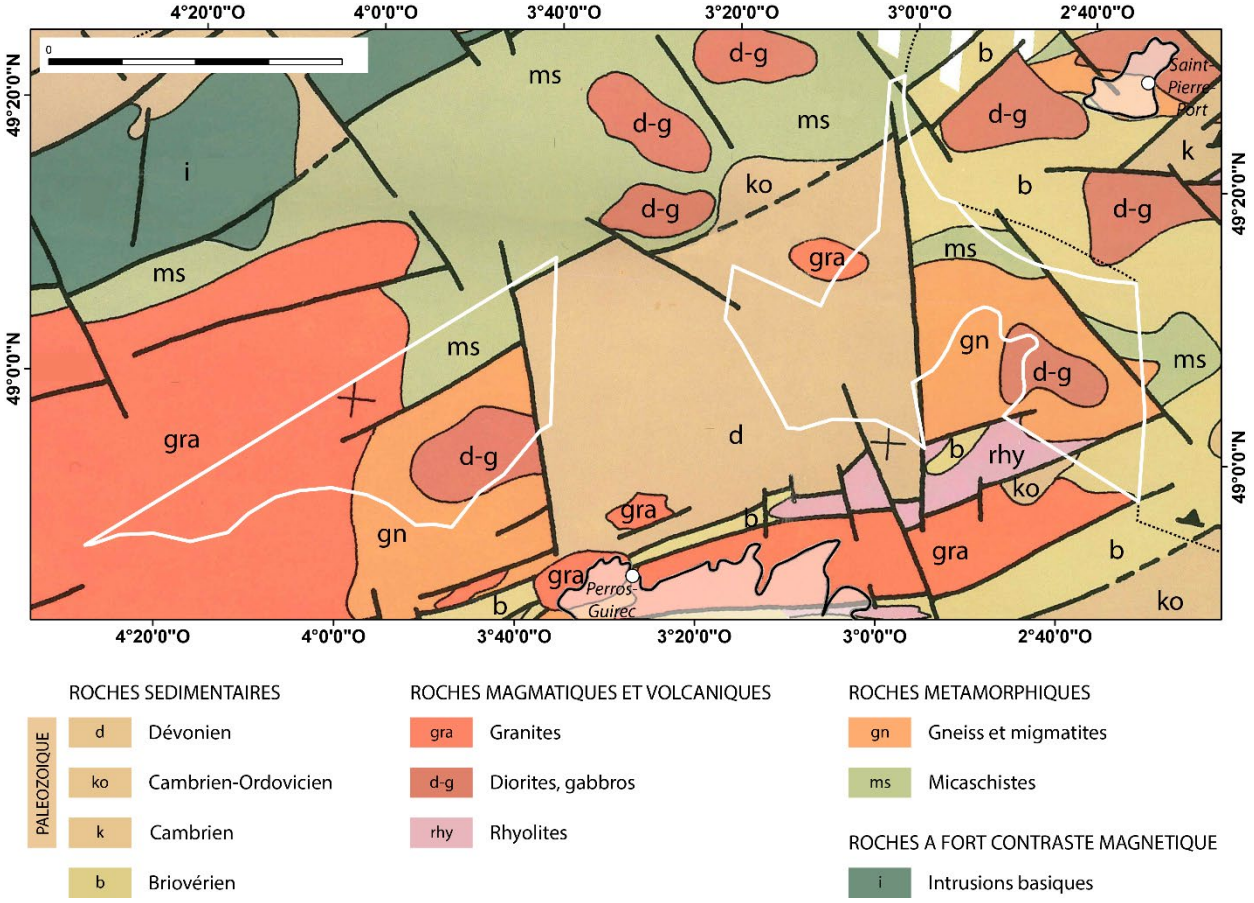


Figure 14 : Ecorché géologique autour des macro-zones BNO et RD-BNE proposant une distribution des ensembles du socle armoricain sous couverture méso-cénozoïque (modifié d'après Lefort, 1975a, 1977). Les traits noirs épais continus et discontinus correspondent aux structures tectoniques (failles), qui sont déduites des discontinuités géophysiques.

Enfin, la zone nord armoricaine est parcourue de nombreuses familles de **filons** intrusifs au sein des différentes unités de socle d'âge Néoprotérozoïque à Paléozoïque. Les lithologies filoniennes sont variées, incluant des **dolérites, microgranites, albitophyres, kersantites, pegmatites, quartz…** (ex : Auvray et al., 1976a, 1976b ; Le Goff et al., 2009a ; Le Goff et al., 2009b ; Guennoc et al., 2015a ; Guennoc et al., 2015b). Les filons doléritiques sont les plus fréquents entre Trégor et Baie du Mont-Saint Michel, avec des directions globalement E-O à l'ouest et N-S à l'est. Les âges varient du Silurien au Carbonifère inférieur (440 Ma à 330 ± 10 Ma ; Auvray, 1979 ; Perroud et al., 1986) ce qui implique que les filons peuvent être retrouvés en intrusion dans les unités géologiques protérozoïques à dévoniennes. Les données aéromagnétiques régionales acquises au-dessus du Golfe Normand-Breton indiquent la prolongation des filons en mer (Lefort et Aïfa,

1996). Les travaux plus récents réalisés sur la base des données magnétiques acquises en mer par le SHOM (Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019) précisent la distribution et les directions des filons (doléritiques), notamment sur la portion orientale de la macro-zone RD-BNE (Figure 15).

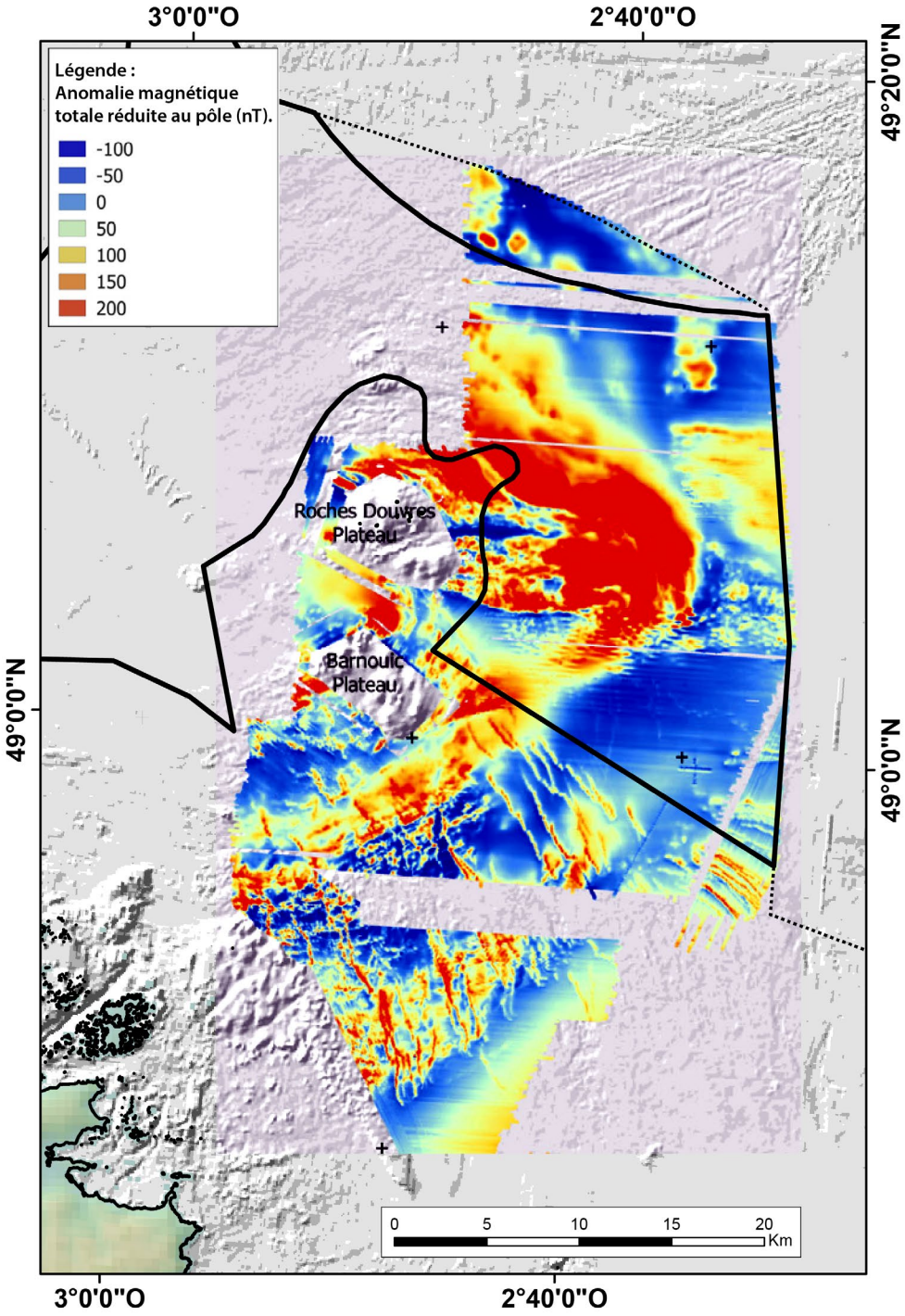


Figure 15 : Carte d'anomalies magnétiques réduites au pôle montrant la signature des filons de dolérites (anomalies linéaires ONO-ESE à NO-SE apparaissant en nuances de rouge à orange) visibles au sud de

la macro-zone RD-BNE (emprise noire), au nord de la Baie de Saint-Brieuc (modifiée d'après Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019).

Ces considérations sur les filons de dolérites motivent l'attention portée à leur prise en compte dans la mise à jour cartographique de la présente étude.

4.2. STRUCTURES TECTONIQUES MAJEURES

Sur les emprises des macro-zones BNO et RD-BNE, aucune faille n'a été identifiée et cartographiée à ce jour et reportée sur les cartes géologiques existantes (BGS-BRGM, 2000 ; Chantraine et al., 2003). Néanmoins, de nombreuses structures sont représentées à proximité, et affectant uniquement les ensembles de socle du Massif Armoricain, principalement au sud (Trégor, Léon, Roches Douvres) à l'est autour des Îles Anglo-Normandes ou au nord, au niveau du Banc des Langoustiers. Ces structures sont attribuées aux grandes phases orogéniques cadomiennes et varisques (Figure 11 et Figure 13). L'écorché anté-mésozoïque de Lefort (1975a, 1977) propose la présence de structures tectoniques sous-couverture (Figure 14).

Des propositions de distinction des blocs structuraux cadomiens et varisques sont proposées par Ballèvre et al. (2001), Ballèvre et al. (2009) et Ballèvre et al. (2013), et sont reproduites en Figure 16 et Figure 17. Ces reconstitutions positionnent les macro-zones BNO et RD-BNE à cheval entre le domaine cadomienne Trégor-La Hague (incorporé plus tard au domaine nord-armoricain lors de l'orogenèse varisque) et le domaine varisque du Léon.

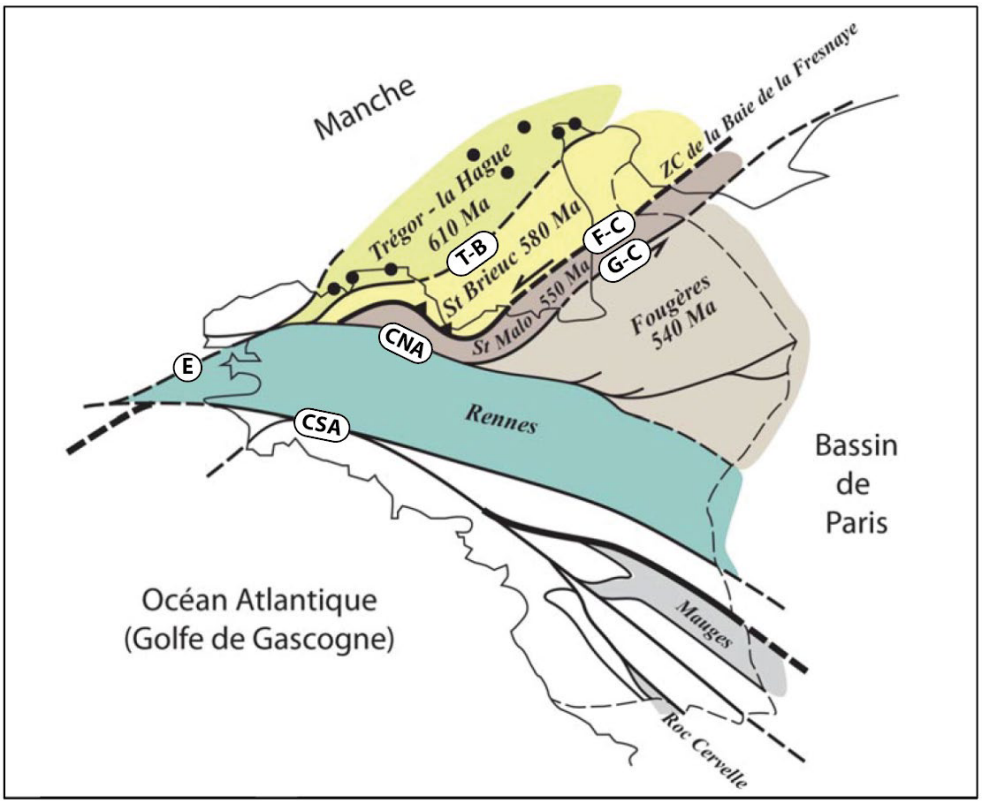


Figure 16 : Carte synthétique des sous-domaines structuraux cadomiens au sein du Massif Armoricain, limités par les accidents majeurs (CSA : Cisaillement Sud-Armoricain ; CNA : Cisaillement Nord-Armoricain ; E : Faille de l'Elorn ; T-B : Faille de Trédrez-Beauport ; F-C : Faille de Fresnay-Coutances ; G-C : Faille de Granville-Cancale). Les âges associés aux sous-domaines correspondent aux ages moyens

des intrusions (granitiques, gabbro-dioritiques, …) du cycle orogénique cadomien propres à chaque sous-domaine. Les points noirs du sous-domaine Trégor-Hague correspondent aux occurrences de reliques paléoprotérozoïques icartiennes. Modifiée d'après Ballèvre et al., 2001 ; Ballèvre et al., 2013.

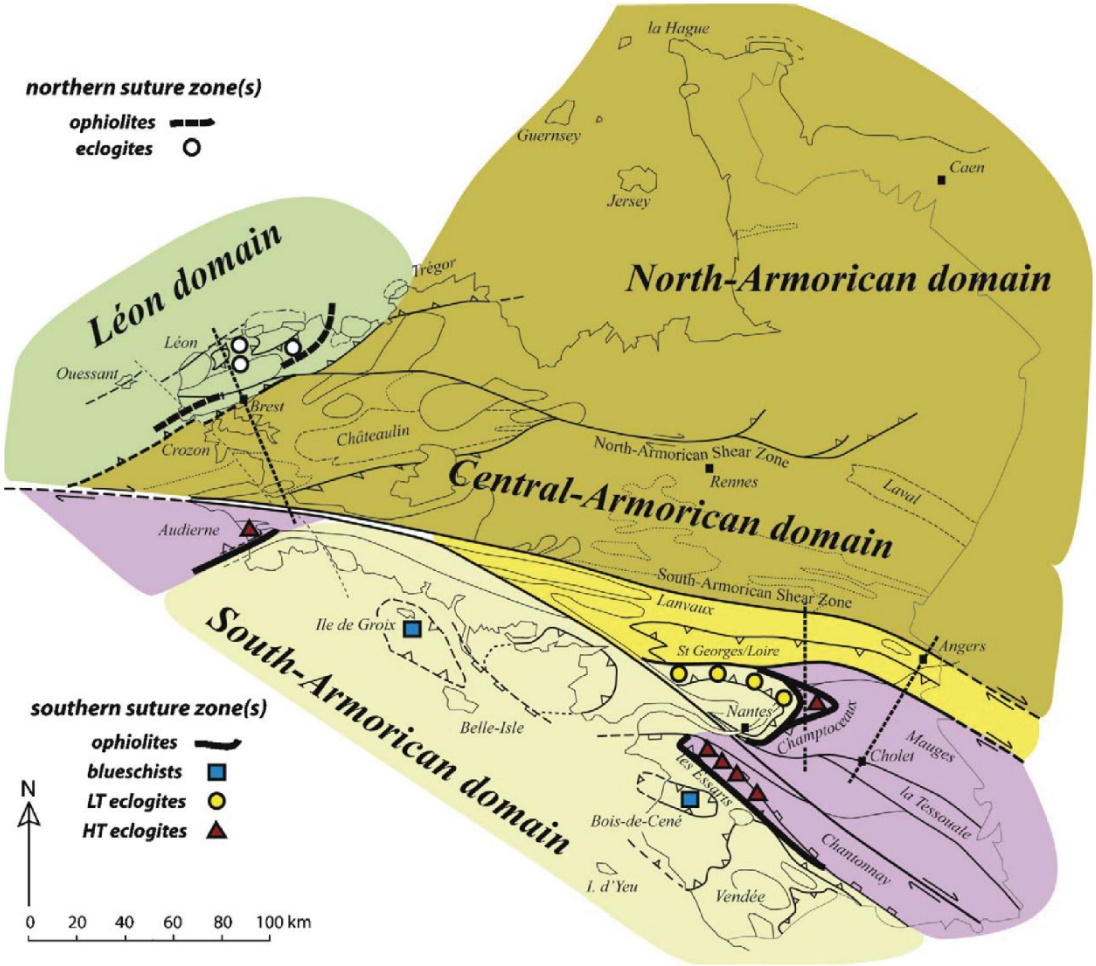


Figure 17 : Carte synthétique des domaines structuraux varisques du Massif Armoricain, séparés par les grands cisaillements carbonifères (Ballèvre et al., 2009).

Il est ainsi plus que vraisemblable que des failles de socle soient présentes sous la couverture sédimentaire méso-cénozoïque.

De plus, la cartographie géologique régionale (BGS-BRGM, 2000 ; Chantraine et al., 2003) indique la présence d'un faisceau de failles et de plis associés au nord des macro-zones BNO et RD-BNE et qui affectent les terrains méso-cénozoïques. Ces structures rapportées à l'alignement structural Aurigny-Ouessant segmentent la Manche en séparant les zones de préservation cénozoïques (Bassin Léon-Cotentin (BLC) et Bassin des Approches Occidentales de la Manche (BAOM)), et en faisant remonter les séries mésozoïques du Trias au Crétacé supérieur (Figure 9 et Figure 10) ainsi qu'un pointement de granite ordovicien de la Basse Blanche (label 7 sur la Figure 9 et la Figure 11) le long d'un accident de ce faisceau structural (Lefort et al., 1978). L'enracinement des structures Aurigny-Ouessant dans le socle ne semble pas faire débat dans la communauté scientifique. Or si les structures Aurigny-Ouessant d'orientation NE-SO et héritées des orogenèses cadomienne et/ou varisque ont pu être réactivées au Cénozoïque (Figure 9 et Figure 10), il est possible que des structures parallèles aient également affecté la

couverture cénozoïque du Bassin Léon-Cotentin. Cette hypothèse est donc à prendre en compte dans la mise à jour cartographique des macro-zones BNO et RD-BNE de la présente étude (Chapitre 5). Ce travail est également complété par l'analyse de la sismicité traitée au chapitre 7.

5. Mise à jour de la cartographie

L'état des connaissances géologiques en amont de cette étude est présenté dans le chapitre 4. Il est basé sur un corpus de données dont l'essentiel a été acquis au cours de la deuxième moitié du XXème siècle. Si les échantillons géologiques caractérisés en lithologies et/ou en âges offrent une vision assez complète des formations lithostratigraphiques, qui composent la région des macro-zones BNO et RD-BNE, le manque de densité ou de résolution des données géophysiques alors disponibles ne rend pas compte des géométries et des contours de ces formations.

Nous proposons ici de mettre à jour la cartographie sur la base de données géophysiques récentes tant en sismique Très-Haute-Résolution (THR) qu'en bathymétrie multifaisceaux.

5.1. DONNEES

Afin de réaliser cette mise à jour, les données de sismique réflexion très-haute-résolution (Sparker) de trois campagnes (Tableau 1) ont été utilisées et interprétées au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE. Les profils sismiques interprétés sont localisés sur un plan de position (Figure 18). Les campagnes ASTROLABE (Boillot, 1970) et GEOMANCHE 71 (Horn, 1971) furent parmi les premières campagnes sismiques réalisées sur le plateau continental afin de réaliser la première carte géologique de la Manche. Les données disponibles de ces deux campagnes sont des scans (images numérisées) des rouleaux papiers imprimés à bord. La campagne GEOBREST 2003 (Le Roy et Thinon, 2003) a été réalisée dans le cadre d'appels d'offre de la Flotte Océanographique Française (FOF - https://www.flotteoceanographique.fr/) et ses données traitées sont disponibles en format numérique.

Tableau 1 : Liste des campagnes océanographiques dont les données ont fait l'objet d'interprétations sismiques (: nom actuel de l'institution)*

Campagne	Année	Navire	Type de sismique	Chef de mission	Institution*	Référence
ASTROLABE	1970	Astrolabe (II) A780	Sparker monotrace	G. Boillot	UMR 6118 Géosciences Rennes	Boillot G. (1970)
GEOMANCHE 71	1971	NO Le Noroit	Sparker monotrace	R. Horn	BRGM	Horn R., (1971) https://doi.org/10.17600/71000111
GEOBREST 2003	2003	NO Côtes de la Manche	Sparker multitraces	P. Le Roy et I. Thinon	UMR 6538 Géo-Océan / BRGM	Le Roy et Thinon (2003) https://doi.org/10.17600/17006700

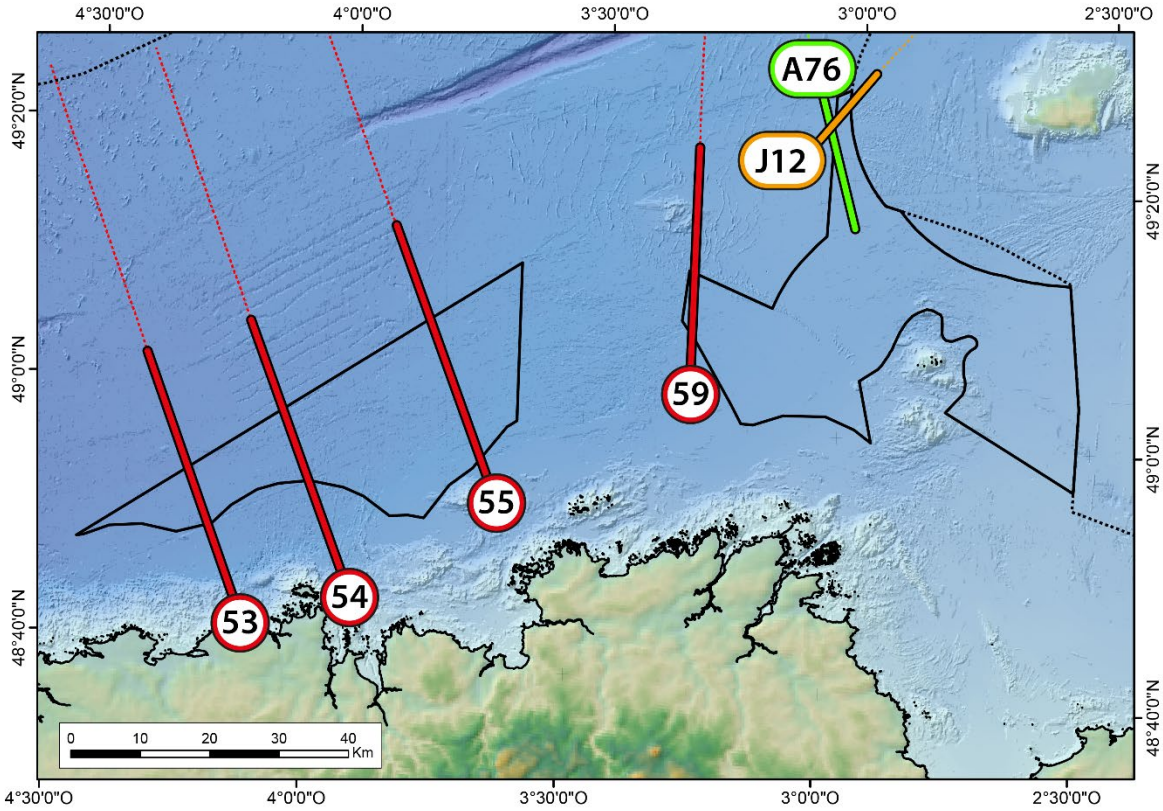


Figure 18 : Carte de localisation des 6 coupes sismiques interprétées provenant des campagnes ASTROLABE (en vert), GEOMANCHE 71 (orange) et GEOBREST 2003 (en rouge), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

Afin compléter ce jeu de données sismiques, il est nécessaire de s'appuyer sur les données bathymétriques les plus précises disponibles sur le secteur nord-Bretagne. Le SHOM met à disposition de nombreux lots de données bathymétriques, issus d'acquisition aux sondeurs monofaisceau ou multifaisceaux. Sur les zones BNO et RD-BNE, nous avons ainsi pu obtenir 9 lots de sondes bathymétriques pertinents depuis le portail de diffusion de données du SHOM (https://diffusion.shom.fr/) et couvrant l'essentiel de la macro-zone RD-BNE et environ un tiers de la macro-zone BNO (liste des lots dans le Tableau 2). Les lots de sondes bathymétriques ont ensuite été transformés par interpolation en modèle numérique de terrain (MNT) géoréférencés en utilisant le logiciel Globe v. 2.1.3 (Poncelet et al., 2025 ; 10.17882/70460). Leurs emprises cartographiques et résolution sont présentées en Figure 19. Les résolutions spatiales obtenues varient de 2 à 40 m permettant ainsi de compléter le MNT bathymétrique de synthèse EMODnet (2022) dont la résolution avoisine les 90 m. Des aperçus des MNT sont présentés en Figure 20

Tableau 2 : Liste des campagnes océanographiques dont les données ont fait l'objet d'interprétations morpho-bathymétriques (: nom actuel de l'institution)*

Campagne / Levé bathymétrique	Année	Type de sondeur	Nb. sondes	Origine	Référence / DOI
S199404900	1994	Deso 20 Lennermor	3 077 761	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S199404900
S200304700	2003	Simrad em1002s	42 803 044	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S202001900
S200401200	2004	Simrad em1002s	6 022 257	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S200401200
S200500400	2005	Simrad em1002s	16 809 669	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S202001900
S200601400	2006	Simrad em1002	7 153 503	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S202001900
S200607200	2006	Simrad em1002	35 726 698	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S202001900
S200701700	2007	Simrad em1002s	173 124 852	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S200701700
S200800800	2008	Simrad em1002	54 146 717	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S200800800
S201010500	2010	Simrad em1002 / Simrad em710	189 286 001	SHOM	http://dx.doi.org/10.17183/S201010500

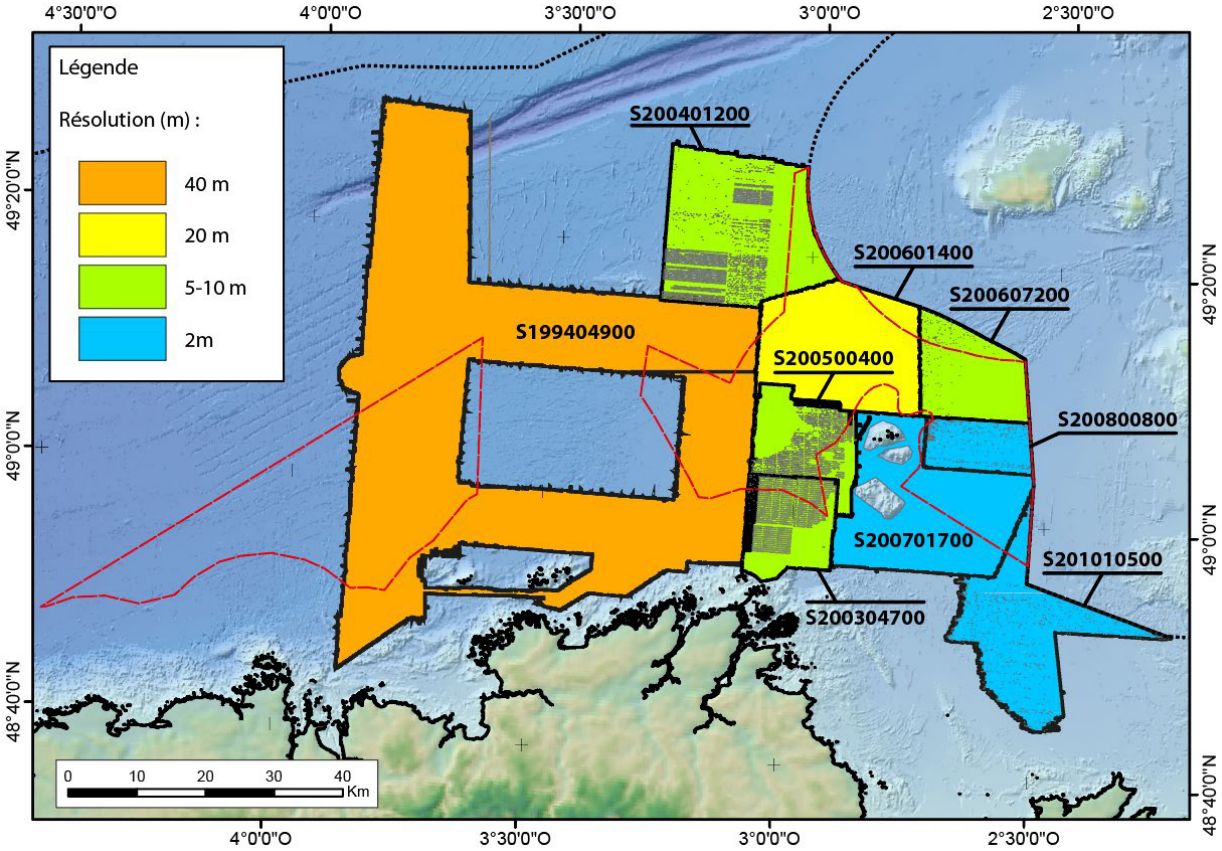


Figure 19 : Carte de l'emprise des 9 lots de sondes bathymétriques du SHOM (voir Tableau 2) au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE (emprises en trait rouge pointillés), et indiquant les résolutions obtenues après interpolation et production des MNT (aperçu en Figure 20)

c)

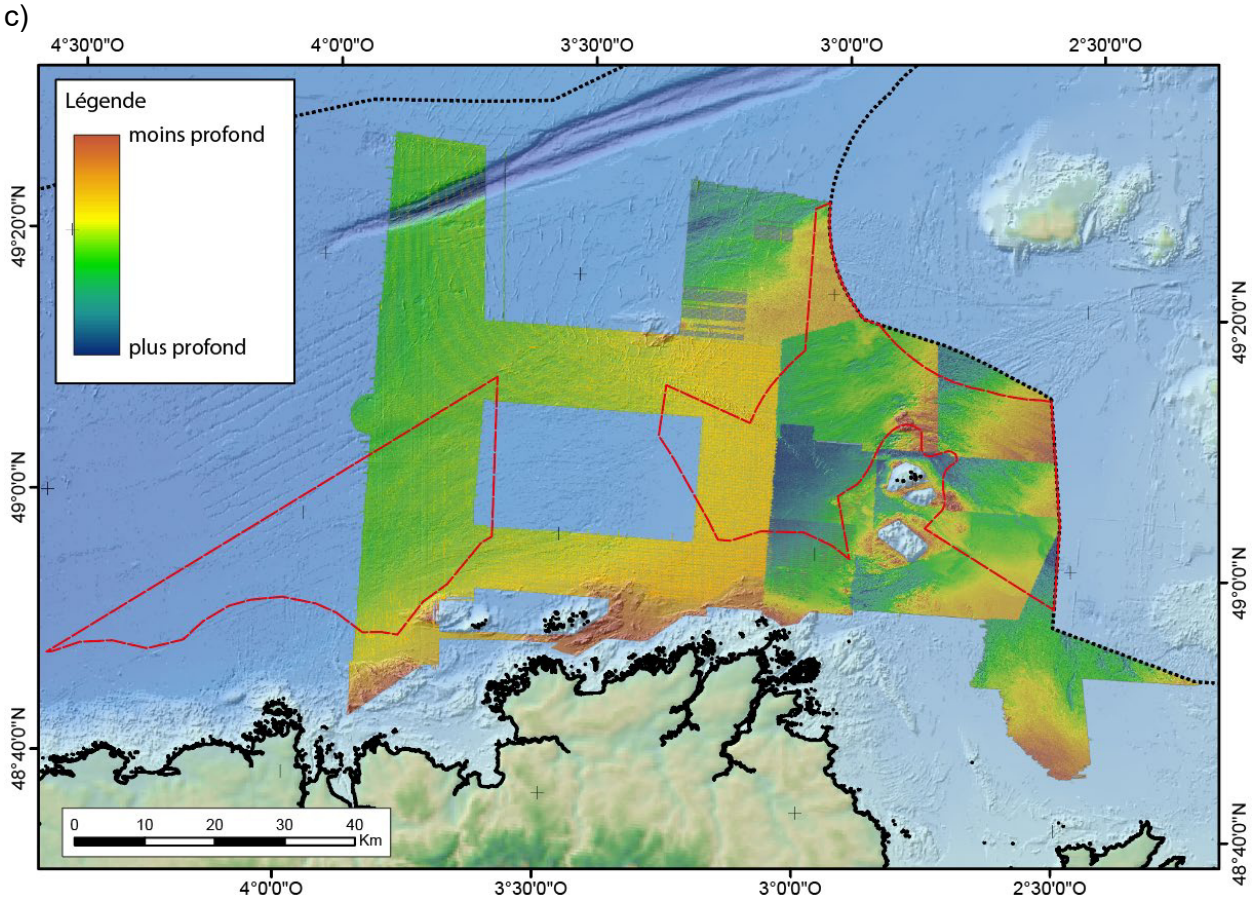


Figure 20 : Carte d'aperçu des MNT produits à partir des lots de sondes bathymétriques du SHOM (voir Tableau 2) au niveau des macro-zones BNO et RD-BNE (emprises en trait rouge pointillés).Le dégradé de couleur est indicatif et diffère d'un MNT à l'autre.

5.2. METHODOLOGIE

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 (Boillot et al., 1972 ; Bouysse et al., 1975).

Les données scannées des campagnes ASTROLABE et GEOMANCHE 71 offrent des images sismiques dont la qualité ne permet pas de faire des distinctions claires autres que les grands ensembles géologiques (socle, séries sédimentaires méso-cénozoïques, sédiments meubles). Les données sismiques THR récentes de la campagne GEOBREST 2003 offrent une qualité et une résolution bien plus intéressantes, mais l'espacement inter-profils et trop important sur les macro-zones BNO et RD-BNE pour permettre d'effectuer les corrélations de profil à profil.

Le travail d'interprétation de la présente étude aboutit au pointé de 6 horizons (dont le fond marin), qui ont pu être associés à autant de limites stratigraphiques et lithologiques majeures. L'attribution de chaque horizon à une limite stratigraphique particulière est basée sur les travaux et connaissances préexistants ayant déjà proposé des corrélations entre stratigraphie sismique et lithostratigraphie régionale (Boillot et al., 1972 ; Bouysse et al., 1975). Ces travaux et la présente étude bénéficient également des données et informations liées aux **prélèvements de roches** réalisés sur le fond marin. Ces derniers permettent de caractériser la lithologie d'une unité, et de

proposer ou valider un âge, grâces aux analyses biostratigraphiques (paléontologiques). Une centaine d'échantillons répartis au sein et hors des macro-zones ont ainsi produit des informations sur la lithologie et/ou la stratigraphie du substratum affleurant. 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).

Les MNT bathymétriques obtenus à partir des données multifaisceaux mises à disposition par le SHOM ont fait l'objet d'une interprétation morphologique affinée, consistant à tracer des linéaments et des ensembles morphologiques (aspect, rugosité) puis de les identifier et cartographier en tant qu'objets géologiques. Cette interprétation est également supportée par les interprétations sismiques issues de la bibliographie ou réalisées dans la présente étude, par les prélèvements issus de la BSSmer, et par les données magnétiques (Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019). Ces dernières ont été utilisées pour repérer et cartographier les anomalies magnétiques attribuables à d'éventuels filons de dolérites.

Les ensembles morphologiques vus au chapitre 2 à partir du MNT bathymétrique de synthèse (EMODnet, 2022) ont été revisités à partir des MNT bathymétriques haute résolution multifaisceaux. Des grandes zones géologiques sont différenciées à partir des images bathymétriques et leur interprétation en termes de géomorphologie et géologie, appuyée par l'interprétation des profils de sismique réflexion, les échantillons, ou la présence d'anomalies magnétiques. La Figure 21 donne les localisations d'une sélection d'images caractéristiques des différents domaines dans la zone RD-BNE, qui présentent les meilleures données bathymétriques.

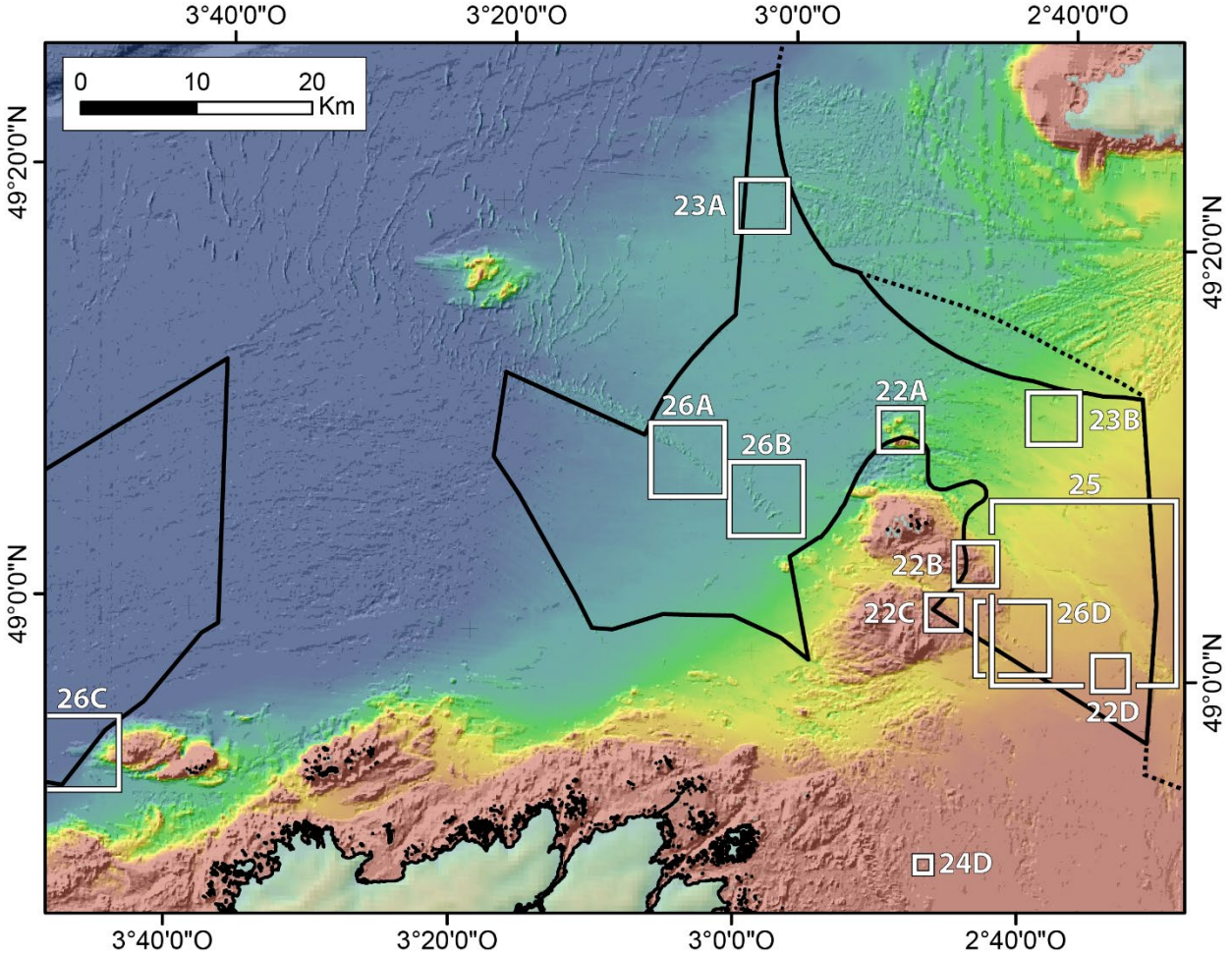


Figure 21 : Carte de localisation des zooms sur les données bathymétriques de la Figure 22 à la

On peut ainsi reconnaître :

- Des zones de **socle magmatique et/ou métamorphique** caractérisées par une forte rugosité et des discontinuités abondantes correspondant à des failles et fractures (Figure 22 a, b et c). Certaines fractures présentent des orientations préférentielles héritées des déformations postérieures ou synchrones des phénomènes de cristallisation ou recristallisation. En plus des failles et fractures, certaines de ces zones présentent une texture composée de stries parallèles plus ou moins régulières, que nous interprétons comme l'expression de plans de **foliation ou de schistosité** imprimés par la déformation. Ces zones de socle magmatique et métamorphique forment généralement des reliefs positifs. Cette interprétation est supportée par (i) le faciès sismique ne présentant pas de réflecteurs internes, (ii) par la présence d'échantillons de **granites, granodiorites, migmatites, et gneiss** d'âges **protérozoïque à paléozoïque (carbonifère)**, et (iii) par les travaux cartographiques antérieurs.

- Des zones de **socle sédimentaire**, qui sont mis en évidence par des ensembles de linéaments parallèles présentant des schémas reproductibles et continus, seulement affectés par la déformation (plis et failles), et qui correspondraient à la **stratification** de séries sédimentaires (Figure 22d). L'accumulation de déformation de ces séries, et notamment la présence de nombreuses failles nous permet de les qualifier de **roches sédimentaires « anciennes »**. Ces domaines de socles sédimentaires, à l'inverse des

zones de socle magmato-métamorphique ne se distinguent pas particulièrement par des topographies positives. Cette interprétation est supportée par (i) le faciès sismique ne présentant pas ou peu de réflecteurs internes, (ii) par la présence d'échantillons de roches paradérivées de bas grade (**schistes, phyllades**), et de **grès** d'âges **néoprotérozoïque (Briovérien) à paléozoïque (Cambro-Ordovicien à Dévonien)**, et (iii) par les travaux cartographiques antérieurs.

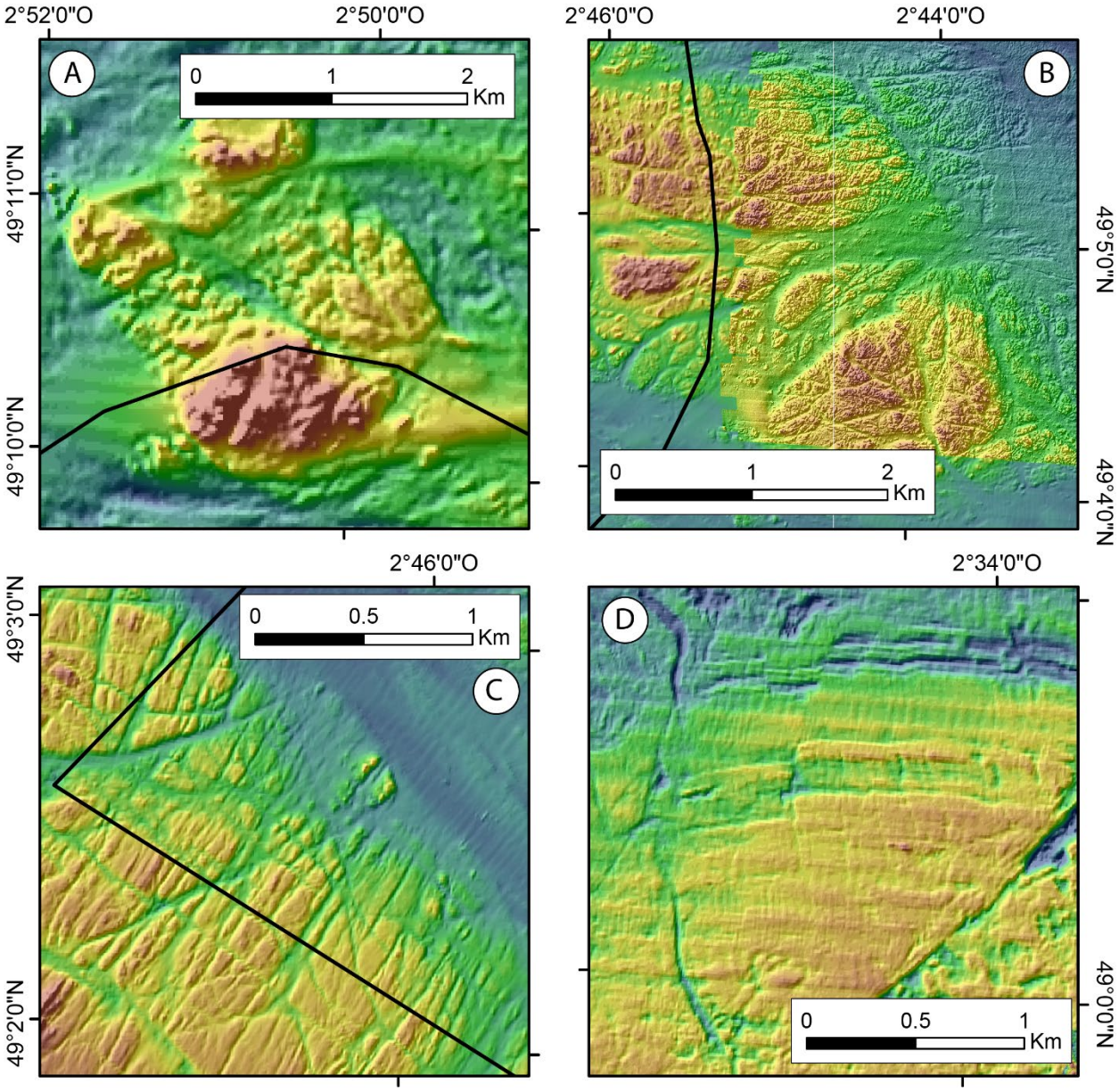


Figure 22 : Zooms sur les morphologies de socle magmatique-métamorphique (A, B et C), et de socle sédimentaire plissé et faillé (D). Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour de la macro-zone RD-BNE. Localisation des zooms en Figure 21.

- Des zones de faible relief, constituant la plateforme régionale, et présentant des **stratifications** plus frustes (Figure 23 a), une moindre déformation, et une rugosité de surface variable traduisant l'effet de processus supergènes d'altération et érosion.

Localement, des dépressions concentriques plus ou moins allongées sont visibles et suggèrent des **dolines et figures de dissolution-karstification** (Figure 23 b) typique de carbonates. Cette interprétation était déjà proposée par Lefort (1970c) et reprise par Guennoc et al. (2015). Nous pouvons ainsi considérer qu'il s'agit de **roches sédimentaires plus « récentes »** constituant la couverture des roches de socle. Cette interprétation est supportée par (i) des faciès sismiques présentant de nombreux réflecteurs internes parallèles et continus ou chaotiques-discontinus, (ii) par la présence d'échantillons **de calcaires, grès, et craie** d'âges **crétacés (Maastrichtien) à éocènes (Lutétien-Bartonien)**, et (iii) par les travaux cartographiques antérieurs.

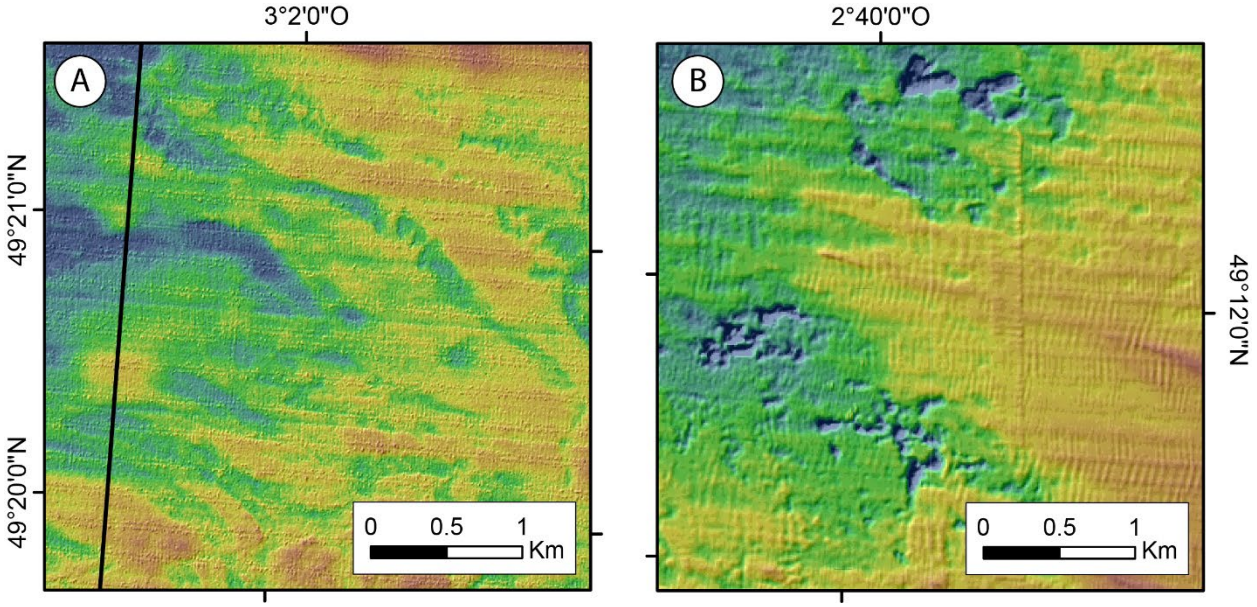


Figure 23 : Zooms sur les morphologies de séries sédimentaires montrant la stratification fruste plissée et faillée (A) et des figures de dissolution-karstification (dépressions décamétriques à hectométriques en B). Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour de la macro-zone RD-BNE. Localisation des zooms en Figure 21.

- Des discontinuités linéaires présentant des jeux apparents décalant d'autres marqueurs (stratification, fractures) et qui sont interprétées ici comme des **failles** *s.s.* (Figure 22 d). Elles peuvent affecter les terrains de type socle ou de substratum sédimentaire. Certaines discontinuités ne présentant pas de décalage peuvent être considérées comme des **fractures**. L'absence de marqueurs clairs de déformation dans les socles magmatiques empêche toute distinction entre failles et fractures.

- Des discontinuités linéaires au relief positif ou négatif, de longueur kilométrique à plurikilométriques, de largeurs métriques à décamétriques, avec ou sans jeu apparent, et se corrélant avec des anomalies magnétiques linéaires (Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019). Ces objets sont interprétés comme des **filons de dolérites** (Figure 24). Régionalement, ils ne sont retrouvés qu'au sein des ensembles de socle magmatique, métamorphique ou sédimentaire et n'affectent pas les terrains méso-cénozoïques. Les filons sont retrouvés à l'est de la macro-zones RD-BNE où ils ont peu de signature morphologique et sont donc principalement cartographiés en utilisant les anomalies magnétiques linéaires qu'ils génèrent. Il est à noter que certaines anomalies magnétiques linéaires n'ont pas d'expression morphologique et sont situées dans des zones caractérisées par une couverture sédimentaire. Elles sont donc considérées comme des « **filons sous couverture** ».

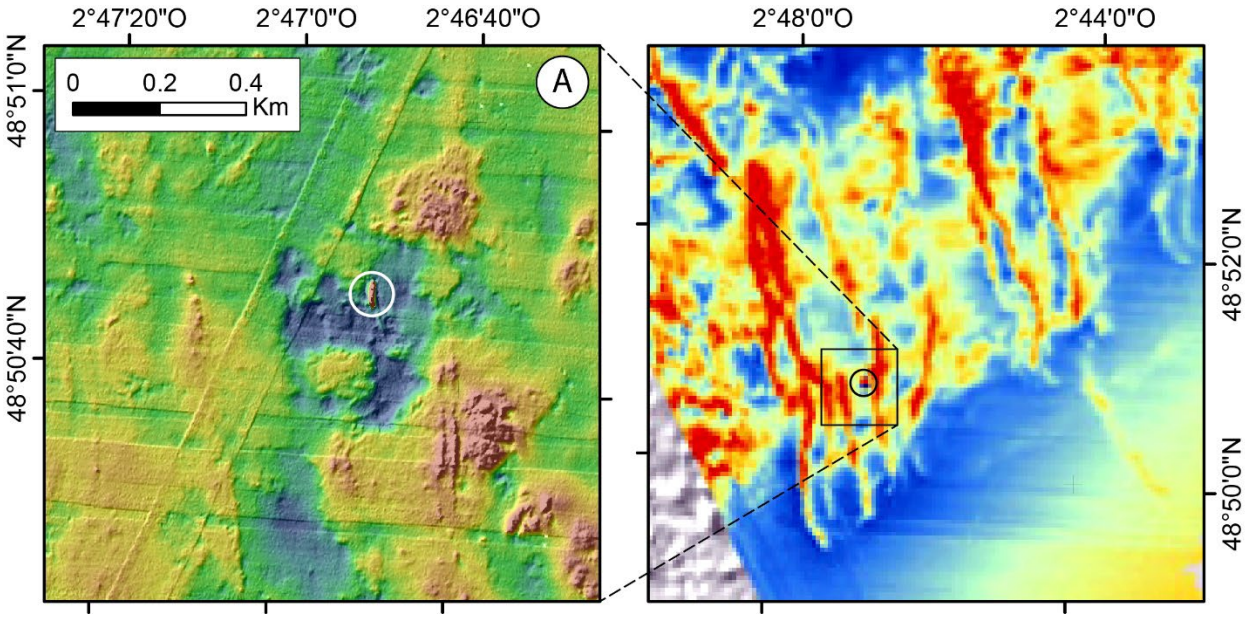


Figure 24 : Zoom sur les morphologies filoniennes (hors macro-zones) se traduisant ici par des linéaments subméridiens (A) coïncidant avec les anomalies magnétiques linéaires (B ; Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019). Dégradé de couleur relatif à l'altitude en A (voir Figure 20) et à l'anomalie magnétique réduite au pôle (voir Figure 15). Les cercles indiquent la position de l'épave du vraquier SS Helge (SHOM, 2022). Localisation du zoom en Figure 21.

- Des dépressions allongées de largeur hectométrique à plurikilométrique, d'une profondeur plurimétrique, et pouvant s'étirer sur plusieurs kilomètres à dizaines de kilomètres. Elles sont identifiables sur des fonds marins n'excédant pas les 60 m et peuvent se prolonger vers la côte (hors macro-zones) où elles semblent se connecter aux vallées du réseau hydrographique actuel. Ces dépressions chenalisées et sinueuses sont interprétées comme des **paléovallées** ayant été creusées lors des périodes de bas niveau marin. Par analogie à l'ensemble des paléovallées identifiées sur le plateau continental des façades MEMN et NAMO, nous proposons un âge **pléistocène** pour l'incision et l'éventuel remplissage de ces paléovallées. Deux systèmes ont pu être identifiés sur la macro-zone RD-BNE. Leurs tracés permettent de les associer aux bassins versants actuels. Un premier système complexe important (0.7 à 3 km de large) de chenaux anastomosés traversant la zone SE de la macro-zone RD-BNE (Figure 25) se connecte en amont aux fleuves côtiers de la Baie du Mont-Saint-Michel (Sée, Sélune, Couesnon) et de la Côte d'Emeraude (Rance, Arguenon). Il sera dénommé informellement « fleuve Normand-Breton » dans la suite de ce manuscrit. La seconde paléovallée, de dimensions plus réduites (100 m de large), est détectée dans le secteur sud et semble se connecter en amont avec les fleuves côtiers de la Baie de Saint-Brieuc (Côte de Penthièvre et Côte du Goëlo).

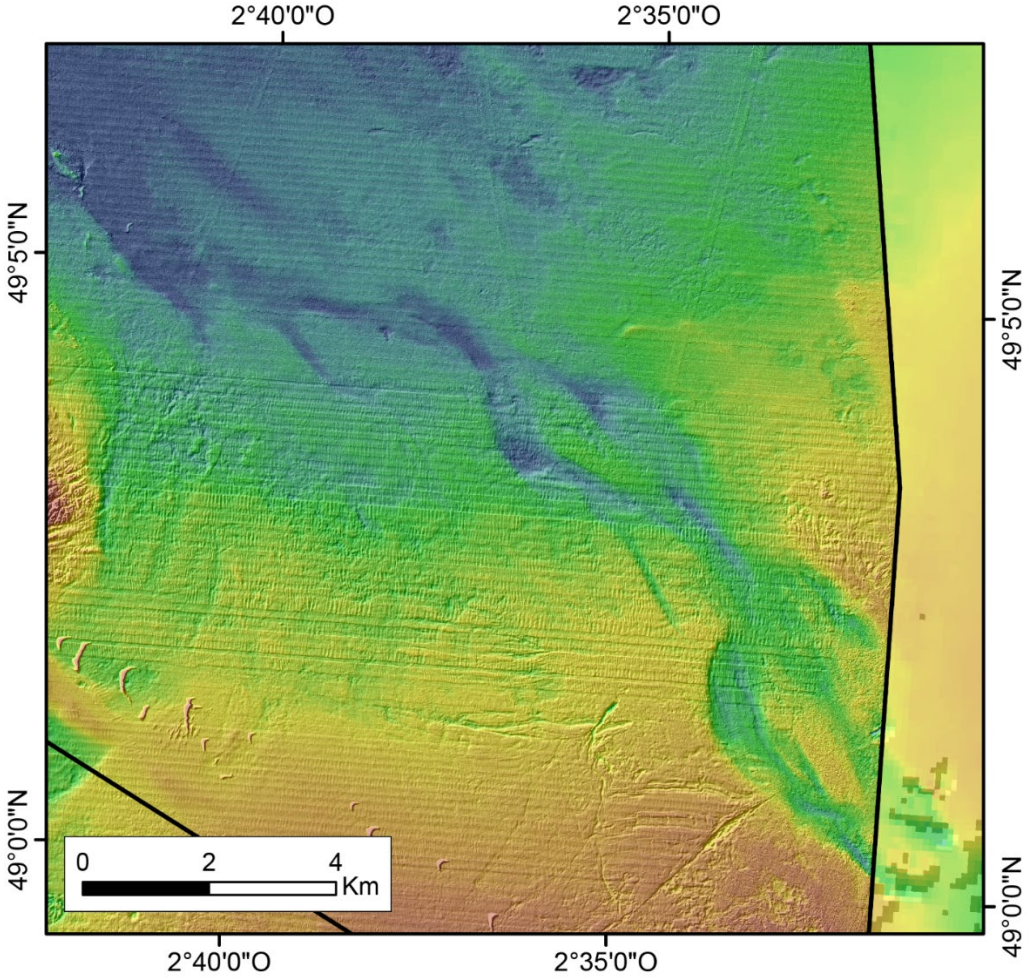


Figure 25 : Zoom sur les morphologies d'incisions sinueuses interprétées comme le tracé d'une paléovallée (fleuve Normand-Breton). Dégradé de couleur relatif à l'altitude en A (voir Figure 20). Le trait noir correspond à la limite de la macro-zone RD-BNE. Localisation du zoom en Figure 21.

- Des reliefs positifs sont également visibles dans les macro-zones et se présentent sous plusieurs formes (Figure 26).
    - Les premières sont ovoïdes plurikilométriques, d'allongement variable, peu rugueuses et d'une hauteur dépassant rarement les 5 m. Elles sont généralement localisées à proximité des reliefs et pointements rocheux rattachés au socle et sont interprétés comme des plaquages sédimentaires ou des **bancs sableux**. Leur orientation est E-O ou NO-SE.
    - Les deuxièmes sont des formes très allongées plus ou moins sinueuses et présentant pour chacune une crête marquée avec des orientations variables selon le secteur. Elles sont généralement groupées, organisées de manière parallèles, formant une sorte de chapelet, où elles sont parfois coalescentes et dont l'orientation globale en NO-SE. Ces reliefs sont typiques des **dunes sableuses** et sont déjà documentés dans des travaux régionaux sur la « Répartition des dunes du Plateau continental français » (SHOM, 2021a ; SHOM, 2021b). Elles sont principalement localisées sur la zone de plateforme et dans de rares cas dans les zones de pointements rocheux et sur les paléovallées pléistocènes. Leur hauteur peut atteindre les 10 m localement. Ces structures peuvent être isolées, jointives, ou se développer au sommet des bancs sableux (hors macro-zones).

Nous proposons ici d'associer ces deux types de formes en dépôts sédimentaires superficiels meubles d'âge **holocène**, principalement sableux, et possiblement soumis à des courants qui entrainent leur déplacement au court du temps. Sur ce point particulier de la mobilité des sédiments superficiels, une vérification sommaire a pu être réalisée sur un groupe réduit de dunes situé hors des macro-zones BNO et RD-BNE. Les données multifaisceaux acquises par le SHOM avec un intervalle de 12 à 13 ans (S200304900 et S201604000) ne présentent pas de décalage substantiel de ladite dune. Cette observation ne peut cependant pas être étendue régionalement et nécessitera une vérification dédiée.

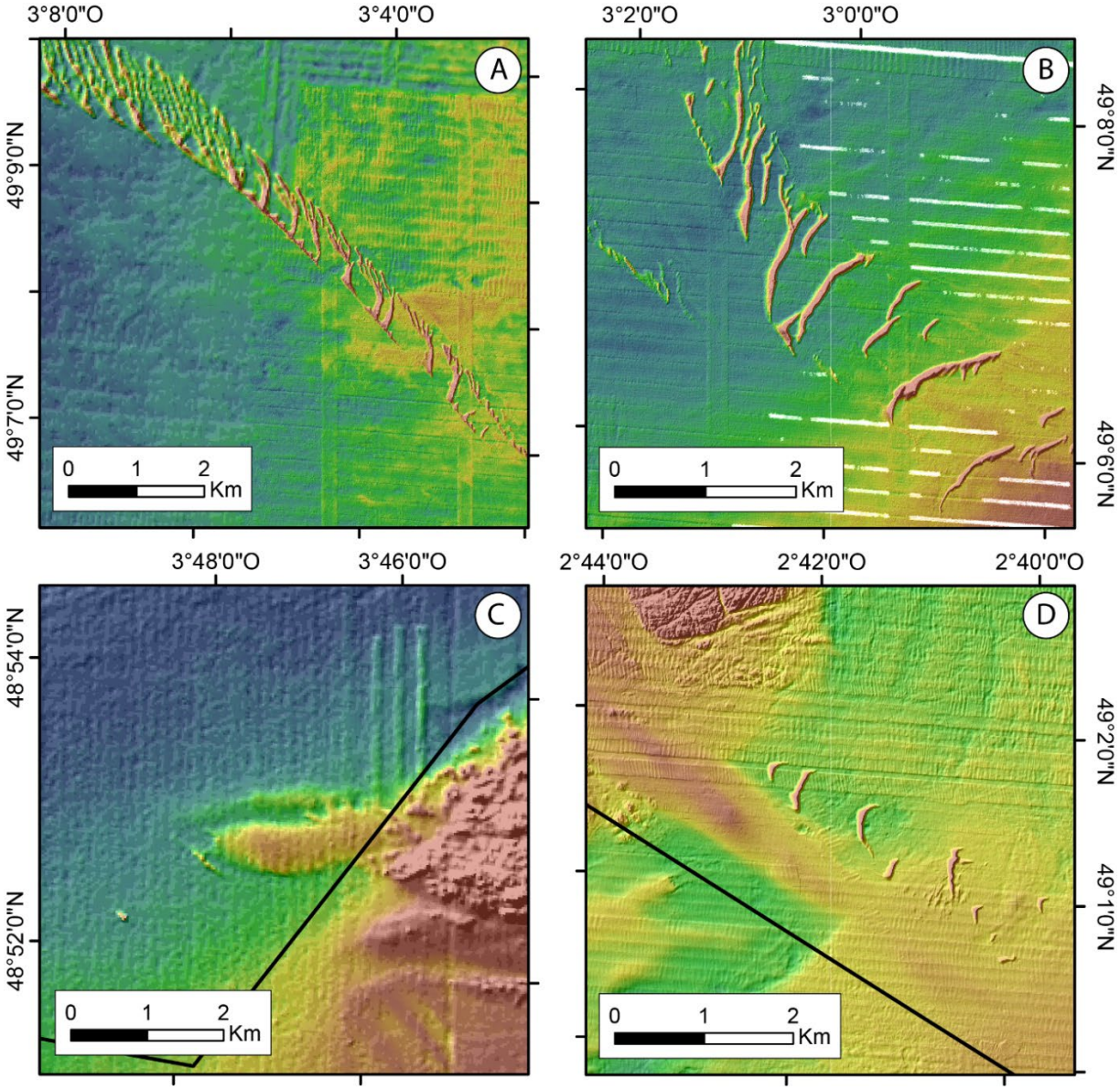


Figure 26 : Zooms sur les morphologies des sédiments superficiels meubles de types dunes et bancs sableux (A) : alignement NO-SE de dunes méridiennes kilométriques ; (B) : alignement NNO-SSE à NO-SE de dunes NE-SO plurikilométriques ; (C) : banc sableux E-O à l'ouest d'un pointement de socle ; (D) : banc NO-SE et alignement NO-SE de dunes NE-SO. Dégradé de couleur relatif à l'altitude (voir Figure 20). Le trait noir correspond au contour des macro-zones BNO (C) et RD-BNE (D). Localisation des zooms en Figure 21.

Les différents ensembles morphologiques décrits plus haut ont été détourés (dunes, bancs, pointements de socle, séries sédimentaires…) ou tracés (failles, fractures, stratification, filons). Les contours et linéaments ainsi obtenus ont intégré la cartographie géologique finale en permettant d'affiner le détail des limites d'unités lithostratigraphiques et les grandes structures tectoniques.

5.3. RESULTATS

5.3.1. Interprétation sismique

Une nouvelle carte géologique a été construite sur la base des pointés des horizons identifiés sur les profils sismiques, par l'interprétation de la morphologie du fond marin, par l'intégration des données lithostratigraphiques des prélèvements et par l'utilisation des cartes d'anomalie magnétique (Oehler et Lequentrec-Lalancette, 2019).

La carte présentée en Figure 27 montre la distribution des grandes coupes sismiques interprétées (Figure 28 à Figure 33) traversant les macro-zones BNO et RD-BNE, et permettant d'appréhender la géométrie des formations géologiques (socle, couverture, sédiments superficiels).

Sur chaque coupe sismique interprétée sont figurés (i) les âges stratigraphiques estimés d'après les études antérieures et échantillons pertinents disponibles, (ii) les failles, et (iii) 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 $m.s^{-1}$. 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.

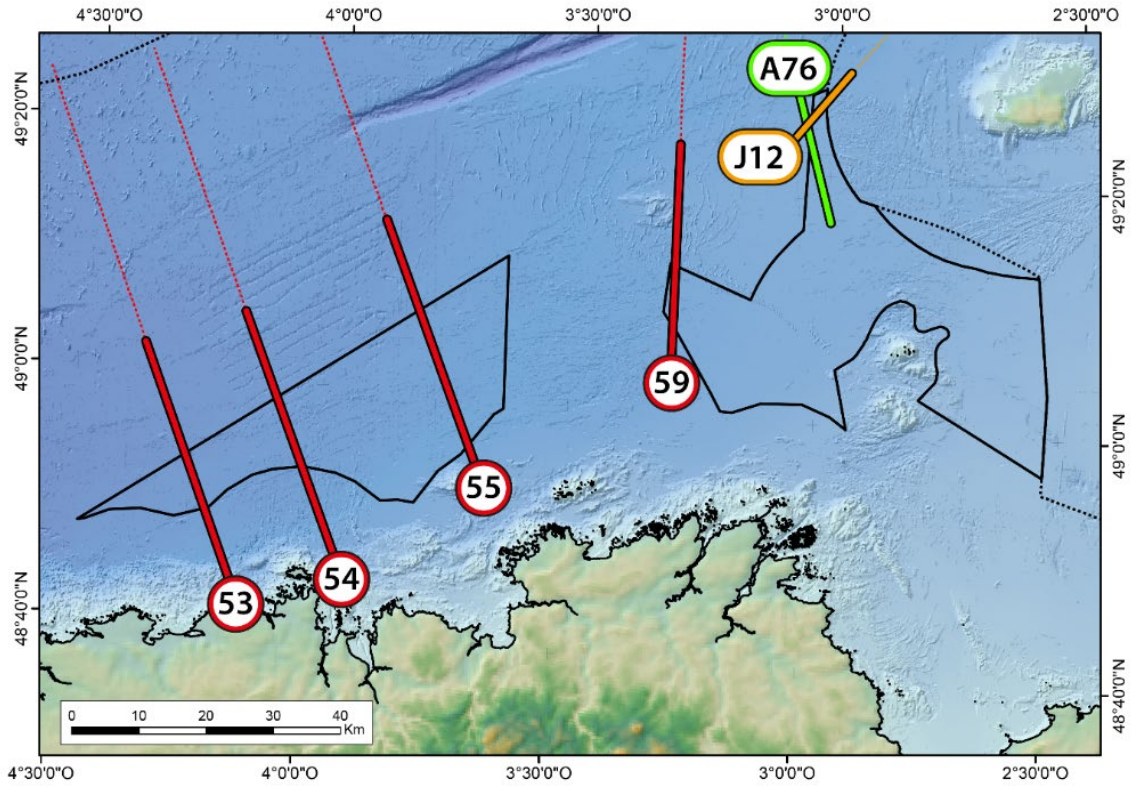
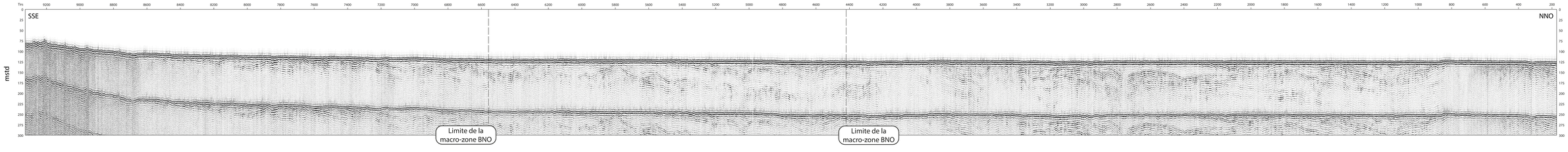
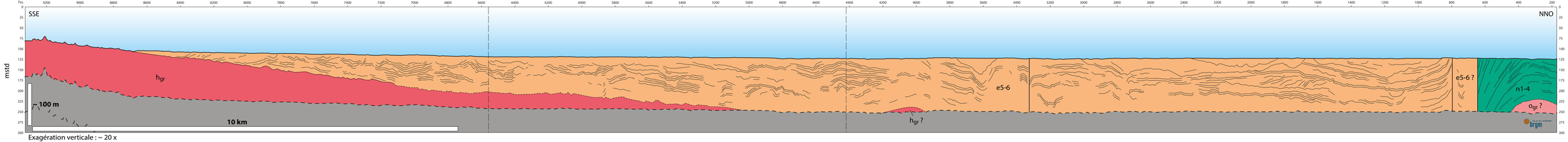


Figure 27 : Carte de localisation des 6 coupes sismiques interprétées provenant des campagnes ASTROLABE (en vert), GEOMANCHE 71 (orange) et GEOBREST 2003 (en rouge), et présentées dans les figures 28 à 33. Fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

Figure 28 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 53.





Exagération verticale : ~ 20 x

53

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbsit03_053c_1_GTS_MIGO gbsit03_053c_2_GTS_MIGO
Campagne :	GEOBREST 2003
Matériel :	Le Roy P., Thinon I. - doi.org/10.17600/17006700 Sparker SIG flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DCGS/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

Légende

Lithostratigraphie

- e5-6 — Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- n1-4 — Berriasien-Barrémien «wealdien»
- hgr — Carbonifère (granites)
- ogr — Ordovicien (granite)

Eléments structuraux

- Failles
- Multiples du fond

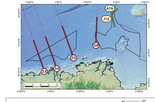
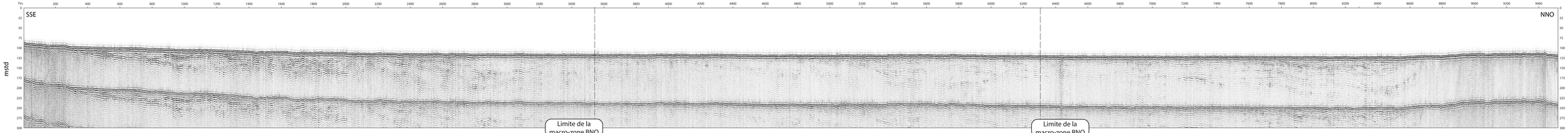
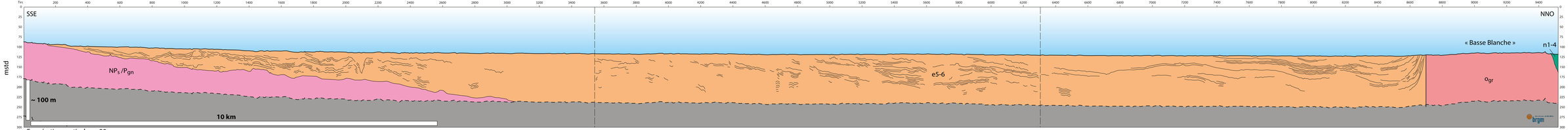


Figure 29 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 54.





Exagération verticale : ~ 20 x

54

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbs03_054_1_GTS_MGO gbs03_054_2_GTS_MGO
Campagne :	GEOSBEST 2003 Ea Mer 37 (Ifremer) - doi.org/10.17600/17006700
Matériel :	Sparker 5kJ flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DCGS/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

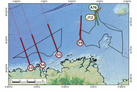
Légende

Lithostratigraphie

- e5-6 : Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- n1-4 : Berriasien-Barrémien «wealdien»
- hgr : Carbonifère (granites)
- ogr : Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
- NPs : Néoprotérozoïque (grès, schistes)
- Pgn : Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

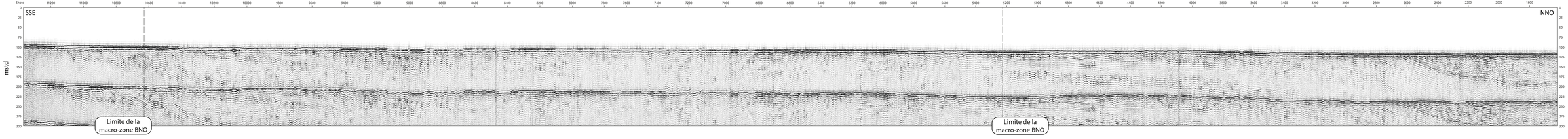
Eléments structuraux

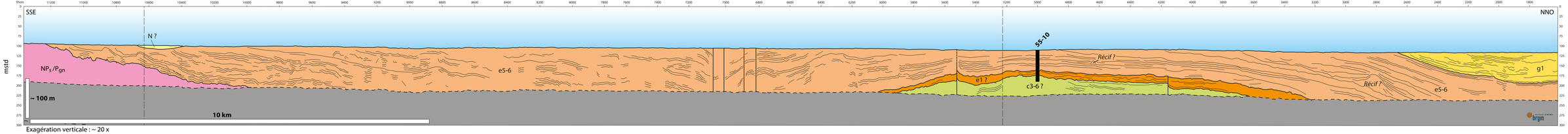
- Failles
- Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 30 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 55.





Exagération verticale : ~ 20 x

55

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbot03_055b_1_GTS_MIGO gbot03_055b_2_GTS_MIGO gbot03_055b_3_GTS_MIGO
Campagne :	GLORIMET 2003 Gulf of Lion Margin 1 - doi.org/10.17600/17006700
Matériel :	Sparker 5KJ flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DOCG/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DOCG/GSB)

Légende

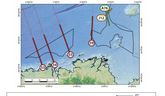
Lithostratigraphie

N	Néogène indifférencié probable
g1	Rupélien (calcaires)
e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
NPx	Néoprotérozoïque (grès, schistes)
Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

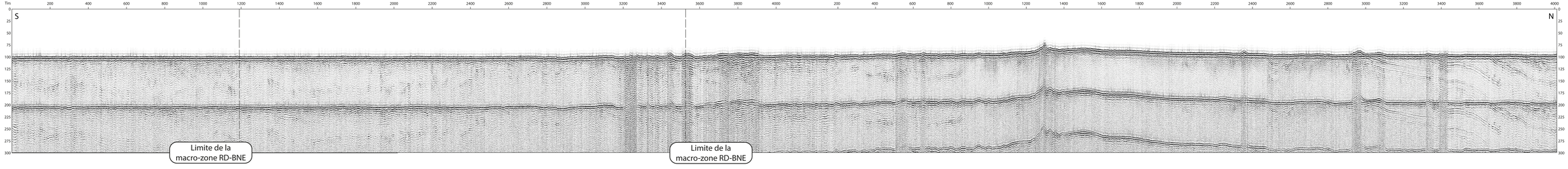
Failles

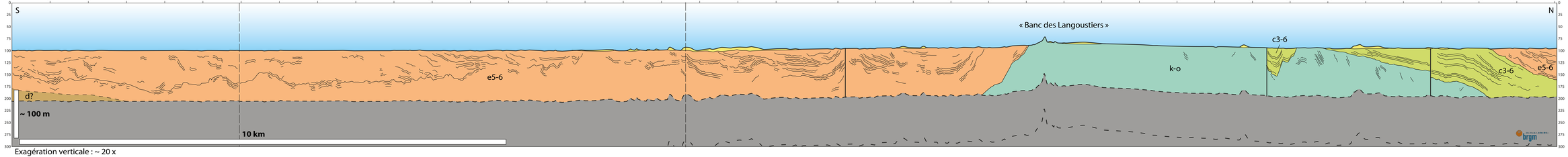
Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 31 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe 59.





Exagération verticale : ~ 20 x

59

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbst03_059_GT5_MIGO gbst03_059b_1_GT5_MIGO
Campagne :	GEOBREST 2003
Matériel :	(Le Roy P., Thinon I. - doi.org/10.17600/17006700) Sparker 5KJ flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DCGS/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

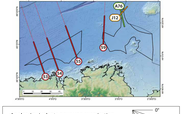
Légende

Lithostratigraphie

- Holocène (dunes et bancs sableux)
- e5-6 — Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- c3-6 — Coniacien-Maastrichtien (craie)
- d — Dévonien (schistes ardoisiers)
- k-o — Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)

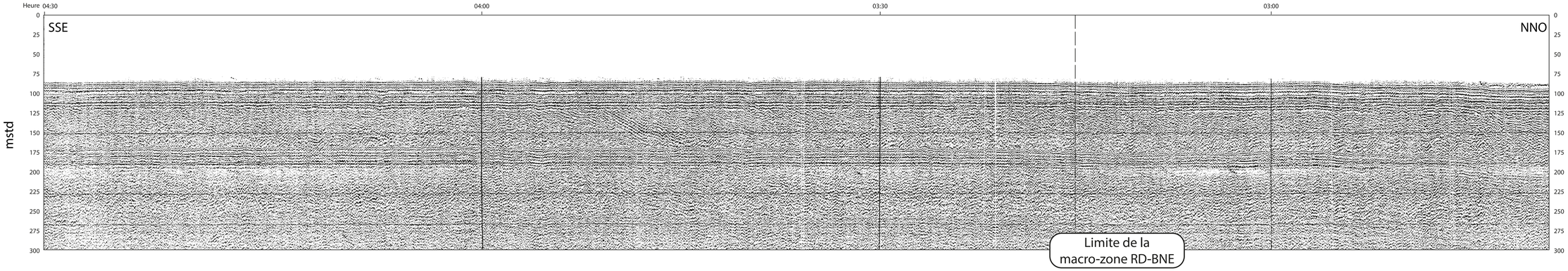
Eléments structuraux

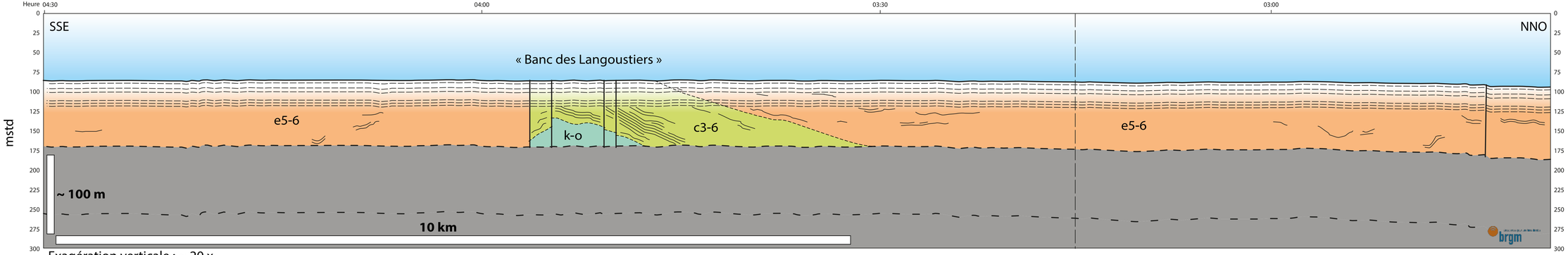
- Failles
- Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 32 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe A76.





Exagération verticale : ~ 20 x

A76

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: Scan ASTROLABE-1970_A76_F-A570P4.tif Scan ASTROLABE-1970_A76_F-A570P5.tif
Campagne :	ASTROLABE (Boillot G. - doi.org/10.17600/71000111)
Matériel :	Sparker SIG flûte monotrace
Traitement :	Impression directe à bord
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

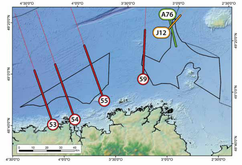
Légende

Lithostratigraphie

- e5-6 — Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- c3-6 — Coniacien-Maastrichtien (craie)
- k-o — Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)

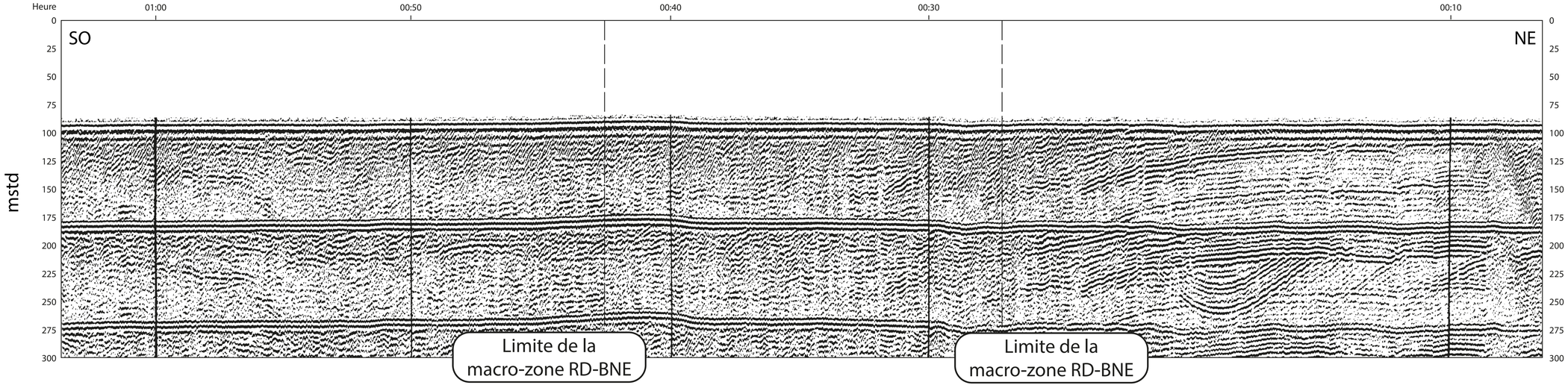
Eléments structuraux

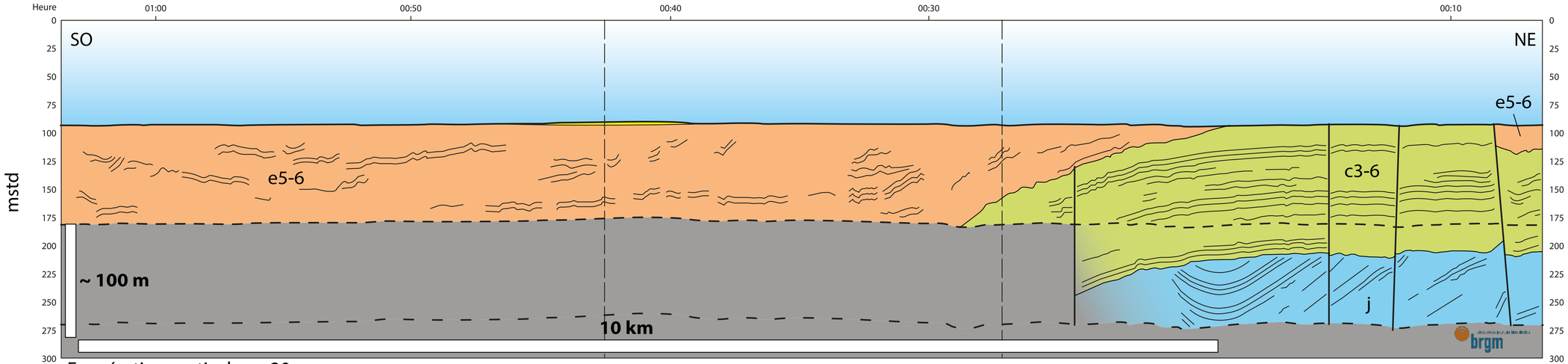
- Failles
- Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 33 : Profils sismiques brut (haut) et interprété en stratigraphie (bas) correspondant à la coupe J12.





Exagération verticale : ~ 20 x

J12

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: GEOMANCHE 71 - J12 Scan Geomanche71_J12_F-NO71AM6.tif
Campagne :	GEOMANCHE 71 (Horn R. - doi.org/10.17600/71000111)
Matériel :	Sparker SIG flûte monotrace
Traitement :	Impression directe à bord
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

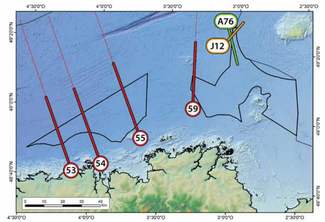
Légende

Lithostratigraphie

- N — Néogène indifférencié probable
- e5-6 — Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- c3-6 — Coniacien-Maastrichtien (craie)
- j — Jurassique (argilites et calcaires)

Eléments structuraux

- Failles
- Multiples du fond



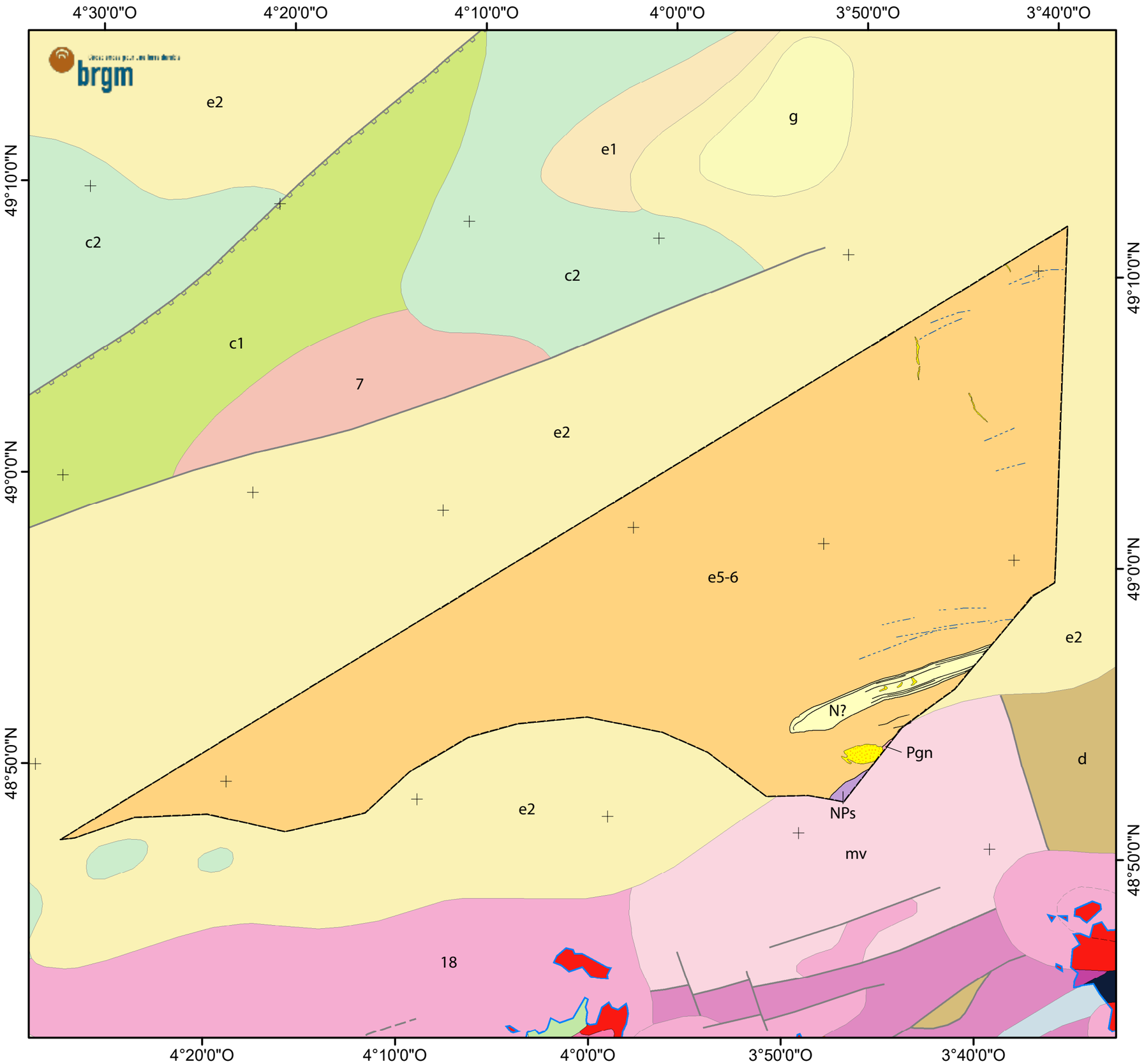
Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Les cartes géologiques révisées des macro-zones BNO et RD-BNE issues des travaux de la présente étude sont présentées de la Figure 34 à la Figure 37. Les cartes présentées en Figure 34 et Figure 36 représentent l'ensemble des unités stratigraphiques et incluent les dépôts superficiels (paléovallées, dunes et bancs sableux du Pléistocène et de l'Holocène) pour les macro-zones BNO et RD-BNE. Les cartes présentées en Figure 35 et Figure 37 sont des écorchés représentant les unités stratigraphiques sous le Pléistocène pour les macro-zones BNO et RD-BNE.

Figure 34 : Carte géologique de la macro-zone BNO au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux dépôts superficiels holocènes. Les sédiments superficiels ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique.

Carte géologique de la macro-zone Bretagne Nord Ouest

BRGM/RP-74348-FR



Auteur : Fabien PAQUET (BRGM)

1 : 250 000

0 5 10 15 20 Km

Projection : Lambert - RGF 93

Légende

Lithostratigraphie

Chantraine et al. (2003)		Cette étude	
			Holocène (dunes et bancs sableux)
			Pléistocène (paléovallées)
		N?	Néogène probable (Miocène ? - calcaires)
g		g1	Rupélien (calcaires)
e2		e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1		e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c2		c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
c1		n1-4	Berriasien-Barrémien «wealdien» (sables argileux)
18		h_{gr}	Carbonifère (granites)
d		d	Dévonien (schistes ardoisiers)
k-o		k-o	Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
b		NPs	Néoprotérozoïque - Briovérien (grès, schistes)
mv		Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

Faille

Faille supposée

Filon

Filon sous couverture

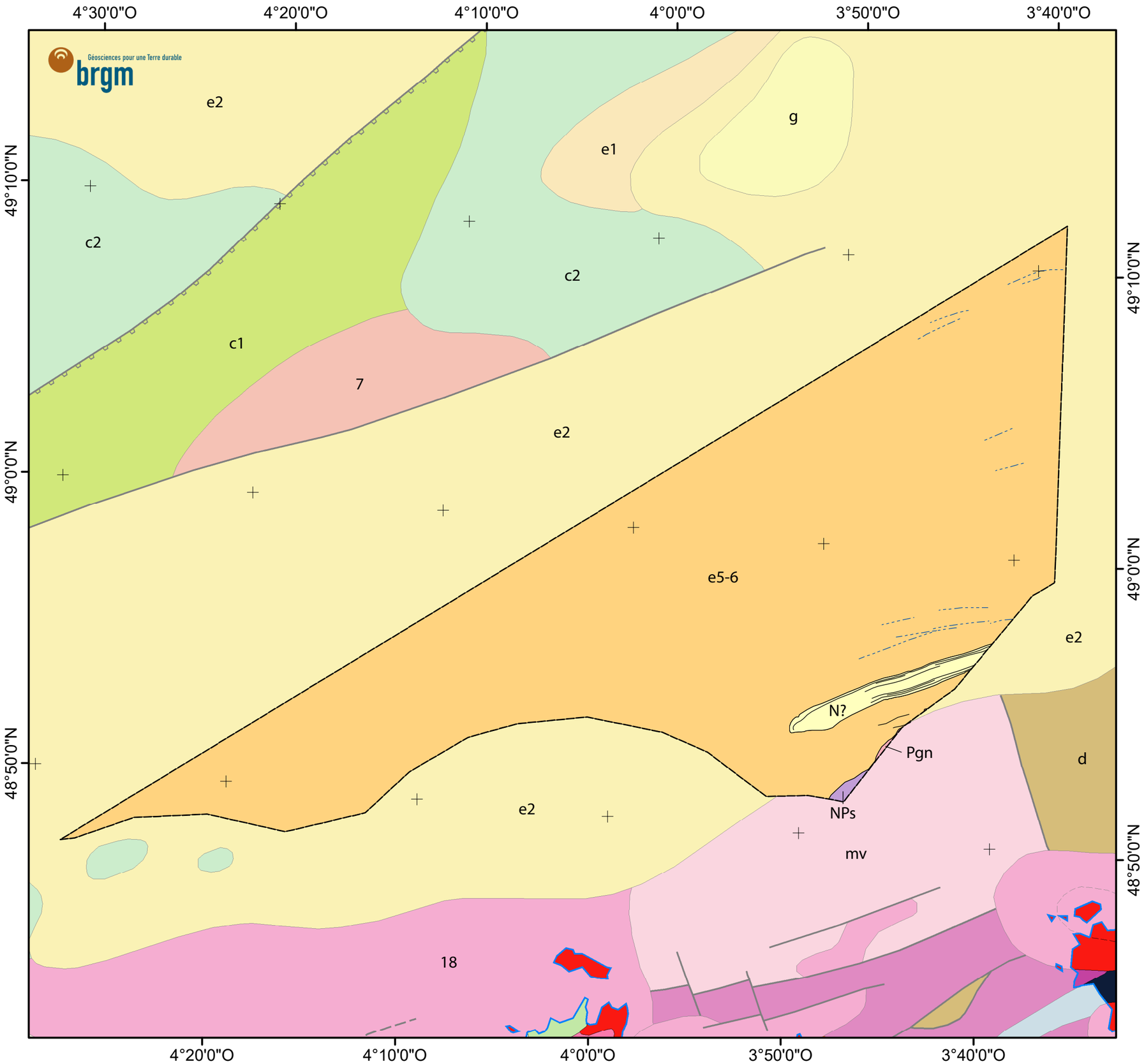
Stratification

Linéaments indéterminés

Figure 35 : Carte géologique de la macro-zone BNO au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux formations du Néogène.

Carte géologique de la macro-zone Bretagne Nord Ouest

BRGM/RP-74348-FR



Auteur : Fabien PAQUET (BRGM)

1 : 250 000

0 5 10 15 20 Km

Projection : Lambert - RGF 93

Légende

Lithostratigraphie

Chantraine et al. (2003)		Cette étude	
		Holocène (dunes et bancs sableux)	
		Pléistocène (paléovallées)	
		N?	Néogène probable (Miocène ? - calcaires)
g		g1	Rupélien (calcaires)
e2		e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1		e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c2		c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
c1		n1-4	Berriasien-Barrémien «wealdien» (sables argileux)
18		h_{gr}	Carbonifère (granites)
d		d	Dévonien (schistes ardoisiers)
k-o		k-o	Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
b		NPs	Néoprotérozoïque - Briovérien (grès, schistes)
mv		Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

Faille

Faille supposée

Filon

Filon sous couverture

Stratification

Linéaments indéterminés

Figure 36 : Carte géologique de la macro-zone RD-BNE au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux dépôts superficiels holocènes. Les sédiments superficiels ne sont représentés que lorsque leur épaisseur a permis leur détection en bathymétrie ou sur l'imagerie sismique.

Carte géologique de la macro-zone Roches Douvres - Bretagne Nord Est

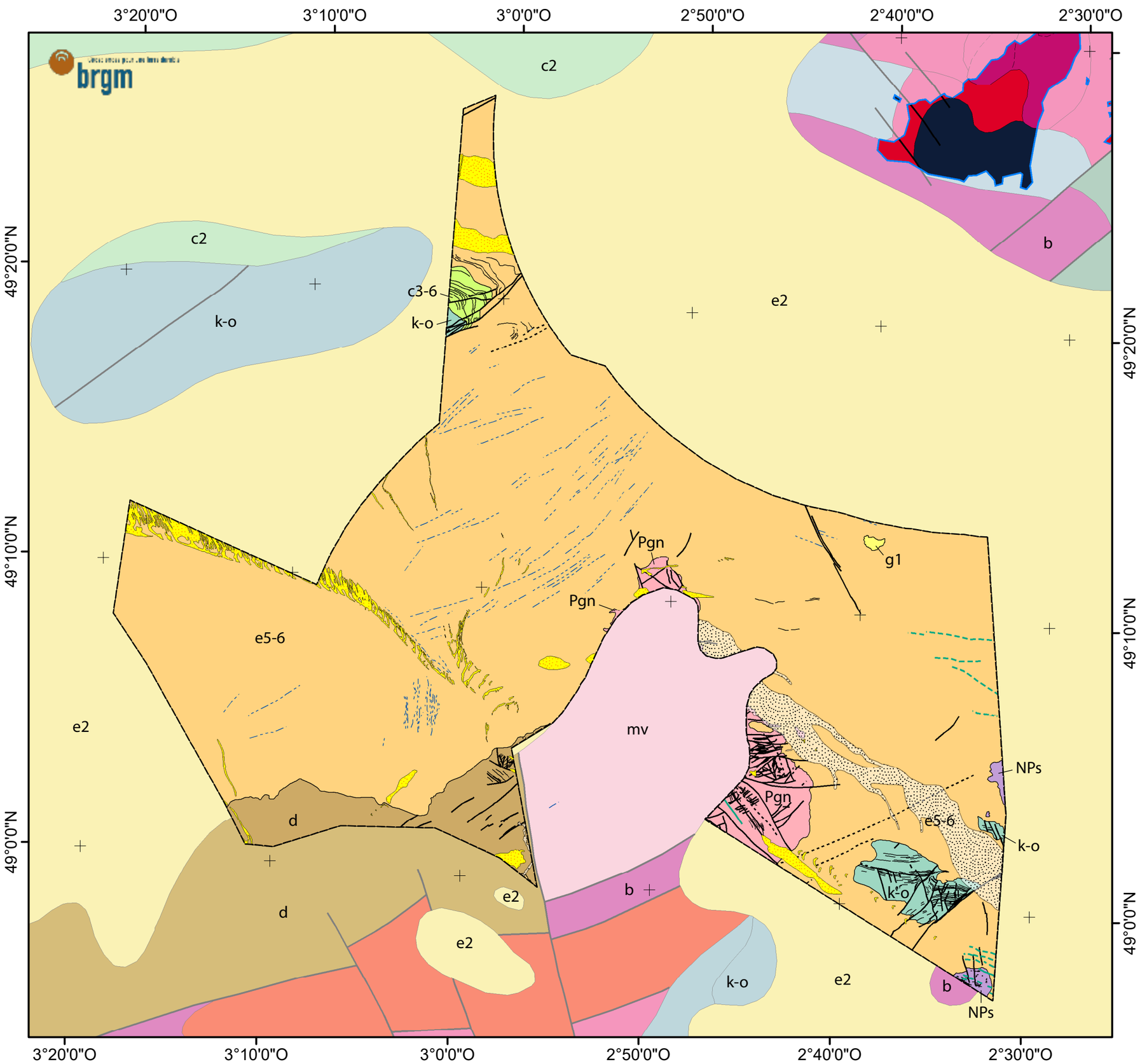
BRGM/RP-74348-FR

Auteur : Fabien PAQUET (BRGM)

1 : 250 000

0 5 10 15 20 Km

Projection : Lambert - RGF 93



Légende

Lithostratigraphie

Chantraine et al. (2003)		Cette étude	
			Holocène (dunes et bancs sableux)
			Pléistocène (paléovallées)
		N?	Néogène probable (Miocène ? - calcaires)
g		g1	Rupélien (calcaires)
e2		e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1		e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c2		c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
c1		n1-4	Berriasien-Barrémien «wealdien» (sables argileux)
18		h_{gr}	Carbonifère (granites)
d		d	Dévonien (schistes ardoisiers)
k-o		k-o	Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
b		NPs	Néoprotérozoïque - Briovérien (grès, schistes)
mv		Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

Faille

Faille supposée

Filon

Filon sous couverture

Stratification

Linéaments indéterminés

Figure 37 : Carte géologique de la macro-zone RD-BNE au 1/250 000 issue des travaux de la présente étude et montrant la répartition des unités lithostratigraphiques du socle protérozoïque jusqu'aux formations du Néogène.

Carte géologique de la macro-zone Roches Douvres - Bretagne Nord Est

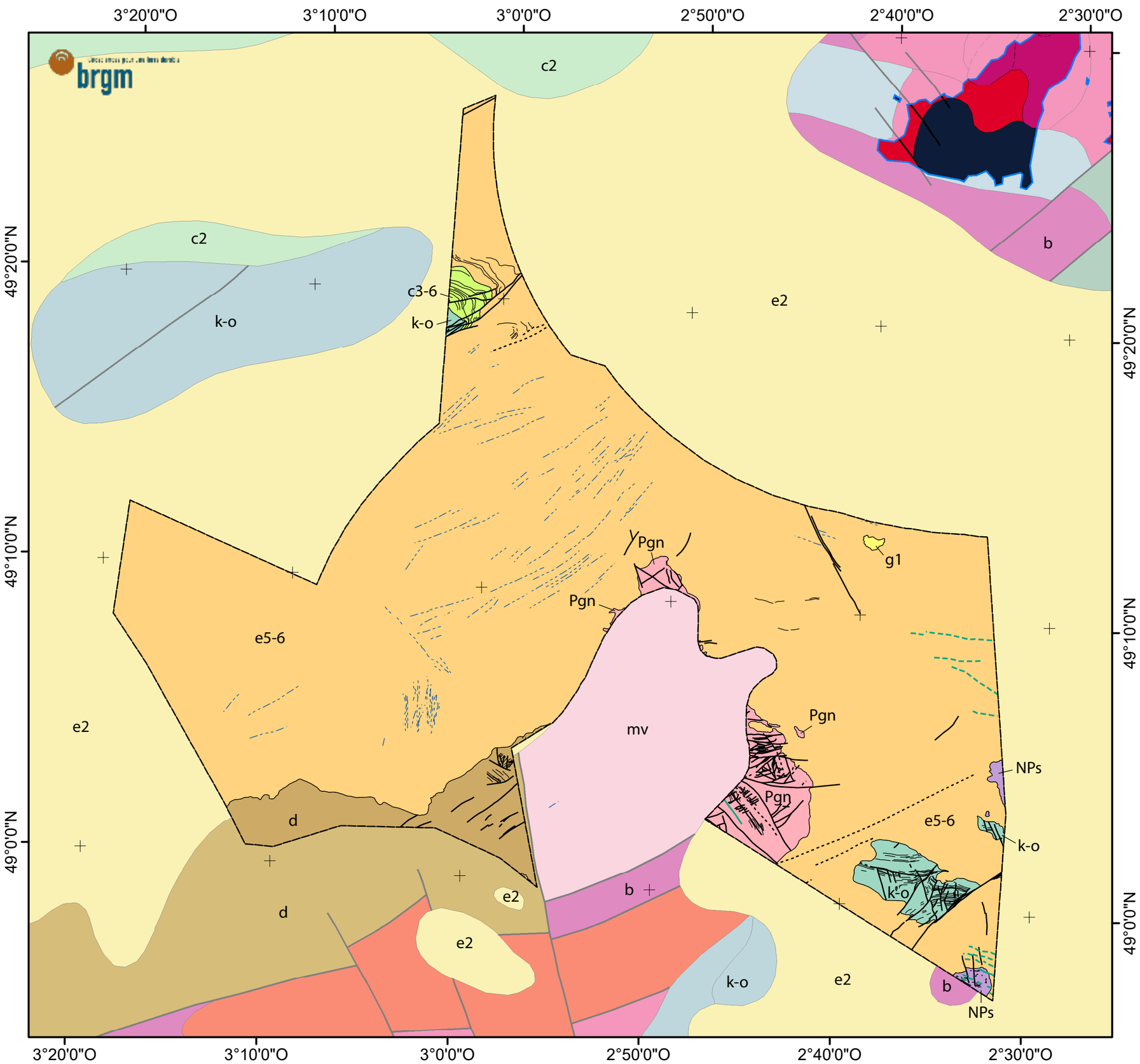
BRGM/RP-74348-FR

Auteur : Fabien PAQUET (BRGM)

1 : 250 000

0 5 10 15 20 Km

Projection : Lambert - RGF 93



Légende

Lithostratigraphie

Chantraine et al. (2003)		Cette étude	
			Holocène (dunes et bancs sableux)
			Pléistocène (paléovallées)
		N?	Néogène probable (Miocène ? - calcaires)
g		g1	Rupélien (calcaires)
e2		e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1		e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c2		c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
c1		n1-4	Berriasien-Barrémien «wealdien» (sables argileux)
18		h_{gr}	Carbonifère (granites)
d		d	Dévonien (schistes ardoisiers)
k-o		k-o	Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
b		NPs	Néoprotérozoïque - Briovérien (grès, schistes)
mv		Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

Faille

Faille supposée

Filon

Filon sous couverture

Stratification

Linéaments indéterminés

6. Lithologies du substratum rocheux

Les sections suivantes décrivent les lithologies potentiellement rencontrées sur chaque macro-zone par niveau stratigraphique. La charte chronostratigraphique produite par la Commission Internationale de Stratigraphie (ICS) est proposée en annexe 1 (Cohen et al., 2013 – mise à jour 2024).

6.1. MACRO-ZONE BNO

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 BNO et dans les cent premiers mètres du substratum correspondent à une couverture sédimentaire méso-cénozoïque sur des unités de socle protérozoïque à paléozoïque.

Cette section a pour objectif d'établir la variété des lithologies qui peuvent être rencontrées sur l'emprise de la macro-zone BNO sur la première centaine de mètres de substratum. Pour ce faire, les séries sédimentaires sont décrites par niveaux stratigraphiques, tel que retenu dans le travail de cartographie du chapitre 5. Les lithologies attribuées à ces unités sont basées sur (i) les échantillons géologiques prélevés in-situ, et (ii) sur la connaissance régionale issue de la synthèse des publications et cartes existantes, ainsi que sur l'interprétation des profils sismiques disponibles. Les lithologies principales des différents niveaux stratigraphiques des deux macro-zones sont présentées sous forme d'une coupe, synthétisant les observations issues de la littérature scientifique et de la présente étude (Figure 38 et Figure 39).

6.1.1. Socle

Le socle de la macro-zone BNO inclut les unités précambriennes-protérozoïques et paléozoïques impliquées ou résultant des cycles orogéniques cadomien (Néoprotérozoïque-Cambrien) et varisque (Paléozoïque). Ce socle est affleurant localement à l'extrémité sud-est de la macro-zone BNO et plus largement au sud de celle-ci. Les interprétations sismiques permettent de suivre le contact socle-couverture sous les dépôts postérieurs (coupes 53, 54 et 55 des Figures 28, 29 et 30). Ce contact est une discordance majeure, qui correspond au premier ordre à une surface de faible relief, légèrement pentée (< 1°) vers le nord ou nord-ouest. Cette faible pente résulte en un lent approfondissement des unités de socle sous la couverture sédimentaire (coupes 53 et 55). Ainsi, les unités suivantes pourraient être rencontrées dans les 100 premiers mètres de substratum dans la macro-zone BNO.

Nous attirons l'attention sur le manque d'informations concrètes (prélèvements rares) sur les différentes unités de socle à l'échelle régionale. La complexité structurale connue à terre ne transparaît pas en mer faute de données pertinentes, mais tout porte à croire, notamment au regard des variabilités morphologiques révélées par la bathymétrie multifaisceaux, que les unités et lithologies associées pourraient être plus variées que ce qui est présenté ci-dessous.

L'état d'altération du socle n'est pas connu mais quelques prélèvements de granites altérés ont été collecté régionalement.

- **Précambrien**
    - **Protérozoïque**
        - Le **Protérozoïque indifférencié (P_{gn})**, dont l'âge peut s'étaler jusqu'au Paléozoïque inférieur, est métamorphique. Il est retrouvé dans le sud-est de la macro-zone, où il est représenté par des **gneiss et leptynites**.
        - Le **Néoprotérozoïque sédimentaire (NP_s)**, d'âge **Briovérien** présumé est présent à proximité immédiate à l'ouest du P_{gn}, sans qu'une limite franche puisse être établie. Il est composé principalement de **schistes** (chloritoschistes), traduisant l'effet du métamorphisme.
        -
- **Phanérozoïque**
    - **Paléozoïque**
        -
        - Le **Dévonien (d)** sédimentaire faiblement métamorphisé est documenté au sud-est de la macro-zone BNO.
        - Son contact faillé NNO-SSE avec les unités métamorphiques protérozoïques (Lefort, 1975 ; Chantraine et al., 2003) est remis en question lors de l'établissement de la carte géologique de Perros-Guirec (Guennoc et al., 2015) ainsi que les interprétations pouvant être faites à partir de la bathymétrie. Le Dévonien est caractérisé par des **schistes, grès, quartzite et rares calcaires**. Sa présence est donc suspectée sous couverture au sein de la macro-zone.
        - Le **Carbonifère (h_{gr})** magmatique est documenté au sud et sud-ouest de la macro-zone (coupe 53). Il est caractérisé par des **granites et leucogranites** varisques.

6.1.2. Couverture méso-cénozoïque

La couverture sédimentaire méso-cénozoïque est présente au-dessus du socle cadomo-varisque de la Manche occidentale. D'un point de vue cartographique, la série cénozoïque (Eocène supérieur) domine la macro-zone. Néanmoins, la présence avérée de Danien et de Crétacé supérieur à l'ouest et au nord, et les interprétations sismiques réalisées dans la présente étude, permettent d'en suspecter la présence sous les séries cénozoïques. La présence de Crétacé inférieur sous-jacent n'est pas retenue car cette formation ne semble ne pas être préservée au sud de sa zone d'affleurement au centre de la Manche, le long des accidents structuraux d'Aurigny-Ouessant *s.l.*

Les analyses de la bathymétrie et l'interprétation de la sismique font ressortir un ensemble de stratifications s'étirant sur une quinzaine de kilomètres en ENE-OSO et apparemment concentriques. Si son apparence cartographique ressemble à un pli synclinal faiblement marqué, l'interprétation sismique invalide l'hypothèse structurale et semble être en faveur d'une incision et d'un remplissage pelliculaire postérieur à la série de l'Eocène supérieur. Cette configuration rappelle celle des dépôts d'âge néogène (Miocène à Pliocène) présents autour de l'Île d'Ouessant et possiblement à rapprocher des incisions et dépôts des fosses de la Manche.

L'état d'altération de la série sédimentaire n'est pas connu avec certitude mais des indices bathymétriques et la connaissance régionale permettent de supposer que les formations carbonatées ont pu subir des processus de dissolution. Ce point fait l'objet d'un paragraphe dédié dans le chapitre 7.

- **Phanérozoïque**
  - **Mésozoïque**
    - **Crétacé supérieur**
      - Le **Sénonien (c3-6 ; Coniacien-Maastrichtien)** est présent directement à l'ouest et au nord de la macro-zone BNO. A l'instar du reste de la région, il est reconnaissable en sismique par des réflecteurs continus et parallèles. Ce type de faciès a pu être retrouvé au niveau de la coupe 55, au niveau d'un large anticlinal faisant remonter la pile sédimentaire. S'il n'a pas été échantillonné ici, il présente principalement des lithologies de **craies**.

  - **Cénozoïque**
    - **Paléogène**
      - **Paléocène**
        - Le **Danien (e1)** est présent en Manche occidentale où il est décrit comme une série sédimentaire d'une trentaine de mètres, discordant sur le Sénonien et intercalé sous l'Eocène supérieur. Sa présence est proposée de manière hypothétique dans la partie orientale de la macro-zone BNO comme indiqué sur la coupe 55. Il est régionalement caractérisé par des **craies, marnes et argiles**.
      - **Eocène**
        - **Le Lutétien-Bartonien (e5-6)** représente l'essentiel du substratum de la macro-zone BNO, tant du point de vue cartographique, que dans les cent premiers mètres (coupes 53, 54 et 55). Il est caractérisé par des **calcaires tendres bioclastiques localement dolomitiques et plus ou moins gréseux**. L'interprétation sismique et la distribution des prélèvements n'a pas permis pour l'instant de déterminer des subdivisions au sein de cet ensemble. En effet, le faciès sismique et particulièrement chaotique avec des réflecteurs discontinus. Néanmoins, la coupe 55 montre des morphologies atypiques formant des reliefs localisés d'environ 10 à 20 m de hauteur à différents niveaux stratigraphiques et qui pourraient correspondre à des patchs récifaux. Cette interprétation est à vérifier mais aurait des implications quant à la variabilité latérale des faciès, lithologies et, *in fine*, des propriétés mécaniques.

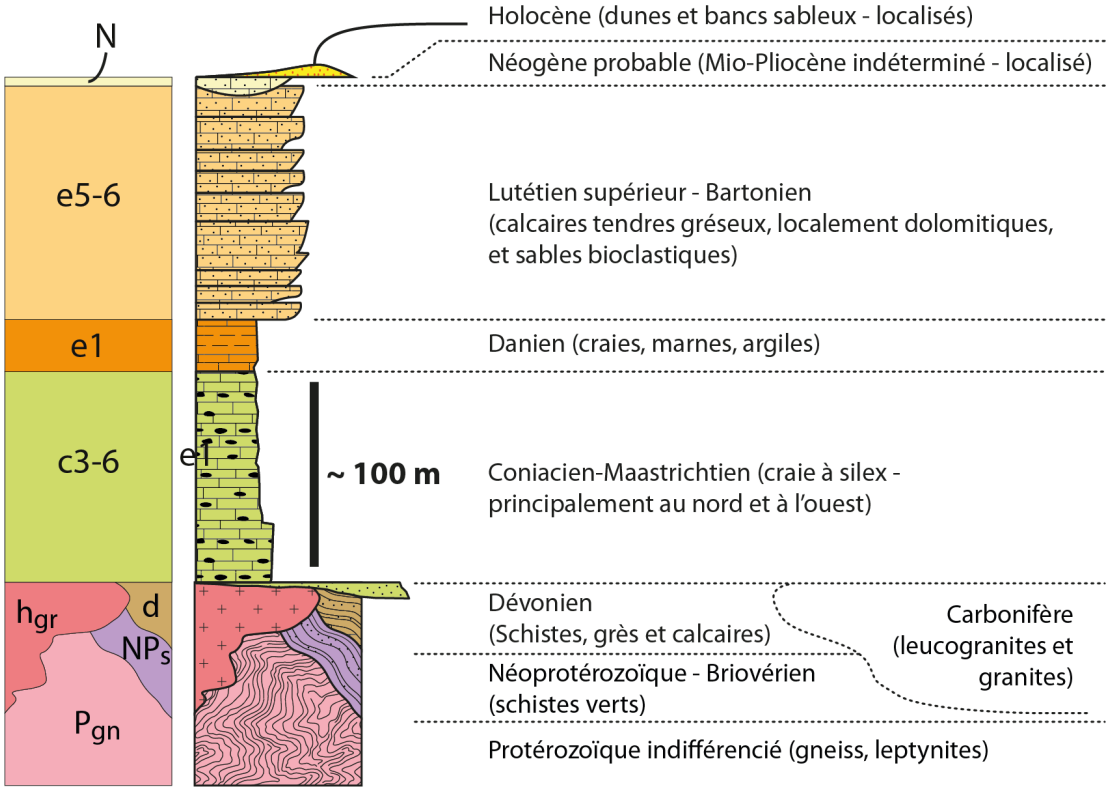


Figure 38 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées dans la macro-zone BNO au sein de chaque étage et sous-étage de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque, ainsi que dans les unités de socle.

6.2. MACRO-ZONE RD-BNE

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 RD-BNE et dans les cent premiers mètres du substratum correspondent à une couverture sédimentaire méso-cénozoïque sur des unités de socle protérozoïque à paléozoïque.

Cette section a pour objectif d'établir les différentes lithologies qui peuvent être rencontrées sur l'emprise de la macro-zone RD-BNE sur la première centaine de mètres de substratum. Pour ce faire, les séries sédimentaires sont décrites par niveau stratigraphique, 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, et (ii) sur la connaissance régionale issue de la synthèse des publications et cartes existantes, ainsi que sur l'interprétation des profils sismiques disponibles. Les lithologies principales des différents niveaux stratigraphiques sont présentées sous forme d'une coupe, synthétisant les observations issues de la littérature scientifique et de la présente étude (Figure 39).

6.2.1. Socle

Le socle de la macro-zone RD-BNE inclut également les unités précambriennes-protérozoïques et paléozoïques impliquées ou résultant des cycles orogéniques cadomien (Néoprotérozoïque-Cambrien) et varisque (Paléozoïque). Ce socle affleure localement dans le sud de la macro-zone RD-BNE, le long du contact régional socle-couverture, et sous la forme de pointements isolés.

Un autre pointement est également présent au nord de la macro-zone où il a pu être repéré sur les profils sismiques (coupes 59, A76 et J12 des Figures 31, 32 et 33). Les interprétations sismiques permettent de suivre le contact socle-couverture sous les dépôts postérieurs. A l'instar du socle de la macro-zone BNO, le contact socle-couverture est une discordance majeure et semble présenter une pente faible vers le nord (coupe 59), au moins dans la portion occidentale de la macro-zone. Le manque de profils sismiques exploitables sur le reste du secteur méridional ne permet pas de propager la morphologie à faible pente du contact à l'ensemble de la macro-zone. Le pointement de socle paléozoïque situé au nord de la macro-zone, dans le prolongement du « Banc des Langoustiers », semble être affleurant à la faveur du jeu de plusieurs failles. Ce pointement présente un contact à versant sud abrupt et à versant nord de faible pente, mais affecté par plusieurs failles (coupes 59 et A76).

De manière générale, les unités de socle décrites ci-après sont présentes en plusieurs endroits et peuvent également être rencontrées sous couverture, dans les 100 premiers mètres de substratum dans la macro-zone RD-BNE.

Nous attirons l'attention sur le manque d'informations concrètes (prélèvements rares) sur les différentes unités de socle à l'échelle régionale. Comme pour la macro-zone BNO, la complexité structurale connue à terre ne transparaît pas en mer faute de données pertinentes mais tout porte à croire, notamment au regard des variabilités morphologiques révélées par la bathymétrie multifaisceaux, que les unités et lithologies associées pourraient être plus variées que ce qui est présenté ci-dessous.

L'état d'altération du socle n'est pas connu mais quelques prélèvements de granites altérés ont été collecté régionalement.

- **Précambrien**
-
    - **Protérozoïque**
        - Le **Protérozoïque indifférencié (P_{gn})**, dont l'âge peut s'étaler jusqu'au Paléozoïque inférieur, est métamorphique et magmatique. Il est retrouvé en plusieurs endroits dans le sud de la macro-zone autour des Roches Douvres et du Plateau de Barnouic. Il est représenté par des **gneiss** (Barnouic) **et granites** (Roches Douvres).
        - Le **Néoprotérozoïque sédimentaire (NP_s)**, d'âge **Briovérien** présumé, est présent en pointement isolé dans l'extrême sud-est de la macro-zone où cette étude permet de préciser sa position. Il est également suspecté le long de la bordure est (frontière France-Iles Anglo-Normandes) une quinzaine de kilomètres plus au nord, sur la base de sa signature morphologique. Ces pointements n'ont pas été échantillonnés mais des prélèvements d'affleurements proches ont fourni des **schistes verts et des grès**.
- **Phanérozoïque**
    - **Paléozoïque**
        - Le **Cambrien-Ordovicien (k-o)** affleure dans deux secteurs de la macro-zone RD-BNE. Le premier, à l'extrême nord, est situé dans le prolongement du « Banc des Langoustiers ». Il est reconnu en sismique. Le deuxième secteur est situé au sud où des pointements ont été rattaché au Cambrien-Ordovicien sur la base (i) d'une stratification nette et

déformée caractéristique de ces séries en bathymétrie multifaisceaux, et (ii) sur la présence à proximité de prélèvements de cette période. La lithologie principale correspond aux **grés quartzitiques siliceux et/ou micacés, parfois argileux et de couleur rouge-rose**. Il est à noter que quelques échantillons régionaux ont produits des âges Ludlow (Silurien).

- Le **Dévonien (d)** sédimentaire faiblement métamorphisé est documenté au sud et sud-ouest de la macro-zone RD-BNE. Il est caractérisé par des **schistes ardoisiers**.
- Son contact faillé NNO-SSE avec les unités métamorphiques protérozoïques de Barnouic et Roches Douvres au NE (Lefort, 1975 ; Chantraine et al., 2003), qui forme la bordure de la macro-zone, peut être remis en question sur la base des interprétations des données bathymétriques.

6.2.2. Couverture méso-cénozoïque

La couverture sédimentaire méso-cénozoïque est présente au-dessus du socle cadomo-varisque de la Manche occidentale. D'un point de vue cartographique, la série cénozoïque (Eocène supérieur) domine la macro-zone. Néanmoins, la présence avérée de Crétacé supérieur au nord du « Banc des Langoustiers », et les interprétations sismiques et bathymétriques réalisées dans la présente étude, permettent d'établir sa présence, intercalé entre les séries cénozoïques et le socle Cambro-Ordovicien. Il apparaît ainsi cartographiquement au nord des failles NE-SO bordant le flanc sud du « Banc des Langoustiers ». La présence de Crétacé inférieur sous-jacent n'est pas retenue car il semble ne pas être préservé dans le secteur.

Le reste de la couverture sédimentaire de la macro-zone RD-BNE est dominé par les dépôts du Cénozoïque.

L'état d'altération de la série sédimentaire n'est pas connu avec certitude mais des indices bathymétriques et la connaissance régionale permettent de supposer que les formations carbonatées ont pu subir des processus de dissolution. Ce point fait l'objet d'un paragraphe dédié dans le chapitre 7.

- **Phanérozoïque**
  - **Mésozoïque**
    - **Crétacé supérieur**
      - Le **Sénonien (c3-6 ; Coniacien-Maastrichtien)** est présent directement au nord de la macro-zone RD-BNE. A l'instar du reste de la région, il est reconnaissable en sismique par des réflecteurs continus et parallèles. Ce type de faciès a pu être retrouvé au niveau des coupes 59, A76 et J12. Son épaisseur semble atteindre voire dépasser la centaine de mètres. Il n'a pas été formellement identifié au sud du « Banc des Langoustiers ». Les échantillons proches ont fourni des lithologies de **craies**.
  - **Cénozoïque**
    - **Paléogène**
      - **Paléocène**
        - Le **Danien (e1)** et présent en Manche occidentale où il est décrit comme une série sédimentaire d'une trentaine de mètres, discordant sur le Sénonien et intercalé sous

l'Eocène supérieur. Cependant, les occurrences de Danien ne semblent pas exister vers l'est et l'intérieur du Golfe Normand-Breton. Sa présence est donc considérée comme possible mais reste hypothétique et limitée de préférence à la partie occidentale de la macro-zone RD-BNE. Il est régionalement caractérisé par des **craies, marnes et argiles**.

-
  - **Eocène**
    - **Le Lutétien-Bartonien (e5-6)** représente l'essentiel du substratum de la macro-zone RD-BNE, tant du point de vue cartographique, que dans les cent premiers mètres (coupes 59, A76 et J12) où il a pu être identifié en sismique. Vers le sud, l'apparition progressive sur le fond marin des unités de socle laissent penser que son épaisseur se réduit progressivement. Cependant la géométrie du contact socle-couverture reste inconnue sur l'essentiel de la macro-zone. Le Lutétien-Bartonien est caractérisé par des **calcaires tendres bioclastiques, localement dolomitiques, et plus ou moins gréseux**. Comme pour la macro-zone BNO, l'interprétation sismique et la distribution des prélèvements n'a pas permis pour l'instant de déterminer des subdivisions au sein de cet ensemble. Les morphologies interprétées comme de possibles récifs autour de la macro-zone BNO n'ont pas été clairement vu ici, vraisemblablement du fait de la faible densité des profils sismiques. Leur présence et les implications en termes de variabilité lithologique et mécanique ne peuvent donc pas être écartées.
  - **Oligocène**
    - Le **Rupélien (g1)** a été prélevé et cartographié dès les années 1970 sous la forme d'un rémanent de quelques kilomètres carrés à une dizaine de kilomètres au NE des Roches Douvres. L'absence de profils sismiques recoupant ce secteur limite la caractérisation de l'Oligocène. Néanmoins, la bathymétrie multifaisceaux montre une zone entourée de dépressions en chapelet et formant un relief à l'apparence d'une butte témoin (Figure 23 B), dans laquelle se localise le prélèvement unique de Rupélien (Oligocène inférieur). La lithologie collectée est une **argile verte**. La proximité de failles NNO-SSE déduites de la bathymétrie multifaisceaux et situées à l'ouest de l'affleurement d'Oligocène peut être avancée pour expliquer la préservation de celui-ci par déformation et abaissement du compartiment ENE.

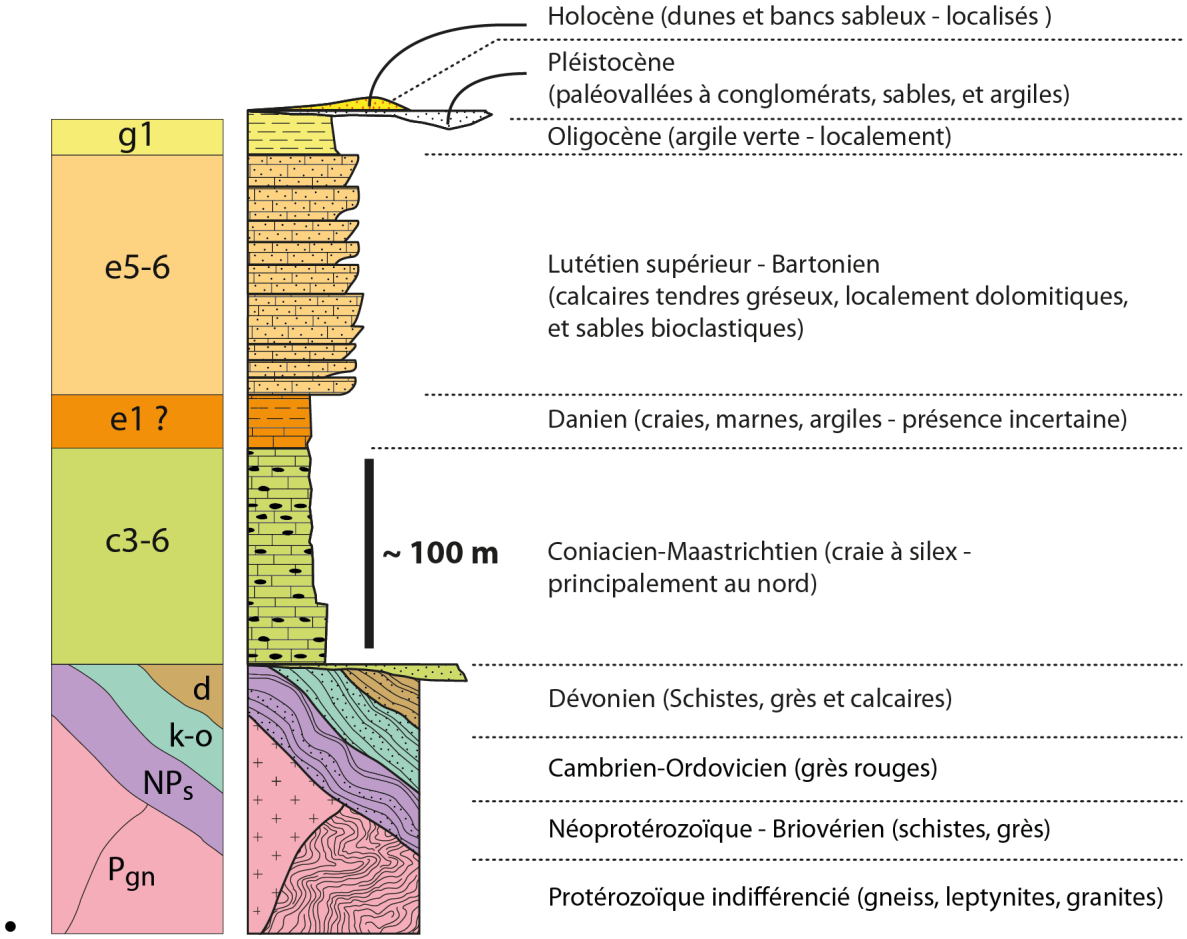


Figure 39 : Colonne lithostratigraphique présentant les lithologies principales rencontrées dans la macro-zone RD-BNE, au sein de chaque étage et sous-étage de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque, ainsi que dans les unités de socle.

7. Aléas géologiques des macro-zones BNO et RD-BNE

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 des macro-zones BNO et RD-BNE.

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 sont accompagnés de recommandations.

7.1. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE ET ALEA SISMIQUE

7.1.1. Analyses des données sismologiques

a) Compilation et catalogue de sismicité régionale

L'étude de la sismicité autour des deux macro-zones RD-BNE et BNO se centre sur un rayon de 200 km. Pour cela, il est nécessaire de compiler des catalogues de référence de la France et de la Grande Bretagne.

Côté français, le catalogue de référence est le FCAT17 (Manchuel et al., 2018) qui inclut le catalogue de sismicité historique SISFRANCE (https://www.sisfrance.net) ainsi que le catalogue instrumental SI-HEX pour la période 1962-2009 (Cara et al., 2015). La magnitude de ce catalogue est homogénéisée en magnitude de moment Mw. Ce catalogue est complété avec le catalogue du BCSF-Rénass (https://renass.unistra.fr/fr/zones/france/) pour la période 2010-2024 exprimé en magnitude locale Ml. Côté britannique, le catalogue de référence est celui du British Geological Survey (https://www.earthquakes.bgs.ac.uk), qui permet de couvrir la zone au-delà du canal de la Manche. La magnitude de ce catalogue est une magnitude locale ML. La conversion de magnitude locale ML en magnitude de moment Mw n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude.

La Figure 40 montre l'année à partir de laquelle le catalogue est complet en fonction de la magnitude, c'est à dire, à partir de quelle année le catalogue contient tous les évènements à partir d'une magnitude donnée.

La complétude est le nombre cumulé d'évènements en fonction du temps et selon un seuil de magnitude dans la zone d'étude (200 km de rayon autour des macro-zones BNO et RD-BNE).

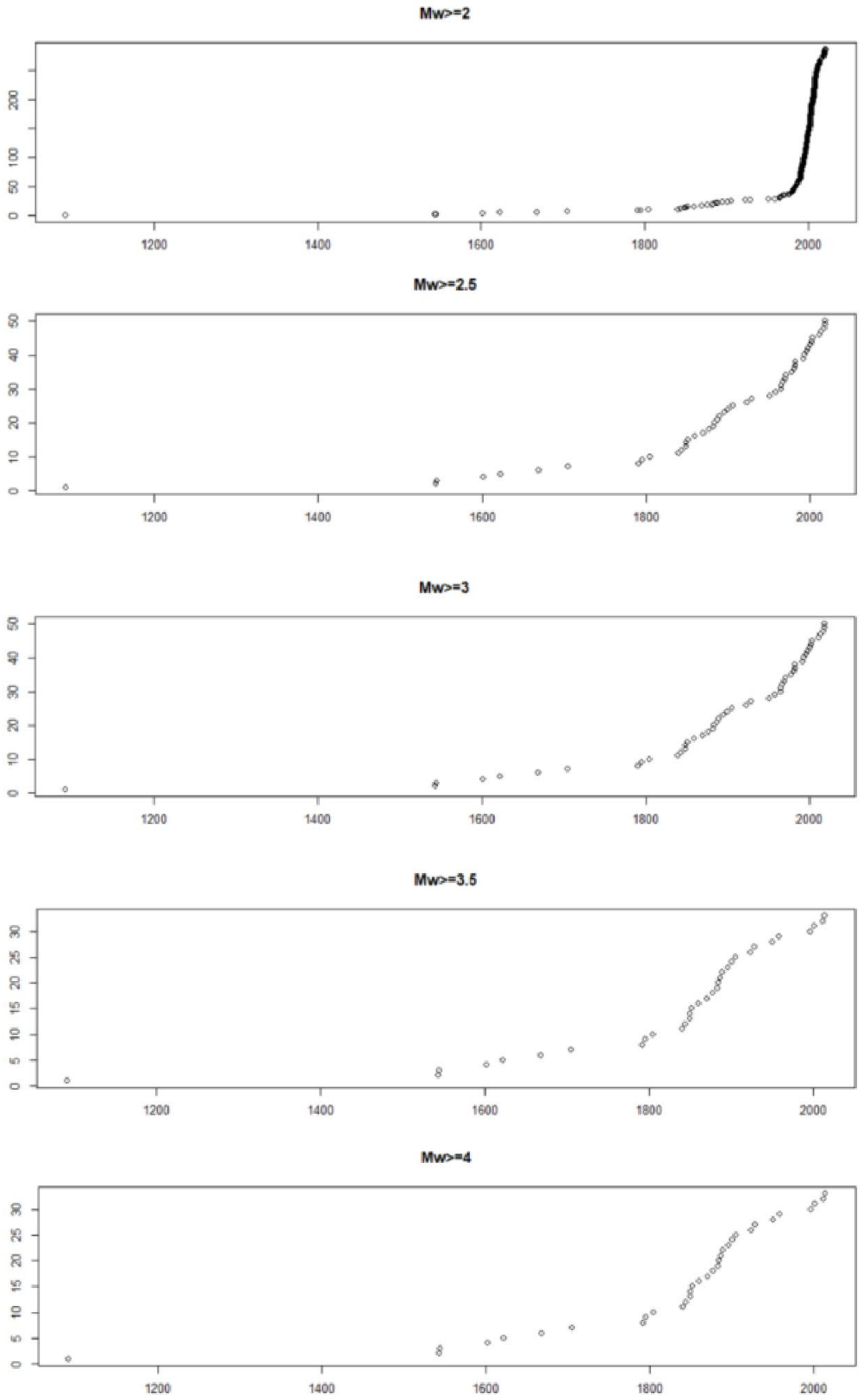


Figure 40 : Evolution temporelle de la complétude du catalogue de sismicité en fonction de la magnitude.

La zone d'intérêt, délimitée sur la Figure 41 et la Figure 42 par un périmètre noir, compte 3267 séismes d'origine naturelle et de magnitude comprise entre 0 et 5.5. Le premier séisme rapporté date du 2 novembre 1091, à proximité de Granville (France). Environ 305 séismes de magnitude égale ou supérieur à 3.0 (potentiellement ressentis par la population) sont répertoriés dans le catalogue sur cette zone. A noter que 90% de la sismicité présente des magnitudes faibles (M<3).

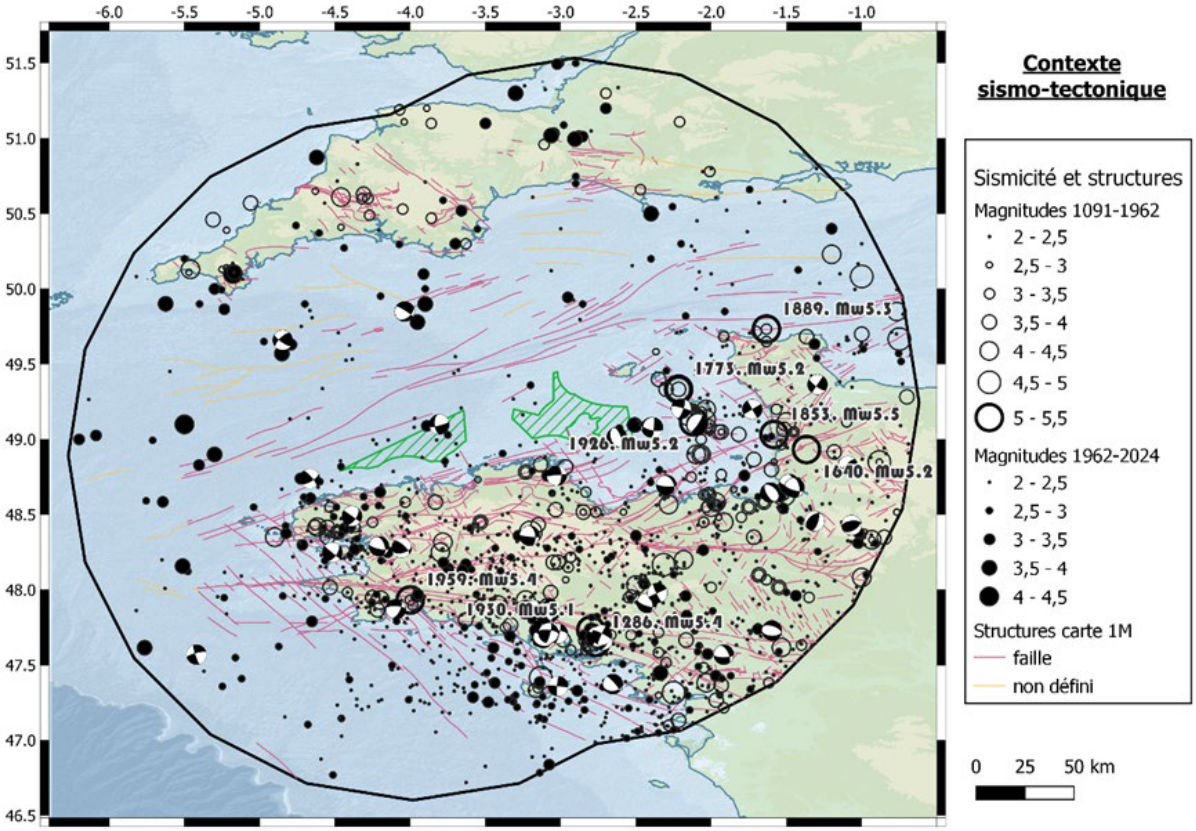


Figure 41 : Sismicité naturelle 1091-2024 et structures extraites des compilations régionales (Chantraine et al., 2003), sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023). Les mécanismes au foyer sont issus de la compilation menée par Mazotti et al. (2021).

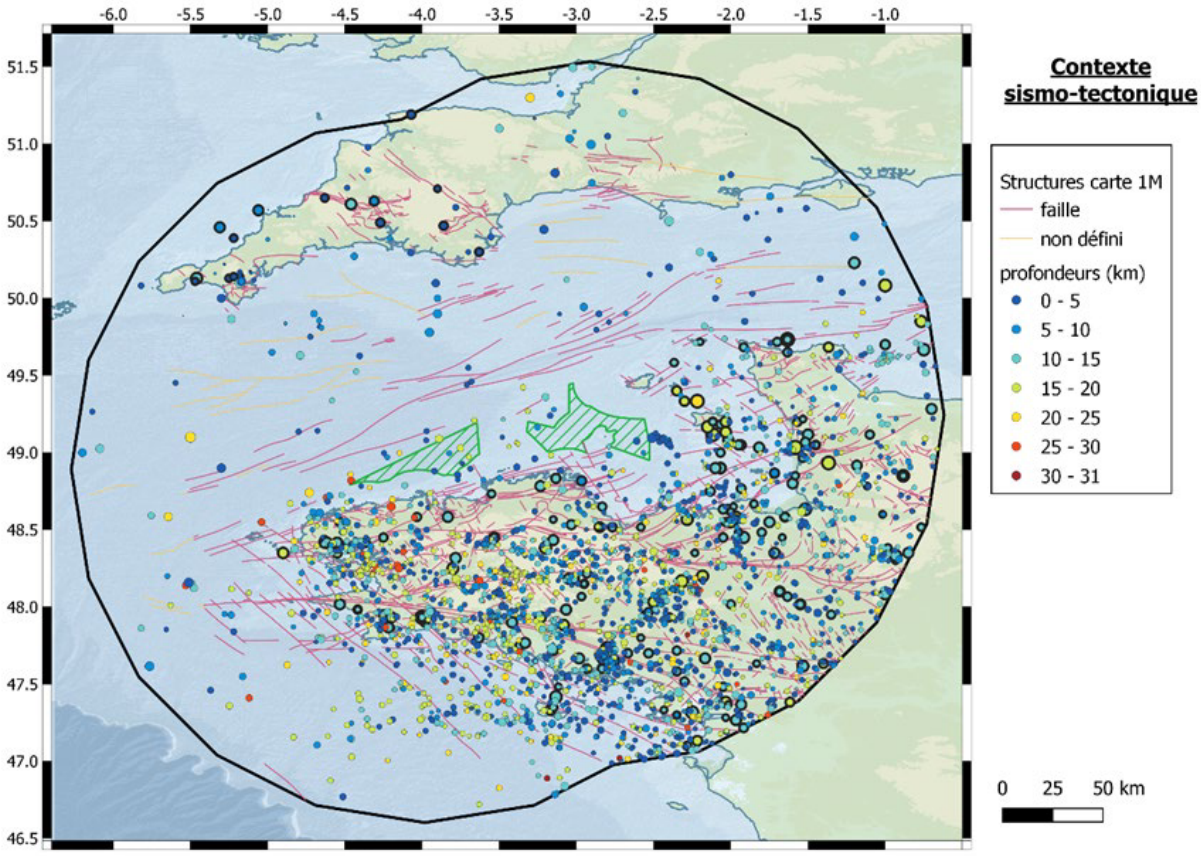


Figure 42 : Sismicité naturelle de la zone d'intérêt. Les épicentres sont représentés en fonction de la profondeur des séismes. Les séismes historiques sont identifiés par un cercle noir épais. Fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023).

La sismicité liée aux explosions et tirs de carrière est importante dans cette zone (Figure 43). Au cours de la période 2021-2024 le BCSF-RENASS a recensé 2500 tirs de carrière ainsi que 94 explosions. Parmi ces séismes anthropiques, 171 se situent à moins de 50 km des macro-zones RD-BNE et BNO dont environ 30 explosions situées en mer ou proche de la côte.

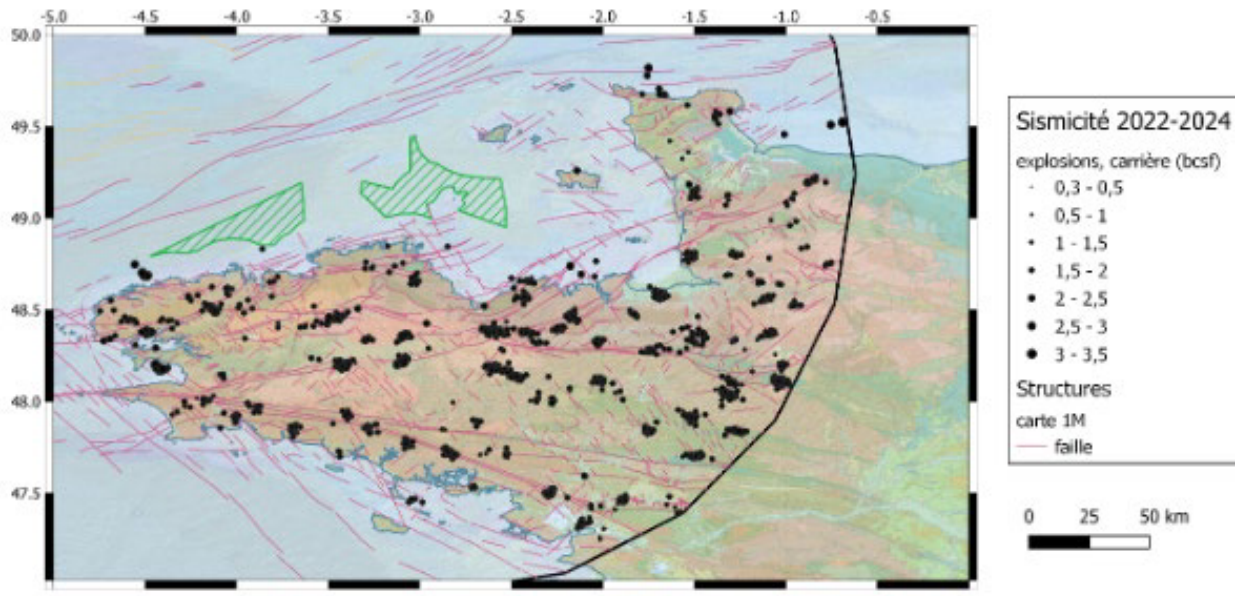


Figure 43 : Sismicité anthropique associée à des tirs de carrières et des explosions et répertoriée entre 2021 et 2024 par le BCSF-RENASS. Le fond de carte représente la carte géologique au millionième (Chantraine et al., 2003).

b) Description de la sismicité régionale

La zone d'intérêt de la présente étude s'inscrit dans le contexte géodynamique du Massif armoricain. Trois domaines peuvent y être distingués, héritage des phases d'orogène qu'a subi la région. Les systèmes de faille héritées des phases d'orogène ont déjà été réactivées, en fonction de l'évolution du champ de contrainte régional, qui au fil du temps peut devenir compatible avec la géométrie des structures et permettre à ces dernières de devenir actives (e.g. Beucler et al., 2021). Le champ de contrainte actuel est marqué par la continuation de la convergence entre l'Afrique et l'Europe.

La sismicité régionale, considérée comme faible à modérée est cependant marquée par des zones plus sismiques, en particulier au sud du Massif armoricain, avec une bande de sismicité remarquable, étendue suivant une direction NO-SE, depuis l'Ouest de la Bretagne jusqu'au sud des Pays de Loire (Figure 44). Dans la zone d'intérêt (Bretagne et presqu'île du Cotentin en incluant les zones côtières, le plateau continental, la Manche et la Cornouaille), la sismicité est relativement diffuse et non homogène (Figure 42). Des séismes sont cependant répertoriés sur l'ensemble de la zone : en Bretagne, dans la presqu'île du Cotentin, et, dans une moindre mesure, en Cornouaille et dans la Manche, où la sismicité répertoriée est plus éparse et d'intensité plus faible (faible activité sur la période d'observation, pas de séismes de magnitude supérieure à 4.5). Le sud du Massif armoricain, la presqu'île du Cotentin et le nord-est de la Bretagne sont associés à une sismicité légèrement plus intense, où se localisent les plus grands événements s'étant produits dans la région. Les séismes majeurs de la région se sont produits pendant la période historique et sont associés à des niveaux de confiance relativement bas, en particulier en ce qui concerne les séismes historiques dont l'épicentre était en mer ou proche des côtes, comme le séisme de Jersey en 1926, celui de Coutances en 1853 ou celui de Cherbourg en 1889 (magnitudes respectives 5.2, 5.5 et 5.3, Tableau 1).

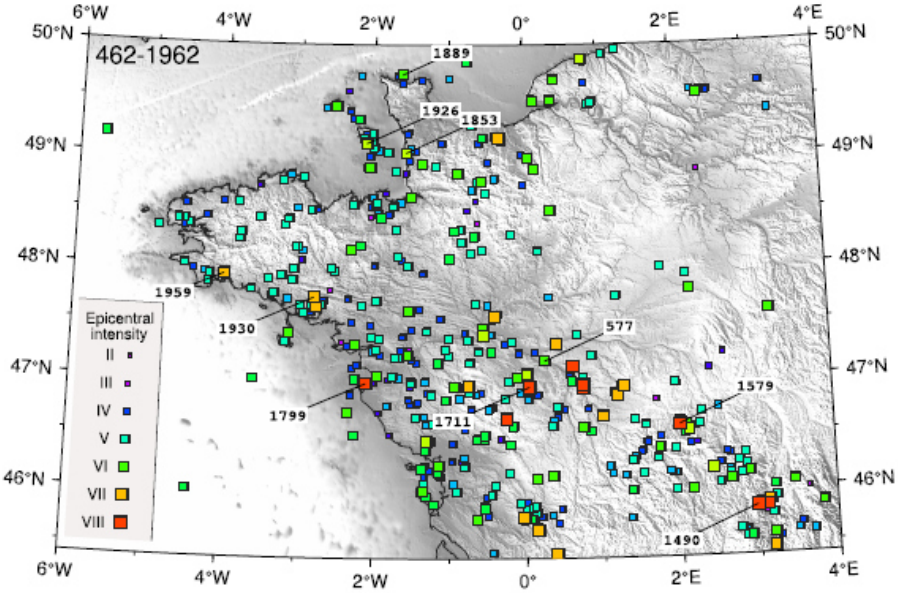


Figure 2. Historical (www.sisfrance.net) seismicity between 462 and 1962. Only earthquakes discussed in the text are labeled.

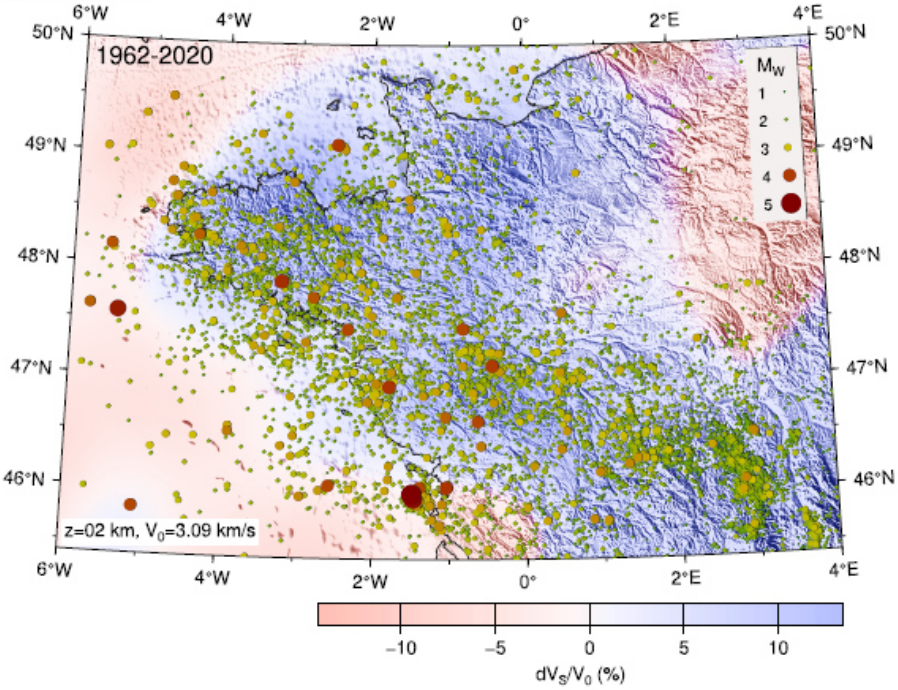


Figure 3. Instrumental seismicity from 1962 to 2020 [Cara et al., 2015 for 1962–2009 and a unified catalog for 2010–2020]. The background color scale represents V_S perturbations at 2 km depth [Gaudot et al., 2021].

Figure 44 : Activité sismique du nord-ouest de la France, d'après Beucler et al. (2021).

Beucler et al. (2021) soulignent le fait que la connaissance de la sismicité historique de la Bretagne pourrait vraisemblablement être améliorée dans la mesure où la construction du catalogue de sismicité historique Sisfrance a été particulièrement centré autour des régions où des installations nucléaires étaient présentes, ce qui n'est pas le cas de la Bretagne. Les séismes en mer ou côtiers sont par ailleurs particulièrement mal contraints sur la période historique. En outre, l'amélioration du réseau d'observation sismologique régional n'est que récente, la

connaissance du comportement sismogène de la Bretagne et régions avoisinantes n'est encore que partielle (Beucler et al., 2021).

c) Description de la sismicité à proximité de la zone d'étude

La sismicité à proximité immédiate ou sur les macro-zones RD-BNE et BNO est principalement diffuse avec des magnitudes relativement faibles (M≤3), à l'exception d'un cluster de sismicité à l'est de RD-BNE qui a eu lieu principalement en 2014 avec un évènement de M=4.0 qui a eu lieu le 11/07/2014.

Dans la zone de l'étude, plusieurs évènements de magnitude M≥ 5.0 ont eu lieu (Tableau 3) localisés principalement au niveau du Cisaillement Sud Armoricain et à l'est de la macro-zone RD-BNE. Les évènements les plus proches géographiquement (1773 et 1926) se trouvent au niveau des îles Anglo-Normandes.

Tableau 3 : Liste des séismes de magnitude Mw≥5.0 dans un rayon de 200 km autour des macro-zones RD-BNE et BNO.

Année	Mois	Jour	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Magnitude (Mw)	Profondeur (km)	Distance de BNE (km)	Distance de BNO (km)	Région de l'épicentre
1853	4	1	-1.58	49.03	5.5 ± 0.3	18	70	150	Côte des Iles
1286	8	30	-2.77	47.65	5.4 ± 0.5	14	145	155	Bretagne sud
1959	1	2	-4	47.93	5.4 ± 0.2	10	135	100	Bretagne sud
1889	5	30	-1.63	49.73	5.3 ± 0.3	20	90	160	Cotentin
1640	7	6	-1.37	48.93	5.2 ± 0.4	18	85	165	Coutances
1773	4	23	-2.22	49.33	5.2 ± 0.4	21	28	105	Îles Anglo-Normandes
1926	7	30	-2.12	49.12	5.2 ± 0.4	16	30	110	Îles Anglo-Normandes
1930	1	9	-2.8	47.73	5.1 ± 0.2	12	140	145	Bretagne sud

Le séisme du 30/07/1926 (Mw=5.2) se localise à 30 km à l'est de la macro-zone RD-BNE (Figure 45). Il est connu grâce à 328 observations macrosismiques qui vont de Nantes à Londres et de Brest à Paris. Dans ce cas, l'épicentre semble assez bien contraint avec une incertitude pouvant atteindre 10-20 km.

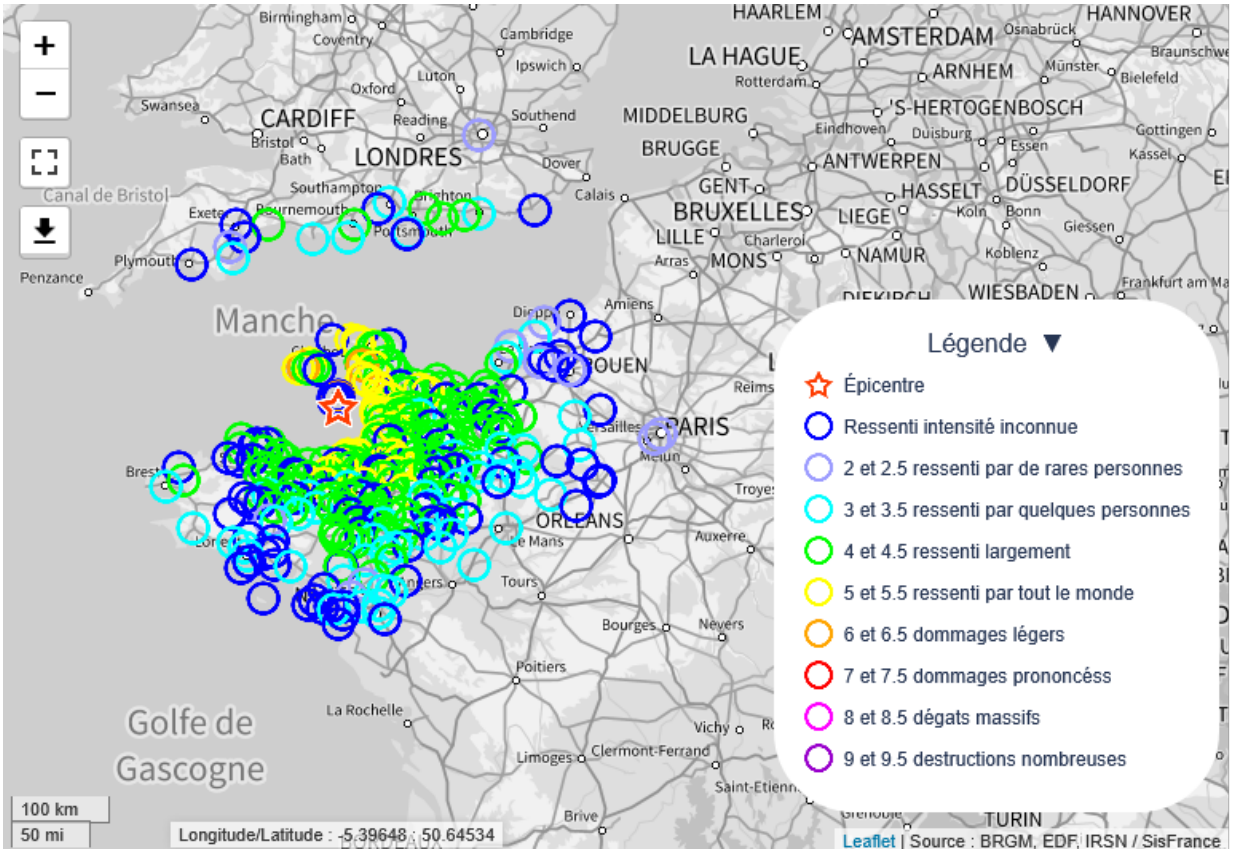


Figure 45 : Observations macrosismiques et épicentre macrosismique du séisme du 30/07/1926 (Mw=5.2) extrait de la base de données SISFRANCE.

Le séisme du 23/04/1773 (Mw=5.2) se localise à 28 km à l'est de la macro-zone RD-BNE (Figure 46). Dans ce cas et à la différence du précédent, il est connu grâce à seulement 8 observations macrosismiques situés dans le golfe de Saint-Malo ce qui implique une grande incertitude de la localisation de l'épicentre.

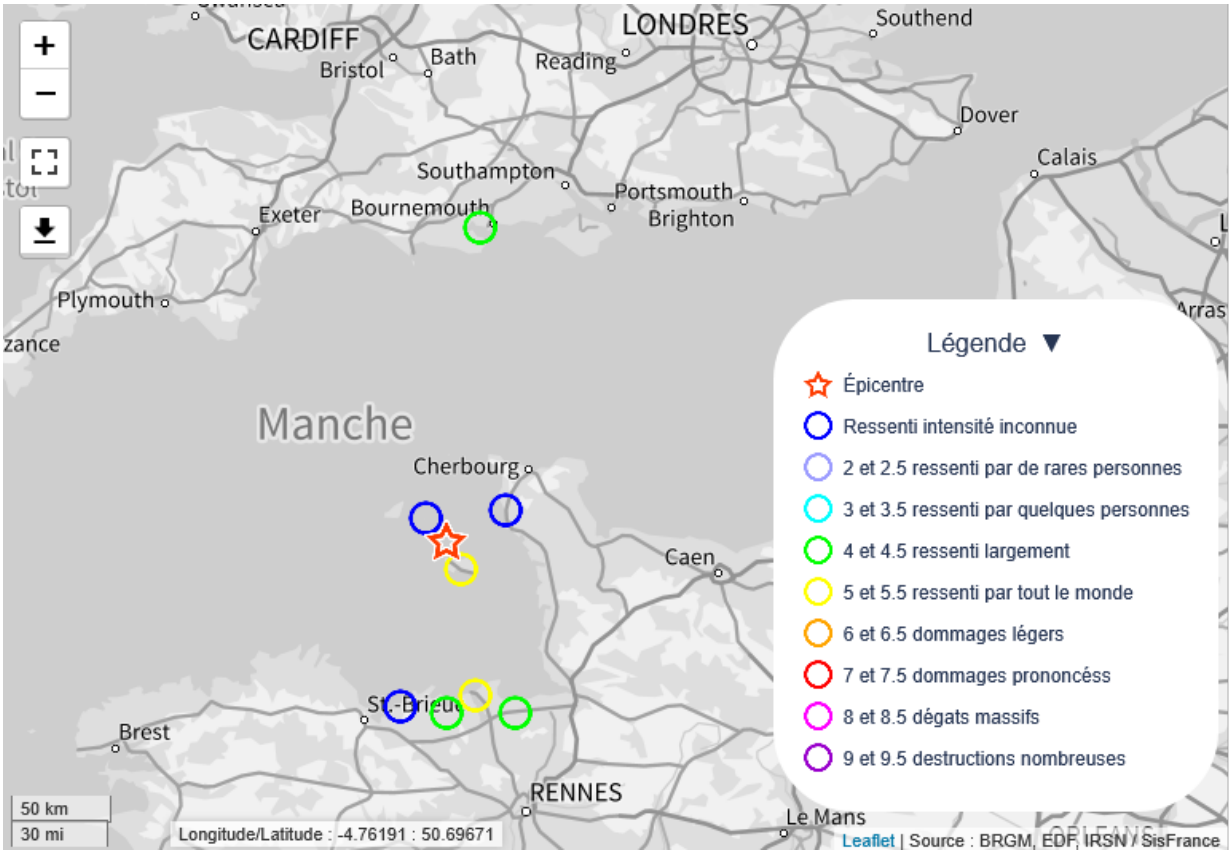


Figure 46 : Observations macrosismiques et épicentre macrosismique du séisme du 23/04/1773 (Mw=5.2) extrait de la base de données SISFRANCE.

d) Description des zones sismotectoniques à proximité des zones d'études

En aléa sismique, le zonage sismotectonique définie des zones où le contexte tectonique, la distribution des séismes et le niveau d'aléa sont considérés comme homogènes. Le dernier zonage sismotectonique à l'échelle de la France Métropolitaine est réalisé par Baize et al. (2013). D'après ce zonage, la zone BNO se trouve sur la zone Armorique Ouest (V-05) et la zone RD-BNE se trouve à cheval entre la zone Armorique Ouest (V-05) et la zone appelée Domaine Domnonéen (V-06) (Figure 47). Ces deux zones ont une histoire géologique similaire et une activité sismique faible. La limite entre les deux zones est donnée par la faille Quessoy-Nort-sur-Erdre considérée active par la BDFA (Jomard et al., 2017).

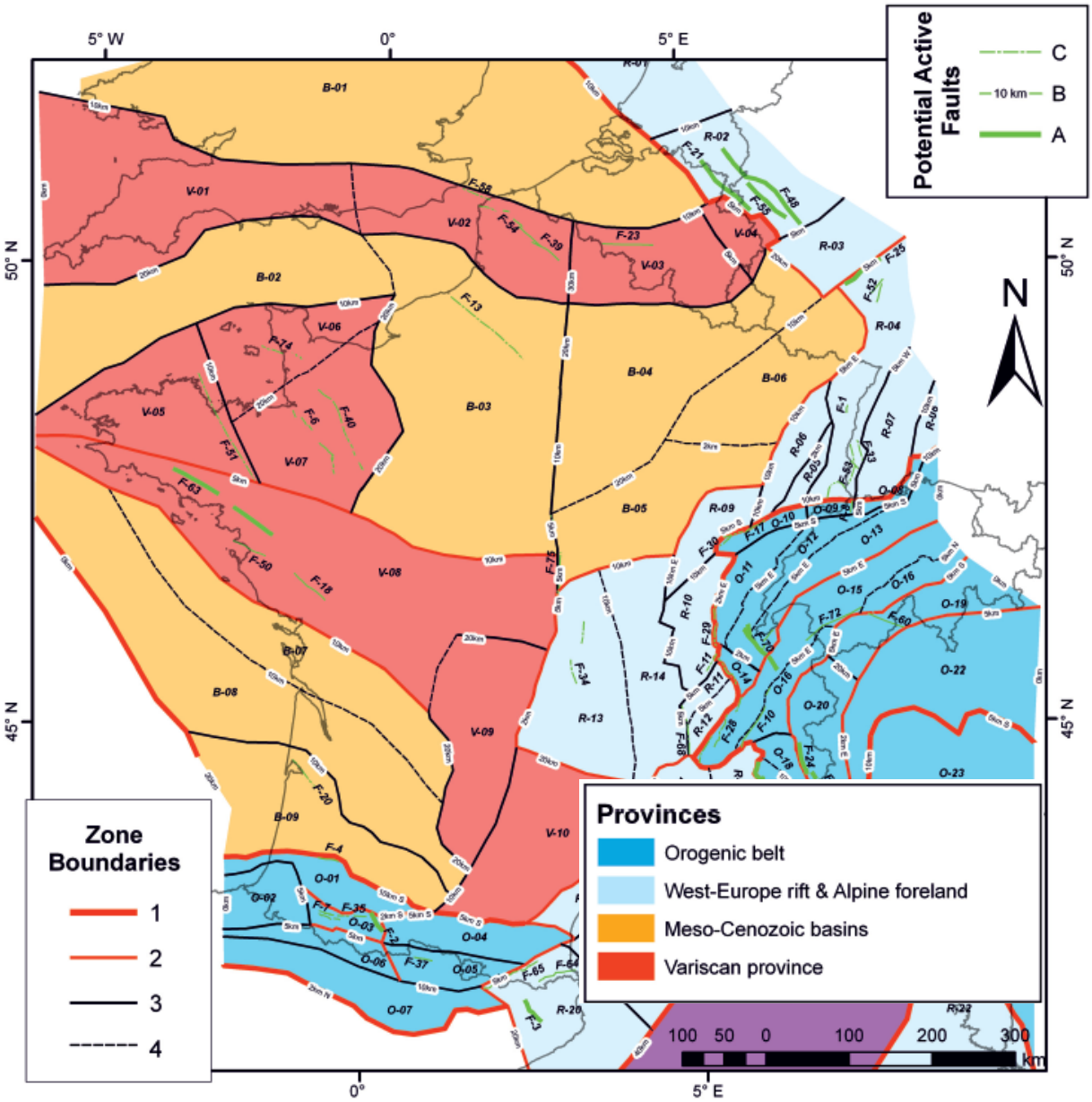


Figure 47 : Zonage sismotectonique extrait de Baize et al. (2013). Les limites des zones sont hiérarchisées (1er ordre à 4ème ordre) et les failles potentiellement actives, en vert, aussi (d'avérée à très peu probablement active).

Les mécanismes au foyer compilés par Mazzotti et al. (2021) illustrent le champ de déformation actuel (Figure 48). A l'exception de quelques événements associés à des failles inverses, les mécanismes disponibles dans la région illustrent majoritairement un comportement en décrochement, associé à une composante normale. De manière générale, l'ouest de la France est caractérisé par un état de contrainte associé à des axes de compression et de tension horizontales NO-SE et NE-SO (Figure 49). La Figure 48 illustre le fait qu'une majorité des mécanismes au foyer disponibles confirme cette tendance, en cohérence avec le champ de contrainte compressif régional NO-SE à NNO-SSE. Cependant quelques spécificités locales sont observées : le sud du Cotentin montre un comportement atypique par rapport aux régions avoisinantes avec la présence de mécanismes associés à des failles inverses (comportement à confirmer d'après Mazzotti et al., 2020).

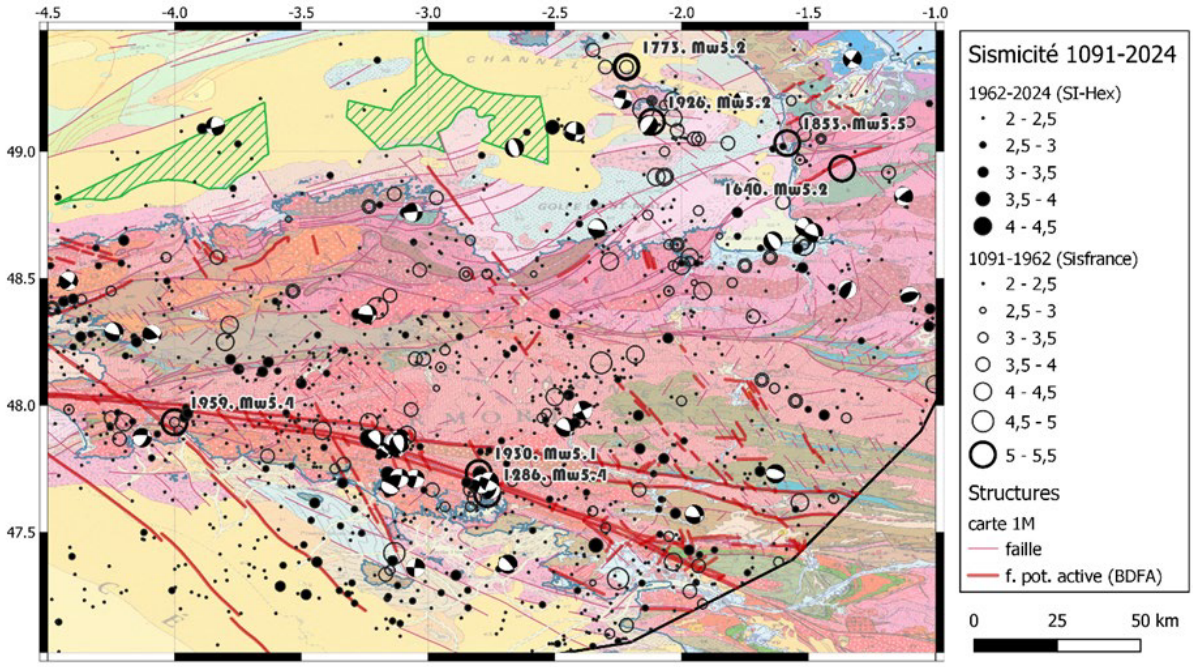


Figure 48 : Sismicité au voisinage des zones BNE et BNO, et structures répertoriées dans la carte géologique au million. Les structures en trait rouge épais représentent les failles potentiellement actives de la BDFA (Jomard et al., 2017).

A l'échelle régionale, les plans nodaux des mécanismes au foyer sont cohérents avec les orientations des systèmes de failles héritées décrites dans les chapitres précédant.

La sismicité régionale est distribuée entre des profondeurs très superficielles (quelques kilomètres) et une trentaine de kilomètres (Figure 50).

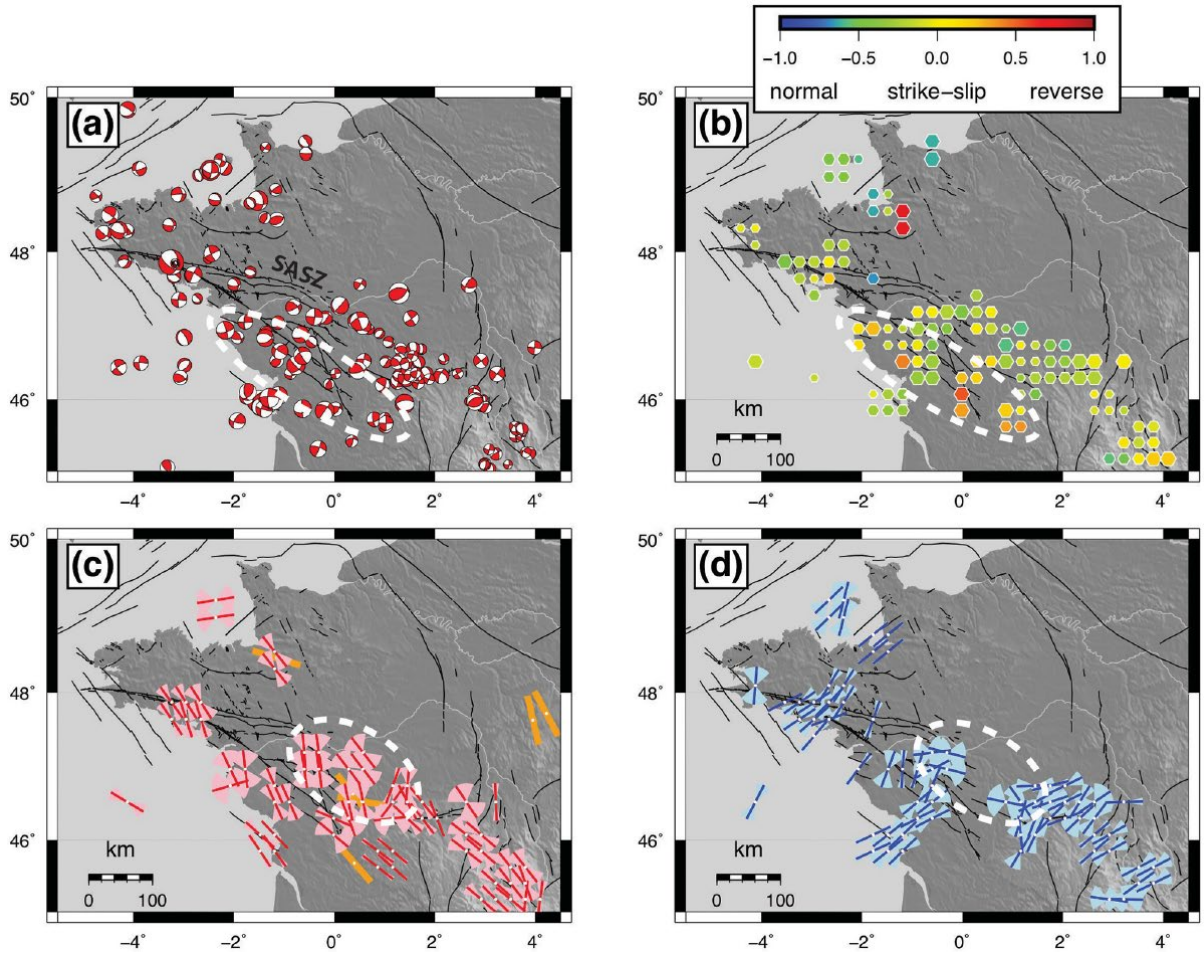


Figure 49 : D'après Mazzotti et al. (2020). (a) Mécanismes au foyer, (b) faulting style moyenné par grille, (c) et (d) orientation moyenne des axes quasi-horizontaux P et T.

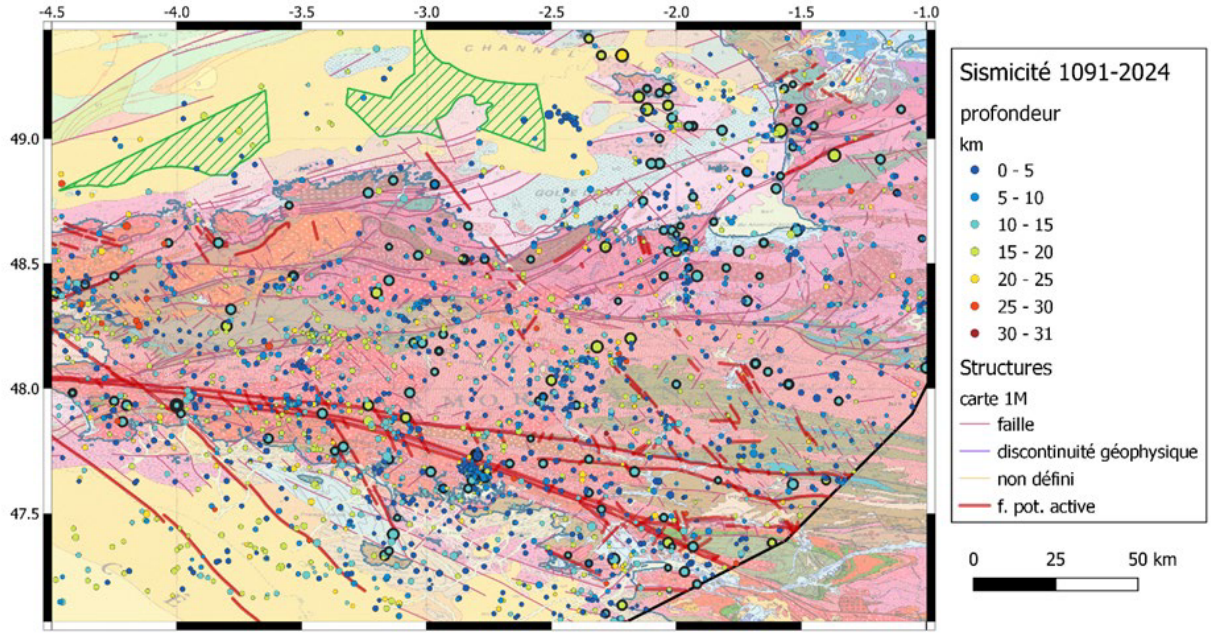


Figure 50 : Sismicité au voisinage des zones BNE et BNO représentées en fonction de la profondeur des événements. Les séismes associés à un contour noir épais sont issus du catalogue de sismicité historique. Structures répertoriées dans la carte géologique au million. Les structures en trait rouge épais représentent les failles potentiellement actives de la BDFA (Jomard et al., 2017).

7.1.2. Rôle de l'héritage structural, de la tectonique et des autres processus dans l'activité sismique contemporaine

Pour rappel, l'ouest de la France est soumis à un état de contrainte général associé à un axe de compression horizontal NO-SE. Sous un tel état de contrainte, des failles préexistantes (héritées) peuvent être réactivées avec un mélange de composantes décrochantes et normales, comme au niveau du cisaillement sud-armoricain. L'ensemble du système accommode une transtension NE-SO. Cependant, le champ de déformation présente une certaine variabilité, avec quelques cas sortant de cette tendance pour qui les mêmes types de structures préexistantes sont parfois réactivées avec des composantes décrochantes et inverses.

Ainsi, Kaci (2023) associe certains événements sismiques du Golfe Normando-Breton à la réactivation de failles majeures héritées des épisodes varisque (NO-SE) et cadomien (NE-SO).

Si à grande échelle on peut considérer que la France métropolitaine subit une compression horizontale NO-SE, liée à la tectonique régionale, le territoire considéré est en domaine intraplaque et a connu une histoire géologique et géodynamique complexe et polyphasée. D'autres processus peuvent jouer localement et influencer le champ de déformation et le comportement sismogène des structures, même anciennes. Parmi ces processus, on peut citer l'ajustement isostatique dû à l'érosion ou aux cycles de glaciation-déglaciation (e.g. compilation dans Mazzotti et al., 2020 et Beucler et al., 2021). Certaines structures anciennes, héritées peuvent être réactivées si elles sont à nouveau favorablement orientées par rapport au nouveau champ de contrainte auquel contribuent potentiellement un ensemble de processus à différentes échelles de temps et d'espace (e.g. tectonique régionale, processus locaux d'ajustement, etc…). En définitive, la sismicité régionale illustre des interactions complexes entre des processus à grande échelle (la tectonique, très lente), des réactivations de systèmes de faille ayant connu une histoire complexe et des processus locaux voire isolés, et de possibles perturbations transitoires

des contraintes (Beucler et al. (2021). Ajouté à cette complexité des processus en jeu, un catalogue de sismicité encore mal contraint pour l'Ouest de la France métropolitaine, a pour conséquence une vision encore partielle du comportement sismogène dans la région.

Quelques observations associées à des tsunamis ont été répertoriées au niveau des côtes françaises de la Manche (Lambert and Terrier, 2011). Il s'agit d'événements dont on ne connait pas l'origine, associés à des perturbations rapides de la surface de la mer (e.g. 1725, baie de Flamanville, 1838 et 1850, baie de Cherbourg). Si l'origine de ces observations de tsunami reste inconnue (aucun séisme ou glissement de terrain n'y a été associé), Terrier and Lemoine (2016) ont proposé des scénarios de tsunamis potentiels le long de la côte ouest de la France métropolitaine, intégrant un scenario lié à la rupture sismique d'une faille NNE-SSO au nord de la presqu'île du Cotentin pouvant avoir un impact local en termes de tsunami. Ces travaux sont à revoir, à la lumière de l'amélioration des connaissances des structures potentiellement actives, mais l'éventualité d'un tsunami modéré dans la région pourrait être envisagée.

7.1.3. Recommandations

La zone d'intérêt a connu des événements historiques importants, atteignant la magnitude Mw=5.5 pour le séisme de Coutances de 1853, sur la côte Ouest de la Presqu'île du Cotentin. Il a été montré que des failles préexistantes, héritées d'anciennes phases d'orogénèse sont potentiellement actives et sismogènes. Dans un tel contexte, il peut être envisagé la survenue d'un événement équivalent au séisme maximal observé dans la zone (i.e. Mw=5.5), voire majoré d'un demi-degré de magnitude (i.e. Mw=6). Cette majoration est classique dans les travaux d'aléa sismique où l'on considère que le catalogue de séismes n'est pas représentatif du potentiel sismogène d'une région, en particulier quand la période d'observation est très courte au regard de taux de déformation faibles. Au sein d'une même zone sismotectonique, il est considéré que le séisme maximal attendu peut se produire en tout lieu de la zone.

Pour rappel, dans le domaine terrestre, le zonage de la sismicité en vigueur depuis 2011 découpe le territoire français en 5 zones, du niveau 1 (associé à une sismicité faible), au niveau 5 (sismicité forte) pour les Antilles. La Bretagne et le Cotentin sont ainsi associées à une sismicité intraplaque faible (Figure 51).

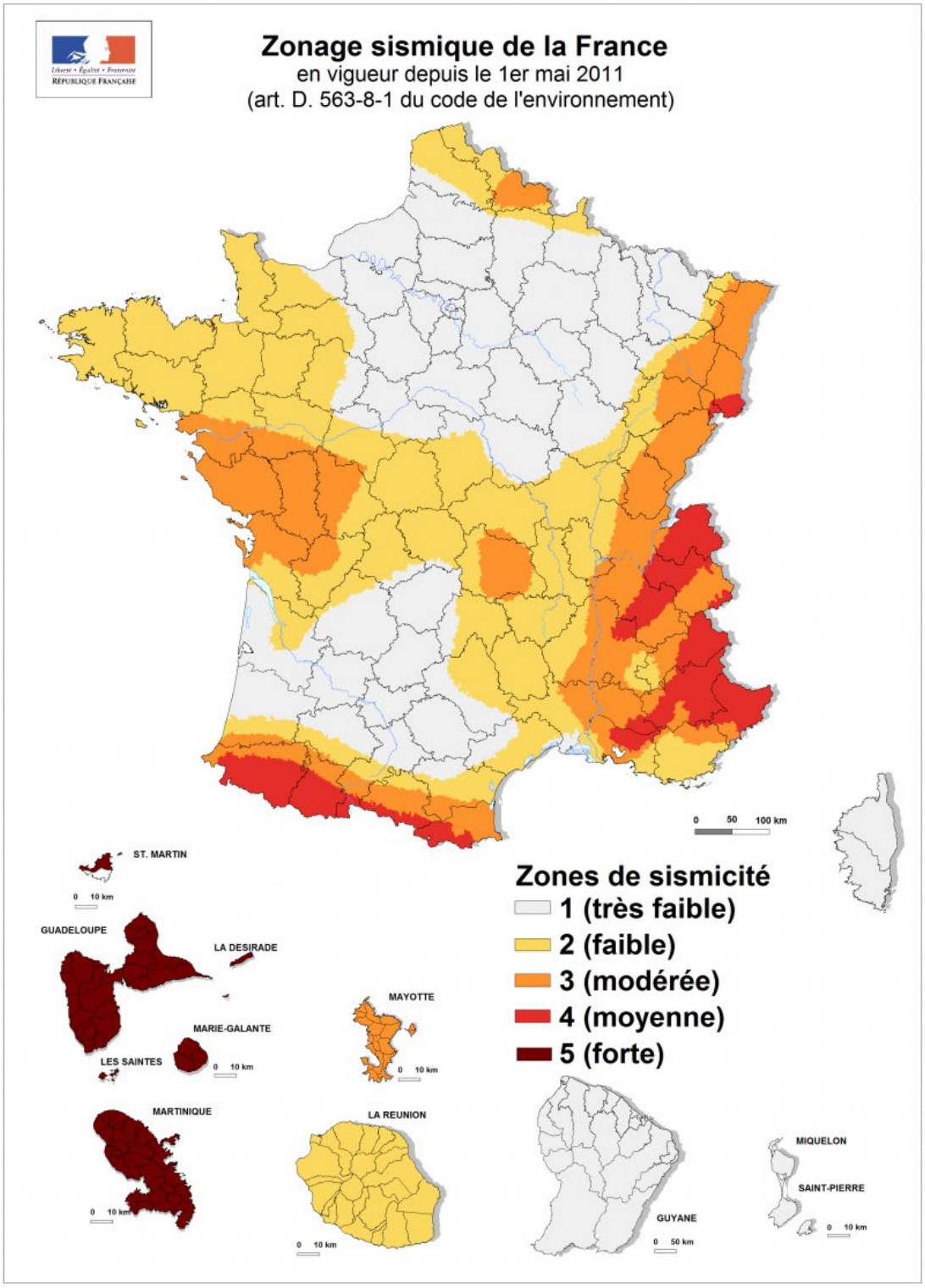


Figure 51 : Zonage de la sismicité métropolitaine en vigueur.

7.2. EFFET DES FAILLES MAJEURES SUR LE SUBSTRATUM

D'une manière générale, les failles majeures, qu'elles soient actives ou non, influencent 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. Il engendre ainsi une complexité accrue de la variabilité latérale des propriétés mécaniques du substratum. Dans la présente étude, nous pouvons signaler à titre d'exemples, (i) le basculement régional, qui porte à la même altitude (ici, le fond marin), les lithologies de socle (granites, gneiss, schistes) et celles de la couverture sédimentaire de l'Eocène supérieur (calcaires tendres) dans le sud des deux macro-zones BNO et RD-BNE, ou (ii) le jeu de failles localisées, qui induit la remontée de grès cambro-ordovicien et de craies sénoniennes au même niveau que les calcaires éocènes dans l'extrême nord de la macro-zone RD-BNE.

Il apparaît important, que de manière générale, les structures tectoniques majeures soient considérées comme susceptibles d'augmenter localement (i) la variabilité des propriétés mécaniques des roches du substratum et (ii) les aléas géologiques associés (fragilisation, dissolution, …). Il conviendra d'en tenir compte dans la réflexion de délimitation de zones d'intérêt pour la localisation de parc éolien 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 ($CaCO_3$). 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 :

$$CO_2 + H_2O + CaCO_3 = Ca_2^+ + 2\ HCO_3^-$$

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 CO2, 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 CO_2 dans l'eau produit de l'acide carbonique, qui par dissociation aqueuse produit des ions oxonium H_3O^+, 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 au nord de la Bretagne

Sur et autour des deux macro-zones étudiées, les calcaires sont retrouvés principalement dans le Crétacé supérieur (craies sénoniennes de l'intervalle Coniacien-Maastrichtien), le Danien (craies) et l'Eocène supérieur (calcaires tendres de l'intervalle Lutétien supérieur – Bartonien). Une attention particulière a été portée à ce dernier intervalle car il est le plus développé sur les deux macro-zones et que des dépressions y ont été découvertes et interprétées comme des structures de dissolution karstique ou dolines (Lefort, 1970c).

Si les indices de karstification sont difficiles à identifier par imagerie de sismique réflexion, la bathymétrie multifaisceaux disponibles offre l'opportunité de localiser des figures de dissolution-karstification sur les séries carbonatées du Lutétien-Bartonien. Ces données bathymétriques montrent en effet une rugosité importante du fond marin au niveau de l'Eocène affleurant dans les deux macro-zones. Dans le détail, de nombreuses dépressions de quelques mètres de profondeur et de dimensions dépassant la dizaine, voire plusieurs centaines de mètres peuvent être observées. Les caractéristiques correspondent à celles établies par Lefort (1970c).

Un pointé de ces dépressions potentiellement karstiques a été réalisé, permettant de produire une carte de distribution de possibles « karsts et dolines » (Figure 52). Elles se révèlent être distribuées sur une vaste superficie indiquant que le phénomène de dissolution a été généralisé lors de période d'émersion du plateau lors de bas niveaux marins, notamment au cours des phases glaciaires du Pléistocène.

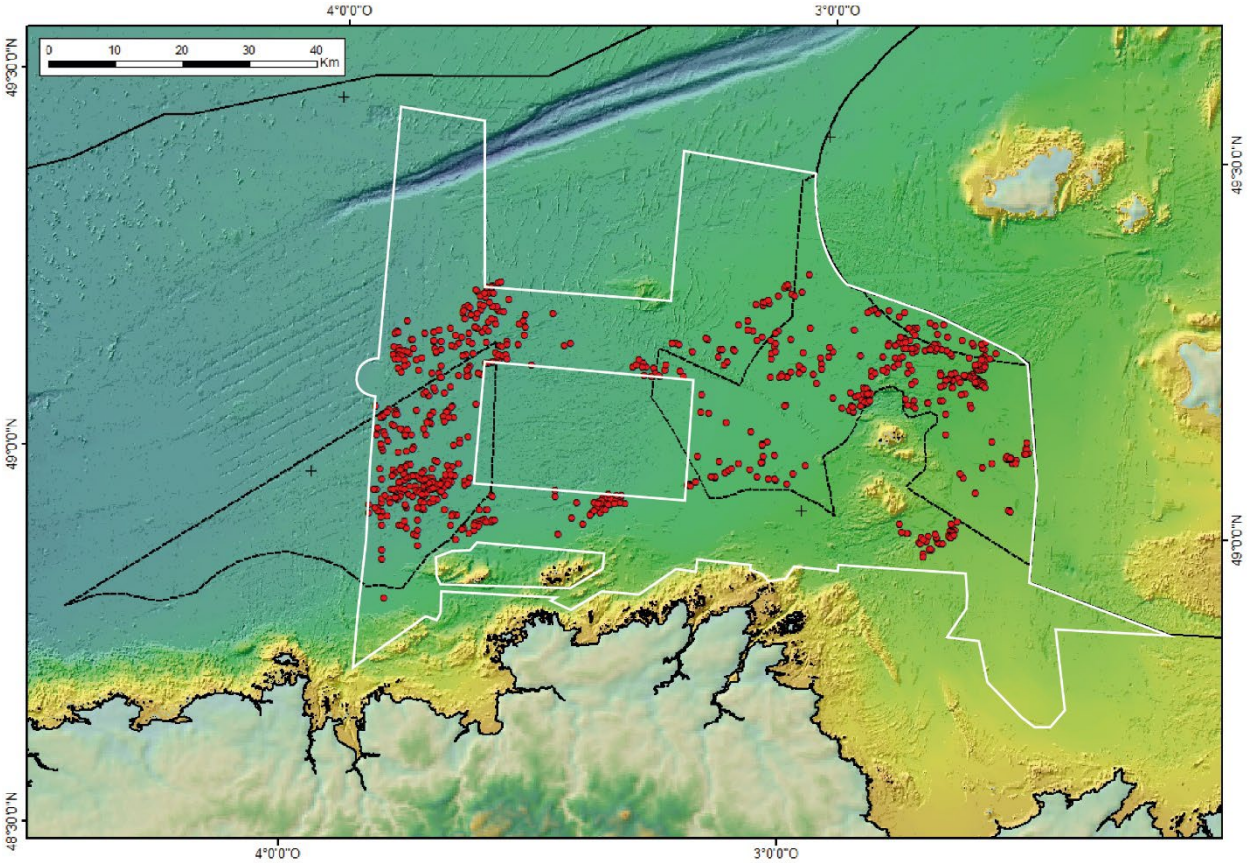


Figure 52 : Carte de distribution de dépressions d'origine karstique probable, détectée à partir des données de bathymétrie multifaisceaux disponibles (emprise blanche). Les macro-zones BNO et RD-BNE sont représentées par des emprise en pointillés noirs. Sur fonds bathymétrique (©EMODnet, 2022) et topographique (©GEBCO, 2023)

Des phénomènes de dissolution-karstification ont également pu se produire antérieurement lors de périodes d'émersion de la plateforme. Les terrains sédimentaires carbonatés ont alors pu être altérés. De telles périodes et configuration ont été rencontrées lors du développement des discordances principales entre Danien et Eocène (Lutétien sup.) mais également entre Crétacé supérieur et Danien. Il est alors possible d'envisager que de la dissolution ancienne de carbonates sous-jacents puisse être retrouvée en profondeur, le long de ses discordances. Les argiles à silex de l'ouest du Bassin de Paris sont un exemple de l'effet d'altération-dissolution de craies crétacées durant le Cénozoïque (Laignel, 1997 ; Quesnel, 1997 ; Laignel et al., 1999).

Les 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 des contacts discordants Crétacé supérieur-Paléogène (Sénonien-Danien) et Danien-Lutétien 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 prélèvements adaptés aux cibles superficielles (carottier à piston, vibrocarottier) ou profondes (forages carottés) déduites des indices géophysiques.

Un aller-retour entre méthodes géophysiques et géologiques est encouragé 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 susceptibles d'être rencontrées sur les cent premiers mètres de substratum des macro-zones BNO et RD-BNE.

Néanmoins, la faible densité ou qualité des profils disponibles, le manque de représentativité des prélèvements géologiques (nombre faible, distribution irrégulière, ponctuels et superficiels) et le manque de données bathymétriques haute-résolution sur certaines zones 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 (méso-cénozoïque, paléozoïque et néoprotérozoïque) et de mettre en évidence certains contacts stratigraphiques (contrastes morphologiques liés aux variations de lithologie, discordances angulaires…),
- Des morphologies et géométries caractéristiques de certains niveaux stratigraphiques ou lithologiques (ex : figures de dissolution-karstification des carbonates méso-cénozoïques),
- Les géométries associées à des déformations tectoniques des séries sédimentaires (failles, plis, fracturation),
- Les textures propres à certaines lithologies des unités de socle, permettant de distinguer les granites des gneiss par exemple.

8.2. SISMIQUE TRES-HAUTE-RESOLUTION

Le maillage de sismique très-haute-résolution (THR) sparker utilisé pour cette étude est clairement insuffisant pour (i) valider certaines interprétations et corrélations des unités

sismiques, notamment dans les zones déformées, (ii) permettre de distinguer des unités au sein de l'ensemble sismiquement chaotique du Lutétien supérieur-Bartonien (e5-6), ainsi que de (iii) 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 pour le cas des failles et plis en Figure 53.

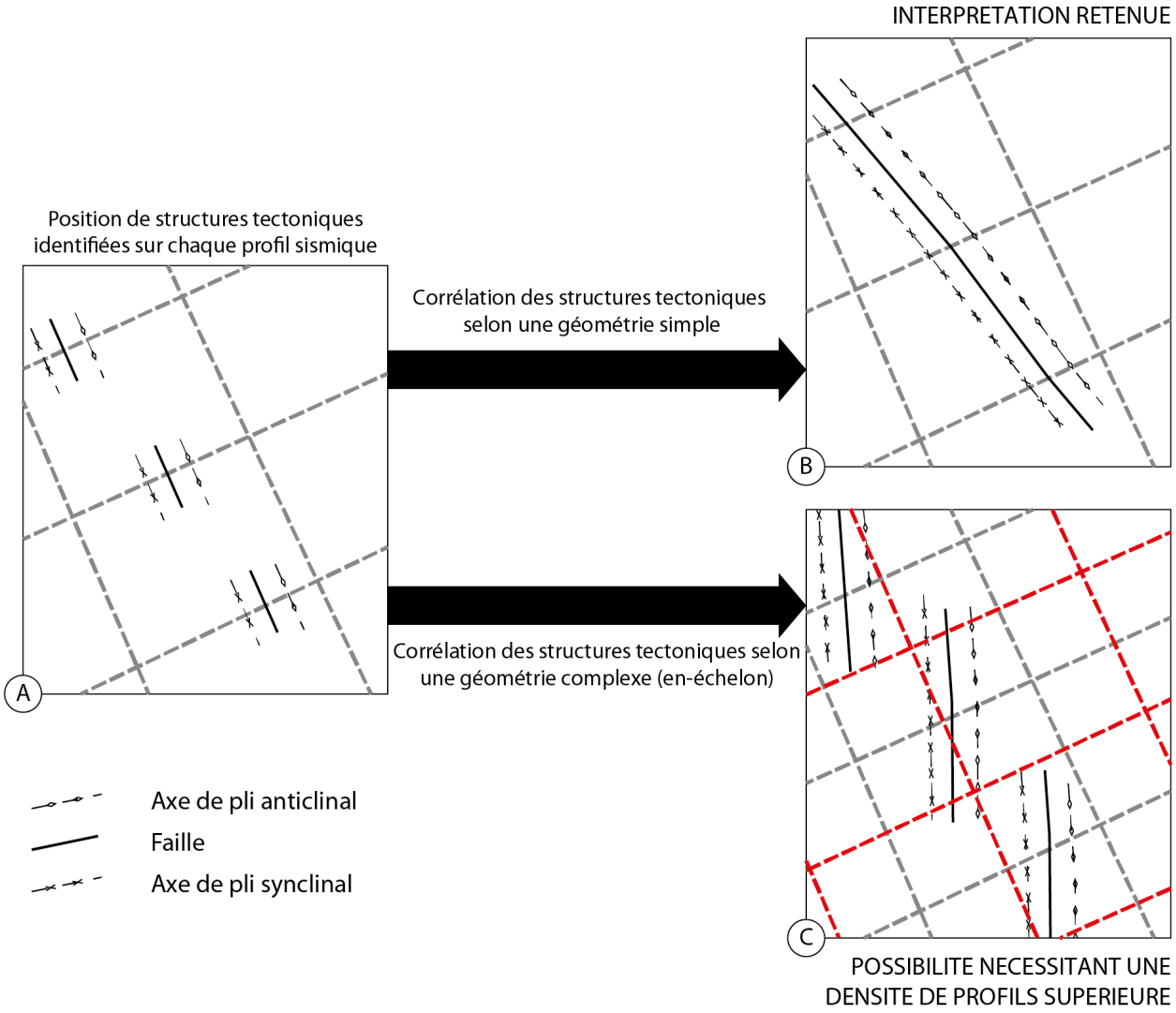


Figure 53 : Illustration de l'effet d'une densification du maillage de profils sismiques réflexion permettant de caractériser plus finement la complexité de la distribution des structures tectoniques. A : illustre la position de structures identifiées le long des profils sismiques ; B : proposition d'interprétation 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. Ceci permet de mieux contraindre les structures tectoniques, et de faciliter les corrélations des unités sédimentaires.

La densité et l'orientation des profils pourra être adaptée, notamment au niveau de certains contacts ou structures tectoniques. C'est en particulier le cas sur la macro-zone RD-BNE où de nombreuses structures ont été détectées au sud comme au nord. La géométrie des unités et en particulier le contact socle-couverture peut être affecté et complexe

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 ou caractérisées plus finement. 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. L'utilisation de plusieurs types de sources sismiques (sparker, boomer, sondeur de sédiments) est à explorer.

8.3. SONDAGES GEOLOGIQUES

Comme indiqué précédemment, la connaissance des lithologies et de la stratigraphie des séries sédimentaires ou des unités de socle 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, notamment pour les séries sédimentaires méso-cénozoïques. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons des réalisations de sondages de 50 mètres de pénétration, à l'exception de cibles plus profondes nécessitant des sondages plus pénétratifs. 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.

Concernant les unités de socle, des sondages moins profonds (< 10m) devrait permettre de caractériser des ensembles qui auront pu être distinguer par l'analyse de la bathymétrie haute-résolution. Il conviendra alors de prévoir une distribution cohérente des sondages

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 Crétacé supérieur (c3-6), jusqu'au Eocène (Lutétien supérieur - Bartonien ; e5-6). De plus, compte-tenu de la complexité apparente du remplissage éocène, et des caractéristiques du bassin sédimentaire dans lequel il est préservé (Bassin Léon-Cotentin), des variations latérales des faciès sédimentaires au sein de chaque unité sont envisageables. Il convient donc de déterminer une distribution spécifique des sondages pour chaque macro-zone.

8.3.1. Sondages dans la macro-zone BNO

Les données sismiques interprétées au sein de la macro-zone BNO sont relativement bien distribuées pour être utilisées comme support pour les propositions d'implantation de sondages géologiques et géotechniques.

Pour la caractérisation des séries sédimentaires présentent dans les cent premiers mètres de la macro-zone, les coupes 53, 54 et 55 sont utilisées pour positionner des sondages de 50 m. Il est à noter que pour atteindre cet objectif, certains sondages sont à positionner hors du périmètre de la macro-zone. En complément, des sondages d'une dizaine de mètres sont proposés pour caractériser le socle et son état d'altération (Figure 54, Figure 55 et Figure 56).

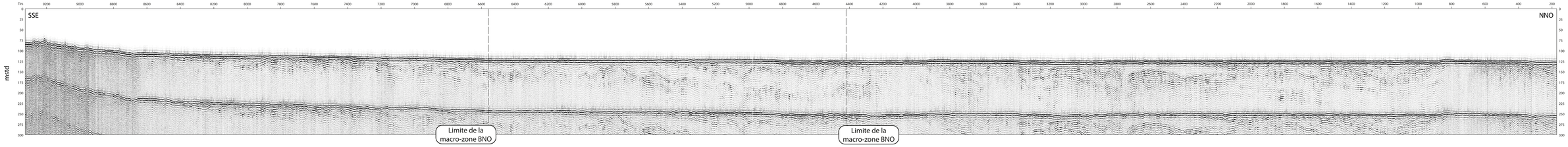
Ainsi, il apparaît que l'implantation d'une série de sondages carottés de 50 m le long des coupes sismiques n°53, 54, et 55 permettrait de satisfaire les contraintes exposées ci-dessus, principalement pour l'intervalle éocène. Il serait souhaitable de réaliser des sondages courts (10 m) sur les zones de socle affleurant vers le sud (sondages n°53-01 et n°54-01), ainsi qu'un sondage long d'environ 80 m (sondage n°55-10), pour vérifier la présence de Danien et de Crétacé supérieur en profondeur, dans le secteur NE de la macro-zone BNO. Le sondage n°55-02 permettra de vérifier la présence de Néogène localisé dans le secteur SE de la macro-zone.

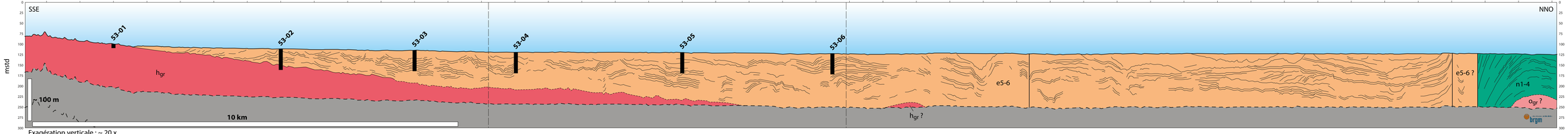
La réalisation de sondages supplémentaires devrait être envisagée à travers l'ensemble de la macro-zone pour :

- (i) vérifier l'éventualité de variations latérales des faciès sédimentaires et donc des lithologies au sein de l'intervalle Lutétien supérieur-Bartonien (e5-6),
- (ii) accéder au Néogène (N) et au Crétacé supérieur d'âge sénonien (c3-6) suspectés respectivement au SE, et au cœur de l'anticlinal situé dans le secteur NE de la macro-zone (Coupe n°55 -Figure 49).
- (iii) vérifier la présence de zones de dissolution et de karstification, ou de récifs dans les niveaux carbonatés.

La distribution cartographique des 23 sondages proposés est présentée en Figure 57.

Figure 54 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°53 et montrant une proposition d'implantation de 6 sondages carottés (53-01 à 53-06) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.





Exagération verticale : ~ 20 x

53

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbsit03_053c_1_GTS_MIGO gbsit03_053c_2_GTS_MIGO
Campagne :	GEOBREST 2003 Le Roy P., Thinon I. - doi.org/10.17600/17006700
Matériel :	Sparker SIG flûte multibraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DCGS/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

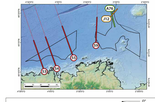
Légende

Lithostratigraphie

- e5-6 — Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- n1-4 — Berriasien-Barrémien «wealdien»
- hgr — Carbonifère (granites)
- ogr — Ordovicien (granite)

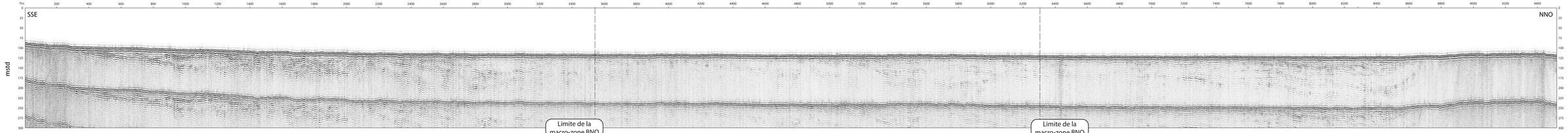
Eléments structuraux

- Failles
- Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 55 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°54 et montrant une proposition d'implantation de 7 sondages carottés (54-01 à 54-07) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.



Exagération verticale : ~ 20 x

54

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbs03_054_1_GTS_MGO gbs03_054_2_GTS_MGO
Campagne :	GEOBREST 2003 Ea Mer 97 Zone L - doi.org/10.17600/17006700
Matériel :	Sparker 5kJ flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DCGS/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DCGS/GSB)

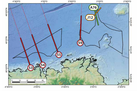
Légende

Lithostratigraphie

- e5-6 : Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
- n1-4 : Berriasien-Barrémien «wealdien»
- h_{gr} : Carbonifère (granites)
- o_{gr} : Cambrien-Ordovicien (grès, schistes)
- NP_s : Néoprotérozoïque (grès, schistes)
- P_{gn} : Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

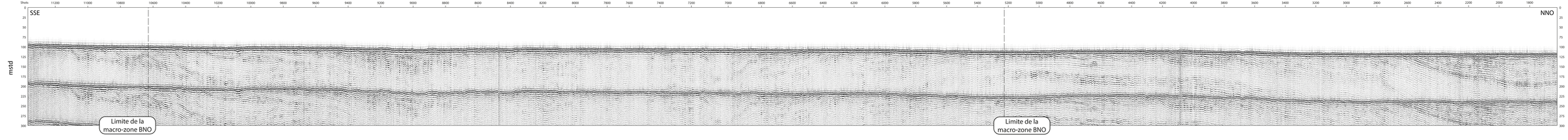
Eléments structuraux

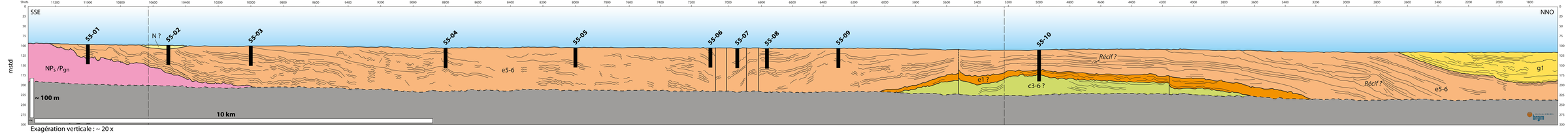
- Failles
- Multiples du fond



Angles équivalents pour une exagération verticale d'environ 20 x

Figure 56 : Profils sismiques bruts et interprétés en stratigraphie correspondant à la coupe n°55 et montrant une proposition d'implantation de 10 sondages carottés (10-01 à 55-10) réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.





Exagération verticale : ~ 20 x

55

BRGM/RP-74348-FR

Données :	Profils: gbot03_055b_1_GTS_MIGO gbot03_055b_2_GTS_MIGO gbot03_055b_3_GTS_MIGO
Campagne :	GLORIBEST 2003 doi.org/10.17600/17006700
Matériel :	Source: Sparker 5KJ flûte multitraces
Traitement :	Isabelle THINON (BRGM - DOCG/GSB)
Interprétation :	Fabien PAQUET (BRGM - DOCG/GSB)

Légende

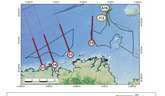
Lithostratigraphie

N	Néogène indifférencié probable
g1	Rupélien (calcaires)
e5-6	Lutétien sup. - Bartonien (calcaires)
e1	Danien (craie, marnes, argiles)
c3-6	Coniacien-Maastrichtien (craie)
NPx	Néoprotérozoïque (grès, schistes)
Pgn	Protérozoïque (gneiss, micaschistes)

Eléments structuraux

Failles

Multiples du fond



Des compléments par carottier à roche du type CNEXO-Ville peuvent être également envisagés pour la caractérisation des lithologies des unités de socle. Cette méthode n'offre qu'un échantillonnage superficiel mais reste simple est rapide à mettre en œuvre.

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 pressiométriques in situ ou de tests au pénétromètre statique si le substrat le permet. 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.

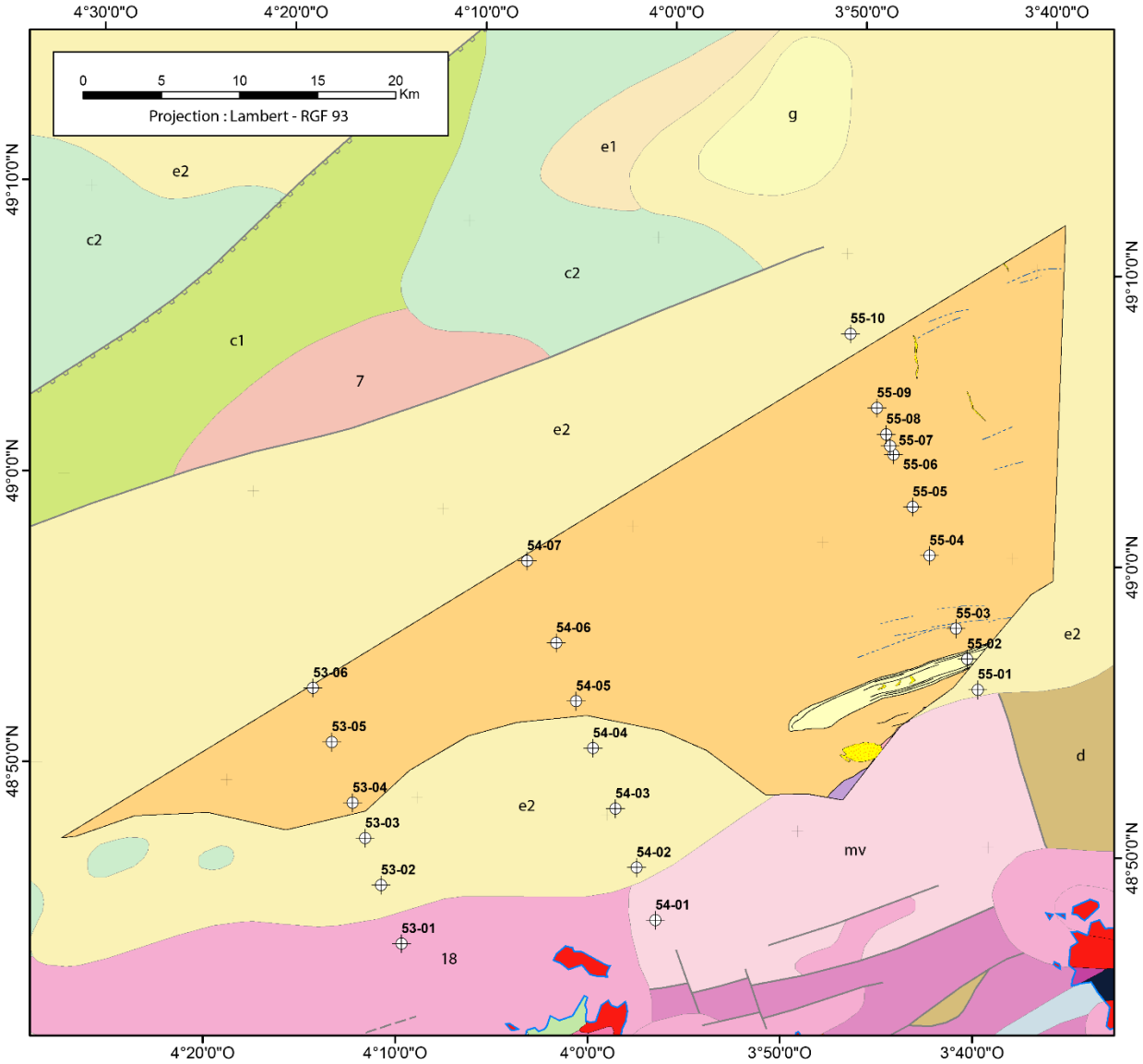


Figure 57 : Carte géologique de la macro-zone BNO montrant la répartition des unités et montrant une proposition d'implantation de 23 sondages carottés réalisés à des fins lithostratigraphiques et géotechniques.

8.3.2. Sondages dans la Macro-zone RD-BNE

La distribution des profils sismiques dans la macro-zone RD-BNE ne permet pas d'appréhender les géométries tridimensionnelles des différentes séries sédimentaires et unités géologiques avec autant de précision que sur la macro-zone BNO. De ce fait, la distribution précise et cohérente des sondages est impossible à ce stade. Les phases d'acquisition géophysiques seront donc déterminantes à ce titre.

9. Conclusion

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

La bathymétrie disponible a été interprétée en termes de géomorphologie 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 (paléovallées).

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 unités de socles et des grands ensembles stratigraphiques de la pile sédimentaire entre le Protérozoïque (P) et le Lutétien supérieur-Bartonien (e5-6), voire Néogène (N). L'intégration des travaux antérieurs des années 1970 aux années 2000 permet d'obtenir une idée de la distribution des lithologies du substratum au sein de la macro-zone. Néanmoins, le manque de données sismiques ne permet pas de décrire le remplissage éocène avec précision et le manque de prélèvements géologiques limite les attributions lithologiques de certains ensembles, notamment dans le socle. Les principales structures tectoniques ont été cartographiées sur la base des données bathymétriques et/ou sismiques. Ici encore, le manque de données sismiques sur les deux macro-zone empêche la validation d'un schéma structural.

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 cartographique, 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 des macro-zones BNO et RD-BNE et adaptés à la phase initiale de levée de risques, qui permettra ainsi de réaliser les objectifs de développement optimal des énergies marines renouvelables.

10. Références

Andreieff P., Lefort J.-P. (1972) Contribution à l'étude stratigraphique des terrains secondaires et tertiaires affleurant en Manche occidentale. Colloque sur la Géologie de la Manche (1971). Mémoires du BRGM 79, p. 49-56.

Andreieff P., Bouysse P., Curry D., Fletcher B. N., Hamilton D., Monciardini C., Smith J. (1975) The stratigraphy of the post-Palaeozoic sequences in part of the Western Channel. Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 279, 79-97.

Augris C., Simplet L. (2011). Atlas géologique de la Baie de Lannion – Côtes d'Armor – Finistère. Editions Quae. 112p.

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/

Auvray B. (1979) Genèse et évolution de la croûte continentale dans le Nord du Massif armoricain. Thèse Univ. Rennes, France, 680p.

Auvray B., Lefort J.-P. (1971) Étude des terrains antécambriens et paléozoïques immergés au large du Petit Trégor (Manche occidentale). Essai cartographique. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, C, III, 2, 77-82.

Auvray B., Lefort J.-P., Monnier J.-L. (1976a) Carte géologique de la France (1/50 000) Feuille Tréguier (171), BRGM, Orléans

Auvray B., Lefort J.-P., Monnier J.-L. (1976b) Notice explicative de la Carte géologique de la France (1/50 000) Feuille Tréguier (171), BRGM, Orléans. 26p.

Baize S., Cushing E.M., Lemeille F. and Jomard H. (2013) Updated seismotectonic zoning scheme of Metropolitan France, with reference to geologic and seismotectonic data, Bulletin de la Société géologique de France, 184, 3, 225-259.

Ballèvre M., Le Goff E. et Hébert R., 2001. The tectonothermal evolution of the Cadomian belt of northern Brittany: a Neoproterozoic volcanic arc. Tectonophysics 331, 19-43.

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.

Ballèvre M., Bosse, V., Dabard, M.-P., Ducassou, C., Fourcade, S., Paquette, J.-L., Peucat, J.-J. Pitra, P. (2013) Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne D – 10-11, 5-96.

Beucler E., Bonnin M., Hourcadea C., Van Vliet-Lanoë B., Perrin C., Provostd L., Mocquet A., Battaglia J., Geoffroyc L., Steer P., Le Gallc B., Douchaing J-M., Fligielb D., Gernigonb, P., Delouis B., Perrotc J., Mazzotti S., Mazet-Roux G., Lambotte S., Grunberg M., Vergne J., Clément C., Calais E., Deverchère J., Longuevergne L., Duperret A., Roques C., Kacio, T. and Authemayou C. (2021) Characteristics and possible origins of the seismicity in northern France, Comptes Rendus Géoscience – Sciences de la Planète, 353, S1, 53-77, https://doi.org/10.5802/crgeos.86

BGS-BRGM. (2000). Guernsey Sheet 49N – 04W Solid Geology. 1:250 000 UTM series of the United Kingdom and continental shelf. Crown copyright, contains British Geological Survey materials © UKRI.

Boillot G. (1970) ASTROLABE cruise, RV Astrolabe.

Boillot G., Horn R., Lefort J.-P. (1972) Evolution structural de la Manche occidentale au Secondaire et au Tertiaire. Colloque sur la Géologie de la Manche (1971). Mémoires du BRGM 79, 79-86.

Boillot G., Musselec P. (1975) Origine de la Manche d'après une carte géologique au 1:1 000 000e Phil. Trans. Roy. Soc. London A 279, 21-27.

Bois, C., Cazes, M., Gariel, O., Lefort, J.-P., Le Gall, B., Pinet, B., et Sibuet, J.-C. (1991) Principaux apports scientifiques des campagnes SWAT et WAM à la géologie de la mer Celtique, de la Manche et de la marge atlantique. In : Etude de la croûte terrestre par sismique profonde (Mer Celtique, Manche et ses Approches Occidentales; profils SWAT et WAM), C. Bois, O. Gariel et J.-C. Sibuet (eds), Mémoire Soc. Géol. Fr., 159, p. 185-217.

Bourcart J. (1945) Le Sénonien à Roscoff (Finistère). Compte-rendu Sommaire des Séances de la Société Géologique de France 14, 195-197.

Bouysse P., Horn R. (1968) Nouvelles données sur la structure du plateau continental sud-armoricain (France). Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences – Série D – Sciences Naturelles 267, 690-693.

Bouysse P., Horn R., Guennoc P. (1972) GEOMANCHE 72 cruise, RV Le Noroit, https://doi.org/10.17600/72002511

Bouysse P., Horn R., Lefort J.-P., Le Lann F. (1975) Tectonique et structure post-paléozoïques en Manche occidentale. Phil. Trans. Roy. Soc. London A 279, 41-54.

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/gssgfbull.186.1.3

Chantraine J., Houlgatte E., Chauris L., Le Goff E., Coussement C., Barrière M., Larsonneur C., Garreau J. 1999a. Carte Géologique de la France à 1/50 000 – Feuille Lannion. BRGM.

Chantraine J., Houlgatte E., Chauris L., Le Goff E., Coussement C., Garreau J., Larsonneur C., Carn A. 1999b. Notice explicative de la Feuille Lannion à 1/50 000. BRGM.

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. (2013 – updated 2024). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36, 199-204.

Deunff J., (1985). Dépôts de roches étrangères en baie de Locquirec. Penn Ar Bed 15-118, 113-116.

EMODnet (2022) EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2022).

EMODnet (2024) EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2024).

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

Evans C.D.R., Hillis R.R. Gatliff R.W., Day G.A., Edwards J.W.F. (1990) UK Offshore regional Report: the geology of the western English Channel and its western approaches. HSMO for BGS, London.

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/

Giresse P., Hommeril P., Lamboy M. (1972) Résultats préliminaires d'une campagne de sismique réflexion dans le Golfe Normand-Breton. Colloque sur la Géologie de la Manche (1971). Mémoires du BRGM 79, 193-201.

Graindor M.-J., Roblot M.-M. (1976) Géologie sous-marine de la Baie du Mont-Saint-Michel et de ses abords. EDF – Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches – Série A, 1/2, 265 p.

Guennoc P., Hallegouët B., Lebret P., Feybesse J.-L., Choulet F., Eglinger A., Barrière M. (2015a). Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Perros-Guirec (170). Orléans. BRGM

Guennoc P., Feybesse J.-L., Hallégouët B., Lebret P., Chauris L., Lucassou F., Thiéblemont D., Choulet F., Eglinger A. avec la collaboration de Bourdillon C., Cocherie A., Tegyey M. (2015b) Notice de la carte géologique de la France (1/50 000) Feuille Perros-Guirec (170). 264p.

Guilcher A., Marie P., Battistini R. (1951). Un gisement de craie sur l'estran à Landéda (Finistère). Compte-rendu sommaire des séances de la Société Géologique de France 12, 197-198.

Horn R. (1971) GEOMANCHE 71 cruise, RV Le Noroit, https://doi.org/10.17600/71000111

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

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 sismo-tectoniques. Thèse de doctorat. Université Le Havre Normandie, 300 p.

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.

Lambert, J. and Terrier, M. (2011) Historical tsunami database for France and its overseas territories, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1037–1046, https://doi.org/10.5194/nhess-11-1037-2011.

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

Lefort J.-P. (1970a) Sur la Présence de Lutétien inférieur au Sud de la Manche occidentale. C. R. Sommaire de la Soc. Géol. France, 3, 80-81.

Lefort J.-P. (1970b) Étude géologique de la Manche au Nord du Trégor ; IUI : Le problème des sables calcaires : la sédimentation actuelle. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, C, II, 1, 11-13.

Lefort J.-P. (1970c) Étude géologique de la Manche au Nord du Trégor ; III : géologie du substrat rocheux et morphologie. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, C, II, 2, 89-103.

Lefort J.-P. (1975a) Le socle péri-armoricain. Étude géologique et géophysique du socle submergé à l'Ouest de la France. Thèse Université Rennes 1. Mémoires Soc. Géol. Fr., 130 (1977), 68 p.

Lefort J.-P. (1975b) Etude géologique du socle anté-mésozoïque au nord du Massif Armoricain : limites et structures de la Domnonée. Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 279, 123-135.

Lefort J.-P. (1977) Les prolongements submergés du Massif Armoricain – étude de géologie et de géophysique marine. Mémoires de la Société Géologique de France 130, 1-68.

Lefort J.-P., Deunff J. (1974) Etude du socle antémésozoïque de la partie septentrionale du golfe normand-breton. Bulletin du BRGM (2), IV, 73-83.

Lefort J.-P., Vidal P. H., Cabioch L. (1978) First dating of a submerged granite in the Western Channel: appearance of an intrusion of the lower Paleozoic age. Estuarine and Coastal Marine Science 7, 373-379.

Lefort J.-P., Aïfa T. (1996) Origine et structuration de l'essaim filonien nord armoricain. Compte-Rendu de l'Académie des Sciences Paris, IIa, 981-986.

Le Goff E., Guennoc P., Hallegouët B., Lebret P., Thomas E., Bonnot-Courtois C., Ehrhold A., Augris C. (2009a). Carte géologique de la France (1/50 000) Feuille Saint-Malo (243), BRGM Orléans.

Le Goff E., Guennoc P., Hallegouët B., Lebret P., Thomas E., avec la collaboration de Bourdillon C., Courbouleix S., Carn A., Le Berre P., Martelet G., Langouët L., Monnier J.-L., Ehrhold A., Pluquet F., Bonnot-Courtois C., Siméon Y, Bitri A., Egal E., Augris C. (2009b). Notice explicative de la carte géologique de la France (1/50 000) Feuille Saint-Malo (243), BRGM Orléans, 199p.

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

Le Roy P., Thinon I. (2003) GEOBREST 2003 cruise, RV Côtes De La Manche, https://doi.org/10.17600/3480150

Lisiecki LE, Raymo ME. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ18O records. Paleoceanography 20, 1–17. https://doi.org/10.1029/2004PA001071

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.

Mazabraud Y., Béthoux N., Guilbert J., Bellier O. (2005) Evidence for short-scale stress field variations within intraplate central-western France. Geophysical Journal International 160: 161–178. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXII.1.93

Mazzotti S., Jomard H., Masson F. (2020) Processes and deformation rates generating seismicity in metropolitan France and conterminous Western Europe. BSGF – Earth Sciences Bulletin 191. https://doi.org/10.1051/bsgf/2020019

Mazzotti S., Aubagnac C., Bollinger L., Coca Oscanoa K., Delouis B., Do Paco D., Doubre C., Godano M., Jomard H., Larroque C., Laurendeau A., Masson F., Sylvander M., Trilla, A. (2021) FMHex20: An earthquake focal mechanism database for seismotectonic analyses in metropolitan France and bordering regions. *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, *192*(1), 10.

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.

Oehler J.-F., Lequentrec-Lalancette M.-F. (2019) The contribution of marine magnetics in the Gulf of Saint-Malo (Brittany, France) to the understanding of the geology of the North Armorican Cadomian belt. Comptes-Rendus Géoscience 351, 1-9.

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.

Perroud H., Auvray B., Bonhommet N., Mace J., Van der Voo R. (1986) Paleomagnetism and K-Ar dating of Lower Carboniferous dolerites dykes from northern Brittany. Geophys. J. R. Astr. Soc., p. 143-154.

Poncelet C., Billant G., Corre M.-P., Saunier A. (2025). Globe (GLobal Oceanographic Bathymetry Explorer) Software. SEANOE. https://doi.org/10.17882/70460

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

Quesney, A. (1983). "Manche occidentale et mer Celtique. Etude des paléovallées, des fosses et des formations superficielles." *Thèse de Doctorat*, Université de Caen.

SHOM (2021a) Carte sédimentaire mondiale. https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/HOM_GEOL_SEDIM_MONDIALE.xml

SHOM (2021b) Répartition des dunes du Plateau continental français – pré-paquet. https://services.data.shom.fr:/geonetwork/srv/api/records/HOM_GEOL_DUNES_PACK.xml

SHOM (2022) Epaves et obstructions répertoriées par le Shom. https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/BDML_EPAVES.xml

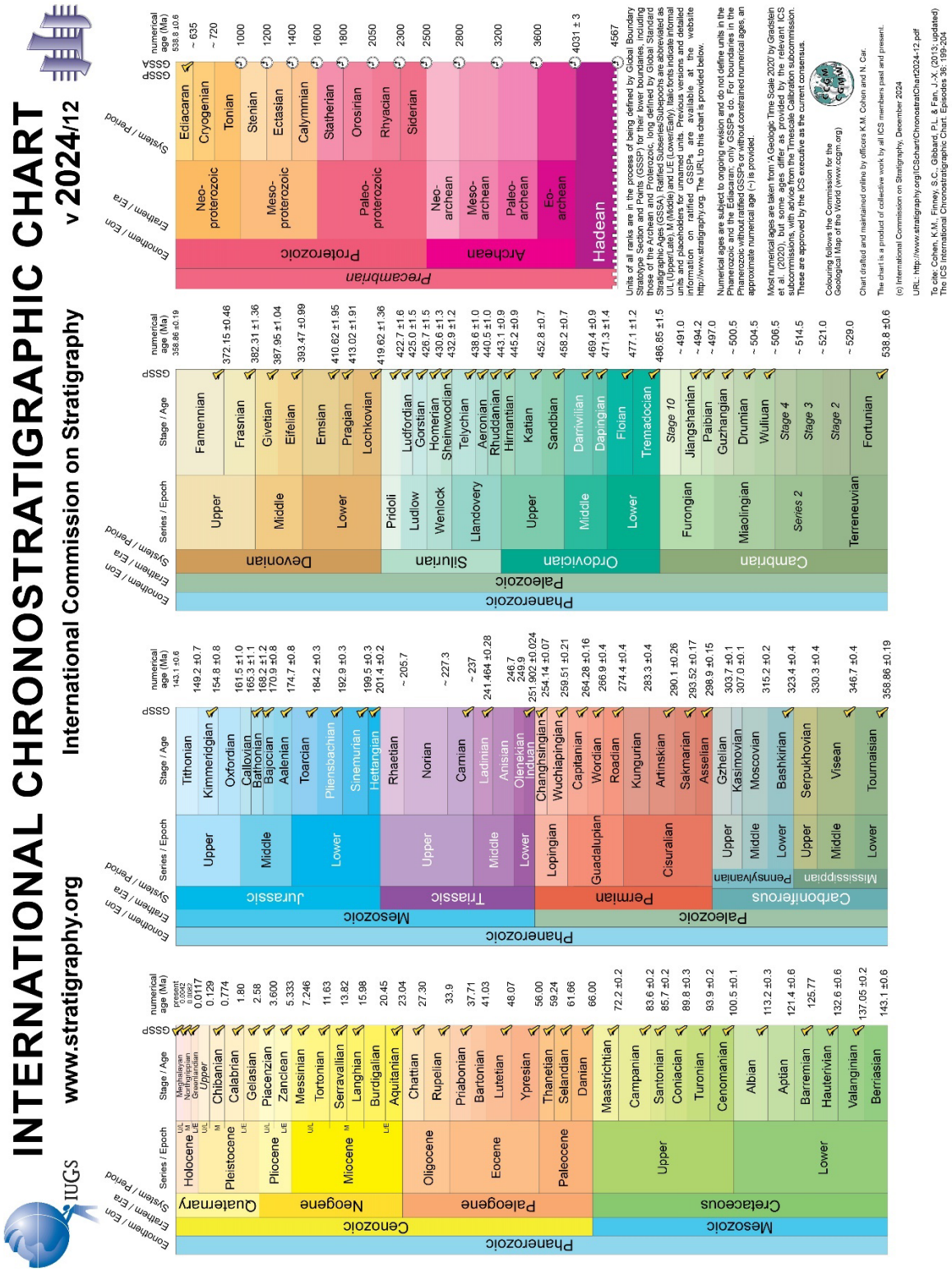
Smith A. J., Curry D. (1975) The structure and geological evolution of the English Channel. Phil. Trans. Roy. Soc. London A 279, 2-20.

Terrier M. et Lemoine A. (2016) Study of the possible tsunamigenic seismic sources for the French coast (Atlantic façade and English Channel), 35th International Geological Congress, South Africa.

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., Béchennec F., Le Métour 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


INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART
v 2024/12
IUGS
www.stratigraphy.org
International Commission on Stratigraphy
Eonothem / Eon
Erathem / Era
System / Period
Series / Epoch
Stage / Age
GSSP
numerical age (Ma)
Phanerozoic
Paleozoic
Mesozoic
Cenozoic
Quaternary
Neogene
Paleogene
Cretaceous
Carboniferous
Permian
Triassic
Jurassic
Cambrian
Ordovician
Silurian
Devonian
Pleistocene
Pliocene
Miocene
Oligocene
Eocene
Paleocene
Upper
Middle
Lower
Pennsylvanian
Mississippian
Precambrian
Proterozoic
Archean
Hadean
Neo-proterozoic
Meso-proterozoic
Paleo-proterozoic
Neo-archean
Meso-archean
Paleo-archean
Eo-archean
Ediacaran
Cryogenian
Tonian
Stenian
Ectasian
Calymmian
Statherian
Orosirian
Rhyacian
Siderian
Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Ratified Subseries/Subepochs are abbreviated as U/L (Upper/Late), M (Middle) and L/E (Lower/Early). Italic fonts indicate informal units and placeholders for unnamed units. Previous versions and detailed information on ratified GSSPs are available at the website http://www.stratigraphy.org. The URL to this chart is provided below.
Numerical ages are subject to ongoing revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.
Most numerical ages are taken from 'A Geologic Time Scale 2020' by Gradstein et al. (2020), but some ages differ as provided by the relevant ICS subcommission with authority over the interval concerned. These are approved by the ICS executive as the current consensus.
Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World (www.ccgm.org)
Chart drafted and maintained online by officers K.M. Cohen and N. Car.
The chart is a product of collective work by all ICS members past and present.
(c) International Commission on Stratigraphy, December 2024
URL: http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2024-12.pdf
To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204

Annexe 1 : Charte chronostratigraphique (Cohen et al., 2013 – mise à jour 2024).

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
Direction régionale ou UTAM
Adresse
Tél. :
www.brgm.fr