

Document public

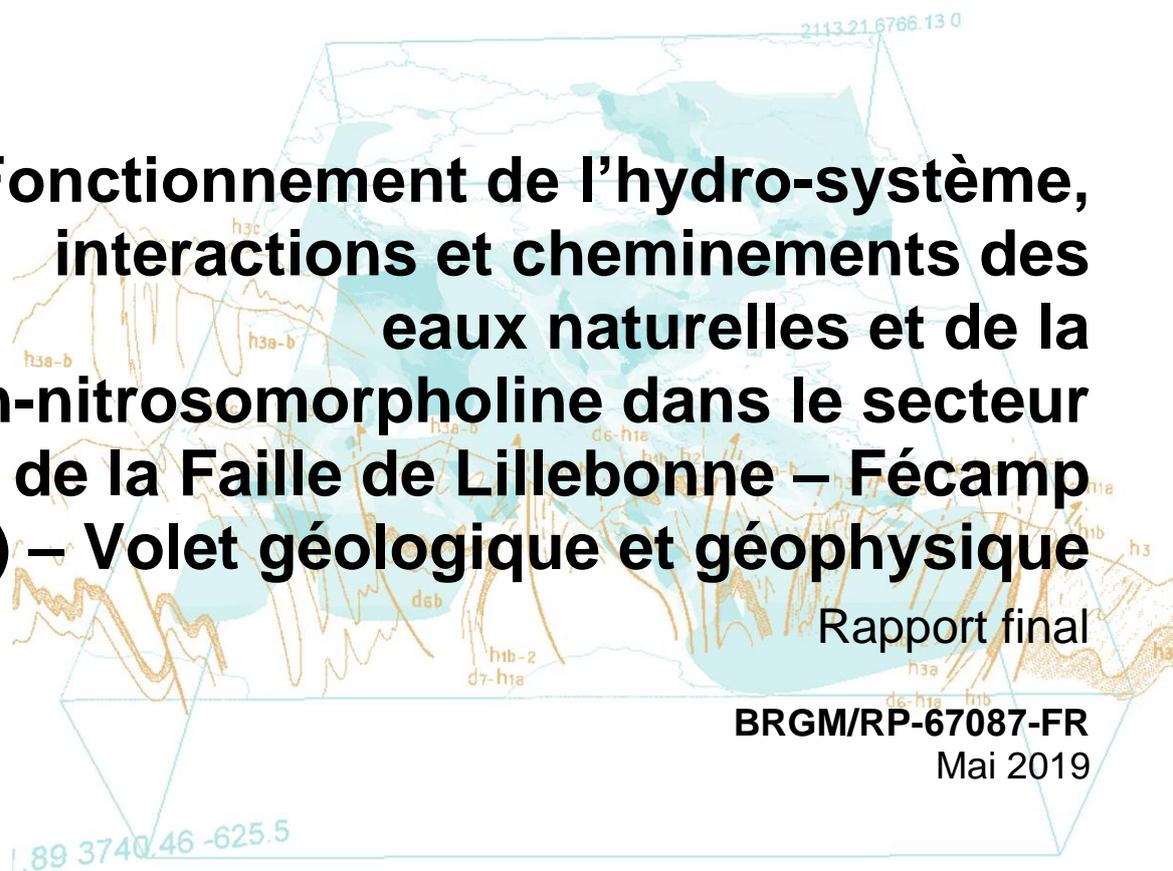


Fonctionnement de l'hydro-système, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la Faille de Lillebonne – Fécamp (76) – Volet géologique et géophysique

Rapport final

BRGM/RP-67087-FR

Mai 2019



Document public



Fonctionnement de l'hydro-système, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la Faille de Lillebonne – Fécamp (76) – Volet géologique et géophysique

Rapport final

BRGM/RP-67087-FR

Mai 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM 2015-POL-29

B. Meire, A. Portal, T. Jacob, F. Paquet, A. Bitri, F. Mathieu, P.Y. David

Vérificateur :

Nom : Cécile Allanic

Fonction : Géologue

Date : le 28.05.2019

Signature :

Approbateur :

Nom : Didier Pennequin

Fonction : Directeur Régional
Normandie

Date : 29.05.2019

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Mots-clés : géologie, géophysique, investigations gravimétriques, investigations électriques, investigations sismiques, faille de Fécamp-Lillebonne, structure tectonique, Lillebonne, Bolbec, Seine-Maritime, Normandie.

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

Meire B., Portal A., Jacob T., Paquet F., Bitri A., Mathieu F., David P. Y. (2019) – Fonctionnement de l'hydro-système, interactions et cheminements des eaux naturelles et de la n-nitrosomorpholine dans le secteur de la Faille de Fécamp-Lillebonne – Volet géologique et géophysique. Rapport final. BRGM/RP-67087-FR, 175 p., 66 ill., 2 tabl..

Synthèse

En 2012, la présence d'une molécule de la famille des nitrosamines (n-nitrosomorpholine i.e. NMOR) a été décelée dans la nappe souterraine qui alimente en eau potable les villes de Bolbec et de Gruchet-le-Valasse. Un plan de surveillance a été mis en place sous l'impulsion de l'ARS, assuré par différents acteurs. Ceci a rapidement permis de mettre en évidence l'étendue plus importante que prévue initialement de la pollution et, en particulier, son caractère très inhabituel. En effet, des captages situés de part et d'autre de la ville de Bolbec (Yport et vallée du Commerce) étaient contaminés par la pollution, indiquant que celle-ci avait migré à la fois vers le nord-ouest et vers le sud-est du département. Cette dispersion de la pollution mettait ainsi en évidence la complexité des cheminements souterrains et superficiels, et plus généralement du fonctionnement de l'hydro-système de la Craie dans le secteur de Bolbec.

Face à la persistance de la pollution dans le milieu naturel, le groupe technique de suivi de la pollution a décidé de lancer une étude visant à mieux comprendre comment fonctionne l'hydro-système de la craie (nappe et rivières) dans le secteur de Bolbec et en aval, de manière à pouvoir mieux appréhender les cheminements possibles que peuvent emprunter la morpholine et la nitrosomorpholine dans leur migration vers les captages AEP, afin ensuite d'avoir les éléments nécessaires pour mettre en place les mesures du suivi et de protection nécessaires les plus adaptées. Cette étude a été confiée au BRGM.

La première phase de l'étude, objet de ce présent rapport, a consisté à synthétiser et analyser les données géologiques existantes, et à mettre en œuvre des investigations géophysiques et géologiques visant à mieux comprendre la structure et la nature du sous-sol au sein duquel l'eau contaminée circule, afin de mettre en évidence les différentes voies de transferts potentielles des foyers de pollution vers les captages.

Ce rapport est le premier des deux rapports qui sont issus de la présente étude, l'autre portant le n° BRGM/RP-69139-FR.

A l'échelle de la géologie de la France, le secteur de Bolbec se situe sur la marge ouest du Bassin de Paris, qui correspond à une large cuvette sédimentaire centrée sur l'Île de France. En Seine-Maritime, ces formations sédimentaires sont essentiellement constituées de la puissante série crayeuse du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Turoniens – Coniaciens – Santoniens), qui forme l'ossature des plateaux du Pays de Caux. Ces craies, aquifères, reposent sur les formations sablo-argileuses moins perméables du Crétacé inférieur (Aptien – Albien).

La carte structurale des plateaux seino-marins présente une relative simplicité, puisque seules quelques structures majeures semblent affecter la monotonie des dépôts crayeux, mais dans le détail, le cadre tectonique du Pays de Caux apparaît plus complexe, puisqu'aux grands accidents d'orientation armoricaine N150-N160 (structure du Bray, faille de Fécamp-Lillebonne, faille de la Seine) s'ajoutent des structures d'orientation varisque N60-N70 (accident de Villequier), ainsi qu'une structuration N090 mise en évidence par une analyse morphométrique du relief des plateaux.

Dans le secteur de Bolbec, la tectonique locale a joué un rôle important sur la sédimentation, dans la mesure où la comparaison des différents faciès présents dans la zone d'étude avec ceux que l'on peut observer classiquement dans le Pays de Caux, met en évidence des jeux synsédimentaires de la structure de Fécamp-Lillebonne-Villequier au Crétacé. Ces rejeux ont induit notamment la mise en place des « sables de Lillebonne » dans un secteur nommé « Sillon de Lillebonne ».

La géologie est donc particulièrement plus complexe qu'initialement statuée dans le secteur d'étude, avec une influence certaine sur les écoulements souterrains et sur les échanges de flux entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Afin de déterminer au mieux les différentes voies d'écoulement souterraines, il est ainsi important d'avoir la meilleure image possible du réservoir passant par une meilleure définition des faciès et des structures en présence dans le sous-sol.

Dans un premier temps, la synthèse des données géologiques de la littérature a permis de faire un état des lieux relativement exhaustif des différents faciès et structures rencontrées dans le secteur d'étude. Dans un second temps, en complément de cette analyse bibliographique, plusieurs campagnes d'investigations géophysiques et géologiques ont été menées sur des secteurs clés de la zone d'étude. En termes de connaissance géologique et hydrogéologique, les objectifs de ces investigations sont multiples :

- Améliorer les connaissances sur la répartition spatiale (géométrie, épaisseur) des faciès aquifères (sables aptiens, albiens ou cénomaniens, craie) ou aquicludes (argiles albiennes, formations superficielles) ;
- Améliorer les connaissances sur les structures cassantes ou plicatives, notamment celles mentionnées dans la littérature et qui peuvent potentiellement avoir un rôle sur les dynamiques hydrogéologiques (drain ou barrière selon leur remplissage) (par exemple confirmer ou infirmer la présence de structures tectoniques à l'endroit où des linéaments ont été identifiés par l'analyse des photographies spatiales ou aériennes) ;
- Améliorer les connaissances sur l'état de fracturation de la craie aux abords de la faille de Fécamp-Lillebonne (failles satellites, failles conjuguées, relais etc.), ainsi que sur le développement de réseaux karstiques ;

Les investigations géophysiques ont consisté en la réalisation d'une carte gravimétrique, de 9 profils électriques et de deux profils sismiques. L'interprétation des résultats géophysiques a été effectuée à partir de l'analyse des données de sondage disponibles dans le secteur (Banque du Sous-Sol), calée et étayée par la réalisation d'un sondage carotté réalisé en janvier 2019 par le BRGM, au cœur de la zone faillée (sondage SC-1) ainsi que par l'observation de différents affleurements et de cavités souterraines dans le secteur de Bolbec.

Ces investigations géophysiques et géologiques ont permis d'améliorer notre connaissance du contexte géologique et structural entre Mirville au nord et Lillebonne au sud, et particulièrement dans le secteur de Bolbec. Ainsi, la corrélation des données géologiques et géophysiques a permis de proposer un nouveau schéma structural, qui met notamment en évidence certaines structures jusqu'alors ignorées :

- La structure en « faisceaux » de la faille de Fécamp-Lillebonne, orientée N150°, qui délimite des blocs parfois basculés ;
- la présence d'une structure antiforme faillée à l'aplomb du bord nord-est surélevé du faisceau principal axé N150°, à l'origine de la remontée en sub-surface des formations de la base du Crétacé supérieur et du Crétacé inférieur ;
- la présence de « graben », orientés NE-SO aux droits des vallons de la Fontaine Palfray et de Bolbec ;

En outre, plusieurs structures supposées dans le cadre d'études antérieures (notamment des failles) ont pu être validées, ce qui complète la connaissance structurale de la zone. Ce nouveau

schéma structural, plus complexe qu'initialement statué dans la zone entre Mirville et Lillebonne, résulte de l'activité tectonique polyphasée sur des structures de nature, d'âge et d'orientations différentes. Cette activité tectonique a conditionné la nature et la géométrie des dépôts albiens et cénomaniens (cas de la Pierre de Fécamp et des Sables de Lillebonne notamment). Plus récemment, ces structures ont largement favorisé la mise en place d'un système karstique très développé, empruntant la structure de Fécamp-Lillebonne. Ces données inédites ont permis donc d'établir de nouvelles hypothèses sur la géométrie de l'aquifère.

D'un point de vue opérationnel, pour comprendre les cheminements des eaux souterraines et des relations nappes rivières :

- les nouvelles failles et structures mises en évidence ont été cartographiées (Illustration 64, Illustration 65) ;
- des coupes de synthèse ont été établies notamment au droit des deux grabens qui peuvent constituer des voies de transfert préférentielles des pollutions vers les captages (vallée de Bolbec - des sources du Commerce jusqu'au centre-ville - et vallon Palfray) (Illustration 62 et Illustration 63).

Ces nouvelles connaissances ont déjà permis d'établir des recommandations concernant l'extension du réseau de piézo-qualitomètres visant à mieux définir l'extension du panache de pollution en MOR-NMOR, et à mieux caractériser l'impact de ces structures géologiques sur le comportement de la nappe.

Enfin, ces nouvelles connaissances acquises lors de la phase 1, contribueront largement à améliorer l'interprétation des résultats de la deuxième phase de l'étude (investigations hydrologiques et hydrogéologiques) et à mieux appréhender les cheminements possibles que peuvent emprunter la morpholine et la nitrosomorpholine dans leur migration vers les captages AEP. Ceci permettra ensuite d'avoir des éléments fiables pour mettre en place les mesures de suivi et de protection nécessaires les plus adaptées.

Sommaire

1. Contexte géologique et structural – état des connaissances	13
1.1. CADRE GEOLOGIQUE GENERAL	13
1.2. CONTEXTE STRUCTURAL DE LA ZONE D'ETUDE	14
1.2.1. La zone de faille majeure de Fécamp-Lillebonne	19
1.2.2. Déformations associées à la faille de Fécamp-Lillebonne	35
1.2.3. Carte structurale de la zone d'étude (compilation bibliographique)	39
1.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS DU CRETACE	43
1.3.1. Crétacé inférieur	47
1.3.2. Crétacé supérieur	55
1.4. DESCRIPTION ET REPARTITION SPATIALE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES.....	61
1.4.1. Limons des Plateaux.....	62
1.4.2. Formation résiduelle à silex	62
1.4.3. Colluvions et dépôts de pente	62
1.4.4. Le complexe alluvionnaire.....	62
1.4.5. Variations latérales de faciès	64
2. Investigations géophysiques : résultats et interprétations.....	69
2.1. OBJECTIF : AMELIORER LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL DU SECTEUR LILLEBONNE-BOLBEC	69
2.2. DEROULEMENT DES INVESTIGATIONS.....	70
2.3. INVESTIGATIONS GRAVIMETRIQUES	73
2.3.1. Mode opératoire et traitement	73
2.3.2. Résultats.....	95
2.3.3. Interprétation et discussion	110
2.4. INVESTIGATIONS ELECTRIQUES	113
2.4.1. Mode opératoire.....	113
2.4.2. Résultats et interprétations	115
2.5. INVESTIGATIONS SISMIQUES	135
2.5.1. Mode opératoire.....	135
2.5.2. Résultats et interprétations	137
2.6. MISE EN PARALLELE DES INTERPRETATIONS GEOPHYSIQUES	141
2.6.1. Corrélation des résultats le long du profil ERT1 (bloc nord-est soulevé)	141
2.6.2. Corrélation des résultats le long du profil ERT4 (orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne)	142

2.6.3. Corrélation des résultats le long du profil ERT3 (orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne, le long de la RD6015).....	142
3. Investigations géologiques : résultats et interprétations	145
3.1. SONDAGE CAROTTE SC-1.....	145
3.1.1. Objectifs des investigations géologiques	145
3.1.2. Déroulé des investigations.....	147
3.1.3. Description lithologique du sondage carotté SC-1	147
3.1.4. Analyse des données diagraphiques	150
3.2. DONNEES D’AFFLEUREMENTS.....	153
3.2.1. Affleurement de la rue Fontaine Martel (Bolbec).....	153
3.2.2. Affleurement du gymnase J. Anquetil (Bolbec)	154
3.3. UTILISATION DES INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES POUR UNE NOUVELLE INTERPRETATION DES DONNEES GEOPHYSIQUES	154
3.3.1. Calage du profil électrique ERT 4 et réinterprétation des profils électriques	154
3.3.2. Origine des anomalies gravimétriques P2, P4, P5 et P6.....	155
4. Exploitation et corrélation des données géologiques et géophysiques à l’échelle de la zone d’étude	157
4.1. PROPOSITION DE COUPES GEOLOGIQUES DES VALLEES DE BOLBEC ET DE PALFRAY	157
4.2. PROPOSITION D’UN NOUVEAU SCHEMA STRUCTURAL.....	161
5. Conclusions et perspectives.....	167
6. Bibliographie.....	173

Liste des figures

Illustration 1 : Cadre géologique de la zone d'étude à l'échelle du Bassin de Paris. La zone d'étude est représentée par le rectangle rouge, et la position simplifiée de la coupe par le tracé rouge (sources : carte géologique de la France au 1/1.000.000 (BRGM) et coupe géologique du Bassin Parisien et du Fossé Rhénan (AGBP, 2014))	14
Illustration 2 : Situation et contexte structural de la zone d'étude sur la bordure ouest du Bassin de Paris (sources : carte géologique de la France à 1/1.000.000 (BRGM), carte géologique de la France à 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM), carte géologique de la marge continentale de la France à 1/250.000 (BRGM), cartes géologiques de la France à 1/50.000 (feuilles de Bolbec et Fécamp) (BRGM), Hauchard et al., 2002))	17
Illustration 3 : Carte géologique simplifiée modifiée d'après la carte géologique de la Baie de Seine au 1/250.000 (Paquet et al., in prep). Les zones d'affleurement du Crétacé inférieur sont indiquées en rouge. Les flèches rouges localisent les 3 zones d'affleurement associées à des anticlinaux situés le long de l'accident Nord-Baie-de-Seine – Fécamp-Lillebonne. La localisation des profils sismiques (illustration suivante) est figurée par les segments A et B.....	20
Illustration 4 : Profils sismiques très haute résolution CW16_043 (A) et CW16_021 (B) acquis lors de la campagne Chalkwave 2016 en version non interprétés (haut) et interprétés (bas), modifiés d'après Paquet et al., 2017. L'albien est figuré en rouge. Exagération verticale d'environ 30x	21
Illustration 5 : Profil sismique effectué en mer orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne lors des études préliminaires pour l'implantation d'un champ éolien offshore à Fécamp (modifié d'après ID SCOPE, 2011). Forte exagération verticale	22
Illustration 6 : Estimations des rejets verticaux le long de la structure de Fécamp-Lillebonne dans la zone d'étude, d'après la corrélation des logs géologiques validés de la BSS atteignant le niveau repère du Gault (Albien).....	25
Illustration 7 : Coupes géologiques SO-NE (CPGF, 1980)	27
Illustration 8 : Illustration de la compartimentation de la structure de Fécamp-Lillebonne entre Lillebonne au sud et Bolbec au nord (Ragot, 1988)	29
Illustration 9 : Structure en « marches d'escalier » avec regard ouest de la faille Fécamp-Lillebonne vers Lillebonne (Ragot, 1988)	30
Illustration 10 : Extrait de la coupe topographique et géologique proposée par ID SCOPE dans son rapport (issue d'un profil sismique) qui présente la dépression endoréique située au niveau de l'axe de l'anticlinal qui borde la faille de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé (modifié d'après ID SCOPE, 2011).....	31
Illustration 11 : Synthèse des données relatives aux phénomènes karstiques et à la fracturation du substratum crayeux dans le secteur situé entre Mirville et Notre-Dame-de-Gravenchon	33
Illustration 12 : Histogrammes de répartition du nombre de linéaments (axe ordonnées) par valeur d'azimut montrant les bornes utilisées pour déterminer les 3 (haut) ou 5 (bas) classes différentes	38
Illustration 13 : Comparatif entre les groupes de valeurs d'azimuts établis par Hauchard et al. (2002) et dans cette étude	38
Illustration 14 : Carte des linéaments par classe d'azimut sur le Pays de Caux.....	39
Illustration 15 : Schéma structural du secteur situé entre Mirville au nord et Notre-Dame-de-Gravenchon au sud, synthèse des données bibliographiques	41
Illustration 16 : Colonne lithostratigraphique synthétique des formations géologiques dans le secteur de Bolbec (compilation bibliographique, épaisseurs moyennes)	43
Illustration 17 : Synthèse des données lithostratigraphiques disponibles dans la littérature pour les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé (d'après Juignet, 1974 ; Ragot, 1988, Lasseur, 2008, Mortimore et al., 2004, Ménillet, 1969).....	45

Illustration 18 : Affleurement du faciès des Sables ferrugineux (oxydés) de l’Aptien au Cap de la Hève (Seine-Maritime) – BRGM	47
Illustration 19 : Succession Aptien (Sables ferrugineux) – Albien inf. (Poudingue ferrugineux) et Albien sup. (Argiles du Gault) au niveau d’un affleurement du Cap de la Hève (Seine-Maritime) – BRGM.....	48
Illustration 20 : Faciès des Argiles du Gault de l’Albien supérieur rencontrés en fin de forage dans le sondage de la CODAH de Nointot (ici entre 159 m et 162 m de profondeur) – ouvrage BSS 00756X0209	49
Illustration 21 : Faciès des Gaize de l’Albien supérieur rencontrés dans le forage de la CODAH de Nointot (ici entre 150 m et 153 m de profondeur) – ouvrage BSS 00756X0209	49
Illustration 22 : Affleurement des « Sables de Lillebonne » de l’Albien supérieur dans la rue Fontaine Martel à Bolbec, à une centaine de mètres en amont de la structure de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé – BRGM	50
Illustration 23 : Géométrie de la Gaize supérieure du secteur entre Villequier à l’est et Radicatel à l’ouest, représentée par le faciès des « Sables de Lillebonne » (modifié d’après Ragot, 1988).....	50
Illustration 24 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des faciès du Crétacé inférieur (sources : Ragot, 1988 ; CGG, 1998 ; Banque du Sous-Sol (BRGM) et carte géologique de la France au 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM)).....	53
Illustration 25 : Variations lithologiques et géométriques de la partie haute de la faciès de la Gaize supérieure « Sables de Lillebonne ») et du Cénomani inférieur sur l’ Axe de Lillebonne (modifié d’après Ragot, 1988)	55
Illustration 26 : Affleurement de la Pierre de Fécamp, faciès condensé du Cénomani inférieur dans la rue Fontaine Martel à Bolbec, à une centaine de mètres en amont de la structure de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé – BRGM.....	56
Illustration 27 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des faciès du Crétacé supérieur (sources : carte géologique de la France au 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM) ; cartes géologiques de la France au 1/50.000 (BRGM), CGG, 1998, données BSS (BRGM))	59
Illustration 28 : Répartition schématique des formations superficielles sur le substratum crayeux de l’Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al., 1996).....	61
Illustration 29 : Répartition des formations superficielles alluvionnaires sur la zone d’étude (d’après la carte géologique harmonisée de la Seine-Maritime, Quesnel et al., 2007)	63
Illustration 30 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des formations superficielles (sources : Cartes géologiques de la France au 1/50.000 (BRGM) ; CGG, 1998, données BSS (BRGM))	67
Illustration 31 : Carte de localisation des investigations géophysiques réalisées sur le secteur de Bolbec	71
Illustration 32 : Carte d’implantation des stations gravimétriques acquises en avril 2016 (points bleus) et en décembre 2016 (points rouges). La base gravimétrique est marquée par un triangle vert. Fond topographique IGN au 25000 ^{ème}	75
Illustration 33 : a) localisation de la base (rond rouge) sur photographie aérienne b) photographie de situation de la base gravimétrique principale, située à l’hôtel ‘le Relais d’Etretat’. c) détail du positionnement du trépied du CG5 au niveau de la dalle, les côtes sont en cm.....	77
Illustration 34 : Corrections topographiques (mGal) pour une densité 2.06. Fond : MNT IGN RGE Alti à la maille de 5 m.	81
Illustration 35 : Méthode de Parasnis pour trouver la densité optimale de réduction de l’anomalie de Bouguer : l’anomalie à l’air libre corrigée d’un plan est représentée en fonction des termes qui dépendent de la densité dans la formule de l’anomalie de Bouguer, pour chaque mesure. La pente de la droite passant au mieux par ces points (droite bleue) donne la densité	83
Illustration 36 : Coefficient de corrélation entre l’anomalie résiduelle et l’altitude des stations. Le trait rouge horizontal marque le coefficient de corrélation nul, et le trait rouge vertical la densité associée	84

Illustration 37 : a) Topographie interpolée aux stations gravimétriques, b) à f) : anomalie résiduelle (mGal) calculée pour les densités de réduction 1.7 à 2.1	85
Illustration 38 : Histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé (courbe rouge). Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée	91
Illustration 39 : Histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée	92
Illustration 40 : Histogramme des reprises du positionnement horizontal en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée	93
Illustration 41 : Histogramme des écarts entre les altitudes GPS des stations et celles projetées sur le MNT à 5 m	94
Illustration 42 : Anomalie de Bouguer pour une densité de 2.06 (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les 0.05 mGal	97
Illustration 43 : Anomalie régionale obtenue par prolongement vers le haut de 250 m de l'anomalie de Bouguer	99
Illustration 44 : Anomalie résiduelle (mGal).....	101
Illustration 45 : Gauche : dérivée seconde verticale de l'anomalie de Bouguer pour une densité de réduction de 2.06, droite : module du gradient horizontal	105
Illustration 46 : Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques (lignes noires parallèles aux axes), et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (tirets rouges) de P1 à P7, les axes négatifs (tirets bleus) de N1 à N4	107
Illustration 47 : Clé d'interprétation des profils électriques, qui permet d'associer une réponse électrique à chaque faciès géologique identifié sur le secteur	117
Illustration 48 : Schéma structural de la zone d'étude basé sur la corrélation des différents profils électriques. Cette carte montre clairement la structure en faisceau de la faille de Fécamp-Lillebonne ...	131
Illustration 49 : Mise en perspective des profils électriques orthogonaux au tracé de la structure de Fécamp-Lillebonne illustrant sa structure en faisceau	133
Illustration 50 : Carte de positionnement des profils sismiques 1 (bleu) et 2 (rouge), et des forages de calage stratigraphique (numérotation BSS), sur fond de la carte géologique de la France au 1/50.000 feuille de Bolbec (Ménillet, 1969a). Le tracé de la faille de Fécamp-Lillebonne est figuré en traits interrompus	136
Illustration 51 : Planche d'interprétation du profil sismique 1 (orienté E-O), avec de haut en bas : le profil non-interprété, le profil interprété et habillé en stratigraphie, et le profil interprété et habillé en lithostratigraphie	138
Illustration 52 : Planche d'interprétation du profil sismique 2 (orienté SO-NE), avec de haut en bas : le profil non-interprété, le profil interprété et habillé en stratigraphie, et le profil interprété et habillé en lithostratigraphie	139
Illustration 53 : Comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil électrique ERT 1 NE-SO	141
Illustration 54 : Comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil électrique ERT 4	142
Illustration 55 : Analyse comparée des données gravimétriques, électriques et sismiques le long du profil électrique ERT 3, qui montre une très bonne corrélation entre les résultats au niveau du passage de la faille F2 (faisceau de failles F2 et F2')	143
Illustration 56 : Situation du sondage carotté SC-1 réalisé par le BRGM en janvier 2019, et des autres forages destructifs (SD) ou carottés (SC) préconisés par le BRGM	146

Illustration 57 : Situation du sondage carotté SC-1 vis-à-vis des investigations géophysiques.....	146
Illustration 58 : Description lithologique du sondage carotté SC-1, réalisé par le BRGM en janvier 2019	149
Illustration 59 : Corrélation des données lithologiques et diagraphiques pour le sondage carotté SC-1.	152
Illustration 60 : Situation des deux affleurements étudiés par le BRGM dans le vallon de Bolbec, vis-à-vis du sondage SC-1 et des structures mises en évidence par la géophysique	153
Illustration 61 : Localisation des coupes n°1 et 2	157
Illustration 62 : Coupe géologique synthétique du vallon de Bolbec (coupe n°1). A noter que seules les failles couvertes par les investigations géophysiques ont été nommées (F1, F2 etc.). Les formations superficielles ne sont pas représentées	159
Illustration 63 : Coupe géologique synthétique du vallon Palfray (coupe n°2). A noter que seules les failles couvertes par les investigations géophysiques ont été nommées (F1, F2 etc.). Les formations superficielles ne sont pas représentées	159
Illustration 64 : Proposition du nouveau schéma structural pour la zone d'étude, entre Notre-Dame-de-Gravenchon et Mirville	163
Illustration 65 : Proposition d'un nouveau schéma structural pour le secteur de Bolbec, basé sur l'interprétation des données géophysiques, géologiques et morphologiques	165
Illustration 66 : Proposition d'implantation du réseau de piézomètres-qualitomètres. Le sondage SC-1 a été réalisé en janvier 2019	169

1. Contexte géologique et structural – état des connaissances

Ce premier chapitre a pour objectif de préciser le contexte géologique et structural aux abords de l'accident de Fécamp-Lillebonne, à partir de l'analyse et de la synthèse d'éléments bibliographiques. Cet « état des connaissances » s'inscrit comme une première étape indispensable pour effectuer l'interprétation des investigations géophysiques et géologiques qui ont été réalisées dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 2 et chapitre 3).

1.1. CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

A l'échelle de la géologie de la France, le secteur de Bolbec se situe sur la bordure ouest du Bassin de Paris qui correspond à une large cuvette sédimentaire centrée sur l'Île de France (Illustration 1). En Seine-Maritime, les formations sédimentaires qui le constituent sont, des plus anciennes aux plus récentes :

- les faciès argileux du Jurassique supérieur ;
- en discordance, les formations sablo-argileuses peu perméables du Crétacé inférieur (Aptien – Albien) ;
- en discordance, la puissante série crayeuse du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Turonien – Coniacien – Santonien) formant l'essentiel de l'ossature des plateaux du Pays de Caux. Ces craies sont aquifères de par leur importante porosité.

Sur le terrain, ces formations mésozoïques affleurent peu. Généralement leur observation est possible uniquement à la faveur des ruptures de pentes sur les versants ou dans d'anciennes carrières à ciel ouvert. La majeure partie du substratum est en effet recouvert de formations superficielles diverses, parfois très épaisses (cf. chapitre 1.4) :

- altérites à silex et limons des plateaux au sommet des plateaux ;
- colluvions et formations de pentes sur les versants ;
- complexe alluvionnaire en fond de vallées.

Structuralement, le secteur d'étude paraît peu déformé et présente généralement une structure sub-tabulaire à monoclinale. La faille de Fécamp-Lillebonne reste l'accident géologique majeur de la région pouvant induire des perturbations dans le système aquifère, de par :

- la complexité de sa géométrie (pouvant être à l'origine d'une compartimentation du réservoir) ;
- son jeu synsédimentaire, notamment au cours du Crétacé, qui induit des variations locales de faciès et d'épaisseurs, particulièrement pour les formations albiennes et cénomaniennes ;
- sa ou ses réactivation (s) tectonique(s) dans le temps.

De plus amples détails sont fournis dans la partie 1.2 de cette étude.

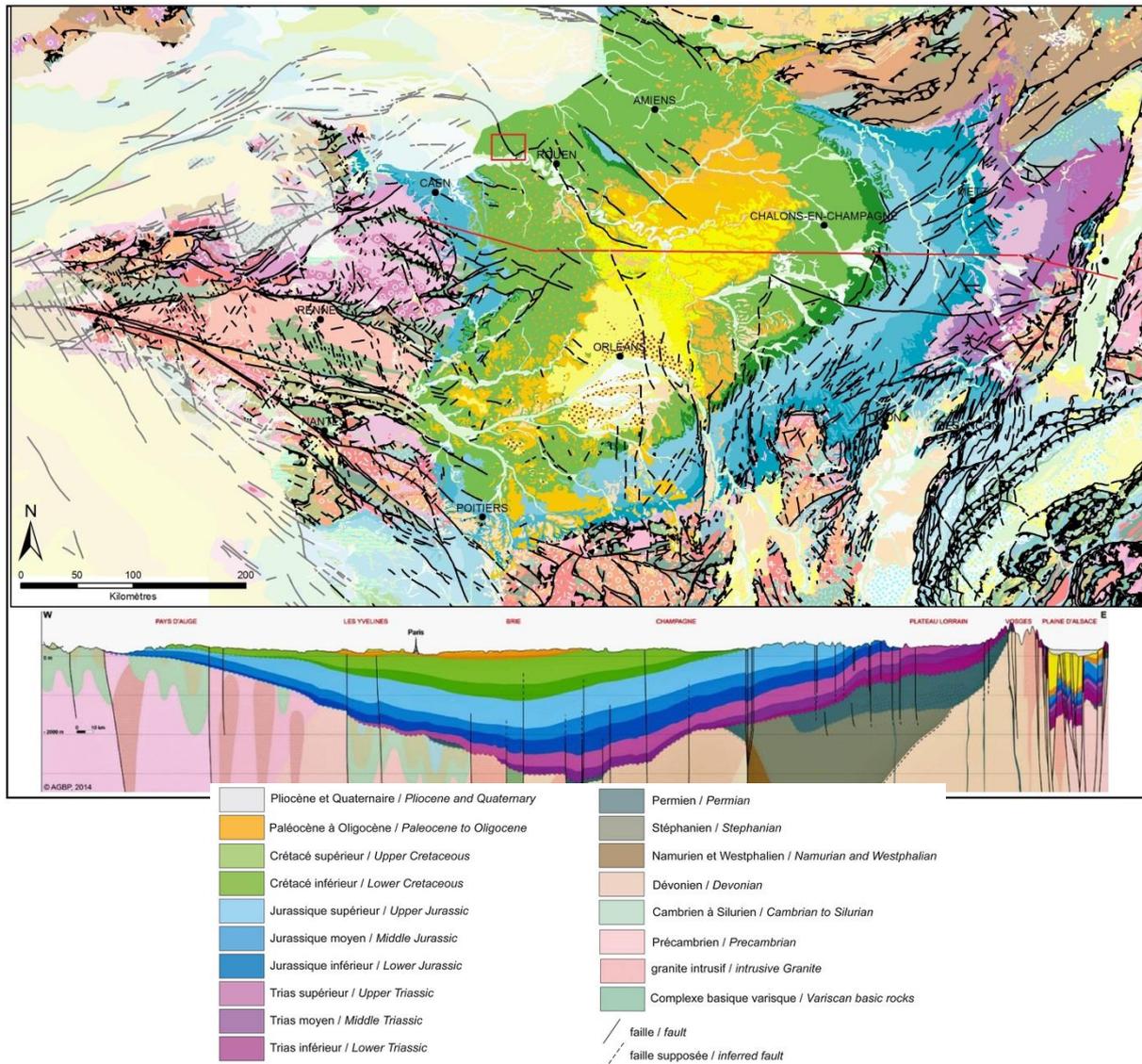


Illustration 1 : Cadre géologique de la zone d'étude à l'échelle du Bassin de Paris. La zone d'étude est représentée par le rectangle rouge, et la position simplifiée de la coupe par le tracé rouge (sources : carte géologique de la France au 1/1.000.000 (BRGM) et coupe géologique du Bassin Parisien et du Fossé Rhénan (AGBP, 2014))

1.2. CONTEXTE STRUCTURAL DE LA ZONE D'ETUDE

A l'échelle du Bassin de Paris, la carte structurale des plateaux seino-marins (Illustration 2) ne fait état que de très peu de déformations affectant les dépôts crayeux : les principaux accidents d'extension régionale sont l'anticlinal faillé du Bray et la faille de Fécamp-Lillebonne (orientés N150°-N160° - orientation *armoricaine*), reliés à l'accident de la Seine (orientation *armoricaine*) par la structure de Villequier (N60°-N70° - orientation *varisque*) et les failles de Pavilly.

Dans le détail, le cadre tectonique du Pays de Caux apparaît plus complexe (Illustration 2). Aux grands accidents d'orientation armoricaine N150°-N160° (structure du Bray, faille de Fécamp-Lillebonne, faille de la Seine) s'ajoutent des structures d'orientation varisque N60°-N70° (accident de Villequier), ainsi qu'une structuration N090° mise en évidence essentiellement par l'analyse

morphométrique du relief des plateaux (*Hauchard, 2002 ; Hauchard et Laignel, 2008*), confirmée en baie de Seine par les récentes investigations géophysiques et géologiques (*Benabdellouahed et al., 2014*).

Ces structures sont héritées d'accidents anciens du socle principalement mis en place lors de l'orogénèse cadomienne et surtout hercynienne. Les orogénèses pyrénéenne et alpine ont ensuite réactivé une partie de ces structures en fonction de leurs orientations par rapport au champ de contrainte. Le soulèvement alpin et la subsidence de la Manche ont notamment achevé le façonnement de la région en découpant les plateaux seino-marins en différents blocs tectoniques (*Hauchard et Laignel, 2008*). Ainsi, le secteur d'étude est segmenté en deux blocs par la faille de Fécamp-Lillebonne: le bloc affaissé de la pointe de Caux à l'ouest et le bloc soulevé du Caux central à l'est (*Hauchard et Laignel, 2008*).

La description des différents faciès présents dans la zone d'étude (cf chapitre 1.3), au regard de ceux que l'on peut observer classiquement dans le Pays de Caux, met en évidence des spécificités locales liées au jeu synsédimentaire de la structure de Fécamp-Lillebonne-Villequier au Crétacé. Ces jeux ont induit notamment la mise en place des « Sables de Lillebonne » dans un secteur nommé « Sillon de Lillebonne ».

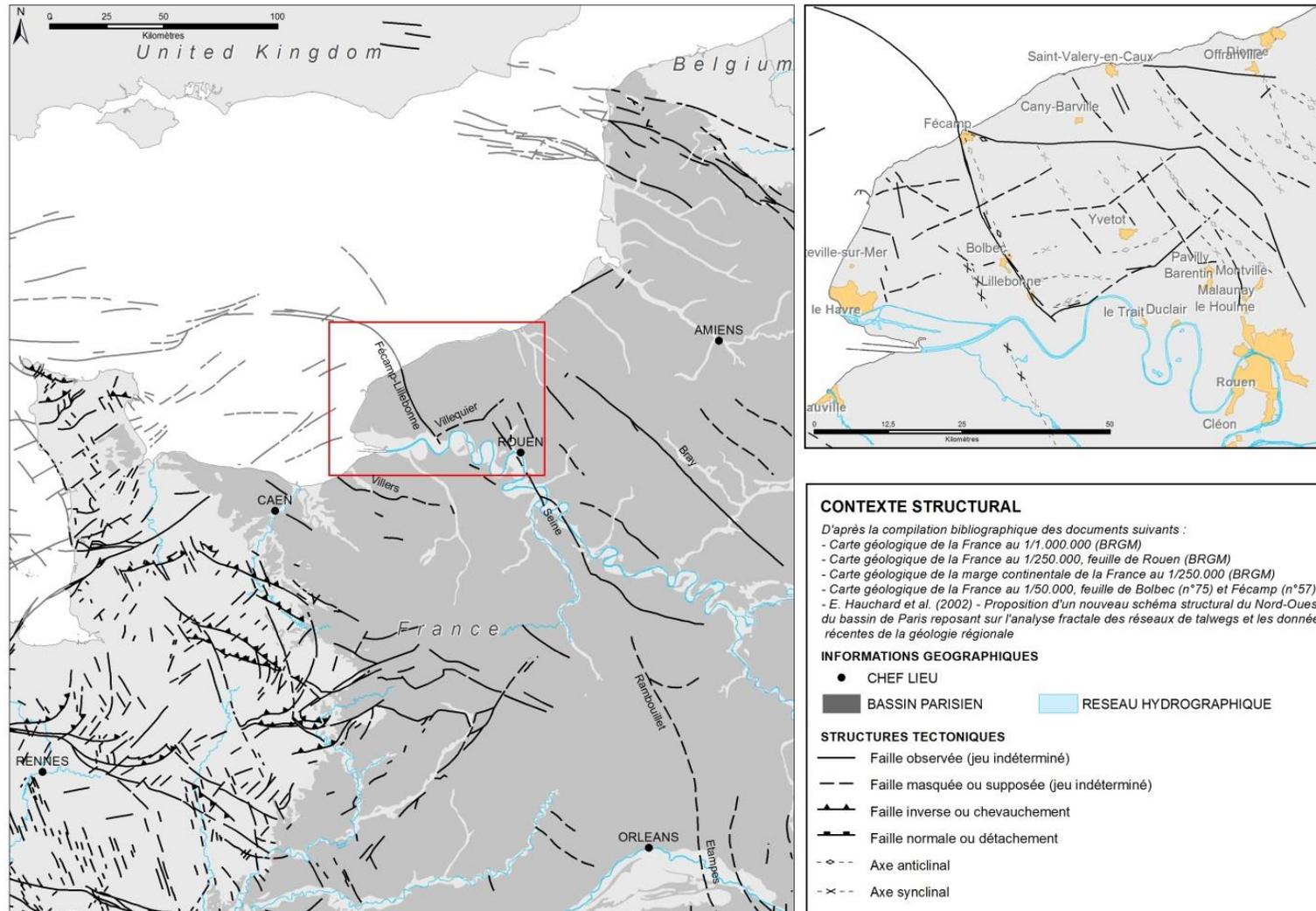


Illustration 2 : Situation et contexte structural de la zone d'étude sur la bordure ouest du Bassin de Paris (sources : carte géologique de la France à 1/1.000.000 (BRGM), carte géologique de la France à 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM), carte géologique de la marge continentale de la France à 1/250.000 (BRGM), cartes géologiques de la France à 1/50.000 (feuilles de Bolbec et Fécamp) (BRGM), Hauchard et al., 2002))

1.2.1. La zone de faille majeure de Fécamp-Lillebonne

Caractérisation de la structure - état des connaissances

NOM	ORIENTATION	JEU (OBS. ACTUELLE)	NATURE	REJET VERTICAL	CONTACT ANORMAUX
Faille de Fécamp-Lillebonne	N150°	Normal Décrochant dextre	Faisceau de failles	Bolbec : 150 m Lillebonne : 40 m	Sénonien / Cénomaniens inf.

Nommée faille de Fécamp-Lillebonne ou faille de Lillebonne-Bolbec selon les auteurs, il s'agit d'une structure géologique régionale majeure orientée N150° (orientation *armoricaine*), qui traverse tout le Pays de Caux sur plus de 25 km et se prolonge en Manche au large de Fécamp en prenant progressivement une orientation E-O. Au sud, cette structure n'atteindrait pas la Seine et viendrait buter contre l'accident N060° (orientation *varisque*) de Notre-Dame-de-Gravenchon – Triquerville - Villequier. A l'échelle du Bassin de Paris, cette structure possède la même orientation que les failles de la Seine, de Rambouillet et d'Etampes (Illustration 2).

La faille de Fécamp-Lillebonne est une faille normale-décrochante dextre (*Hauchard et Laignel, 2008*), correspondant à la réactivation d'un accident du socle d'orientation similaire, et présentant une géométrie analogue aux grandes failles N150-N160° du Massif Armoricain. D'une manière générale, ces structures correspondent initialement à des accidents décrochants au tardi-hercynien ayant rejoué en faille normale lors de la phase distensive qui marque l'Europe à l'Eocène supérieur (*Vernhet et al., 1995*). Ils sont caractérisés par de grandes failles à fracturation ouverte et hydrauliquement très conductrices.

La faille de Fécamp-Lillebonne semble avoir été réactivée après le Turonien au cours d'un épisode distensif NE-SO, encore actif au Coniacien, ce qui a eu un rôle sur les épaisseurs des dépôts crayeux aux abords de cet accident (*Duperret et al., 2012*). Plus récemment, les rejeux cénozoïques semblent être à l'origine de la géométrie actuelle de la faille, et de la mise en place des structures plissées associées (anticlinal de Fécamp, anticlinal de Bolbec etc.) (*Wazi, 1988, Hauchard et al., 2008*). Enfin, de(s) rejeu(x) post-pliocène de cette structure semblent confirmés par la présence, entre Bréauté et Lillebonne, de poches de sables plio-pléistocènes alignés et disposés dans le bloc sud-ouest affaissé (*Wazi, 1988*).

Le rejet vertical de la faille de Fécamp-Lillebonne varie selon les secteurs : aux alentours de Bolbec, le rejet vertical est de l'ordre de 100 à 150 m (*Ménillet, 1969 ; Ternet, 1968 ; CPGF, 1980*), ce qui met en contact les craies du Coniacien (situées dans le bloc SO affaissé), avec les niveaux glauconieux de l'Albien et du Cénomaniens inférieur (situées sur le bloc NE), tandis que le rejet vertical est estimé à environ 40 m vers Lillebonne (*SAFEGE, 2012*).

Dans le paysage structural du Pays de Caux, la faille de Fécamp-Lillebonne est associée à de larges structures plicatives avec des axes environ N150° à faible pendage, globalement parallèles à la faille (*Ragot, 1988*) (cf. détails partie suivante).

Les récents profils sismiques réalisés au large de Fécamp dans le cadre de la mise à jour de la cartographie géologique de la baie de Seine (*Benabdellouahed et al., 2014 ; Paquet et al., 2017*), ou lors des études géophysiques pour l'implantation du champ éolien offshore de Fécamp (*ID SCOPE, 2011*) ont permis d'améliorer la connaissance de la géométrie de la faille en mer. L'illustration 4 correspond à deux profils sismiques orientés SO-NE, orthogonaux à la faille au large de Fécamp. Ils mettent en évidence une structure cassante verticale associée à une

structure antiforme asymétrique bien marquée au nord-est, et à une structure synforme à large longueur d'onde au sud-ouest. Cette géométrie se retrouve sur le profil sismique réalisé par ID SCOPE (Illustration 5), où l'on observe bien l'accident cassant de Fécamp-Lillebonne qui tronque le flanc sud d'une structure anticlinale pincée bien marquée qui passe latéralement vers le Nord / Nord-est à un synclinal dissymétrique à large longueur d'onde, puis de nouveau à un dôme anticlinal.

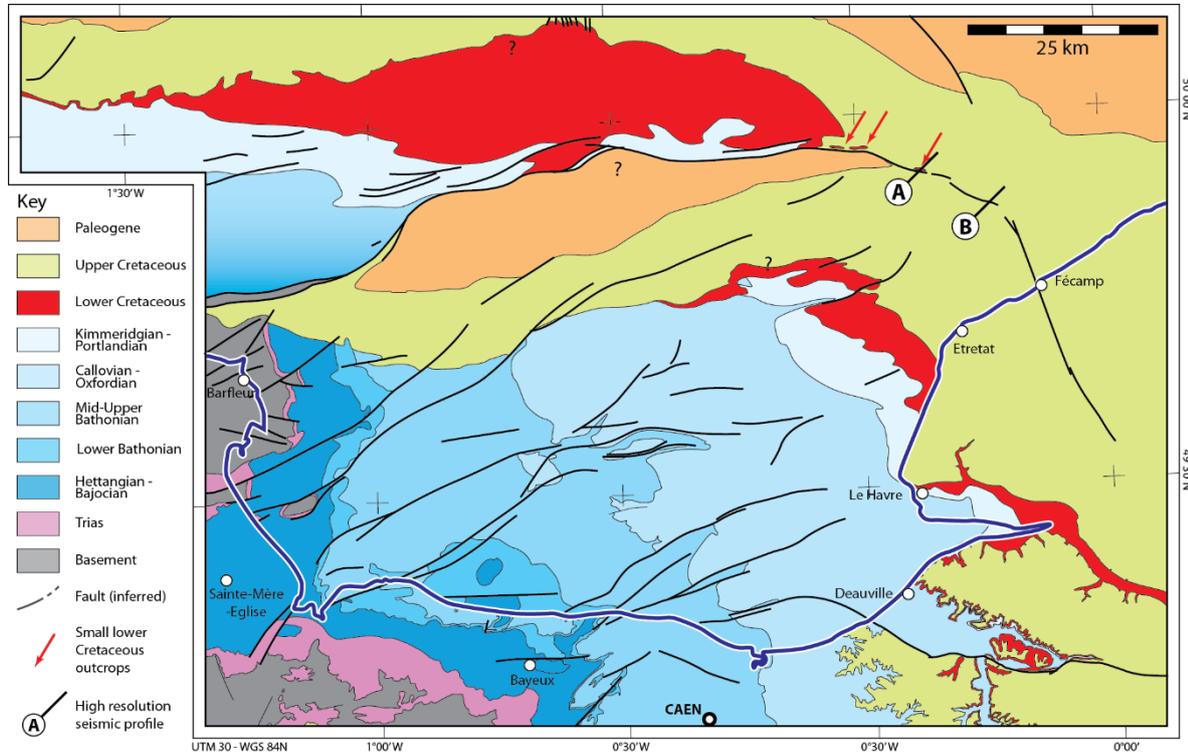


Illustration 3 : Carte géologique simplifiée modifiée d'après la carte géologique de la Baie de Seine au 1/250.000 (Paquet et al., in prep). Les zones d'affleurement du Crétacé inférieur sont indiquées en rouge. Les flèches rouges localisent les 3 zones d'affleurement associées à des anticlinaux situés le long de l'accident Nord-Baie-de-Seine – Fécamp-Lillebonne. La localisation des profils sismiques (illustration suivante) est figurée par les segments A et B

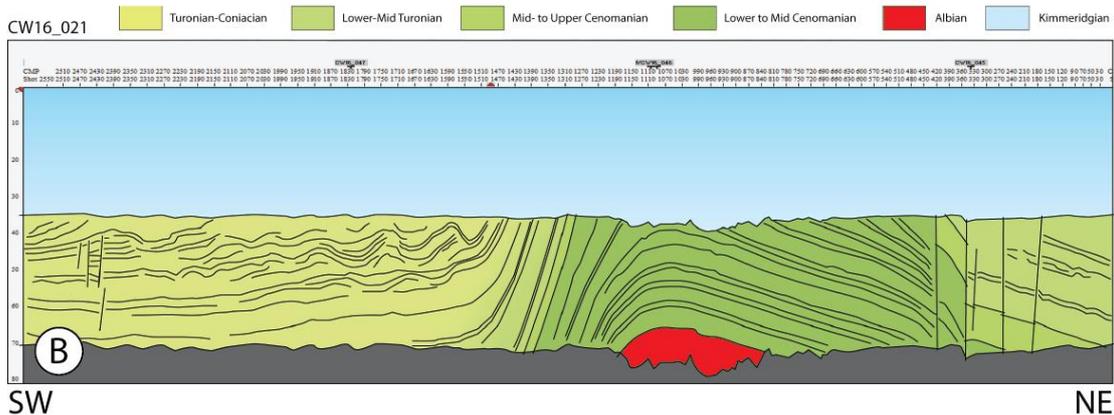
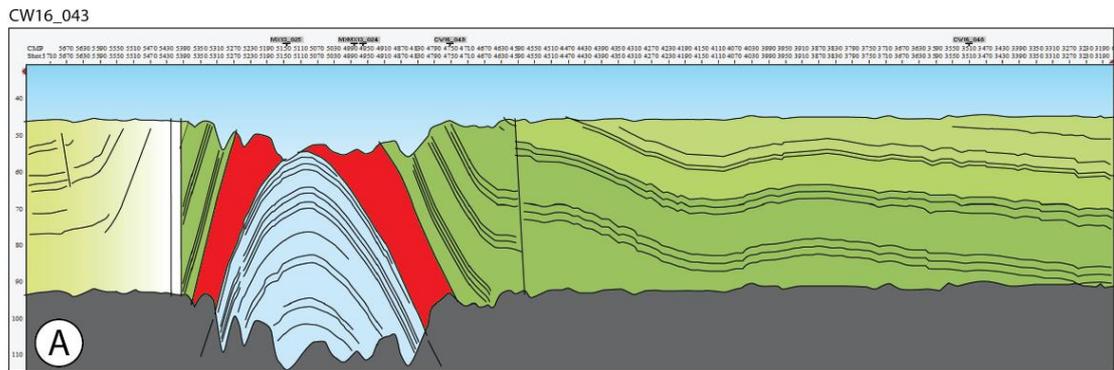
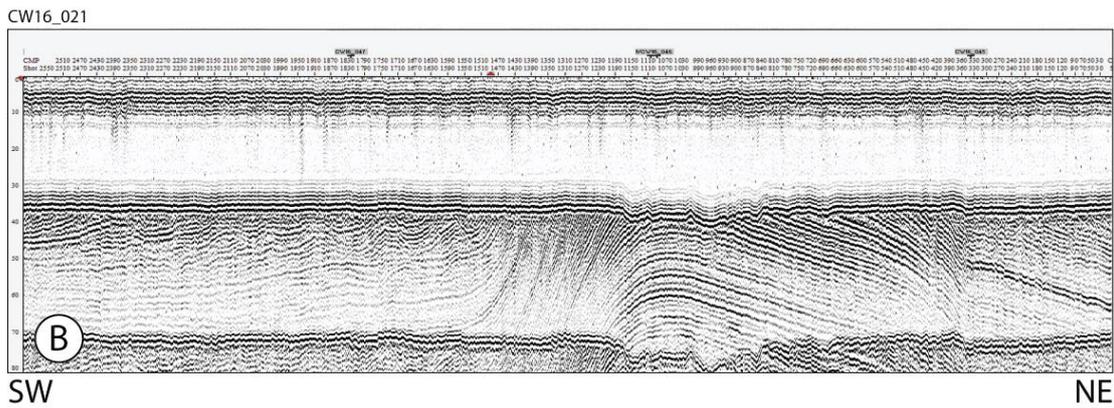
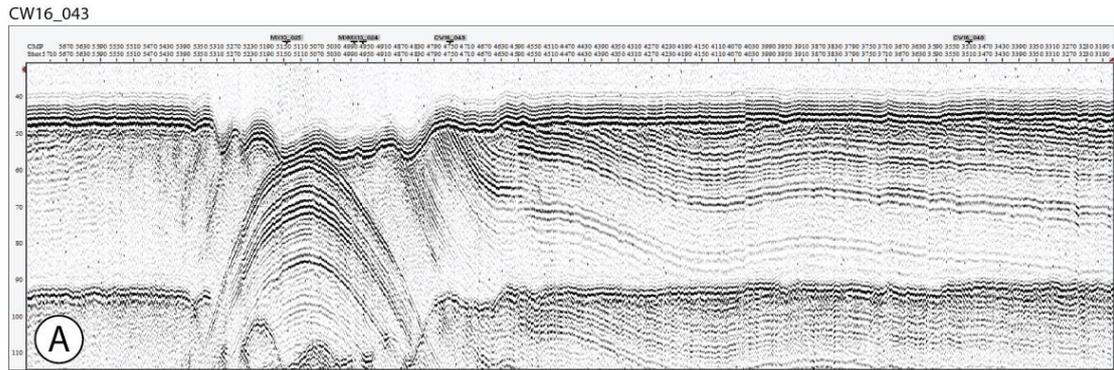


Illustration 4 : Profils sismiques très haute résolution CW16_043 (A) et CW16_021 (B) acquis lors de la campagne Chalkwave 2016 en version non interprétés (haut) et interprétés (bas), modifiés d'après Paquet et al., 2017. L'albien est figuré en rouge. Exagération verticale d'environ 30x

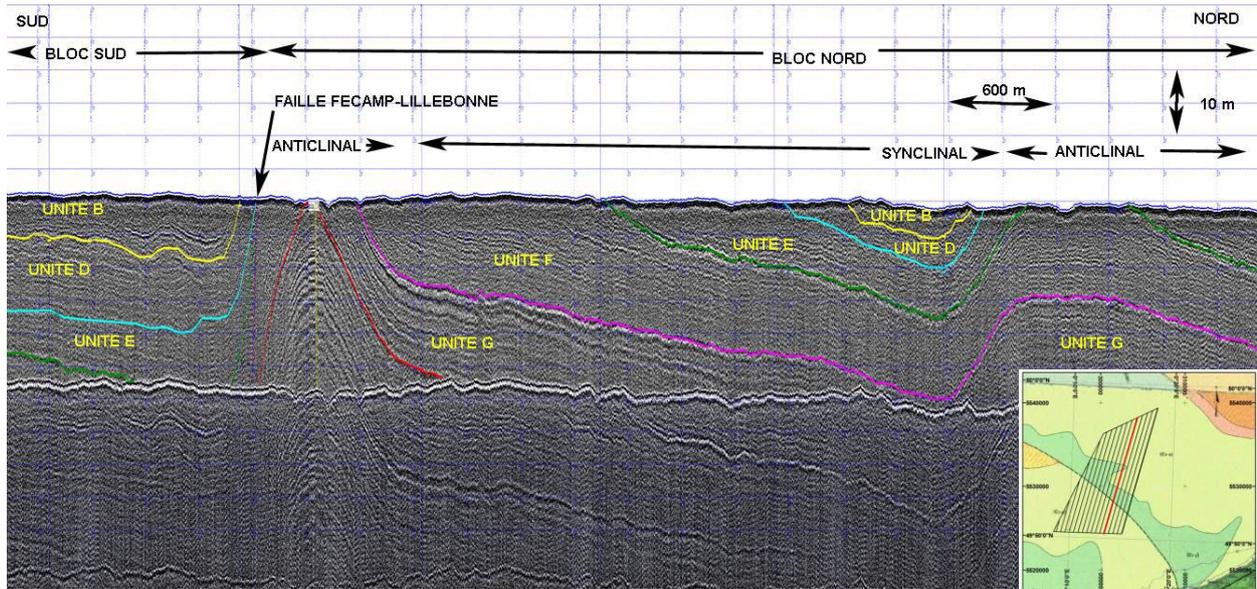


Illustration 5 : Profil sismique effectué en mer orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne lors des études préliminaires pour l'implantation d'un champ éolien offshore à Fécamp (modifié d'après ID SCOPE, 2011). Forte exagération verticale

Apport des données de forages sur l'évaluation des rejets entre Notre-Dame-de-Gravenchon et Mirville

La corrélation de logs géologiques disponibles en Banque de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM permet d'apporter des précisions sur les rejets dans des secteurs clés.

Ainsi, pour le secteur au nord de Bolbec, la corrélation de l'altitude du niveau repère « faciès du Gault » entre le sondage récent réalisé par la CODAH à Nointot (Gault mentionné à - 64 m NGF, bloc SO) et le sondage BSS 00756X0006 situé à 750 m au sud-est, sur le bloc NE (toit du Gault à + 56 m NGF), indique un rejet vertical de 120 m, ce qui corrobore les données des anciens auteurs.

Plus au nord, dans le secteur de Mirville, la corrélation du forage 00752X0004 (bloc NE, toit du Gault mentionné à + 81 m NGF) avec le forage 00752X0006 (bloc SO ou bande faillée, Gault mentionné vers 0 m NGF) indique un rejet vertical de 81 m. Si l'on corrèle la coupe du forage de Mirville (00752X0004, bloc NE, niveau du Gault mentionné à + 81 m NGF) avec celui de Bréauté (00751X0007, bloc SO, niveau du Gault mentionné à - 88 m NGF), le rejet résultant est de l'ordre de 170 m, ce qui est supérieur aux estimations des anciens auteurs. Toutefois, ces deux sondages sont relativement éloignés, et il n'est pas exclu que cette valeur élevée soit en partie liée à une variation locale de l'altitude du toit du Gault, ou à la présence d'une ou plusieurs faille(s) mineure(s) non détectée(s).

Au sud de la structure, dans le secteur de Port-Jérôme – Notre-Dame-de-Gravenchon, la corrélation des sondages 00983X0031 (situé à Port-Jérôme dans la vallée de la Seine, Gault signalé à la côte - 48 m NGF) et 00757X0003 (forage VILQ-5, bloc Est soulevé, Gault signalé à la côte + 8 m NGF) indique un rejet de 56 m.

Les rejets sont donc variables le long de la structure (Illustration 6), ce qui met parfois en contact tectonique des formations de faciès parfois très différents (Illustration 7). Les investigations géophysiques menées dans le cadre de cette étude ont permis d'améliorer la connaissance de

cette structure à terre dans le secteur de Bolbec-Lillebonne. Les résultats géophysiques sont présentés et discutés dans le chapitre 2.

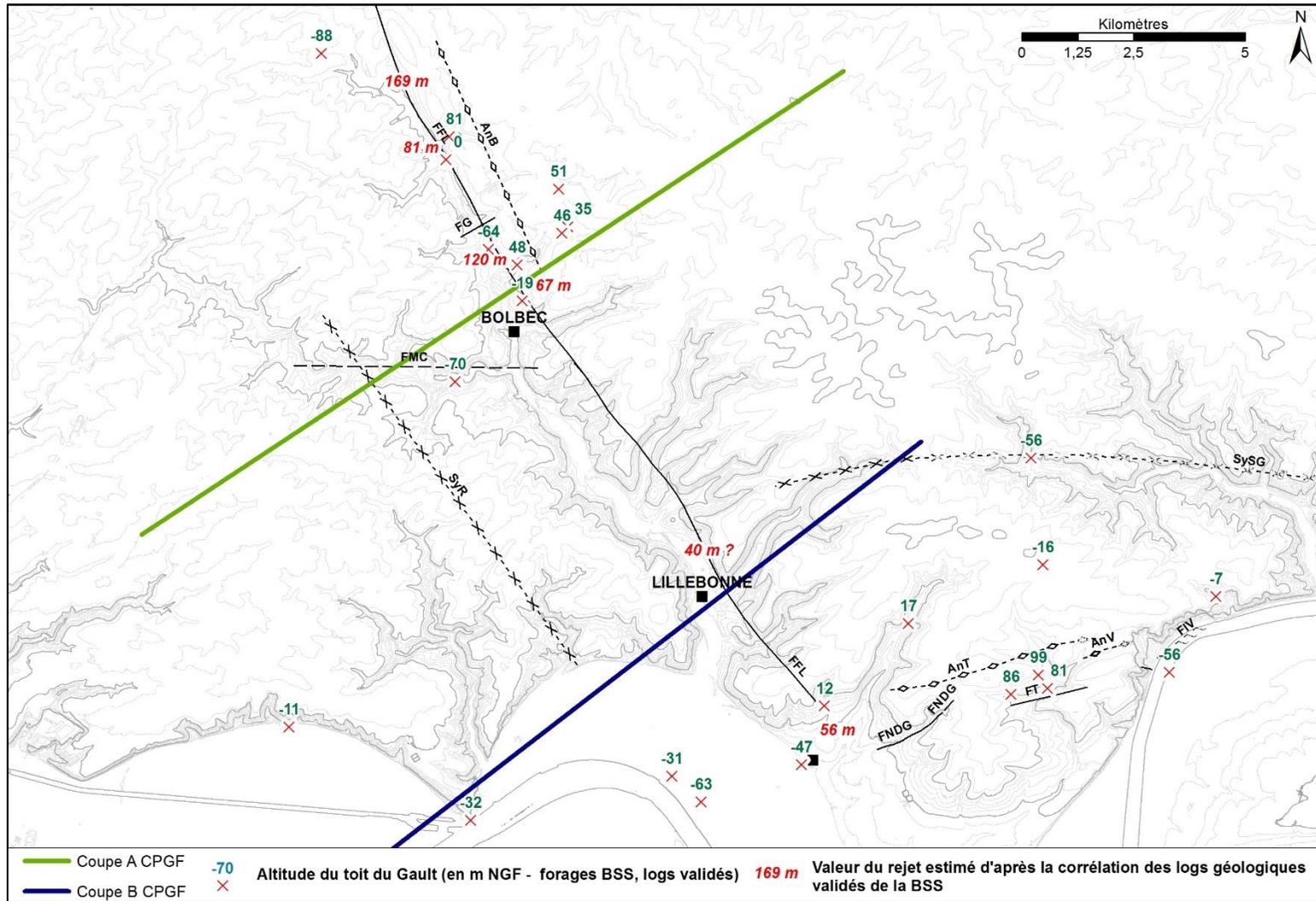


Illustration 6 : Estimations des rejets verticaux le long de la structure de Fécamp-Lillebonne dans la zone d'étude, d'après la corrélation des logs géologiques validés de la BSS atteignant le niveau repère du Gault (Albien)

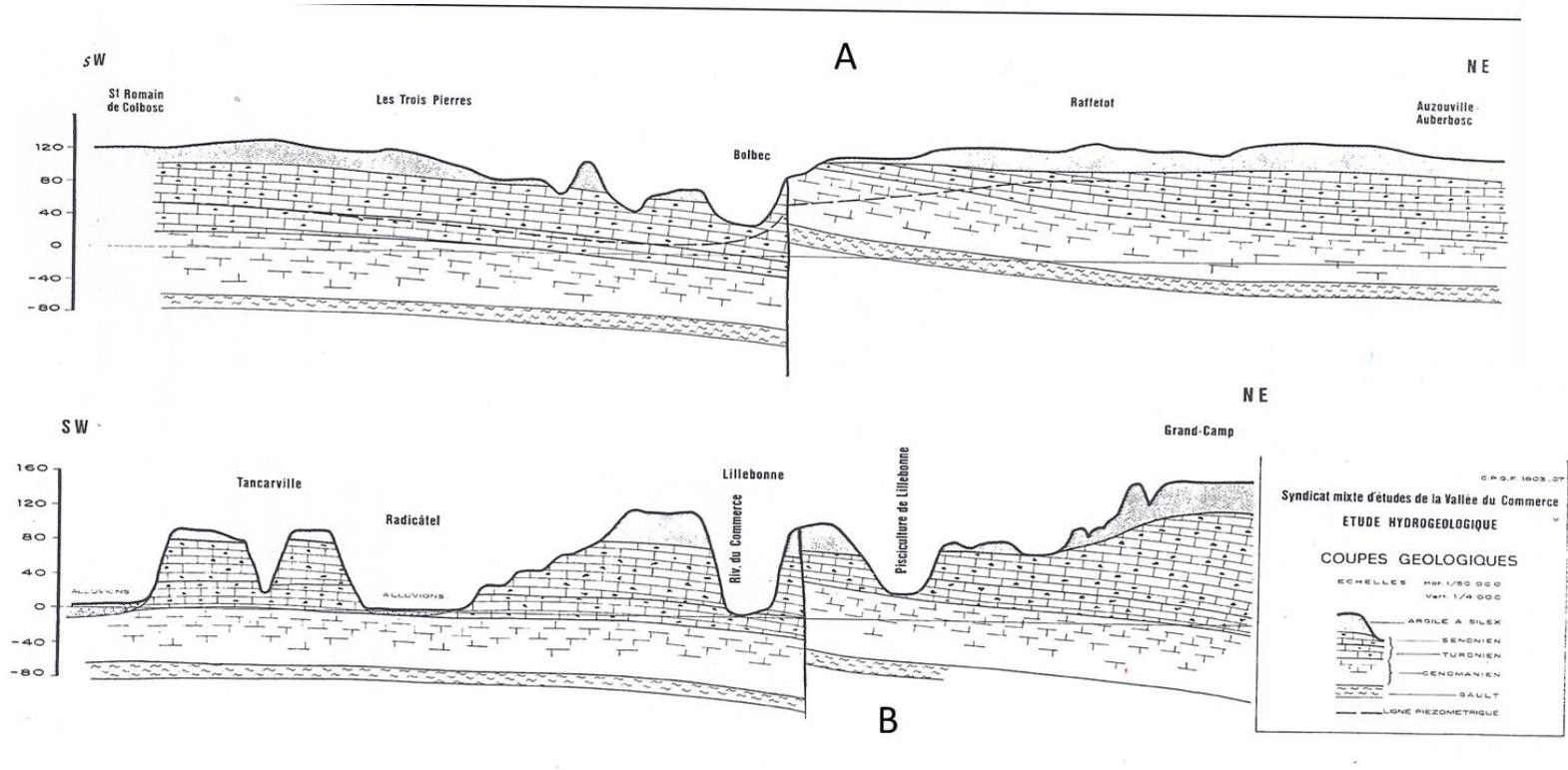


Illustration 7 : Coupes géologiques SO-NE (CPGF, 1980) .

En haut, entre Saint-Romain-de-Colbosc et Auzouville-Auberbosc, mentionnant un rejet vertical proche de 150 m vers Bolbec induisant un contact tectonique entre le Gault et les sables verts du Crétacé inférieur et les craies du Sénonien

En bas, entre Tancarville et Grand Camp mentionnant un rejet d'environ 40 m vers Lillebonne induisant un contact tectonique entre le Gault et les craies cénomaniennes

Géométrie de la structure de la faille de Fécamp-Lillebonne dans le secteur Bolbec-Lillebonne

D'après Ragot (1988), la structure Fécamp-Lillebonne ne s'apparente pas systématiquement à un simple plan de faille. Dans la région de Bolbec, cette structure ressemble davantage à une zone de failles large d'environ 300 m, constituée d'un faisceau de 2 à 4 failles subparallèles N150°, présentant des rejets variant de 10 à 30 m, pour un rejet vertical cumulé approchant 125 m. Ce faisceau de failles, associé à des cassures satellites N060°, isole des compartiments prismatiques basculés, disposés « en marches d'escalier ». Entre Lillebonne et Bolbec, 4 compartiments ont pu être individualisés (Ragot, 1988) (Illustration 8 et Illustration 9) :

- Le compartiment du « Vallon du Vallot », au nord de Bolbec ;
- Le compartiment de la « Vallée de la Fontaine », à Bolbec ;
- Le compartiment du « Vallon de la Roche », à Gruchet-le-Valasse ;
- Le compartiment de Lillebonne

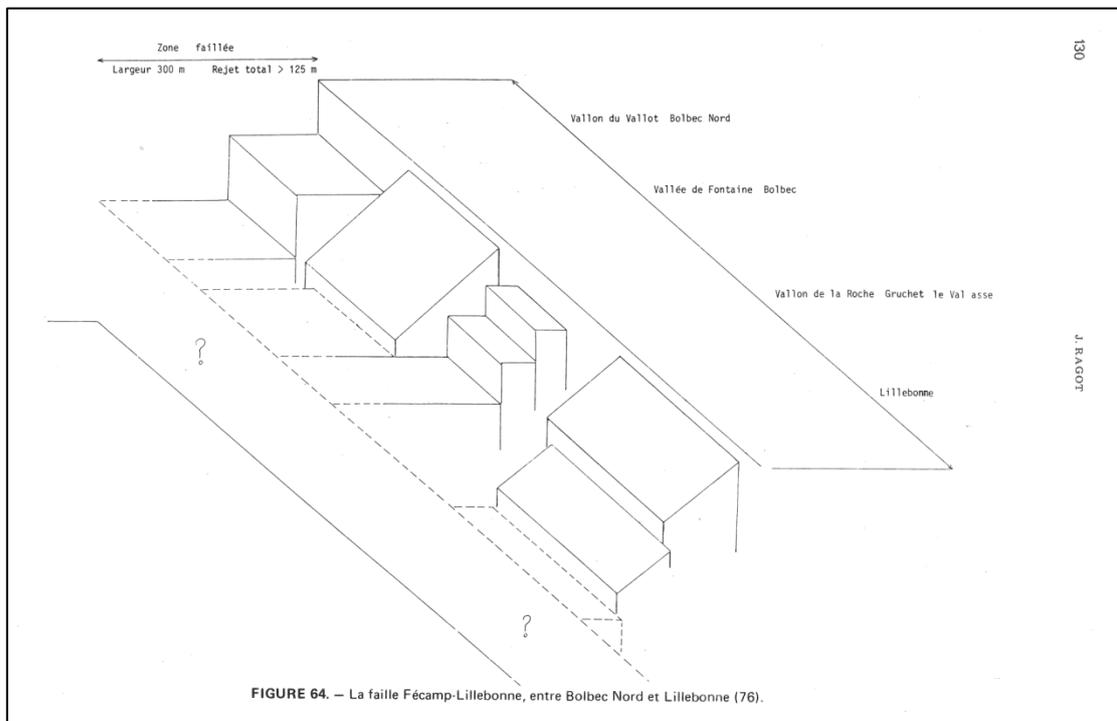


Illustration 8 : Illustration de la compartimentation de la structure de Fécamp-Lillebonne entre Lillebonne au sud et Bolbec au nord (Ragot, 1988)

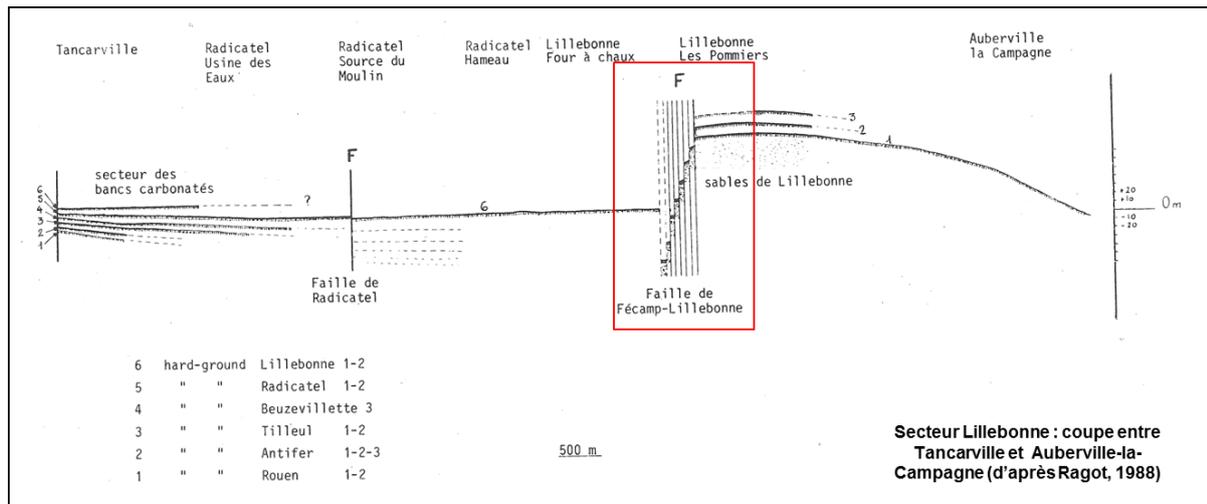


Illustration 9 : Structure en « marches d'escalier » avec regard ouest de la faille Fécamp-Lillebonne vers Lillebonne (Ragot, 1988)

Notons que les structures N060°, orthogonales à la structure de Fécamp-Lillebonne, sont probablement à l'origine des vallons annexes de la vallée de Bolbec, tels que le « vallon Palfray », au nord de Bolbec, la vallée de la Fontaine à Bolbec, le Val de la Reine au sud de Bolbec, ou encore la vallée de la Fontaine Murée entre Gruchet-le-Valasse et Lillebonne. La présence de certaines de ces structures sera notamment confirmée par les investigations géophysiques (chapitre 2).

Rôle de la structure de Fécamp-Lillebonne sur la fracturation de la craie et sur les processus d'altération / karstification

Des observations réalisées par le CETE (affaire n°8882/1, 1978) dans une marnière située à proximité de la structure (indice BDCavité HNOAA0004830, à environ 250 m à l'est de la faille telle qu'elle est dessinée sur la carte géologique au 1/50.000 – bloc NE surélevé) font état d'une craie très fracturée, avec de nombreuses fractures verticales remplies de matériaux fins crayeux ou argileux humides, et dont les épontes portent des stries verticales, témoignage des rejeux tectoniques (l'orientation de ces fractures n'est pas décrite dans le rapport). Cette information corrobore des données de sondages, réalisés à proximité de la structure de Fécamp-Lillebonne, qui ont mis en évidence des anomalies de vitesse de foration liées à la présence de fissures verticales de 7 à 15 cm d'ouverture.

Il est intéressant de corréliser ces informations pour établir une analogie avec les observations structurales effectuées par Ternet (1968) puis Wazi (1988) sur les falaises littorales du secteur de Fécamp – Cap Fagnet, qui présentent une situation globalement semblable vis-à-vis de la structure de Fécamp-Lillebonne (bord nord-est surélevé). D'après ces analyses structurales, la grande majorité des fractures visibles dans la falaise présentent une orientation N105° à N120°, sont généralement subverticales, correspondent souvent à des microfailles normales à rejet décimétrique par une contrainte distensive NE-SO, peuvent conditionner la mise en place de conduits karstiques, et sont d'âge Quaternaire (décalage de karsts pléistocènes) (Wazi, 1988). Les orientations N140°-N155° correspondant à la direction de la faille de Fécamp-Lillebonne sont plus rares.

Ces données structurales peuvent être extrapolées au secteur de Bolbec, puisque cette direction N110°, sécante à la direction N150° de la structure de Fécamp-Lillebonne, est une orientation régionale qui se retrouve dans toute cette bordure du Bassin de Paris (Wazi, 1988). Les analyses

des linéaments du Pays de Caux (données bibliographiques et nouvelle analyse BRGM – cf. paragraphe 1.2.2) confirment cette information. Il n'existe donc pas forcément de relation directe entre la structure majeure de Fécamp-Lillebonne N150° et la fracturation essentiellement N110° des craies, puisqu'elles sont interprétées comme des accidents d'âge et d'origine très différents. Indépendamment du « timing » de mise en place, les craies situées au voisinage de la faille de Fécamp-Lillebonne sont affectées par des structures tectoniques cassantes qui ont conditionné / favorisé les processus d'altération / karstification.

En effet, concernant la faille de Fécamp-Lillebonne, les observations de terrain effectuées par Ragot (1988) témoignent d'une intense activité karstique dans la bande faillée de 300 m orientée N150°, comme en atteste la présence de nombreux effondrements karstiques (cas de la béttoire du « Beau-Soleil » à Bolbec par exemple) ayant parfois piégé des formations post-crétacées, les masses de calcites qui jalonnent les failles ou la présence de la Formation résiduelle à silex au niveau des contacts faillés (Ragot, 1988). Ces informations de terrain montrent clairement que les accidents cassants de la structure de Fécamp-Lillebonne ont été ouverts hydrauliquement (cas des dépôts de calcite), ou ont favorisé le développement de karsts.

Une structure similaire à la béttoire de « Beau-Soleil » a été mise en évidence au large de Fécamp lors des études géophysiques préliminaires à la mise en place du parc éolien en mer (ID SCOPE, 2011). En effet, lors des investigations bathymétriques, une dépression endoréique a été découverte sur le fond marin en bordure de la faille de Fécamp-Lillebonne, sur le bloc NE surélevé, au niveau de l'axe d'une structure anticlinale (Illustration 10). Il existe une analogie entre cette dépression et la béttoire de Beau-Soleil, aussi bien en terme de géométrie qu'en terme de positionnement par rapport à la faille. Ces deux dépressions endoréiques sont d'origine karstique (traçage effectué dans la béttoire de Beau-Soleil), ce qui souligne donc le rôle qu'a pu avoir la structure de Fécamp-Lillebonne et des structures antifformes associées sur les processus de karstification (développement karstique développé au niveau de l'axe des anticlinaux par une densité importante de fractures d'extrados ?).

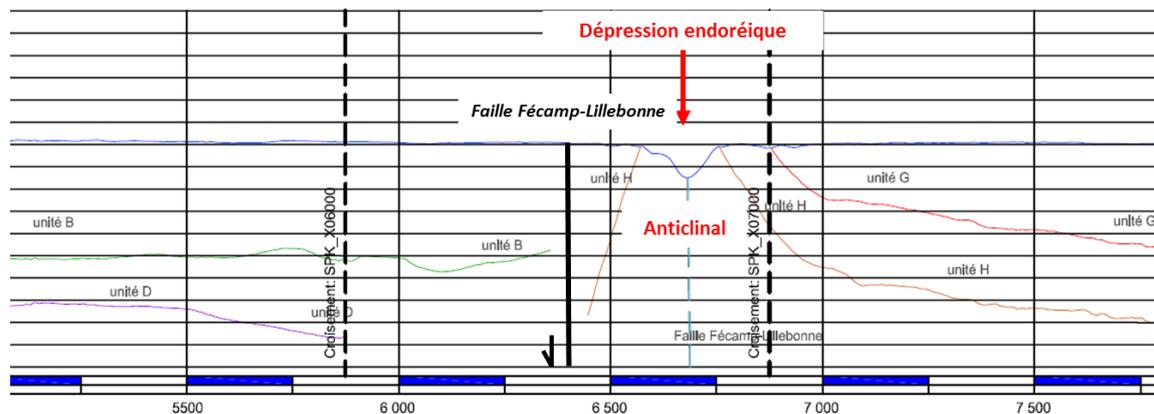


Illustration 10 : Extrait de la coupe topographique et géologique proposée par ID SCOPE dans son rapport (issu d'un profil sismique) qui présente la dépression endoréique située au niveau de l'axe de l'anticlinal qui borde la faille de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé (modifié d'après ID SCOPE, 2011)

D'autre part, la structure de Fécamp-Lillebonne a conditionné la mise en place de la vallée du Commerce qui présente la même orientation N150° entre Bolbec et la vallée de Seine. A l'heure actuelle, il est difficile de savoir si le creusement de la vallée a été favorisé par la présence de fractures tectoniques N150°, plus nombreuses à proximité de la structure de Fécamp-Lillebonne, fragilisant la craie et ainsi contrôlant les écoulements souterrains et de surface (les données de

téledétection thermique et les forages qui signalent de nombreux karsts dans la zone (*Ragot, 1988*) plaident en la faveur de cette hypothèse), ou si cette vallée est liée à un rejeu tectonique de la structure au début du Quaternaire, engendrant un bloc nord-est en relief, et un bloc sud-ouest affaissé, favorisant la mise en place d'une vallée (*Wazi, 1988*). Dans tous les cas, la vallée du Commerce a une origine tectonique ; il en est probablement de même pour les vallons annexes orientés NE-SO qui débouchent sur la vallée du Commerce, mais par l'intermédiaire de structures satellites vraisemblablement orientées NE-SO (*Lechevalier, 1993*). La présence de ces structures a été confirmée par les investigations géophysiques et géologiques effectuées dans le secteur (cf. chapitres 2 et 3).

Enfin, la visite de certains affleurements par le BRGM a permis de constater que la densité de fracturation de la craie sous les versants et sous les vallées n'est pas uniforme horizontalement et verticalement. En effet, dans l'ancienne carrière souterraine située derrière la mairie de Bolbec (accès par cavage, dans le versant dans les craies coniaciennes du bloc sud-ouest affaissé), il est possible d'observer une craie saine et relativement peu fracturée (seulement 4 fractures observées) :

- une diaclase majeure subverticale orientée N050°, argilisée, associée à des arrivées d'eau récurrentes ayant entraîné une calcification (diaclase qui se divise localement en trois diaclases individualisées) ;
- une diaclase mineure argilisée orientée N090° ;
- deux diaclases mineures argilisées orientées N070°.

La diaclase majeure orientée N050° (orientation *varisque*) observée dans la carrière témoigne donc de la relation qu'il peut exister entre les fracturations de la craie (même mineures, sans déplacements), les circulations d'eau (et la calcification associée) et l'argilisation.

Le secteur de Bolbec est donc marqué par plusieurs familles de fractures tectoniques d'origine et d'âge différents, mais qui ont toutes pu favoriser et conditionner la mise en place d'un système karstique complexe. L'illustration 11 confronte les données concernant les karsts (endokarst et exokarst), les sources et exutoires avec les données structurales.

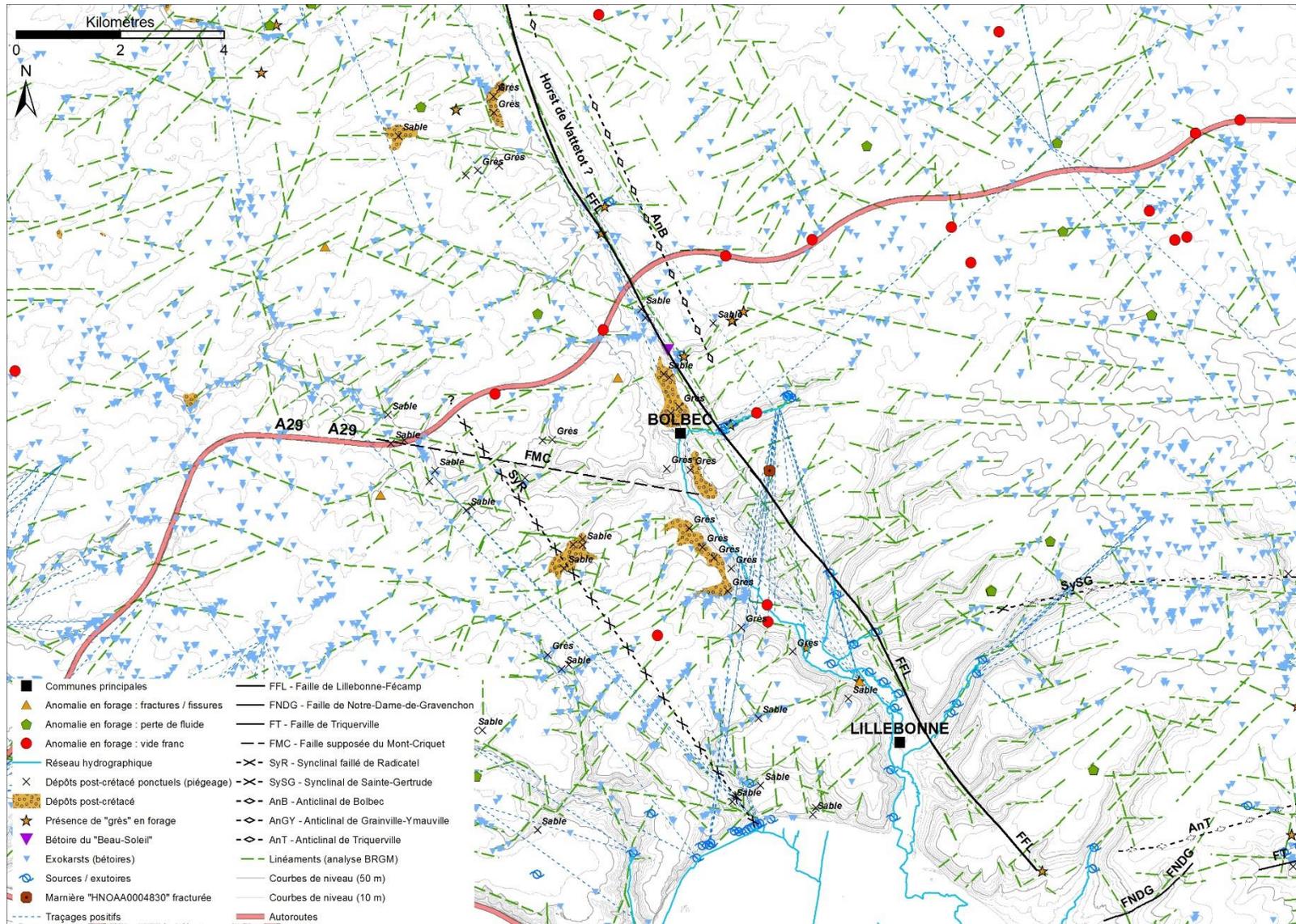


Illustration 11 : Synthèse des données relatives aux phénomènes karstiques et à la fracturation du substratum crayeux dans le secteur situé entre Mirville et Notre-Dame-de-Gravenchon

1.2.2. Déformations associées à la faille de Fécamp-Lillebonne

Les structures plicatives

La structure NO-SE de Fécamp-Lillebonne est associée à de larges structures plicatives globalement orientées N150°, qui affectent le substratum crayeux du secteur de Bolbec.

- **SySG** - Le synclinal de la vallée de Saint-Gertrude à Caudebec-en-Caux

Il s'agit d'une structure synclinale mise en évidence lors des levés de la carte géologique de la France à 1/80.000 (feuille Yvetot, *Nicolesco*, 1964), puis celle à 1/50.000 (feuille Bolbec, *Ménillet*, 1969) par la cartographie des isobathes du toit du Gault (issus de l'interprétation des données de la Compagnie Française des Pétroles et des données BSS). D'après ces éléments cartographiques, le synclinal de Sainte-Gertrude serait orienté N090°-N100°, ce qui correspond globalement à l'orientation de la vallée éponyme. Les isobathes du toit du Gault indiquent une profondeur de l'ordre de -60 m au centre de la structure, soit globalement dans la vallée de Sainte-Gertrude qui occupe une place centrale dans le synclinal.

- **SyR** - Le synclinal faillé de Radicatel / faille du Moulin

Cette structure a été mise en évidence par Ragot (1988) par la corrélation de repères stratigraphiques dans la craie au sud de Saint-Nicolas-de-la-Taille (vallon du Pont-Navarre). D'après les observations effectuées par cet auteur, le rejet de la faille serait de l'ordre de 10 à 12 m (Ragot, 1988). Ce secteur est marqué par une activité karstique intense (sources de Radicatel, nombreuses fissures karstifiées dans les parois crayeuses du secteur). L'orientation et l'extension de cette structure n'est pas connue avec précision, mais les travaux de Hauchard et Laignel (2008) la positionnent sub-parallèle à la faille de Fécamp-Lillebonne, avec une extension jusqu'aux sources d'Yport au Nord (Hauchard et Laignel, 2008 ; Hanin, 2010).

- **AnB, AnGY** - Les anticlinaux sub-parallèles à la structure de Fécamp-Lillebonne

Cette succession de structures antiformes se retrouve tout au long de la structure de Fécamp-Lillebonne, sur le bloc nord-est surélevé (anticlinal de Bolbec - AnB, anticlinal de Grainville-Ymauville - AnGY, anticlinal de Fécamp). Ces dômes apparents sur les isobathes du toit du Gault (Albien), sont connus depuis le levé de la carte géologique du secteur au 1/80.000 (feuille Yvetot, *Nicolesco*, 1964). Au nord de Bolbec, l'érosion dans la charnière de l'anticlinal de Bolbec a permis la mise à l'affleurement de la Gaize albienne au fond du ruisseau de Mirville et du Cénomaniens inférieur dans le vallon de Pétreval à Mentheville (Ragot, 1988) ;

- **AnT** - L'anticlinal de Triquerville-Villequier

Le secteur de Triquerville-Villequier est marqué par plusieurs structures plicatives orientées N060° à N070° (orientation *varisque*), associées aux structures cassantes présentées précédemment.

L'anticlinal de Triquerville-Villequier est un accident assez exceptionnel pour la région. Il s'agit d'un pli anticlinal d'orientation N060° à N070° associé au réseau des failles de ND-de-Gravenchon-Triquerville-Villequier. Il atteint son élévation maximale au nord de Triquerville, où les faciès de l'Albien (Gault) affleurent aux alentours de la côte + 100 m NGF dans le vallon du Bébec (*Ménillet*, 1969).

Les structures cassantes

Le secteur d'étude présente d'autres structures cassantes associées à l'accident principal de Fécamp-Lillebonne.

- **FNDG, FT** - Les accidents de Notre-Dame-de-Gravenchon – Triquerville - Villequier

Il s'agit d'un ensemble de structures cassantes localisées entre Notre-Dame-de-Gravenchon à l'ouest et Villequier à l'est. Orientées globalement N060° à N070°, elles limiteraient l'extension vers le sud de la structure de Fécamp-Lillebonne.

La faille de Triquerville (FT) présente un rejet vertical remarquable de 200 m, qui borde et limite le flanc sud de l'anticlinal de Villequier. Vers l'ouest, ces structures se prolongeraient probablement au-delà de la zone de croisement avec la structure de Fécamp-Lillebonne, en direction du Marais Vernier où elles semblent être à l'origine d'un rejet vertical métrique identifié au niveau d'un horizon tourbeux dans la vallée de la Seine, au nord de Quillebeuf (*Lefebvre et al.*, 1974 ; *Wyns*, 1977).

- Le « horst » de Vattetot-sous-Beaumont

Dans le secteur de Vattetot-sous-Beaumont, la présence d'une anomalie topographique particulièrement marquée dans le paysage pourrait être liée à une structure de horst, orientée N150° et située sur la lèvre nord-est surélevée de la faille de Fécamp-Lillebonne (hypothèse proposée par E. Hauchard). Ce horst est responsable de la mise à l'affleurement des craies du Cénomaniens moyen à supérieur sur sa bordure ouest et sud. Toutefois, il n'est pas exclu qu'il s'agisse d'une partie de l'anticlinal de Bolbec, également signalé dans ce secteur dans diverses sources bibliographiques (*Nicolesco*, 1931 ; *Ménillet*, 1969 ; *Hauchard et al.*, 2002). En l'absence de coupes géologiques détaillées ou d'investigations complémentaires, il n'est pas possible de statuer sur la nature tectonique de cette anomalie topographique (horst vs dôme anticlinal vs anticlinal faillé).

- **FMC** - La faille supposée du « Mont-Criquet »

D'après Wazi (1988), l'alignement des poches de sables piégés dans des dépressions d'origine karstiques qui marquent la vallée sèche située entre Saint-Gilles-de-la-Neuville et Bolbec, sur la lèvre ouest affaissée de la faille de Fécamp-Lillebonne, serait liée à la présence de failles, bordant une lande effondrée ayant favorisé le piégeage de sédiments tertiaires. A ce jour, aucune observation ne permet de confirmer ou d'infirmer la présence de cette structure, qui serait orientée N110° (orientation conforme à d'autres petits fossés tertiaires connus dans la région et orientés selon cette direction, associés à des fractures récentes distensives).

- Nouvelle analyse des linéaments

Une fracturation secondaire est également présente et révélée par photo-interprétation d'images satellites ou aériennes (étude partiellement et localement faite dans le cadre de diverses études dans le passé (*Scanvic et al.*, 1977 ; *Scanvic*, 1978 ; *CPGF*, 1978)).

Au cours de cette étude, une nouvelle analyse des linéaments dans le Pays de Caux a été effectuée par le BRGM. L'analyse se base sur le modèle numérique de terrain IGN (MNT) au pas de 25 m et sur le MNT RGE-ALTI IGN à 5 m pour lesquels un ombrage et une carte de pentes ont été réalisées sous le logiciel de SIG ArcGIS®.

Un total de 1635 linéaments ont été tracés manuellement à l'échelle du 1/25 000 sur la zone d'étude de Bolbec mais également sur une large zone du Plateau de Caux. Les linéaments tracés correspondent, par ordre de représentativité, (i) aux thalwegs du réseau hydrographique, (ii) à des escarpements linéaires hors réseau, (iii) aux alignements de têtes de réseau (sources).

Une comparaison attentive entre le MNT et la cartographie du réseau de transport a permis d'identifier les linéaments liés aux talus, fossés, ou remblais du réseau routier ou ferroviaire.

L'azimut moyen de chacun des 1635 linéaments supposés « naturels » a ensuite été calculé selon la formule suivante en langage Python :

$$180 + \text{math.atan2}((\text{!Shape.firstpoint.X!} - \text{!Shape.lastpoint.X!}), (\text{!Shape.firstpoint.Y!} - \text{!Shape.lastpoint.Y!})) * (180 / \text{math.pi})$$

La valeur d'azimut obtenue correspond à l'azimut moyen du segment entre le premier et le dernier point sur l'intervalle N0°-N180°.

L'histogramme de distribution des linéaments par valeur d'azimut montre trois ou cinq groupes de valeurs (Illustration 12). Les trois ou cinq classes d'azimut déterminées ont les valeurs de bornes suivantes (valeur d'azimut avec la plus forte représentativité par classe en gras) :

- **Trois classes** : [N10°-**N40**°-N75°] ; [N75°- **N105**°-N120°] ; [N145°-**N160**°-N180°]
- **Cinq classes** : [N10°-**N40**°-N50°] ; [N50°-**N65**°-N75°] ; [N75°-**N90**°-N100°] ; [N100°-**N105**°-N120°] ; [N145°-**N160**°-N180°]

Les intervalles d'azimuts [N0° - N10°] et [N120° - N145°] sont nettement sous représentés dans la région.

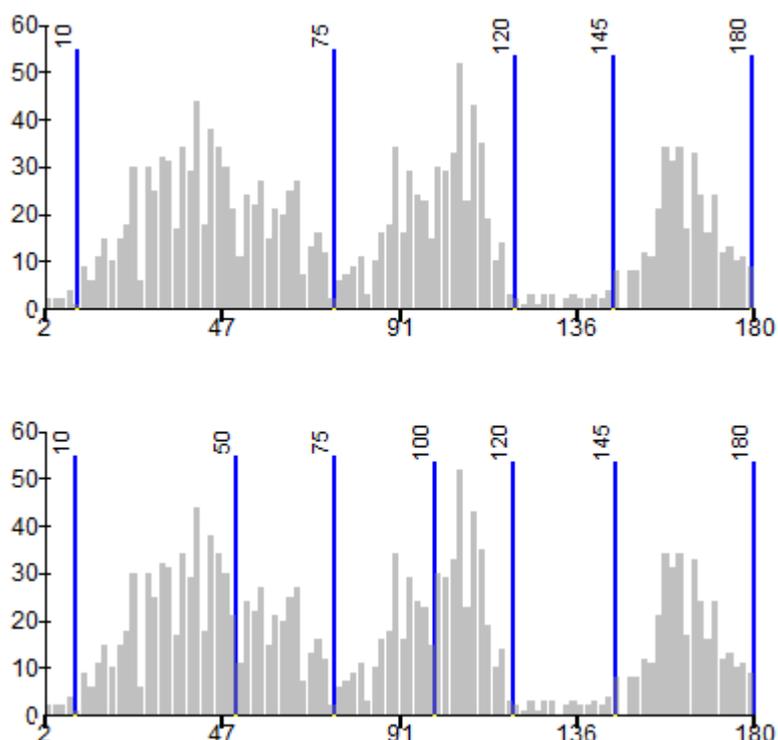


Illustration 12 : Histogrammes de répartition du nombre de linéaments (axe ordonnées) par valeur d'azimut montrant les bornes utilisées pour déterminer les 3 (haut) ou 5 (bas) classes différentes

Les 5 classes identifiées ne diffèrent que légèrement de celles habituellement identifiées dans la région Pays de Caux (Hauchard et al., 2002). L'illustration 13 montre la comparaison entre les groupes de valeurs d'azimut d'après Hauchard et al. (2002) et la présente étude. Les 1635 linéaments identifiés permettent un échantillonnage correct avec ainsi une distribution représentative et fiable des azimuts.

Hauchard et al. (2002)	Nouvelle analyse
N30-50	N10°- N40° -N50°
	N50°- N65° -N75°
N90-100	N75°- N90° -N100°
	N100°- N105° -N120°
N120-130	Sous représentée
N150-160	N145°- N160° -N180°

Illustration 13 : Comparatif entre les groupes de valeurs d'azimuts établis par Hauchard et al. (2002) et dans cette étude

Le résultat de la cartographie et de la classification des linéaments par classe d'azimut (Symbologie-Quantités-Couleurs graduées dans ArcMap) sur la zone d'étude de Bolbec est présenté sur l'illustration 14).

Les linéaments cartographiés et leur classification se corrèlent bien aux directions structurales dans la zone d'étude et sur l'ensemble du plateau de Caux. Les linéaments identifiés correspondent donc vraisemblablement à des failles ou fractures. Les linéaments associés à la faille de Fécamp-Lillebonne sont clairement visibles. Une étude sur l'ensemble du département de Seine-Maritime permettrait de compléter ce schéma structural, de mieux caractériser les classes de fractures et de mettre ainsi en évidence certaines relations entre écoulement/réseaux superficiels et réseaux karstiques.

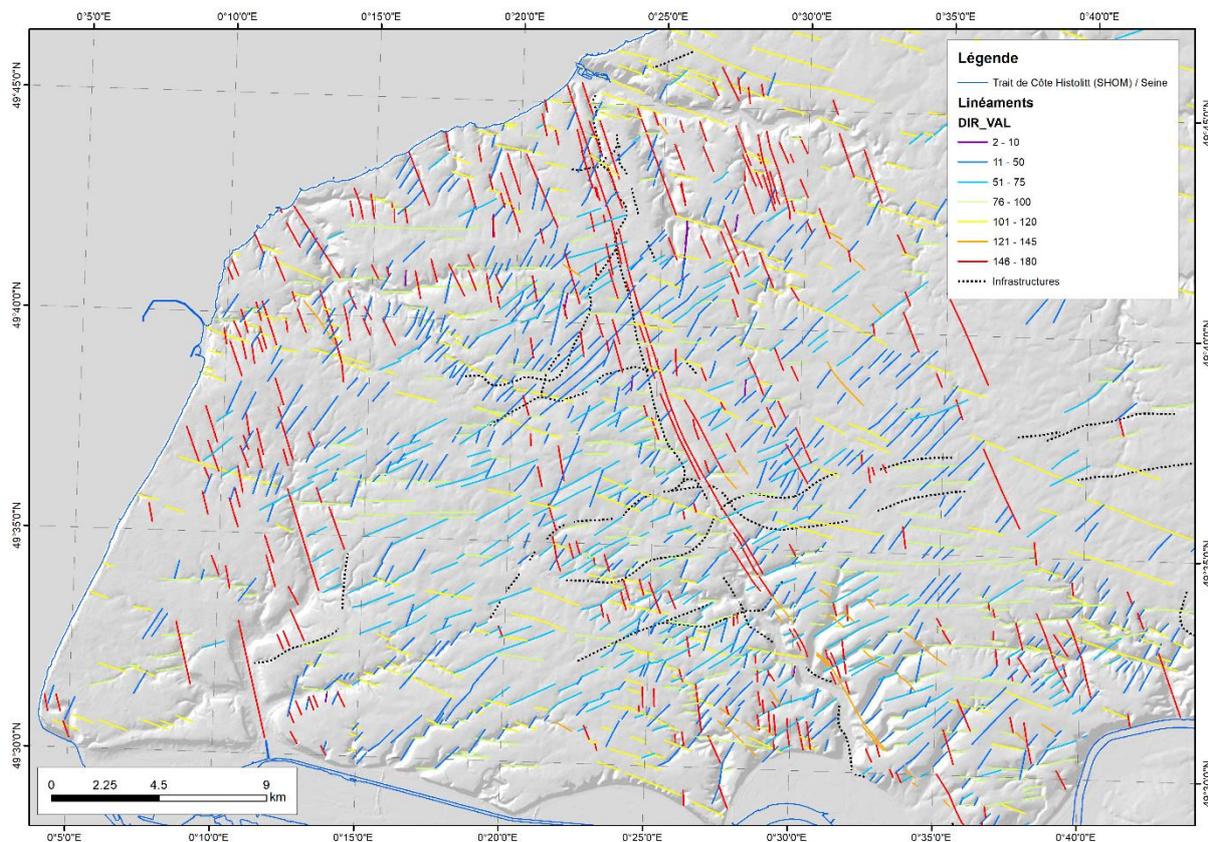


Illustration 14 : Carte des linéaments par classe d'azimut sur le Pays de Caux

1.2.3. Carte structurale de la zone d'étude (compilation bibliographique)

L'ensemble des structures connues ou supposées dans le secteur sont présentées sur l'illustration 15.

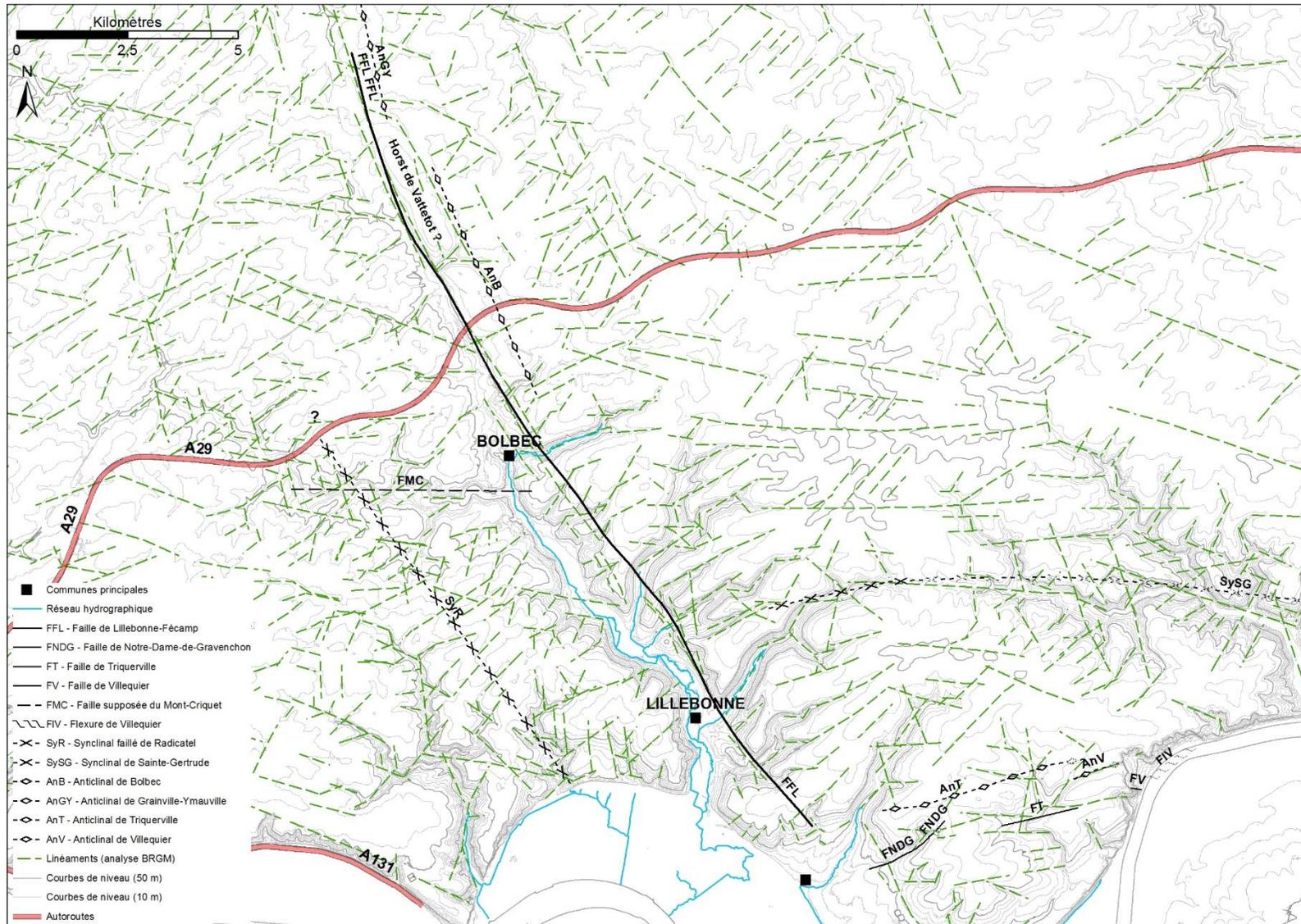


Illustration 15 : Schéma structural du secteur situé entre Mirville au nord et Notre-Dame-de-Gravenchon au sud, synthèse des données bibliographiques

1.3. DESCRIPTION DES FORMATIONS DU CRETACE

Le découpage lithostratigraphique des craies du Crétacé supérieur, initié en 1974 par Juignet (1974), poursuivi par Ragot (1988) et actualisé en 2008 par Lasseur (2008), permet une description lithologique des différents étages de la craie. Ces descriptions se basent sur des observations effectuées notamment sur le littoral du Pays de Caux (d'où le nom des caissons : craie de Fécamp, craie de Saint-Pierre-en-Port etc.). Elles restent valables pour le secteur d'étude. La compilation de ces travaux a permis de dresser la pile stratigraphique « type » des différents faciès du Crétacé rencontrés dans le secteur d'étude (Illustration 17).

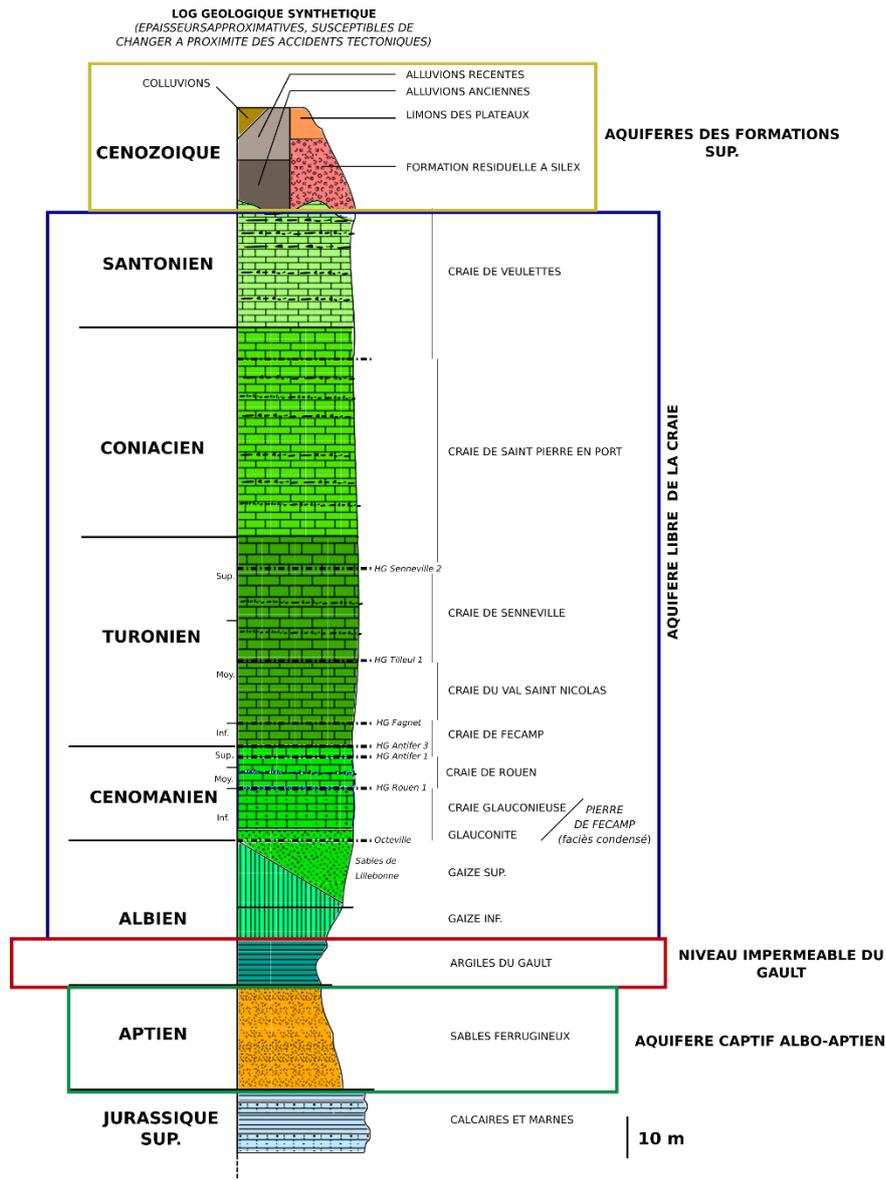


Illustration 16 : Colonne lithostratigraphique synthétique des formations géologiques dans le secteur de Bolbec (compilation bibliographique, épaisseurs moyennes)

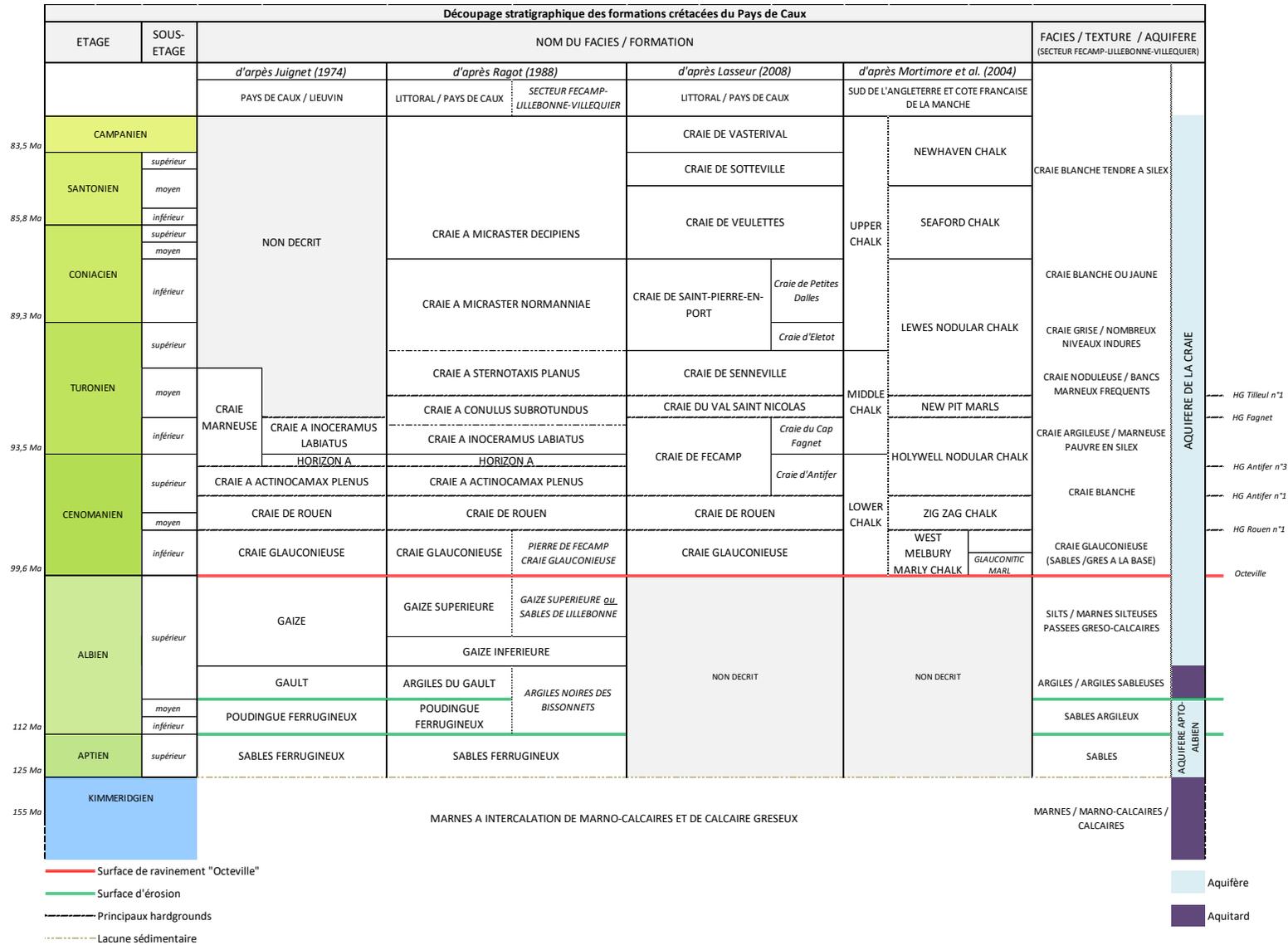


Illustration 17 : Synthèse des données lithostratigraphiques disponibles dans la littérature pour les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé (d'après Juignet, 1974 ; Ragot, 1988, Lasseur, 2008, Mortimore et al., 2004, Ménillet, 1969)

1.3.1. Crétacé inférieur

Les Sables ferrugineux de l’Aptien

Les faciès de l’Aptien constituent les premiers dépôts mis en place lors de la transgression crétacée (*Juignet, 1974*). Ils reposent en discordance sur les formations kimméridgiennes (Jurassique supérieur) caractérisées par des marnes et des calcaires. D’un point de vue lithologique, les descriptions établies par *Juignet (1974)* et *Ragot (1988)* indiquent un faciès essentiellement sableux plus ou moins argileux et glauconieux et de granulométrie variable, dans lequel s’intercalent des niveaux d’argile ou de grès ferrugineux. Ce faciès caractéristique des Sables ferrugineux peut d’ailleurs être bien observé à l’affleurement dans le secteur du Cap de la Hève, au Havre (Seine-Maritime - Illustration 18).

D’après les sondages réalisés dans le secteur d’étude, l’épaisseur des Sables ferrugineux varie de 24 m dans l’anticlinal de Villequier (forage BSS 00758X0002, au sud-est de la zone d’étude) et dans le secteur de Mirville au sein de la zone faillée (forage BSS 00752X0006) à plus de 40 m à Port-Jérôme (forage BSS 00982X0005, où cette formation se termine par 4 m d’une argile noire sableuse). Cette variation d’épaisseur est probablement liée à une subsidence active et synsédimentaire le long de la zone de faille de Fécamp-Lillebonne (*Ragot, 1988*).

D’un point de vue hydrogéologique, cette formation est aquifère et sert de réservoir à la nappe albo-aptienne, majoritairement captive car scellée par les formations argileuses albiennes (argiles de Gault).



Illustration 18 : Affleurement du faciès des Sables ferrugineux (oxydés) de l’Aptien au Cap de la Hève (Seine-Maritime) – BRGM

Les faciès de l’Albien

Les premiers dépôts albiens reposent sur les Sables ferrugineux via une surface d’érosion. Dans le Pays de Caux et sur le littoral, la lithostratigraphie classique de l’Albien est définie par la succession Poudingue ferrugineux (Albien inf. et moy.) – Argiles du Gault (ou Gault) (début Albien sup.) – Gaize (fin Albien sup.).

D’après *Ragot (1988)*, en approchant les abords de la structure de Fécamp-Lillebonne-Villequier, l’Albien présente des variations latérales de faciès qui concernent principalement :

- le passage latéral de la succession Poudingue ferrugineux / Argiles du Gault à des argiles noires dites « des Bissonnets » (dénomination locale), et ;
 - le passage latéral de la gaize supérieure aux « Sables de Lillebonne » (*Juignet, 1974 ; Ragot, 1988*).
- Le Poudingue ferrugineux et les Argiles du Gault

Le Poudingue ferrugineux est décrit sur l'ensemble du Pays de Caux comme une formation détritique, grossière, de faible épaisseur (2 à 6 m en général, localement épais de 10 m vers Port-Jérôme) (*Juignet, 1974*). Le Gault repose sur le Poudingue ferrugineux via une surface d'érosion. Il est constitué essentiellement par des argiles ou des marnes sableuses, noirâtres et glauconieuses. L'épaisseur du Gault varie de 4 à 5 m sur le littoral à environ 12 m vers Villequier (11, 5 m d'argiles sableuses glauconieuses dans le forage BSS 00982X0005, situé dans la zone industrielle de Port-Jérôme) et dans le secteur de Bréauté (forage BSS 00752X0006).

Dans sa définition des « argiles noires des Bissonnets », Ragot (1988) attribue la partie inférieure de la formation à l'équivalent latéral du poudingue ferrugineux, et la partie supérieure à l'équivalent latéral du Gault. Ces deux ensembles sont caractérisés dans le secteur d'étude par un même faciès argilo-sableux gris-noir, glauconieux. Cette variation de faciès est également décrite dans d'autres secteurs du Pays du Caux ce qui témoigne du contrôle de la sédimentation par des mouvements synsédimentaires de cette faille au cours de l'Albien.

D'un point de vue hydrogéologique, le poudingue ferrugineux est aquifère tandis que le Gault, peu perméable est aquitard. Ce dernier joue un rôle majeur à l'échelle de la zone d'étude puisqu'il constitue à la fois le toit imperméable de la nappe captive du Crétacé inférieur, et la base imperméable de la nappe libre contenue dans les épaisses séries crayeuses. La communication verticale entre ces deux nappes d'eau n'est a priori pas possible sauf s'il existe des drains verticaux (e.g. faille verticale drainante) ou une série de Gault discontinue.

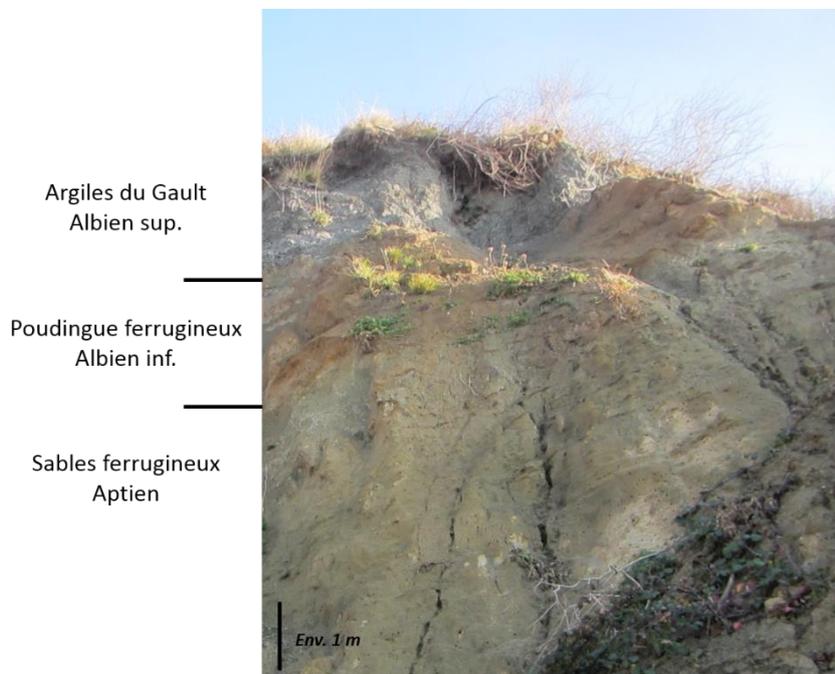


Illustration 19 : Succession Aptien (Sables ferrugineux) – Albien inf. (Poudingue ferrugineux) et Albien sup. (Argiles du Gault) au niveau d'un affleurement du Cap de la Hève (Seine-Maritime) – BRGM



Illustration 20 : Faciès des Argiles du Gault de l'Albien supérieur rencontrés en fin de forage dans le sondage de la CODAH de Nointot (ici entre 159 m et 162 m de profondeur) – ouvrage BSS 00756X0209

- La Gaize et les « Sables de Lillebonne »

La Gaize est caractérisée par des marnes silteuses ou des silts argileux souvent très glauconieux à bancs chertoux. Stratigraphiquement, elle correspond à l'Albien supérieur. Le forage de Nointôt, réalisé par la CODAH en 2015 et situé à l'ouest de la structure de Fécamp-Lillebonne (bloc affaissé) semble avoir traversé environ 37 m de gaize essentiellement représentée par des silts, parfois argileux et glauconieux (Illustration 21). La base des Gaize, peu avant le passage vers le Gault, est caractérisée par un horizon très glauconieux, à faciès de glauconite, épais d'environ 1,5 m dans le sondage de la CODAH.



Illustration 21 : Faciès des Gaize de l'Albien supérieur rencontrés dans le forage de la CODAH de Nointot (ici entre 150 m et 153 m de profondeur) – ouvrage BSS 00756X0209

Dans le secteur d'étude, cette formation silteuse de la Gaize (dite Gaize inférieure) est recouverte de terrains sableux verdâtres très glauconieux : les « Sables de Lillebonne ». La formation des « Sables de Lillebonne » est une spécificité locale puisqu'elle n'est connue qu'aux abords de la structure de Fécamp-Lillebonne, entre Bréauté, Notre-Dame-de-Gravenchon et Villequier, dans un secteur baptisé « sillon de Lillebonne » (Juignet, 1974 ; Ragot, 1988). D'un point de vue stratigraphique, elle correspond à un faciès spécifique de la partie supérieure de la Gaize, et est caractérisée par des sables verts, jaunâtres ou gris, glauconieux, fins et bien classés (Illustration 22). La présence et la répartition des « Sables de Lillebonne » semblent contrôlées par une dynamique synsédimentaire de la structure de Fécamp-Lillebonne (Ragot, 1988). L'épaisseur des « Sables de Lillebonne » est de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans le secteur de Bolbec, où

ils constituent par exemple les terrains sous-jacents aux alluvions dans le vallon de Bolbec (cf. chapitre 4.1 – coupe de la vallée de Bolbec).



Illustration 22 : Affleurement des « Sables de Lillebonne » de l'Albien supérieur dans la rue Fontaine Martel à Bolbec, à une centaine de mètres en amont de la structure de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé – BRGM

La surface de ravinement « Octeville » signe le terme de la sédimentation du Crétacé inférieur, et marque le début de la longue sédimentation crayeuse qui perdurera tout au long du Crétacé supérieur.

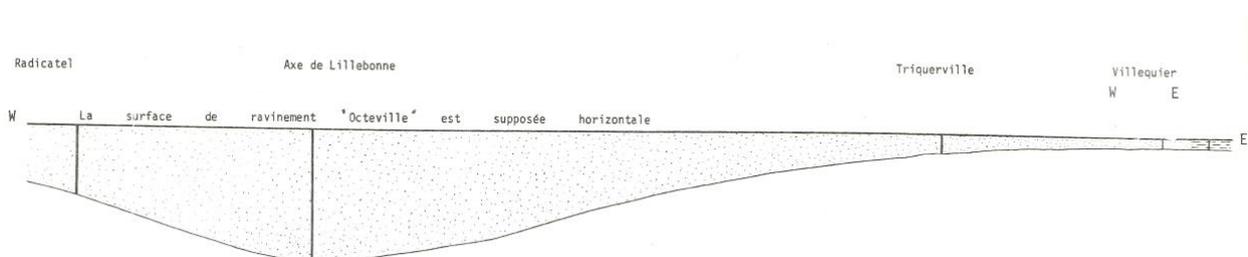


Illustration 23 : Géométrie de la Gaize supérieure du secteur entre Villequier à l'est et Radicatel à l'ouest, représentée par le faciès des « Sables de Lillebonne » (modifié d'après Ragot, 1988)

Variations latérales des faciès

Les faciès du Crétacé inférieur jouent un rôle important dans la dynamique hydrogéologique régionale puisque les faciès argileux du Gault constituent à la fois le mur de la puissante nappe de la Craie et le toit de la nappe albo-aptienne. La présente étude a permis la compilation des données relatives à la répartition des faciès du Crétacé inférieur (Illustration 24). Les données utilisées pour cette synthèse sont les suivantes :

- les isohypses du mur du Cénomaniens (= toit de l'Albien), exprimés en mètres NGF, issus d'une étude de la CGG (1998) ;

- l'altitude du faciès « Gault » en mètres NGF mentionnée dans les logs géologiques validés de la Banque du Sous-Sol (BSS-BRGM¹) ;
- l'épaisseur et la répartition des « Sables de Lillebonne » d'après *Juignet (1974)*, *Ragot (1988)* et une analyse des logs géologiques disponibles en BSS ;

L'épaisseur et la répartition des « Sables de Lillebonne » peuvent varier latéralement. En effet, le forage récent réalisé à l'ouest de Nointôt par la CODAH (bloc ouest affaissé de la faille de Fécamp-Lillebonne – sondage BSS 00756X0209), a traversé une dizaine de mètres d'un faciès sableux très glauconieux verdâtre qui peut être associé aux « Sables de Lillebonne » alors que le forage 00756X0006, situé à 750 m au sud-est, dans le vallon de la Fontaine Palfray (bloc est de la faille de Fécamp-Lillebonne, soulevé), a traversé 18,5 m de sables parfois gréseux également attribués au faciès des « Sables de Lillebonne ». Sur le bloc ouest affaissé, le forage 00751X0007 de Bréauté en a traversé 40 m et le forage 00756X0050 en indique 27 m (cf. Illustration 24).

A noter que des incohérences existent parfois entre les altitudes de la base du Cénomaniens mentionnée en forage et les valeurs des isohypses, mettant en évidence la nécessité de procéder à une nouvelle interpolation incluant les nouvelles données acquises. Ces différences peuvent s'expliquer par la difficulté à différencier les horizons parfois sableux de la base du Cénomaniens inférieur (niveau de glauconitite), avec les Sables de Lillebonne sous-jacents, car les faciès convergent (*Ragot, 1988*).

¹ Les données de la Banque du Sous-Sol (BSS) sont disponibles sur le site internet Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>)

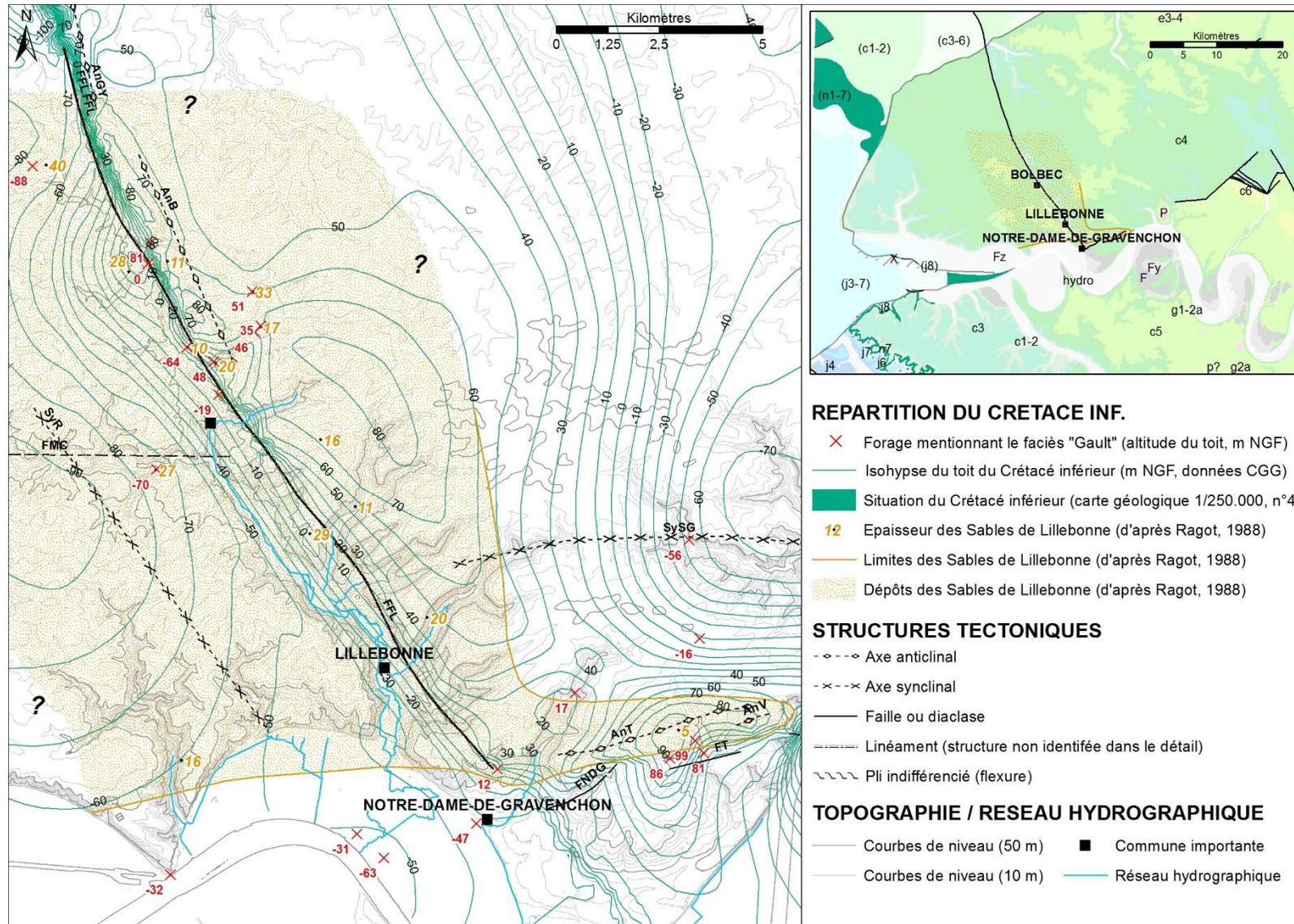


Illustration 24 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des faciès du Crétacé inférieur (sources : Ragot, 1988 ; CGG, 1998 ; Banque du Sous-Sol (BRGM) et carte géologique de la France au 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM))

1.3.2. Crétacé supérieur

Les dépôts du Cénomanien et la Pierre de Fécamp

- Cénomanien inférieur : Craie glauconieuse et Pierre de Fécamp

Les premiers dépôts cénomanien présentent la plupart du temps un faciès sableux, riche en glauconie (faciès de glauconitite), qui s'apparente à celui des « Sables de Lillebonne », rendant difficile la séparation entre les deux étages puisque la surface de ravinement « Octeville » n'est que très peu marquée (Ragot, 1988). Au-dessus, le Cénomanien inférieur est représenté par les dépôts de la Craie glauconieuse caractérisée par des craies sableuses, entrecoupée de nombreux hardgrounds, riches en grains de glauconie et en éléments détritiques ce qui se traduit par une teneur en CaCO_3 voisine de 50 % (Juignet, 1988). La teneur en glauconie et en éléments détritiques diminue généralement de la base vers le sommet de la formation, et la teneur en CaCO_3 atteint rapidement 80 % (Juignet, 1988).

Le Cénomanien inférieur des secteurs situés entre Fécamp au nord et Villequier au sud, le long de la structure Fécamp-Lillebonne-Villequier, est représenté par un faciès particulier : la Pierre de Fécamp. Il s'agit d'un calcaire gréseux, glauconieux, noduleux, sableux à la base, qui correspond à un horizon condensé (hardground complexe – Ragot, 1988). Dans le secteur de Bolbec, la condensation se traduit d'est en ouest (à mesure que l'on se rapproche de la faille), sur 1 kilomètre, par le remplacement d'un niveau crayeux par une glauconitite, associé à une diminution d'épaisseur (3,2 m à 2 m) (Ragot, 1988). D'après Juignet (1974) et Ragot (1988), le caractère condensé de ce faciès particulier est à rapprocher à une manifestation tectonique de la structure de Fécamp-Lillebonne, à l'origine des « Axes de Lillebonne » et de « Villequier » (Juignet, 1974). En effet, le faciès de la Pierre de Fécamp est bien différent de ceux observés ailleurs dans le Pays de Caux, ce qui indique une nouvelle fois le contrôle de la faille de Fécamp-Lillebonne sur la sédimentation.

La base de la Pierre de Fécamp est marquée par un banc lumachellique riche en huîtres (*Pycnodonte vesiculosa*), qui peut représenter un niveau repère stratigraphique intéressant. D'un point de vue sédimentologique, ce banc à huître indique une période propice pour le développement de ces organismes (haut fond, faible profondeur d'eau, arrêt de sédimentation) (Ragot, 1988).

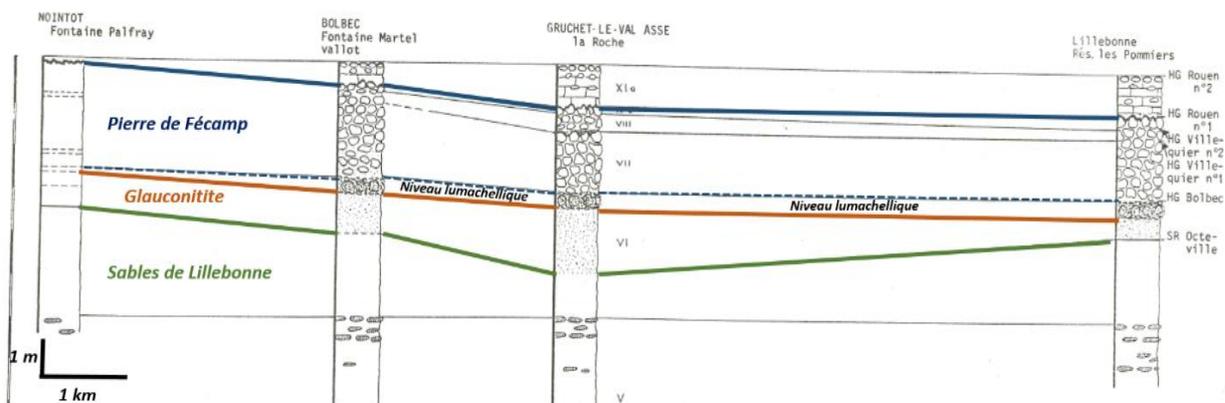


Illustration 25 : Variations lithologiques et géométriques de la partie haute du faciès de la Gaize supérieure « Sables de Lillebonne » et du Cénomanien inférieur sur l' Axe de Lillebonne (modifié d'après Ragot, 1988)

Dans la zone d'étude, entre Bolbec et Lillebonne, la Pierre de Fécamp a pu être observée au niveau de plusieurs affleurements (Illustration 26), et est également connue en forage. Dans tous les cas, ce faciès singulier signale la proximité de la structure de Fécamp-Lillebonne. Le sommet du Cénomaniens inférieur est marqué par le hardground d'importance régionale « Rouen n°1 ».



Illustration 26 : Affleurement de la Pierre de Fécamp, faciès condensé du Cénomaniens inférieur dans la rue Fontaine Martel à Bolbec, à une centaine de mètres en amont de la structure de Fécamp-Lillebonne sur le bloc NE surélevé – BRGM

- Cénomaniens moyen à supérieur : Craie de Rouen et Craie d'Antifer

Les faciès de la craie de Rouen (Cénomaniens moy. et début sup.) sont gris, à rares silex avec une proportion de glauconie diminuant vers le sommet de la série, ce qui diffère grandement des dépôts encore très détritiques du Cénomaniens inférieur. L'épaisseur de cette formation est estimée à 10 m (Ragot, 1988). Elle se termine par le hardground d'importance régionale « Antifer n°1 ».

Enfin, d'après le découpage lithostratigraphique proposé par Lasseur (2007), le sommet du Cénomaniens supérieur est représenté par la Craie d'Antifer, qui est le membre inférieur de la Craie de Fécamp (cf. craies du Turonien). La différenciation lithologique entre cette formation et les craies du Cap Fagnet, qui correspond au membre supérieur de la Craie de Fécamp, est peu marquée : ces deux unités sont représentées par des craies noduleuses, pauvres en silex. Le sommet de la Craie d'Antifer marque le passage Cénomaniens – Turonien.

Les craies du Turonien

Classiquement, les craies turoniennes sont décrites dans la littérature comme des craies marneuses ou argileuses, grises, massives, compactes, pauvres en silex dans la partie inférieure, et dont la teneur en argile peut atteindre 10 à 20 %. Dans la notice de la carte géologique de Bolbec (Ménillet, 1969), la description du sondage 00756X0065 mentionne à la base du Turonien, une craie blanche, granuleuse, plus ou moins dure avec des passées de calcaire dur à grains

fins, et sans silex (Turonien inf.) puis des craies tendres avec alternance de bancs de silex (Turonien moy.). La formation se termine par un faciès de calcaires durs, beiges à jaunâtres, noduleux à silex qui rappellent les dépôts du Coniacien inférieur (Turonien sup.). L'épaisseur du Turonien dans le secteur est de l'ordre de 25 à 30 m.

Les travaux de Juignet (1974) et de Ragot (1988) affinent le découpage lithostratigraphique du Turonien inférieur, en identifiant de la base au sommet :

- la craie à *Actinocamax plenus* de quelques mètres d'épaisseur, qui débute par le hardground régional Antifer n°1 et caractérisée par un faciès de calcaires très noduleux, riches en hardground,
- puis la craie marneuse plus homogène, noduleuse et sans hardground.

Les travaux les plus récents sur la craie du Bassin de Paris (Lasseur, 2008) actualisent et complètent ce découpage pour l'ensemble du Turonien, en identifiant trois unités lithostratigraphiques :

- La *Craie du Cap Fagnet* (Turonien inf., membre supérieur de la Craie de Fécamp) correspond à la craie à *Inoceramus labiatus* du découpage biostratigraphique, mentionnée sur la plupart des cartes géologiques au 1/50.000. Ce sont les premiers dépôts turoniens, caractérisés par une série homogène de gros bancs d'épaisseur métrique de craie argileuse à niveaux noduleux et hardgrounds, généralement très pauvres en silex. C'est une craie très carbonatée (80 à 90 % de CaCO₃) ;
- La *Craie de Senneville* (Turonien moy. et sup.), caractérisée par plusieurs niveaux de craie noduleuse ainsi que de nombreux niveaux marneux dont certains sont particulièrement bien développés. Les derniers mètres de cette formation sont marqués par des niveaux indurés plus marqués et plus abondants associés à des craies plus grossières ;
- La *Craie d'Eletot* (fin du Turonien sup., membre inférieur de la formation des craies de Saint-Pierre-en-Port, qui se prolonge au Coniacien inférieur), caractérisée par des craies grises à niveaux de silex bien lités et riches en niveaux indurés. Cette unité stratigraphique est bien individualisée par ces caractéristiques lithologiques.

Les craies du Coniacien et du Santonien

Classiquement, les craies coniaciennes sont décrites comme des craies dolomitiques, dures, blanchâtres à jaunâtres, qui se présentent en bancs épais séparés par des lits de silex. Dans la notice de la carte géologique de Bolbec (Ménillet, 1969), le Coniacien est divisé en deux parties : une partie supérieure (75 m) de craie blanche, en général tendre, granuleuse, disposée en strates séparées par des lits de silex, et une partie inférieure de craie blanche ou jaunâtre dure, très légèrement glauconieuse à silex peu nombreux disposés en cordons plus ou moins continus.

Ragot (1988) affine le découpage lithostratigraphique du Coniacien en identifiant la Craie à *Micraster normanniae* et la Craie à *Micraster decipiens*, qui d'un point de vue « faciès » correspondent toutes deux à des craies blanc-grisâtre ou jaunâtre à silex noirs dispersés ou alignés en bancs.

D'après Lasseur (2008) le découpage du Coniacien est défini par deux unités lithostratigraphiques :

- La *Craie de Petites Dalles* (Coniacien inf., membre supérieur des Craies de Saint-Pierre-en-Port), caractérisée par des craies grises peu noduleuses à la base, suivies de craies plus noduleuses se terminant par un, voire plusieurs hardgrounds ;
- La *Craie de Veulettes* (Coniacien moy.-sup. et Santonien inf.), qui se présente à l’affleurement comme une craie blanche, localement très bioclastique, à nombreux bancs de silex très développés et dont l’épaisseur peut atteindre 50 cm. Notons que de nombreuses géométries lenticulaires d’extension kilométrique (contourites) sont visibles au sein de cette formation.

Variations latérales des faciès

La Seine-Maritime est constituée majoritairement de dépôts crayeux plus ou moins épais qui hébergent la nappe de la craie. Pour rappel, le Turonien inférieur est caractérisé par de la craie argileuse, ce qui peut impacter les écoulements de la nappe (voire compartimenter l’aquifère ?). A l’échelle de la zone d’étude, la géométrie et les faciès de cette formation et donc de l’aquifère varient.

L’illustration 27 permet de mettre en évidence ces variations. Elle est issue de la compilation des mêmes données énoncées au chapitre 1.3.1, avec, en sus, celles provenant de la carte géologique harmonisée de la Seine-Maritime (*Quesnel et al.*, 2007) et de la carte géologique de Rouen au 1/250.000 (*Cavelier et Medioni*, 1980) pour la répartition des affleurements de craies du Cénomaniens, Turonien, Coniacien et Santonien.

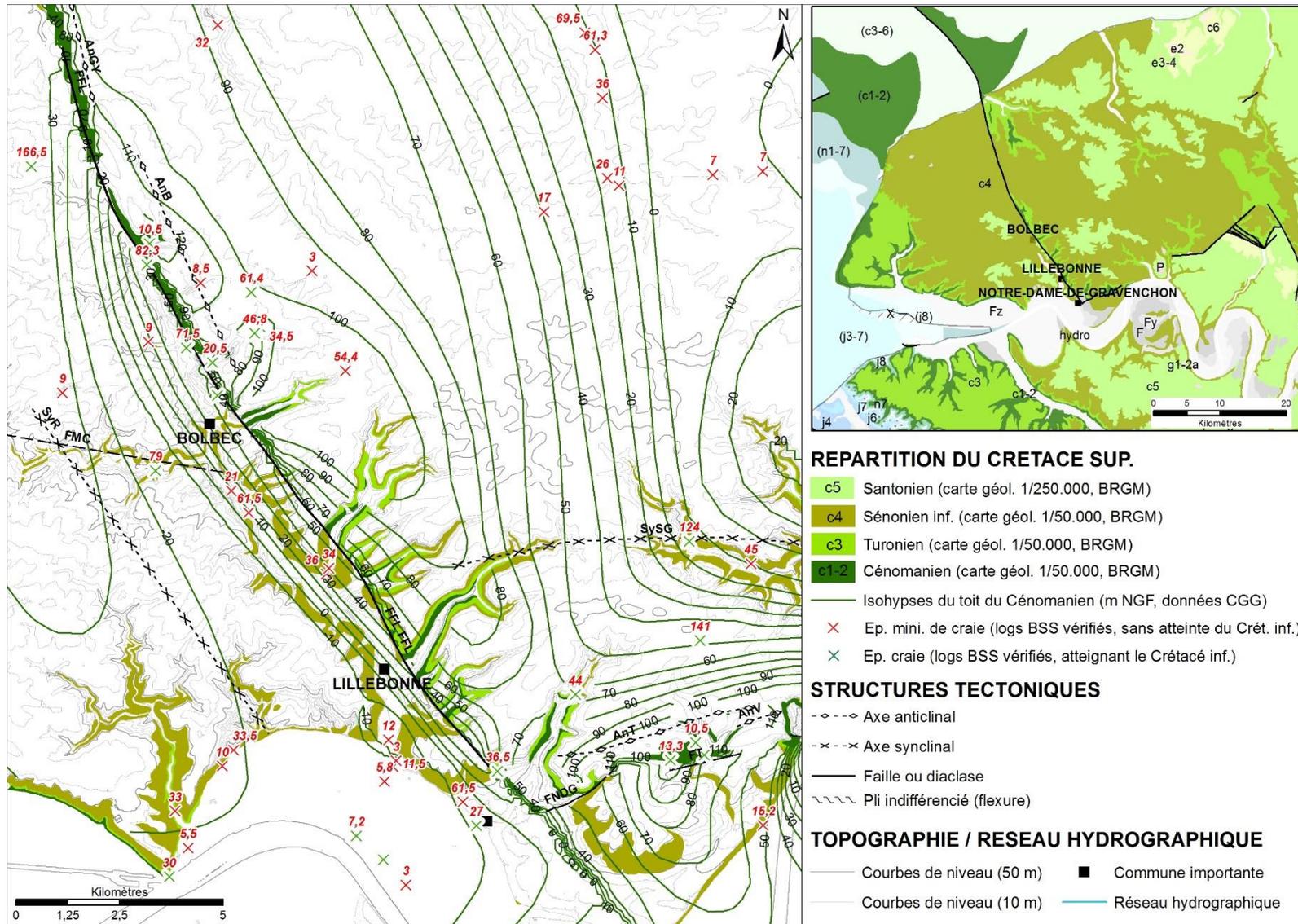


Illustration 27 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des faciès du Crétacé supérieur (sources : carte géologique de la France au 1/250.000, feuille de Rouen (BRGM) ; cartes géologiques de la France au 1/50.000 (BRGM), CGG, 1998, données BSS (BRGM))

1.4. DESCRIPTION ET REPARTITION SPATIALE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les formations superficielles sont les dépôts les plus représentés sur la zone d'étude. Elles recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux du secteur, les affleurements du substratum n'étant localisés qu'au niveau des fortes pentes et des abrupts, situés sur les versants des vallées. Classiquement, ces formations sont divisées en plusieurs grands ensembles :

- les *résidus d'altération* des craies du Crétacé supérieur (formations résiduelles à silex et altérites de la craie) et les formations remaniées associées (biefs et limons à silex) ;
- les *dépôts alluviaux* caractérisés par les complexes alluvionnaires, déposés par les cours d'eau ;
- Les *dépôts éoliens*, caractérisés par le complexe des limons des plateaux, déposés par les vents lors des périodes froides du Quaternaire ;
- Les *dépôts de pente*, caractérisés par les colluvions diverses, aux très fortes variations latérales de faciès, déposées par des phénomènes gravitaires ;
- Les *résidus tertiaires*, qui correspondent à des lambeaux ou des résidus de formations essentiellement sableuses ou gréseuses (sables de Fontainebleau, sables de Lozère), déposés au gré des transgressions et régressions tertiaires, et piégés sous forme de poches dans des effondrements karstiques ou des dépressions topographiques liées à la tectonique.

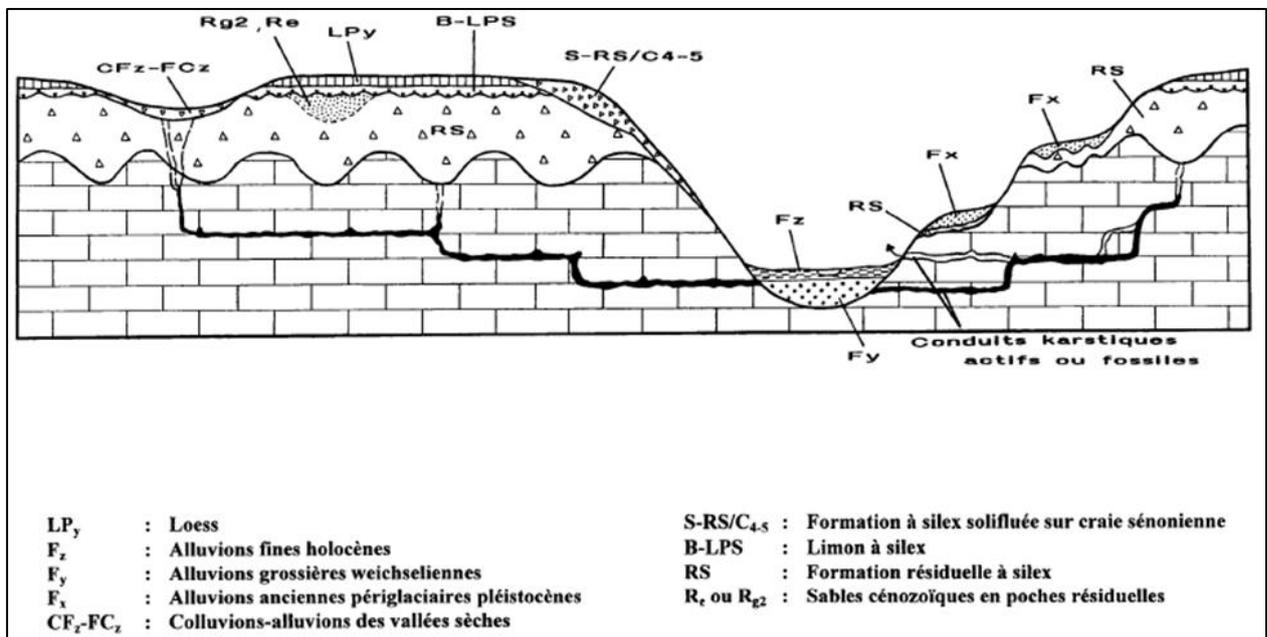


Illustration 28 : Répartition schématique des formations superficielles sur le substratum crayeux de l'Ouest du Bassin de Paris (Quesnel et al., 1996)

1.4.1. Limons des Plateaux

Le complexe des limons des plateaux recouvre une grande partie des plateaux situés dans la zone d'étude. Ce sont des terrains qui forment de bonnes terres arables, ce qui explique les grandes cultures caractéristiques des plateaux normands. Ces formations, décarbonatées, nécessitent d'être amendées pour augmenter la production agricole.

Il s'agit d'une formation allochtone éolienne, assimilée à des lœss, déposées par les vents catabatiques en contexte périglaciaire lors des périodes froides du Quaternaire. Cette formation se caractérise par un faciès limoneux relativement homogène, pouvant devenir plus argileux dans certains horizons (lœss-lehms) ou sableux. La teneur en argile varie de 40 % dans les lœss-lehms (limons anciens), à 20-30 % dans les autres horizons. La puissance de cette formation varie des bords des plateaux vers le centre, où elle peut atteindre une dizaine de mètres.

Cette formation meuble est perméable, laisse l'eau percoler lentement et possède un assez fort pouvoir de rétention (*Calba et al.*, 1979).

1.4.2. Formation résiduelle à silex

La Formation résiduelle à silex, ou résidus à silex, ou encore argiles à silex (nommés RS sur les cartes géologiques), recouvre l'ensemble des plateaux crayeux de la zone d'étude, et est également souvent solifluée sur les versants des vallées.

Les RS résultent de l'altération des différents niveaux crayeux du Crétacé supérieur et se sont formés après l'émersion fini-crétacée, au cours du Cénozoïque. Ce sont des formations globalement sub-autochtones, formées sur place aux dépens du substratum crayeux et sans l'intervention d'agents de transports. Elles sont parfois entrecoupées de poches tertiaires. Ces poches tertiaires peuvent contaminer les RS (contamination postérieure aux dépôts des sables tertiaires) en leur donnant une texture plus sableuse. La morphologie du mur des RS est karstique, marquée par une succession d'entonnoirs de dissolutions qui peuvent pénétrer la craie sur plusieurs dizaines de mètres, à l'origine d'une géométrie en « dents de scie ».

1.4.3. Colluvions et dépôts de pente

Les colluvions sont constituées de matériaux remaniés par le ruissellement, la solifluxion et accumulés sur les versants ou dans les fonds de vallons durant le Quaternaire. Ces formations remanient les formations du tertiaire, les limons des plateaux, les limons à silex et les biefs à silex, les formations résiduelles à silex, les faciès crayeux du Crétacé et parfois d'anciennes terrasses alluviales.

Ce remaniement induit de très grandes variations de faciès, aussi bien latérales que verticales. Leur épaisseur est très variable : elle peut varier de un à quelques mètres et peut atteindre parfois plus de 10 mètres.

1.4.4. Le complexe alluvionnaire

Deux types d'alluvions sont connues dans le secteur d'étude : les alluvions anciennes, disposées en terrasses successives au gré du creusement des vallées ; et les alluvions « récentes », qui tapissent le fond des vallées actuelles et déposées successivement depuis la dernière période glaciaire (Illustration 29).

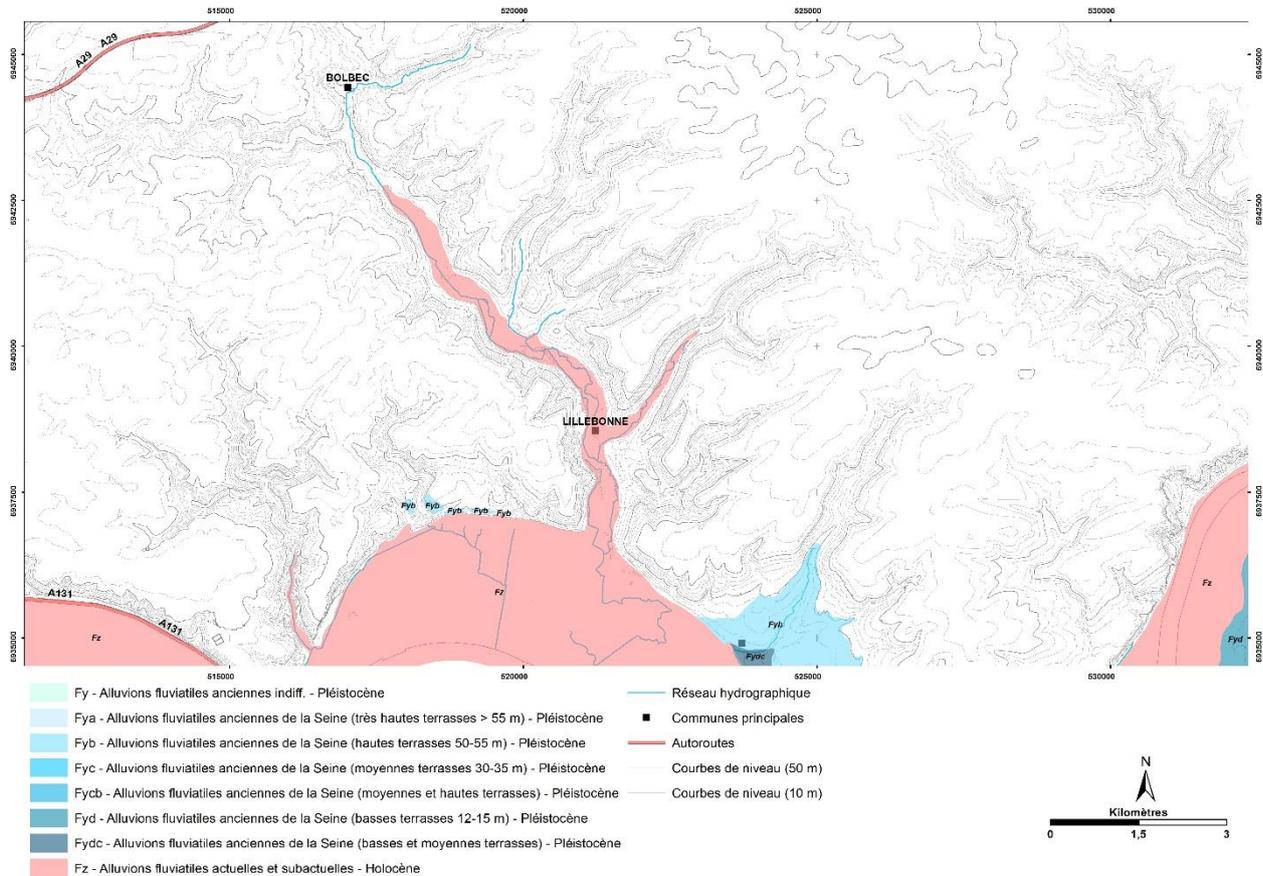


Illustration 29 : Répartition des formations superficielles alluvionnaires sur la zone d'étude (d'après la carte géologique harmonisée de la Seine-Maritime, Quesnel et al., 2007)

Les alluvions anciennes en terrasses

Ces alluvions anciennes sont caractérisées par des faciès essentiellement grossiers : galets, graviers et sables. Déposées par la Seine en climat périglaciaire, elles tapissent d'anciennes terrasses alluviales aujourd'hui perchées par rapport au niveau actuel du fleuve. En rive droite de la Seine, les terrasses alluviales anciennes s'étagent entre + 10 et + 55 m d'altitude. Ces alluvions ont parfois été exploitées comme c'est le cas à Saint-Nicolas-de-Bliquetuit où des alluvions du premier niveau, constituées de galets de silex émoussés mêlés dans des sables, ont été exploitées en carrière (Ménillet, 1969). Les plus hautes terrasses sont constituées d'alluvions épaisses de 5 à 6 m, grossières, à silex hétérométriques très émoussés emballés dans un sable rouge légèrement argileux, grossier à moyen (Ménillet, 1969). Ces alluvions anciennes ne sont pas connues dans la vallée du Commerce.

Les alluvions actuelles et subactuelles du fond de la vallée de la Seine et de ses affluents

La composition des alluvions récentes peut varier localement, mais elles sont globalement caractérisées par des faciès relativement fins, argilo-sableux, et parfois tourbeux. D'après les cartes géologiques disponibles sur le secteur (Ménillet, 1969 ; Quesnel et al., 2007), les alluvions holocènes sont largement représentées dans la vallée de la Seine, ainsi que dans la partie aval de la vallée du Commerce (jusqu'à Gruchet-le-Valasse), et dans la vallée de Sainte-Gertrude à l'est de la zone d'étude (Illustration 29). En amont de Gruchet-le-Valasse, vers Bolbec et dans

les vallons annexes (vallon de Bolbec, Palfray, Fontaine Murée), les alluvions ne sont pas connues. Les fonds de vallons y sont tapissés de formations colluvionnées issues des versants, caractérisées par des faciès fins (limoneux ou argileux) à éléments grossiers remaniés (silex, craie). D'après les sondages disponibles en BSS, entre Bolbec et Gruchet-le-Valasse, ces colluvions semblent reposer directement sur la Formation Résiduelle à silex (sondage 00756X0003). En amont de Bolbec, sur le bloc surélevé de la structure de Fécamp-Lillebonne, ces colluvions reposent directement sur les formations albiennes (Sables de Lillebonne notamment), puis cénomaniennes (craie).

Les dépôts alluvionnaires de la vallée de la Seine et de ses affluents sont classiquement classés en deux grands ensembles, caractérisés par des faciès différents : les « graves de fond », essentiellement graveleuses ou sableuses, qui constituent les premiers dépôts fluviaux reposant sur le substratum (crayeux pour l'ensemble, hormis dans les secteurs de Villequier où la Seine s'écoule sur des terrains argilo-sableux du Crétacé inférieur ou marno-calcaire du Jurassique), déposés sous climat périglaciaire ; et les alluvions plus récentes, plus fines et tourbeuses, qui reposent sur les alluvions grossières. Dans la vallée de la Seine, l'épaisseur des dépôts alluviaux varie de 4 à 5 m en bordure de la vallée, à près de 30 m dans le centre de la vallée, où l'on peut rencontrer 10 à 20 m d'alluvions argilo-sableuses et tourbeuses, puis 5 à 15 m d'alluvions grossières (*Maillary et de la Quèrière*, 1970). Dans la vallée du Commerce, le sondage BSS 00756X0018 situé à Lillebonne a rencontré une dizaine de mètres d'alluvions reposant sur la craie, avec de haut en bas : 1 m de limon tourbeux, 2 m de grave de silex et de fragments de craie, 2,2 m de tourbe, 1,7 m de calcaire désagrégé et 3,5 m de sable et très gros galets (*Ménillet*, 1969). Plus en amont, les sondages situés dans le secteur de Gruchet-la-Valasse (00756X0068 ; 00756X0034) semblent également avoir traversé une dizaine de mètres de terrains sablo-graveleux à passées fines attribuées à des dépôts alluvionnaires reposant sur la craie.

Ces dépôts fluviaux sont issus de l'érosion des formations géologiques plus anciennes (substratum crayeux, Formation Résiduelle à silex) charriés par les cours d'eau, et peuvent être localement alimentés par des dépôts sédimentaires contemporains (Limons des Plateaux, colluvions etc.). Les coupes schématiques de la vallée de la Seine disponibles dans la littérature (*Lefebvre et al.*, 1993) indiquent des géométries lenticulaires des dépôts alluvionnaires.

La structuration de ces dépôts aux épaisseurs et aux faciès très contrastés influence le comportement de la nappe des alluvions, elle-même en lien avec la nappe de la Craie sous-jacente. Il convient donc de décrire le plus précisément possible les dépôts alluvionnaires, en termes de géométrie et de lithologie, pour percevoir le rôle qu'elles peuvent avoir sur le comportement de l'hydrosystème.

1.4.5. Variations latérales de faciès

Les faciès et les épaisseurs de ces formations varient principalement selon leur situation topographique (plateau, versant, vallée). Certaines formations perméables, si elles sont suffisamment puissantes, peuvent héberger des nappes de stagnation temporaire.

L'illustration 30 compile les informations issues :

- de la carte géologique harmonisée de la Seine-Maritime (*Quesnel et al.*, 2007) qui renseigne sur la répartition des formations superficielles ;
- des données de forages (BSS-BRGM) ;
- des isopaques des principales formations superficielles (notamment des limons des Plateaux et de la formation résiduelle à silex) issues de l'étude menée par CGG (1998).

On peut remarquer ainsi une zone de forte épaisseur d'argiles à silex le long de la structure de Fécamp-Lillebonne au nord de Bolbec. A l'heure actuelle, l'origine de cette surépaisseur d'argiles à silex n'est pas connue, mais une origine karstique est probable (plusieurs bétouilles sont d'ailleurs recensées dans ce secteur).

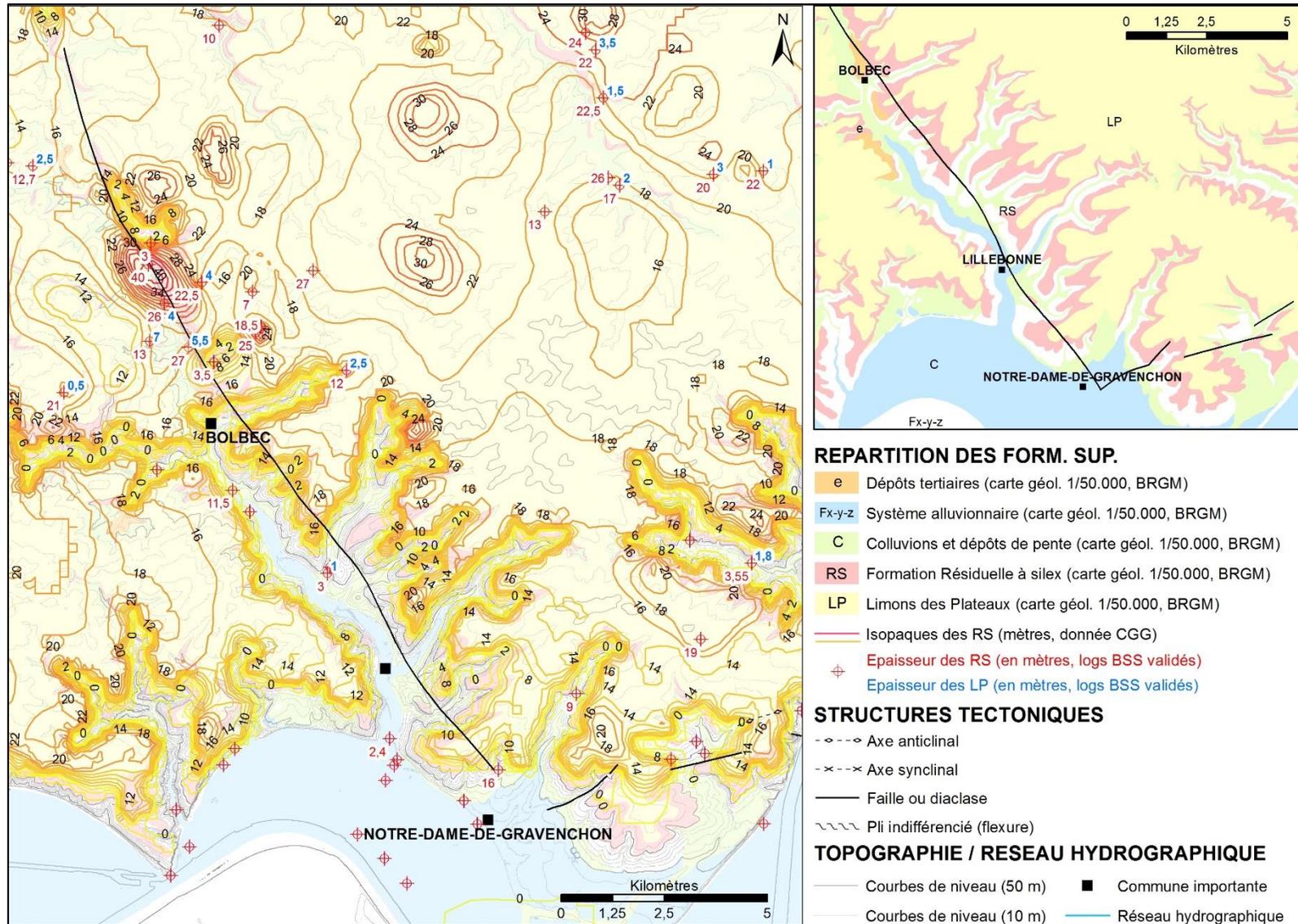


Illustration 30 : Synthèse des données concernant la répartition géographique des formations superficielles (sources : Cartes géologiques de la France au 1/50.000 (BRGM) ; CGG, 1998, données BSS (BRGM))

2. Investigations géophysiques : résultats et interprétations

2.1. OBJECTIF : AMELIORER LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL DU SECTEUR LILLEBONNE-BOLBEC

La géologie est complexe dans le secteur d'étude et elle influence les écoulements souterrains et les échanges de flux entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Afin de déterminer au mieux les différentes voies d'écoulement souterraines, il est important d'avoir la meilleure connaissance possible de la géologie et des structures présentes dans le sous-sol.

La synthèse des données géologiques disponibles dans la littérature a permis de faire un état des lieux relativement exhaustif des différents faciès et structures rencontrées dans le secteur d'étude. En complément de cette analyse bibliographique, plusieurs campagnes d'investigations géophysiques ont été menées spécifiquement sur des secteurs clés de la zone d'étude. En termes de connaissance géologique et hydrogéologique, les objectifs de ces investigations sont multiples :

- Améliorer les connaissances sur la répartition spatiale (géométrie, épaisseur) des faciès aquifères (sables aptiens, albiens ou cénomaniens, craie) ou aquicludes (argiles albiennes, formations superficielles) ;
- Améliorer les connaissances sur les structures cassantes ou plicatives, notamment celles mentionnées dans la littérature (par exemple confirmer ou infirmer la présence de structures tectoniques où des linéaments ont été identifiés par l'analyse des photographies spatiales ou aériennes), et qui peuvent potentiellement avoir un rôle sur les dynamiques hydrogéologiques (drain ou barrière selon leur remplissage) ;
- Améliorer les connaissances sur l'état de fracturation de la craie aux abords de la faille de Fécamp-Lillebonne (failles satellites, failles conjuguées etc.), ainsi que sur le développement de réseaux karstiques ;

Pour répondre à ces objectifs, trois méthodes géophysiques ont été utilisées : la gravimétrie, la sismique réflexion et la tomographie électrique. Ce choix repose sur les avantages qu'apporte chaque méthode sur la connaissance du sous-sol. La tomographie électrique et la gravimétrie apportent par exemple des informations sur la répartition spatiale des faciès (texture) et par conséquent sur des contacts anormaux, tandis que les profils sismiques mettent en évidence la géométrie des structures (failles, plis). L'utilisation conjointe de ces trois méthodes sur le même secteur permet donc de mettre à profit les avantages de chacune d'entre elles. En outre, lorsque les profils géophysiques se recoupent, la corrélation des résultats de chaque méthode permet d'améliorer les interprétations.

A noter qu'en milieu urbain, seule la méthode gravimétrique était applicable.

2.2. DEROULEMENT DES INVESTIGATIONS

Ces investigations ont été mises en œuvre par les équipes de géophysiciens du BRGM et se sont déroulées comme suit :

- Campagnes électriques : du 2 au 25 novembre 2016 ;
- Campagnes gravimétriques en deux phases : entre le 30 mars et le 8 avril 2016 puis entre le 12 et le 16 décembre 2016 ;
- Campagnes sismiques : du 12 au 16 décembre 2016, complétées par une nouvelle acquisition fin 2018 pour le profil situé à Vattetot-sous-Beaumont (profil nord).

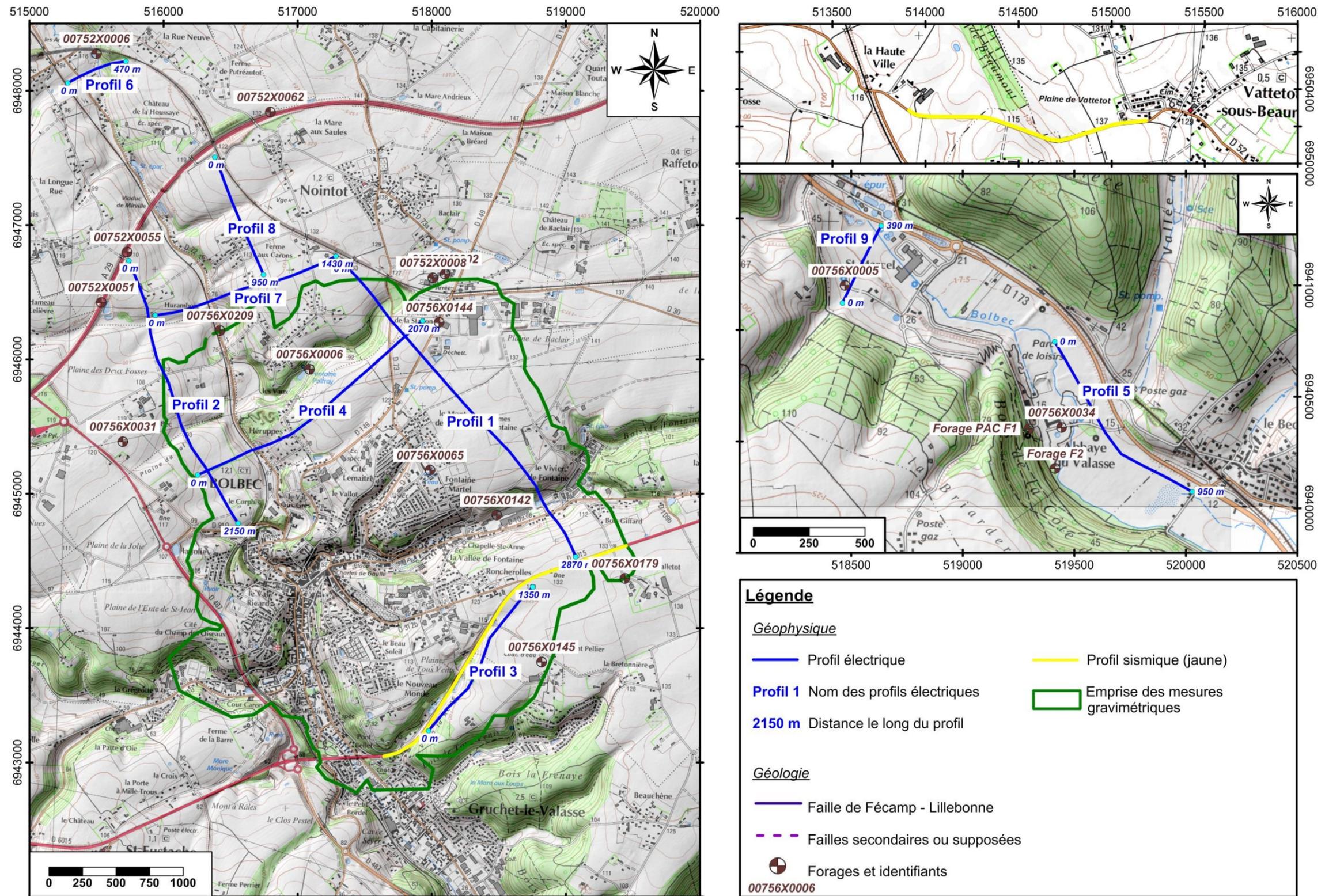


Illustration 31 : Carte de localisation des investigations géophysiques réalisées sur le secteur de Bolbec

2.3. INVESTIGATIONS GRAVIMÉTRIQUES

Cette section du rapport décrit les travaux mis en œuvre, le traitement et l'interprétation des données gravimétriques acquises sur le secteur de Bolbec, sous forme de schéma structural.

2.3.1. Mode opératoire et traitement

Acquisition des données

486 stations gravimétriques ont été implantées et mesurées en gravimétrie et au GPS différentiel sur la zone d'étude (Illustration 32).

Un gravimètre de terrain Scintrex CG-5 (le CG5 #028) a été utilisé pour effectuer les mesures gravimétriques. Le coefficient de calibration du gravimètre est de 0.999872. Il a été établi entre deux bases absolues IGN ayant une différence de g de 205.493 mGal, en novembre 2015. Ce coefficient a été pris en compte lors de la réduction des données.

L'ensemble des mesures gravimétriques a été effectué en 30 programmes semi-journaliers, dont la durée de chacun d'entre eux n'a pas excédée 4h00. Un programme de mesures, pendant lequel 15 à 20 stations gravimétriques sont typiquement mesurées, débute et se termine par une mesure à une base gravimétrique pour contraindre la dérive instrumentale temporelle du gravimètre relatif Scintrex CG-5. Cette dérive est approximée comme étant linéaire avec le temps.

Le mode d'acquisition du gravimètre utilisé a été le suivant :

- 6 à 10 mesures de 50 s à la base
- 3 à 5 mesures de 50 s à chaque station

Si l'inclinaison de l'instrument dépassait ± 10 arcs sur la composante X ou Y, une nouvelle mesure a été systématiquement réalisée avec des inclinaisons réajustées. De même, si l'écart entre l'avant dernière et la dernière mesure était supérieur à 0.005 mGal, une nouvelle mesure était effectuée.

Les mesures ont été réalisées sur trépied bas et la hauteur du gravimètre a été systématiquement mesurée avec un mètre ruban. Cette hauteur a été utilisée pour projeter au sol les valeurs de g en utilisant un gradient vertical usuel de 0.3086 mGal m^{-1} . 50 stations gravimétriques ont été reprises une fois, totalisant 10 % de stations reprises.

Le positionnement des stations gravimétriques a été réalisé à l'aide d'un GPS Trimble Geo 7X centimétrique avec une antenne externe Zephyr II sur canne de 2 mètres, utilisé en mode différentiel. A chaque occupation de station, 3 à 5 mesures de 60 s ont été effectuées, au pas d'acquisition de 1s. Les données enregistrées ont été post-traitées à l'aide du logiciel PathFinder Office v5.65, à partir des données de quatre bases situées à moins de 14 km du terrain : RGP-CTX6- Saint-Romain-de-Colbosc, RGP-TANC- Vigie Nouvelle Ecluse Tancarville, RGP-CTZ2-Goderville, RGP-CT3C-Alvimare.

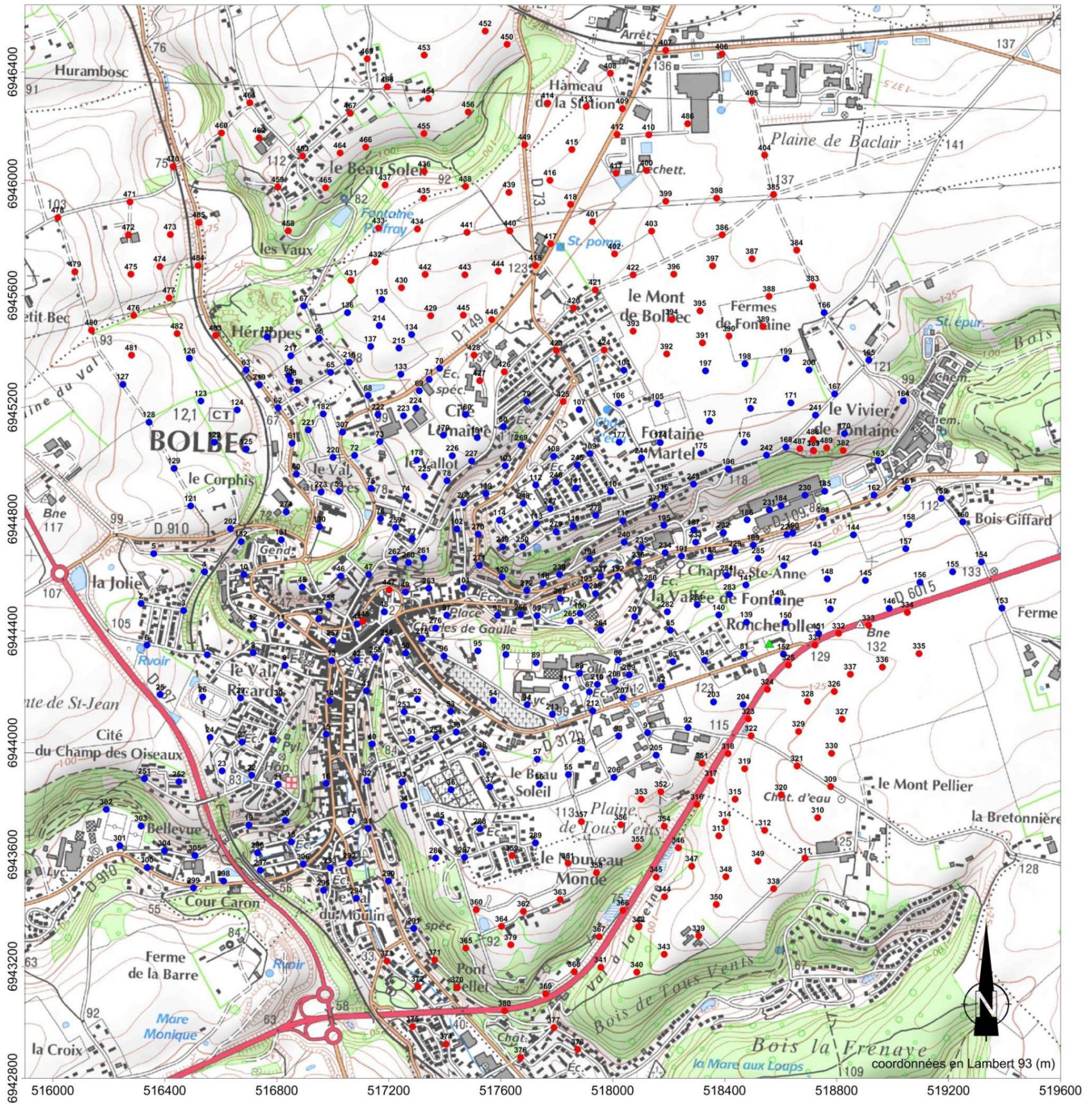


Illustration 32 : Carte d'implantation des stations gravimétriques acquises en avril 2016 (points bleus) et en décembre 2016 (points rouges). La base gravimétrique est marquée par un triangle vert. Fond topographique IGN au 25000^{ème}

Références gravimétriques et altimétriques

Une base gravimétrique principale a été implantée à l'hôtel 'Le relais d'Etretat' (Illustration 33), et a été utilisée pour l'ouverture et la fermeture de tous les programmes de mesures. Celle-ci a été rattachée à la base absolue de l'IGN Gerponville I par deux allers et retours gravimétriques.

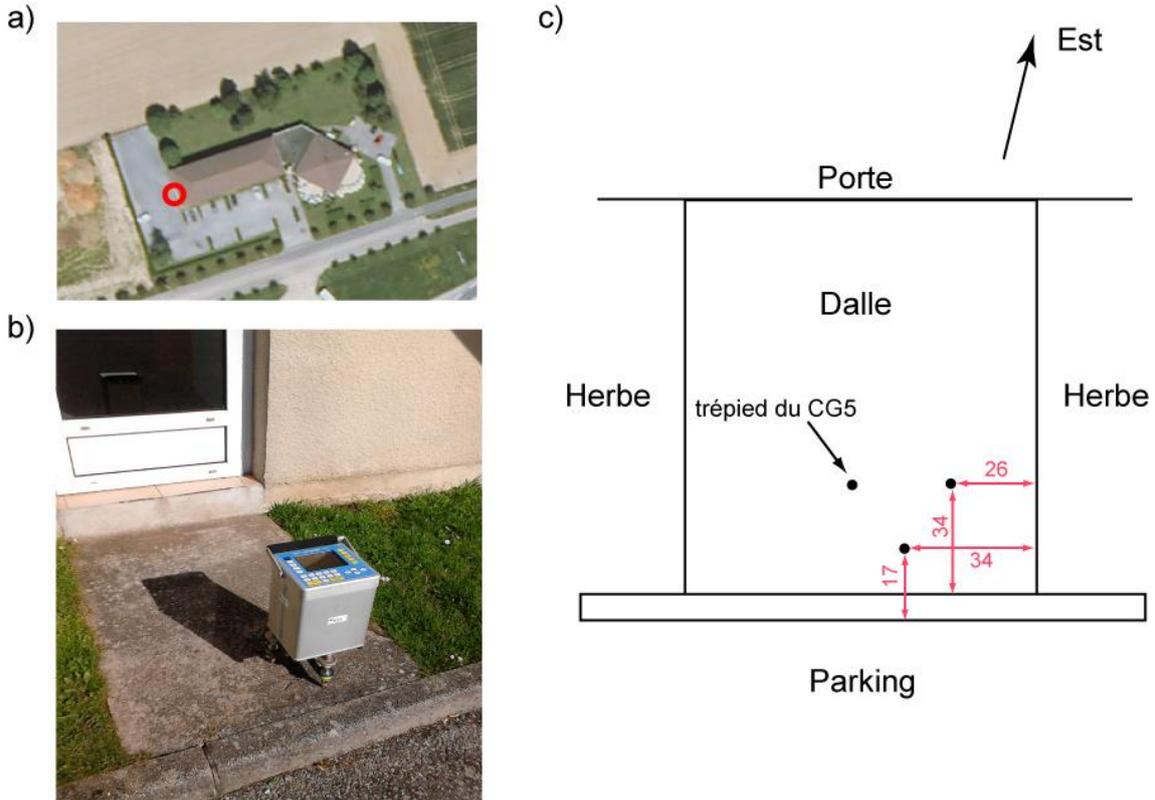


Illustration 33 : a) localisation de la base (rond rouge) sur photographie aérienne b) photographie de situation de la base gravimétrique principale, située à l'hôtel 'le Relais d'Etretat'. c) détail du positionnement du trépied du CG5 au niveau de la dalle, les côtes sont en cm.

La valeur de g à la base est établie à 980983.683 ± 0.020 mGal.

Les positions GPS sont exprimées dans le système RGF93 Lambert-93, selon le système altimétrique IGN 69, grâce à la grille de conversion RAF09.

Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

L'ensemble du traitement des données a été réalisé au BRGM, avec des codes développés au BRGM.

- Principe

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données acquises brutes et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation des

données relatives à la structure du sous-sol. L'anomalie de Bouguer est une anomalie gravimétrique rendant compte de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique.

Les réductions de données suivantes sont à réaliser pour obtenir l'anomalie de Bouguer :

- correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithmes de Longman (1959)),
- correction de la dérive temporelle du gravimètre, déterminée par la première et dernière occupation de la station de base au sein d'un programme de mesure,
- projection de la valeur de g au niveau du sol à partir de la hauteur du capteur mesurée sur le terrain, via un gradient vertical usuel de $0,3086 \text{ mGal m}^{-1}$
 - o Les trois précédentes corrections permettent d'obtenir les valeurs relatives de g aux stations par rapport à la base, appelées valeurs compensées g_{comp}
- retrait du g théorique g_{th} (formule GRS80), fonction de la latitude, qui permet de passer d'une valeur de g à une anomalie,
- correction d'air libre pour compenser les effets des variations d'altitude entre les stations,
- corrections de relief (correction de plateau + corrections de terrain), pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points de mesures

L'anomalie de Bouguer A_B s'exprime ainsi :

$$A_B = g_{comp} - g_{th} + (dg/dz)h - 2\pi G\rho_b h + \rho_b CT + T_A \quad (\text{eq. 1})$$

où ρ_b est la densité de réduction de Bouguer, h l'altitude du point considéré (en mètres), dg/dz le gradient vertical dit à 'l'air libre', G la constante de gravitation universelle, CT la correction de terrain pour un terrain de densité 1.

Calcul des corrections de terrain

Les corrections de terrain (CT) ont été réalisées en prenant en compte la topographie et la bathymétrie entre 0 et 22 km de chaque station, en utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) imbriqués, avec des routines basées sur le calcul par prismes selon le protocole suivant :

- Entre 0 et 1000 m autour des stations, un MNT Lidar IGN RGE Alti à la maille de 5 m est utilisé. Sur une distance de 100 m autour de chaque station, ce MNT a été ré interpolé linéairement à la maille de 1 m pour atténuer les effets de 'marche d'escalier' inhérents au calcul par la méthode de prismes.
- Entre 100 m et 22 km, le MNT IGN BD Alti à la maille de 25 m est utilisé pour calculer les CT.

Les corrections topographiques à chaque station sont illustrées dans l'illustration 34, pour une densité de 2.06. Celles-ci varient de 0.041 à 0.760 mGal, les plus fortes valeurs étant situées au fond des vallées, et les plus faibles sur les plateaux.

Les corrections de terrain n'ont pas été effectuées au-delà de 22 km car l'emprise de la zone d'étude est faible, de l'ordre de 3.5 km par 3.5 km, si bien que l'effet des corrections lointaines est un signal de grande longueur d'onde à cette échelle, qui va être intégré dans l'anomalie régionale. Ceci ne va donc pas nuire à l'étude des moyennes et faibles longueurs d'onde, caractéristiques de la centaine de premiers mètres sous la surface, objet de cette étude.

De plus, la topographie et la bathymétrie sont relativement planes autour du secteur d'étude (pas de chaînes de montagnes ou de marges continentales à proximité).

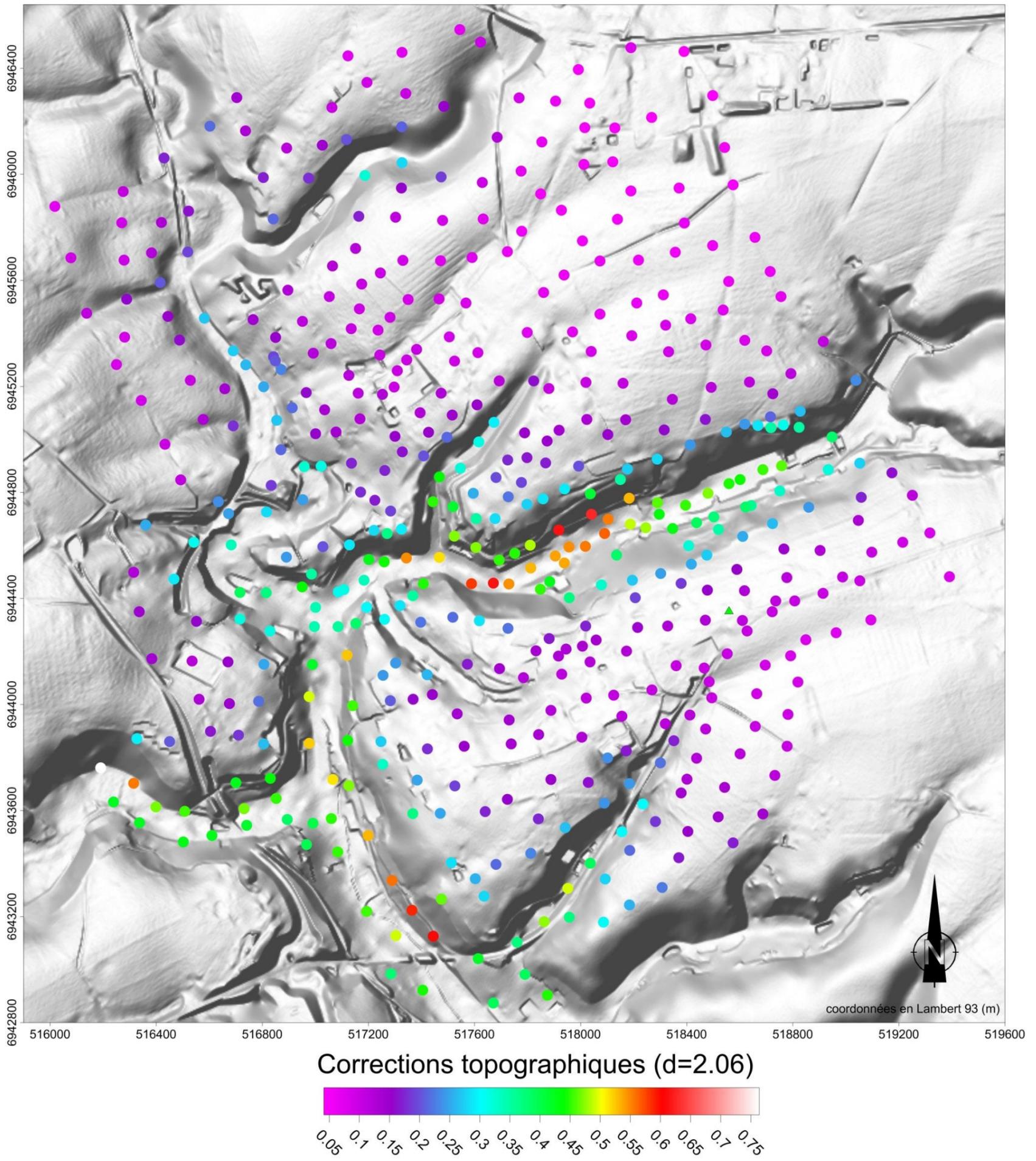


Illustration 34 : Corrections topographiques (mGal) pour une densité 2.06. Fond : MNT IGN RGE Alti à la maille de 5 m.

Choix de la densité de réduction

La densité ρ_B de réduction de l'anomalie de Bouguer est un paramètre important pour l'interprétation de cette anomalie, ainsi que pour celle de l'anomalie résiduelle. Celle-ci doit correspondre au mieux avec la densité des terrains superficiels. En effet, une mauvaise densité de correction génère des anomalies fictives, dues à des sur- ou des sous- corrections de l'effet de la topographie.

- Détermination de la densité par méthodes gravimétriques

Les deux méthodes classiquement utilisées pour déterminer la bonne densité de réduction sont les méthodes de Nettleton (1939) et Parasnis (1952), toutes deux basées sur la recherche de la densité qui permet de décorréler l'anomalie de Bouguer du relief.

Nous utilisons la méthode de Rao et Murty (1973) basée sur la méthode de Parasnis (1952) pour obtenir cette densité. Dans l'équation 1, la densité est la pente d'une fonction affine reliant anomalie à l'air libre et les termes fonction de la densité dans la formule de l'anomalie de Bouguer. En représentant ces deux termes selon un graphique pour chaque mesure gravimétrique, la densité est obtenue par moindres carrés : c'est la pente de la droite passant au mieux par les points (Illustration 35). La densité obtenue par cette méthode est de 2.06.

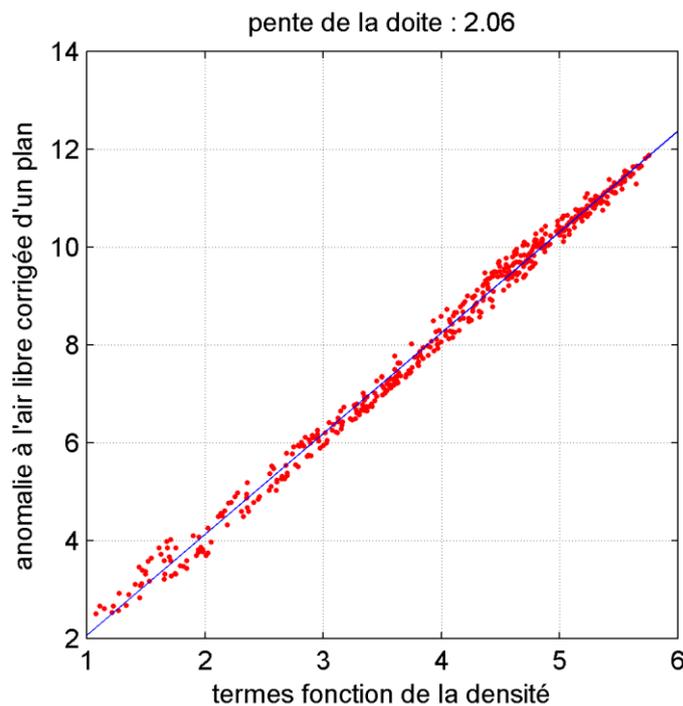


Illustration 35 : Méthode de Parasnis pour trouver la densité optimale de réduction de l'anomalie de Bouguer : l'anomalie à l'air libre corrigée d'un plan est représentée en fonction des termes qui dépendent de la densité dans la formule de l'anomalie de Bouguer, pour chaque mesure. La pente de la droite passant au mieux par ces points (droite bleue) donne la densité

En guise de vérification, nous mettons en œuvre une approche qui s'appuie sur le même principe de décorrélation du relief et de l'anomalie résiduelle. L'anomalie résiduelle est

calculée pour toute densité de réduction entre 1.5 et 2.5 par pas de 0.05, en prenant une anomalie régionale obtenue par prolongement vers le haut de 250 m. Pour chaque densité, la corrélation entre l'anomalie résiduelle et l'altitude des stations est calculée. La densité retenue est celle qui minimise la corrélation entre l'anomalie résiduelle et l'altitude. Ce processus est illustré à l'illustration 36. Une densité de 2.06 minimise la corrélation entre anomalie résiduelle et altitude des stations, à l'échelle de la zone d'étude.

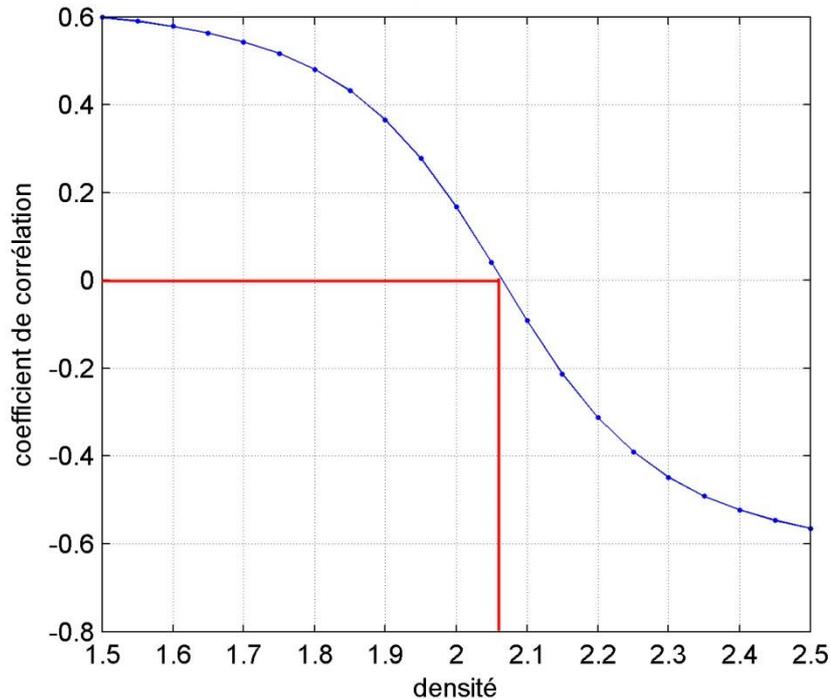


Illustration 36 : Coefficient de corrélation entre l'anomalie résiduelle et l'altitude des stations. Le trait rouge horizontal marque le coefficient de corrélation nul, et le trait rouge vertical la densité associée

Cette corrélation entre la topographie et l'anomalie résiduelle est mise en évidence visuellement à l'illustration 37, où la carte de la topographie est mise en regard de l'anomalie résiduelle pour les densités 1.7 à 2.1, par pas de 0.1.

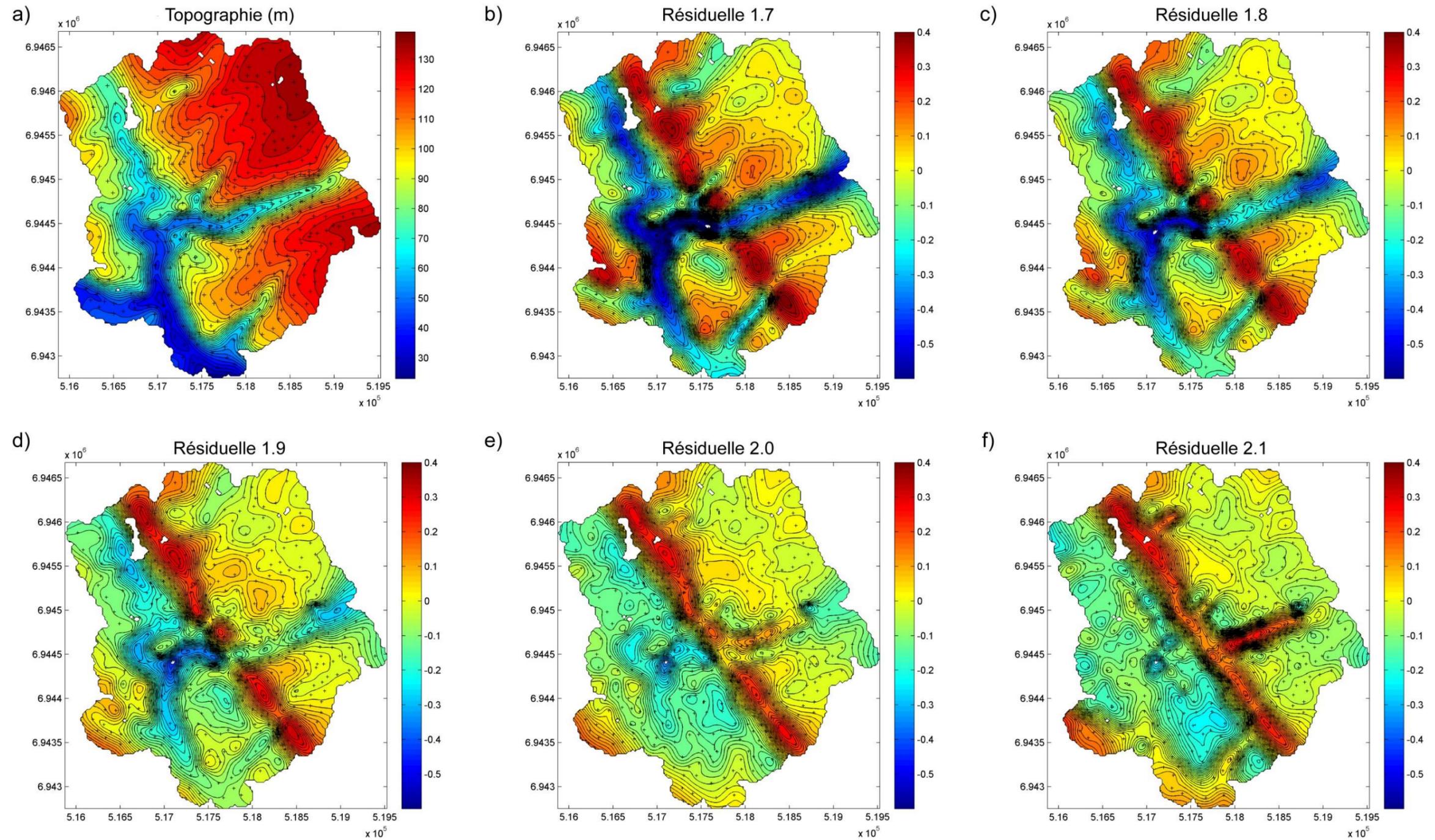


Illustration 37 : a) Topographie interpolée aux stations gravimétriques, b) à f) : anomalie résiduelle (mGal) calculée pour les densités de réduction 1.7 à 2.1

Au droit des vallées, l'anomalie résiduelle est fortement négative pour la densité 1.7 et ces anomalies négatives sont clairement corrélées spatialement avec l'emprise des vallées. Ce signal devient de moins en moins négatif avec une densité croissante, et par la même de moins en moins corrélé avec l'emprise des vallées.

Un axe majeur positif de direction N150° est observé au centre des cartes d'anomalie résiduelle pour toute densité de réduction. Pour les faibles densités de réduction, cet axe est segmenté selon les vallées qui le traversent, car celles-ci sont le siège d'anomalies négatives. Avec l'augmentation de la densité de réduction, cet axe positif devient de plus en plus continu, du fait de la résorption des anomalies négatives dans les vallées. Cet axe est le plus continu pour une densité de 2.1. Pour des densités plus élevées (non-figuré sur l'illustration 37), les parties de cet axe au niveau des vallées ressortent très nettement en positif. A noter qu'un élément de calage pour le choix de la densité de 2.1 utilisée a été la présence d'une cavité souterraine dans le secteur de Bolbec (carrière souterraine située derrière la mairie) qui ressort particulièrement bien en anomalie négative.

La perte de corrélation spatiale entre les anomalies négatives et les vallées s'opère pour des densités différentes entre le secteur à l'Ouest et le secteur à l'Est de l'axe positif. A l'Ouest, la perte de corrélation apparaît entre les densités 2 et 2.1, alors qu'à l'Est, celle-ci s'opère entre 1.9 et 2 (Illustration 37). Les vallées à l'Est de l'axe positif sont le siège d'anomalies positives dès la densité 2.

A partir de cette analyse visuelle, on observe qu'il n'y a pas une densité unique qui minimise la corrélation entre anomalie résiduelle et topographie, à l'échelle de la zone d'étude.

- Mesures de densité sur échantillons dans le forage de Nointôt

La porosité et la masse volumique de 11 échantillons du forage de Nointot (X=516420 m, Y =6946215 m, à la limite NW de la zone d'étude – code BSS 00756X0209) ont été déterminées (Rapport d'Essais N° 16-6-043-A, BRGM). La densité qui importe en gravimétrie est la densité apparente, qui est celle d'un volume de roche incluant la matrice, l'eau et le vide contenus dans les pores. Rappelons la relation entre la densité apparente ρ_{app} , la densité de matrice ρ_{mat} , la porosité ϕ , la saturation S et la densité de l'eau ρ_{eau} :

$$\rho_{app} = (1 - \phi)\rho_{mat} + \phi S \rho_{eau}$$

Dans le contexte hydrogéologique de la zone d'étude, il est plausible que le degré de saturation en eau des pores soit proche de 1, même au-dessus du niveau de la nappe. En effet, les effets de remontée capillaire sont importants en milieu crayeux, et la pluviométrie importante de la zone assure que la zone non-saturée est proche de la saturation. Ainsi, il convient de prendre la densité apparente saturée des formations comme élément d'analyse pour la détermination de la densité de réduction gravimétrique. Celle-ci est comprise entre 1.81 et 2.10 pour 9 des 11 échantillons, avec une moyenne à 2.0 (Tableau 1). Ces faibles densités sont à mettre en relation avec les fortes porosités de ces formations, comprises entre 30 et 43 %.

Les deux formations restantes ont une densité apparente saturée de 2.53 et de 2.61, il s'agit de la craie d'Antifer du Turonien, et de la craie très glauconieuse de la base du

Cénomaniens. Ces fortes densités sont à mettre en relation avec les faibles porosités de ces formations (< 11 %).

Références échantillons - forage de Nointot <i>(interprétation des lithologies réalisé par la CODAH)</i>	Porosité	Densité de matrice	Densité apparente, S=0	Densité apparente, S=0.5	Densité apparente, S=1
Echantillon - profondeur - lithologie - étage	(%)	(g / cm ³)	(g / cm ³)	(g / cm ³)	(g / cm ³)
11 - 42.3 - 42.5 m - Craie altérée d'Etretat - Turonien	42.91	2.68	1.53	1.74	1.96
10 - 57.9 - 58.2 m - Craie de Saint-Nicolas - Turonien	40.00	2.69	1.62	1.81	2.01
9 - 71.8 - 72 m - Craie d'Antifer - Turonien	10.69	2.71	2.42	2.47	2.53
8 - 79.9 - 80.1 m - Craie de Rouen - Cénomanién	40.19	2.68	1.60	1.80	2.00
7 - 104.7 - 105.5 m - Craie très glauconieuse - Base du Cénomanién	5.34	2.70	2.56	2.58	2.61
6 - 85 - 85.5 m - Craie grise glauconieuse - Cénomanién	35.01	2.66	1.73	1.90	2.08
5 - 100.1 - 100.5 m - Craie grise glauconieuse - Cénomanién	33.74	2.62	1.74	1.90	2.07
4 - 119.4 - 119.6 m - Silt glauconieux - Albien	30.76	2.52	1.74	1.90	2.05
3 - 134.1 - 134.5 m - Gaize - Albien	37.08	2.46	1.55	1.73	1.92
2 - 145.9 - 146.3 m - Gaize - Albien	42.27	2.41	1.39	1.60	1.81
1 - 161 - 161.4 m - formation du Gault - Albien	33.21	2.65	1.77	1.94	2.10

Tableau 1 : Données de porosité, de densité de matrice, et de densité apparente pour S =0 (pores remplis d'air), S=0.5 (pores a demi remplis d'eau) et S=1 (pores saturés)

- Densité de réduction retenue

Nous retenons une densité de 2.06 pour calculer l'anomalie de Bouguer. Cette densité est un bon compromis à l'échelle de la zone d'étude, et elle est compatible avec les mesures de densité sur échantillons. De plus, elle pourrait être compatible avec la densité de la Formation résiduelle à silex et des Limons des plateaux, présents en surface sur la grande majorité de la zone d'étude, sur des épaisseurs comprises entre 10 m et 30 m. Ces formations n'ont pas fait l'objet de mesures de densité sur échantillons, et nous n'avons pas pu trouver de données de densité de ces formations dans la littérature.

Les méthodes utilisées pour déterminer la densité sont basées sur l'hypothèse de travail que les anomalies gravimétriques doivent être décorréliées de la topographie. Cette hypothèse peut s'avérer être fautive, par exemple dans le cas de remplissages légers en fond de vallée et de reliefs générés par des structures denses, ou inversement, de fonds de vallées lourds et de hauts topographiques légers.

De plus, la densité déterminée est une densité moyenne pour la zone d'étude. En fonction des densités des formations affleurantes, cette densité moyenne peut s'avérer être localement sur- ou sous-estimée.

Précision de l'anomalie de Bouguer

L'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer est évaluée classiquement comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables entrant dans son calcul, soit :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{gth}^2 + \varepsilon_Z^2 + \varepsilon_{CT}^2} \quad (\text{eq. 2})$$

Le détail de ces erreurs est détaillé ci-après.

- Erreur sur g (ε_g)

Cette erreur est estimée à partir de l'histogramme des écarts sur les stations occupées plusieurs fois au cours des programmes successifs, appelées reprises.

On appelle 'reprise', la mesure de la gravité sur une station qui a déjà fait l'objet d'une mesure dans un programme de mesure antérieur. Une station peut être reprise plus d'une fois. Les écarts entre les valeurs de l'accélération de la pesanteur g compensées (corrigées de la dérive instrumentale et de la hauteur de trépied), issus de ces reprises, donnent la répétabilité de la mesure au sein d'une étude gravimétrique, et sont une bonne indication de la précision de l'étude.

Les reprises peuvent être aléatoires, pour obtenir la précision d'un levé, ou ciblées, pour vérifier une anomalie décelée. L'histogramme des valeurs absolues de ces écarts (Illustration 38) et le pourcentage cumulé associé (courbe rouge) sont généralement utilisés pour définir l'erreur moyenne de l'étude. L'erreur est définie à la valeur à laquelle le pourcentage cumulé atteint 68%, ce qui correspond statistiquement à l'écart-type d'une distribution gaussienne.

Un total de 50 stations a été repris, correspondant à un pourcentage de stations reprises de 10%.

Nous retenons une erreur associée à la mesure de g de 0.009 mGal (Illustration 38).

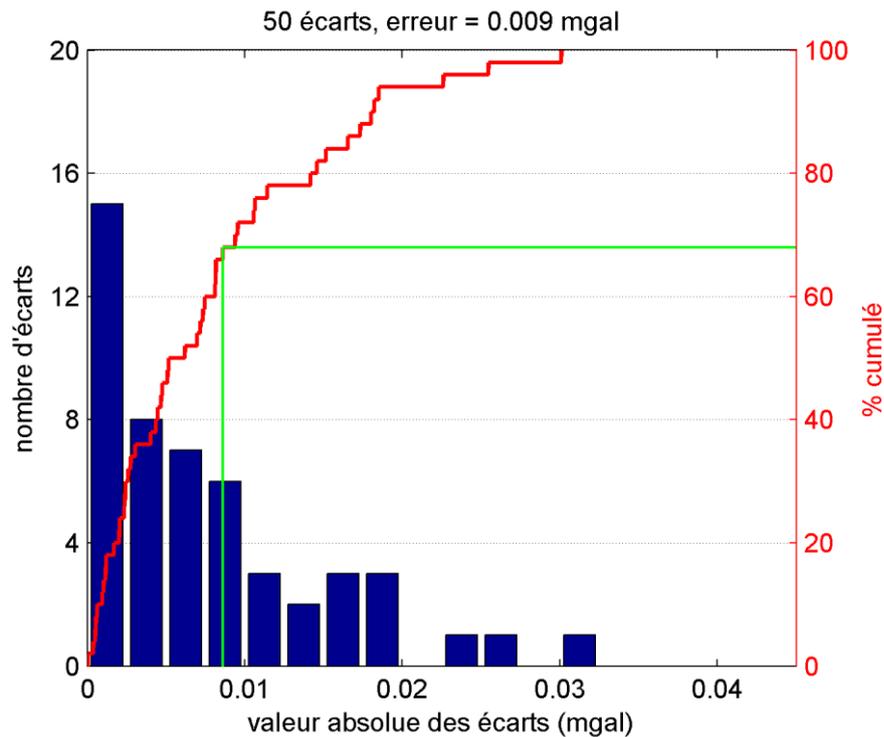


Illustration 38 : Histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé (courbe rouge). Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée

- Erreur sur l'altitude (ε_z)

Les reprises gravimétriques ont été systématiquement associées à des reprises de mesure GPS, sauf pour 3 stations reprises en gravimétrie. Les reprises GPS permettent d'appréhender la précision du positionnement sur la composante verticale. On considère que l'erreur moyenne sur Z est donnée par la valeur à 68 pourcent des écarts cumulés (Illustration 39). Celle-ci est ici de 0.018 cm.

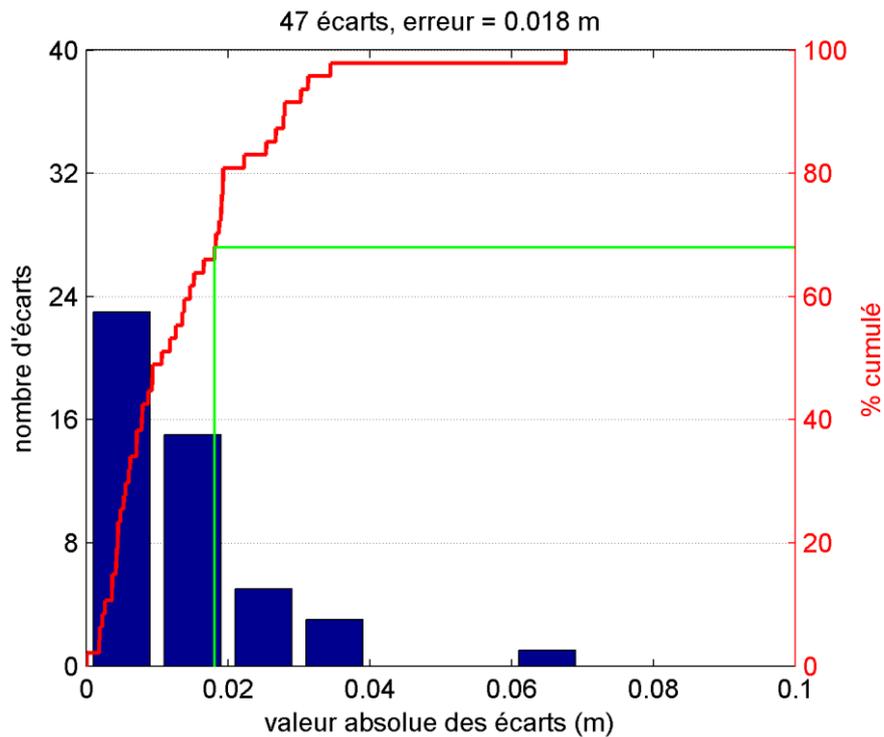


Illustration 39 : Histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée

L'erreur moyenne de 0.018 m correspond à une erreur sur l'anomalie de Bouguer équivalente à 0,004 mGal pour une densité de 2.06.

- Erreur sur g_{th} (ϵ_{gth})

L'erreur sur g_{th} est fonction de l'erreur sur le positionnement en latitude. L'historgramme des écarts de positionnement sur l'axe N-S permet d'estimer cette erreur, à partir des reprises GPS (Illustration 40).

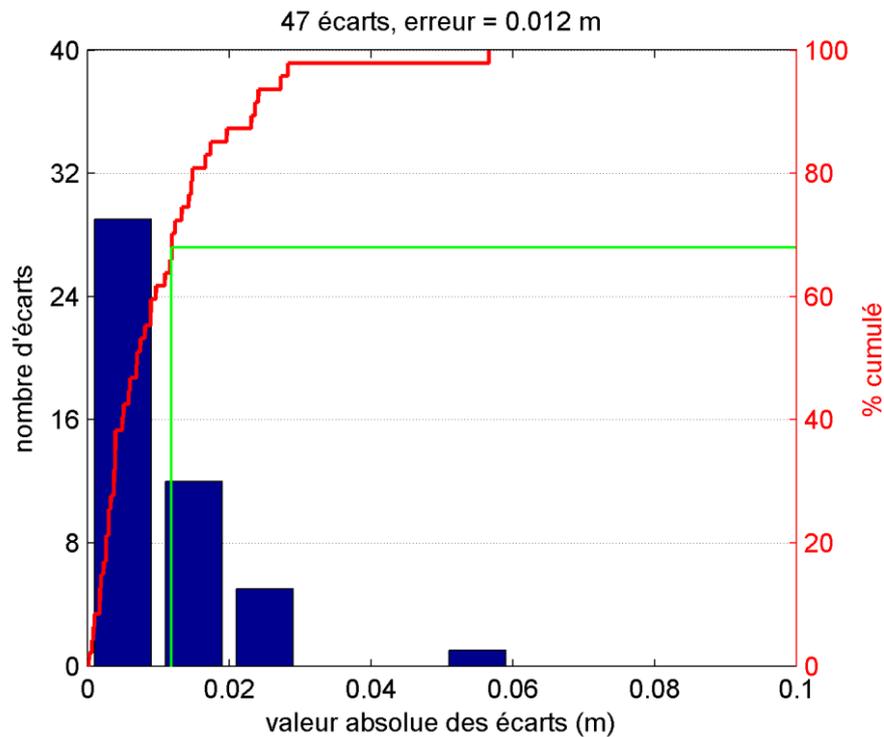


Illustration 40 : Histogramme des reprises du positionnement horizontal en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68% et la valeur de l'erreur associée

L'erreur sur Y est estimée à 0.012 m en moyenne sur l'ensemble de l'étude, ce qui correspond à une erreur négligeable sur g_{th} , inférieure à 0.001 mGal.

- Erreur sur les corrections topographiques (ε_{CT})

L'erreur sur les CT provient :

- de la résolution des MNTs utilisés : les variations de reliefs sont d'autant mieux restituées que le MNT a une maille fine,
- de la précision des MNTs utilisés,
- du positionnement en X,Y,Z des stations gravimétriques,
- de la méthode de calcul de l'effet gravifique des reliefs.

Comme le champ de gravité décroît avec l'inverse de la distance au carré, il est important que le MNT utilisé en champ proche sur la zone 0 - 1000 m soit le plus résolu et le plus précis possible. Au-delà, un MNT moins résolu est généralement utilisé, la perte de résolution et de précision ayant un moindre impact sur la valeur de la CT.

En s'inspirant des travaux de Cattin et al. 2015, nous considérons une erreur sur les CT comme étant linéaire avec l'erreur des MNT utilisés ε_{MNT} , en prenant un facteur d'admittance a de 0.07 mGal/m, défini par Cattin et al. 2015, selon la formule :

$$\varepsilon_{CT} = a\varepsilon_{MNT} \quad (\text{eq. 3})$$

La différence d'altitude entre les stations gravimétriques et leur altitude interpolée linéairement sur le MNT à 5 m est de -0.18 m +/- 0.48 m (Illustration 41). Nous considérons que l'écart-type de

0.48 m est caractéristique de l'erreur sur ce MNT, car l'erreur sur les positions GPS est d'un ordre de grandeur inférieur (voir paragraphe précédent). Le biais observé de 0.18 m n'induit pas d'erreur sur les CT car pour le calcul de celles-ci, le Z pris est celui correspondant au Z du MNT.

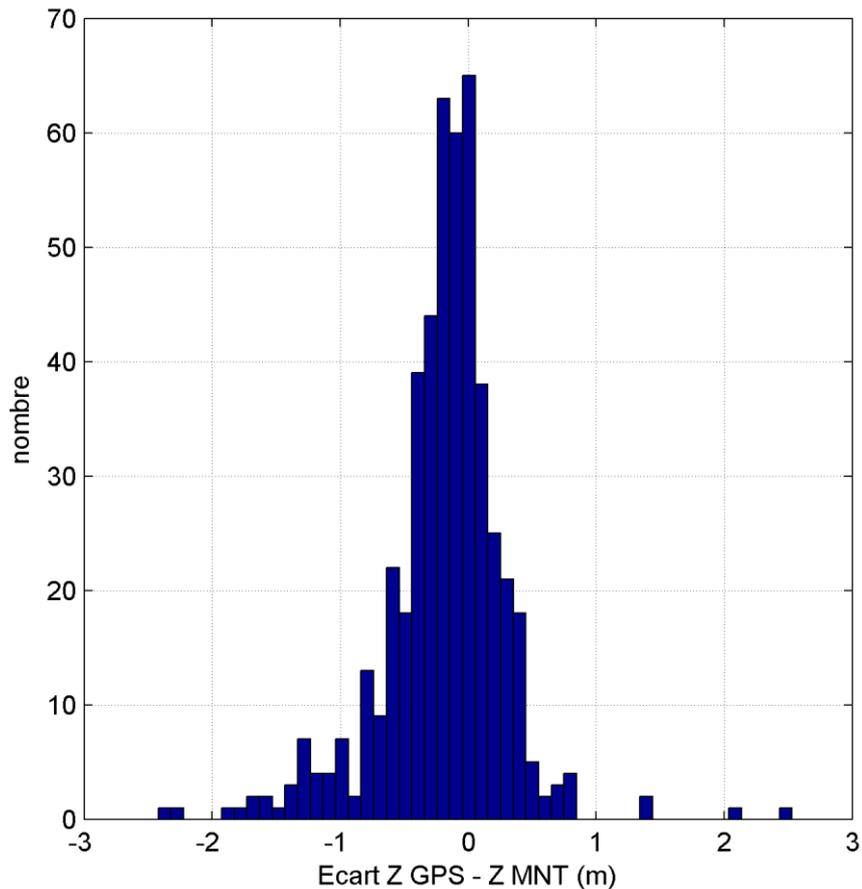


Illustration 41 : Histogramme des écarts entre les altitudes GPS des stations et celles projetées sur le MNT à 5 m

L'erreur sur le MNT à 25 m n'influe que peu sur l'erreur totale du fait de sa distance aux points de mesures : le MNT à 5 m est utilisé sur les 1000 m autour des stations, et c'est donc ses erreurs qui auront la plus grande influence. En effet, en considérant une erreur systématique constante sur une topographie plane, plus de 99% de son effet gravifique provient des premiers 1000 m autour des stations. Ceci est la conséquence de la décroissance avec l'inverse de la distance au carré du champ gravifique.

Ainsi, nous considérons l'erreur sur les CT comme égale à 0.034 mgal, d'après l'équation 3.

- Erreur totale sur l'anomalie de Bouguer (ϵ_{AB})

L'erreur sur l'anomalie de Bouguer est calculée selon l'équation (2), et est estimée à 0.035 mGal.

On note que l'erreur sur l'anomalie de Bouguer est dominée par l'erreur sur les effets des corrections topographiques.

- Seuil de signification

On définit le seuil de signification de l'étude comme étant deux fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer de l'étude, soit 0.070 mGal.

Un niveau de confiance supérieur à 95% est à accorder aux anomalies dont l'amplitude est supérieure à 0.070 mGal.

2.3.2. Résultats

Anomalie de Bouguer, anomalie régionale, et anomalie résiduelle

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique : ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de matériaux denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses.

L'anomalie de Bouguer est présentée sur l'illustration 42. La méthode d'interpolation utilisée est l'interpolation 'bicubic', implémentée dans le code RegularizeData3D.m (Jamal, 2014), basé sur le code Gridfit.m (D'Errico, 2005). Le paramètre de 'smoothness' utilisé est $5 \cdot 10^{-5}$.

La carte présente une dynamique de 2.6 mGal et est marquée par des valeurs élevées au Sud, qui décroissent régulièrement selon un gradient de direction N-S. Les isanomaes sont nettement perturbées par une anomalie positive majeure de direction N150°, bien visible sur l'anomalie de Bouguer.

Le gradient observé à l'échelle de la carte est à mettre en relation avec la structure géologique profonde. Ce signal n'est pas l'objet de cette étude et doit être corrigé pour obtenir une anomalie résiduelle rendant compte de la répartition de densités dans la centaine de premiers m sous la surface. Pour cela, une anomalie régionale doit être judicieusement choisie.

L'anomalie régionale est obtenue par une opération fréquentielle de prolongement vers le haut de 250 m de l'anomalie de Bouguer, et est présentée sur l'illustration 43. Cette opération est effectuée dans le domaine de Fourier, et calcule le champ qui aurait été mesuré si la mesure avait été faite à 250 m de hauteur, ce qui a pour effet d'atténuer les plus courtes longueurs d'onde. Le prolongement vers le haut d'une hauteur $2z$ rendrait compte des effets des structures situées à une profondeur plus importante que z (Jacobsen, 1987). Ainsi, l'anomalie régionale obtenue rend compte des structures situées à plus de 125 m de profondeur, et les grandes longueurs d'ondes présentes dans l'anomalie de Bouguer sont ainsi bien restituées.

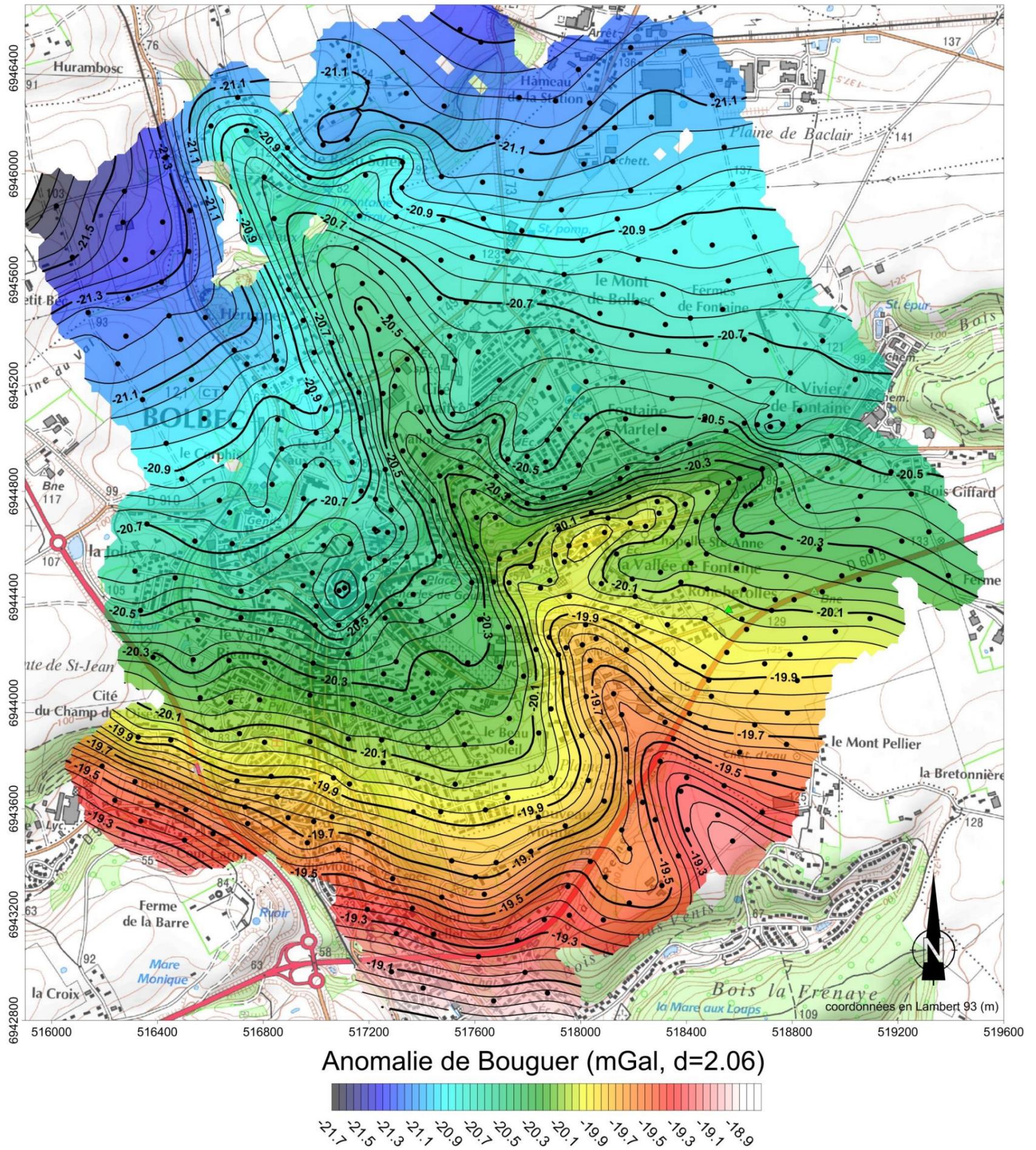


Illustration 42 : Anomalie de Bouguer pour une densité de 2.06 (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les 0.05 mGal

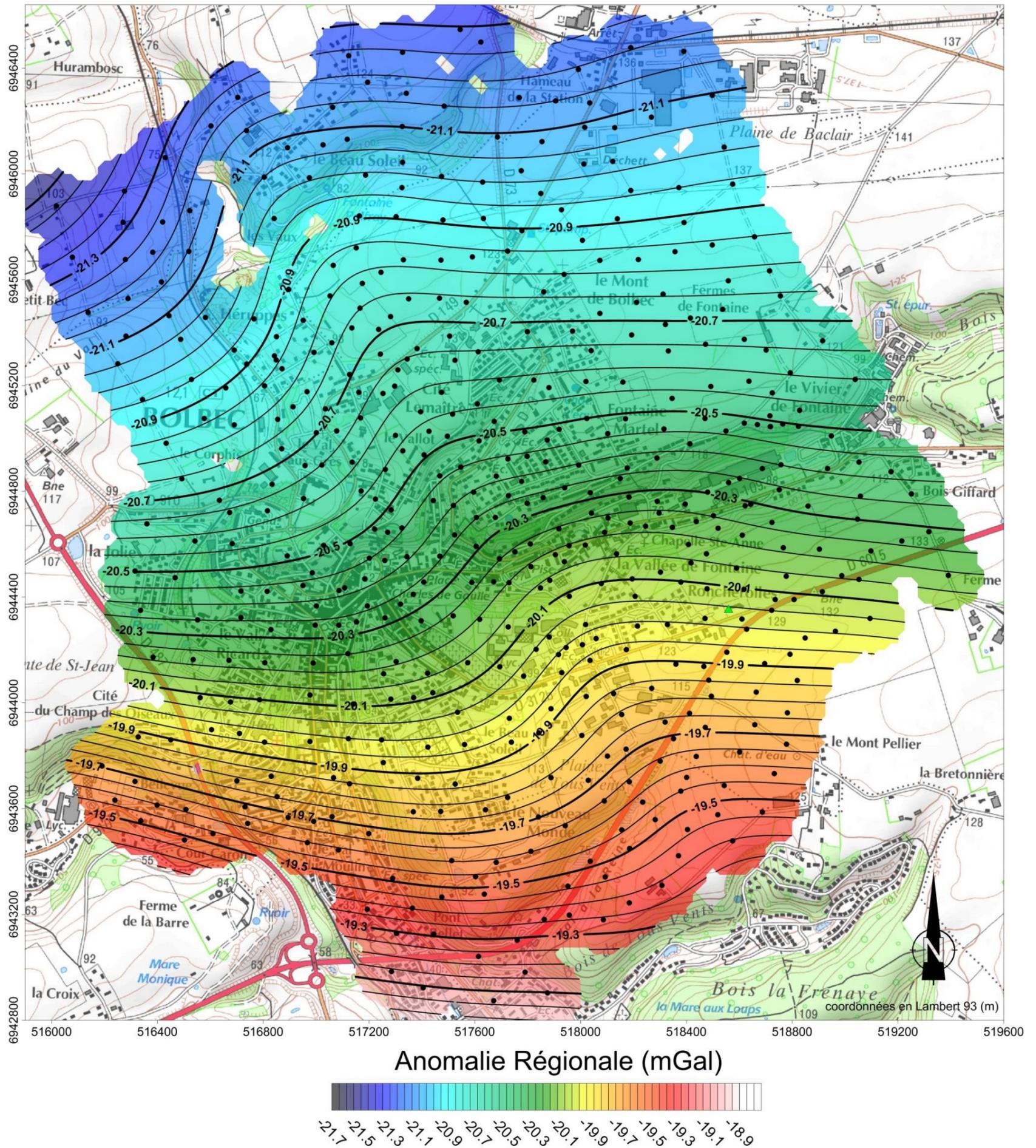
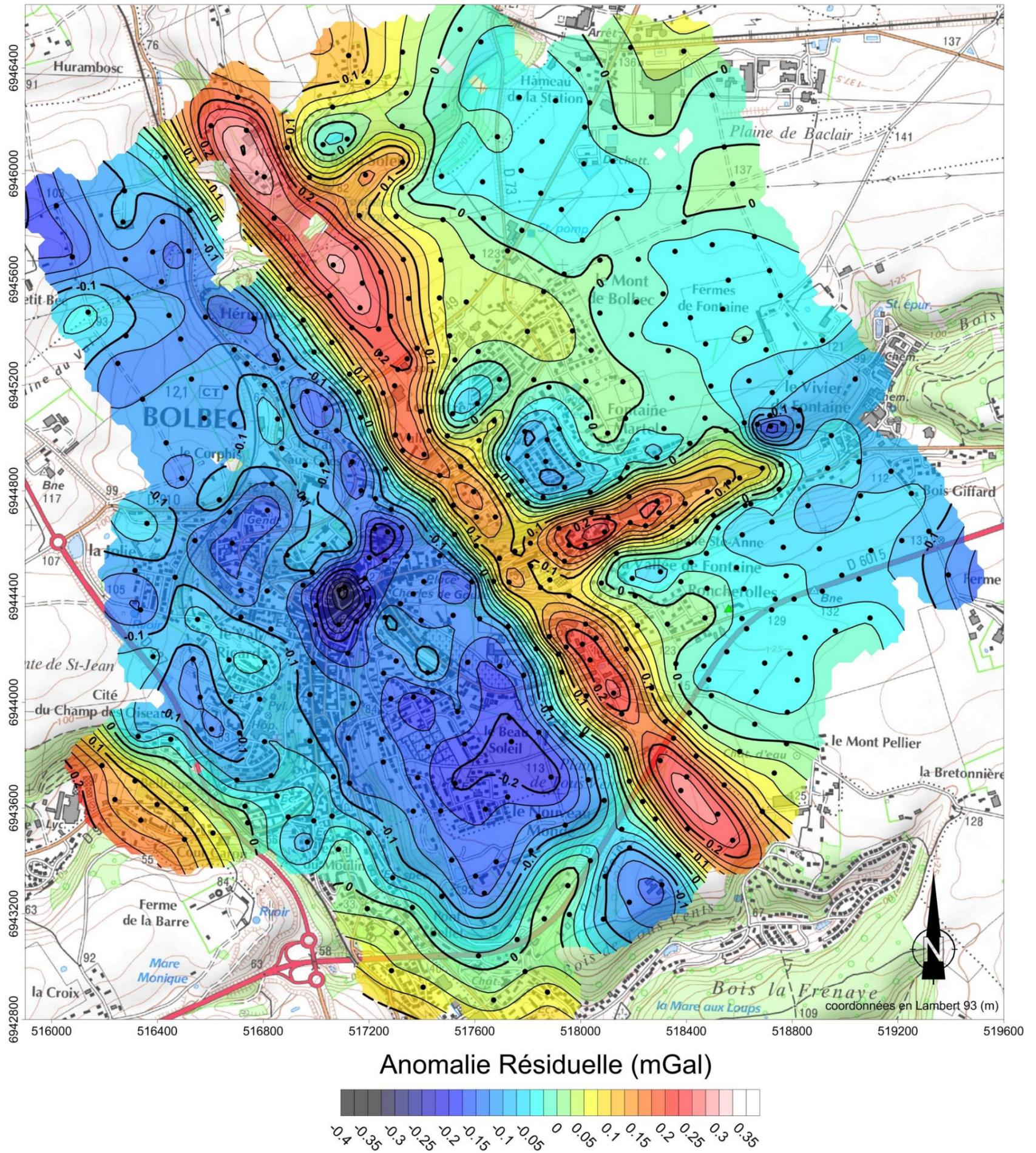


Illustration 43 : Anomalie régionale obtenue par prolongement vers le haut de 250 m de l'anomalie de Bouguer



L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer, et fait ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité comprises entre la surface et une profondeur au moins égale à 125 m, objet de cette étude. Elle est présentée en Illustration 44.

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 0.610 mgal, variant de -0.310 mgal à 0.300 mGal. L'anomalie résiduelle (Illustration 44) met en exergue les anomalies observées sur l'anomalie de Bouguer, et permet d'en faire ressortir les plus fines.

L'anomalie dominante de la carte est une anomalie positive de direction N150°, traversant l'ensemble de la zone d'étude. Celle-ci peut atteindre 0.3 mGal d'amplitude. Les anomalies sont définies et analysées dans le paragraphe suivant.

Analyse structurale de l'anomalie résiduelle

Pour améliorer la détection des discontinuités gravimétriques permettant de cartographier les bordures d'éventuelles structures et pour procéder à une analyse structurale fine, il est possible d'appliquer des opérateurs dits 'focalisant' à l'anomalie résiduelle. Nous appliquons deux opérateurs à l'anomalie résiduelle (Illustration 45) :

- la dérivée seconde verticale, (*Cooper & Cowan*, 2006), son iso-contour nul est utilisé pour cartographier les discontinuités. L'anomalie résiduelle est préalablement prolongée vers le haut de 50 m pour atténuer le bruit haute-fréquence,
- le module du gradient horizontal, qui s'apparente à la valeur de la pente si l'anomalie résiduelle était une carte topographique. Les zones de fortes valeurs du module du gradient horizontal correspondent à la localisation des discontinuités gravimétriques (*Blakely & Simpsons*, 1986).

A partir de cette analyse, et en conjonction avec l'étude de l'anomalie résiduelle, nous définissons les principaux axes positifs, dits lourds, et négatifs, dits légers (Illustration 46). Il en ressort que les axes sont alignés selon les deux orientations régionales, à savoir *armoricaine* (N140° à N150° : faille de Fécamp-Lillebonne, accident du Bray, faille de la Seine etc.) et *varisque* (N045° à N070° : structure de Notre-Dame-de-Gravenchon – Triquerville - Villequier) :

- la direction N140° à N150° (*armoricaine*) : il s'agit notamment de l'axe positif P2 correspondant à l'anomalie positive majeure de la carte d'anomalie résiduelle, alignée presque « parfaitement » le long de la faille de Fécamp-Lillebonne telle qu'elle est dessinée sur la carte géologique au 1/50.000 (il est intéressant de souligner que cette anomalie positive se retrouve aussi bien en vallée que sous les plateaux). Notons également les axes positifs P3 et P7 de plus faibles amplitudes, et les axes négatifs N1 et N4, situés à l'ouest de la faille ;
- la direction N045° à N070° (*varisque*) : il s'agit des axes positifs P4, P5 et P6 qui viennent buter contre l'axe P2 (anomalies positives uniquement cantonnées dans les vallées orthogonales à l'axe P2 (vallon de Bolbec, vallon de la Fontaine Palfray), ainsi que les axes négatifs N2 et N3 situés de part et d'autre de l'axe positif P4, de chaque côté du vallon de Bolbec

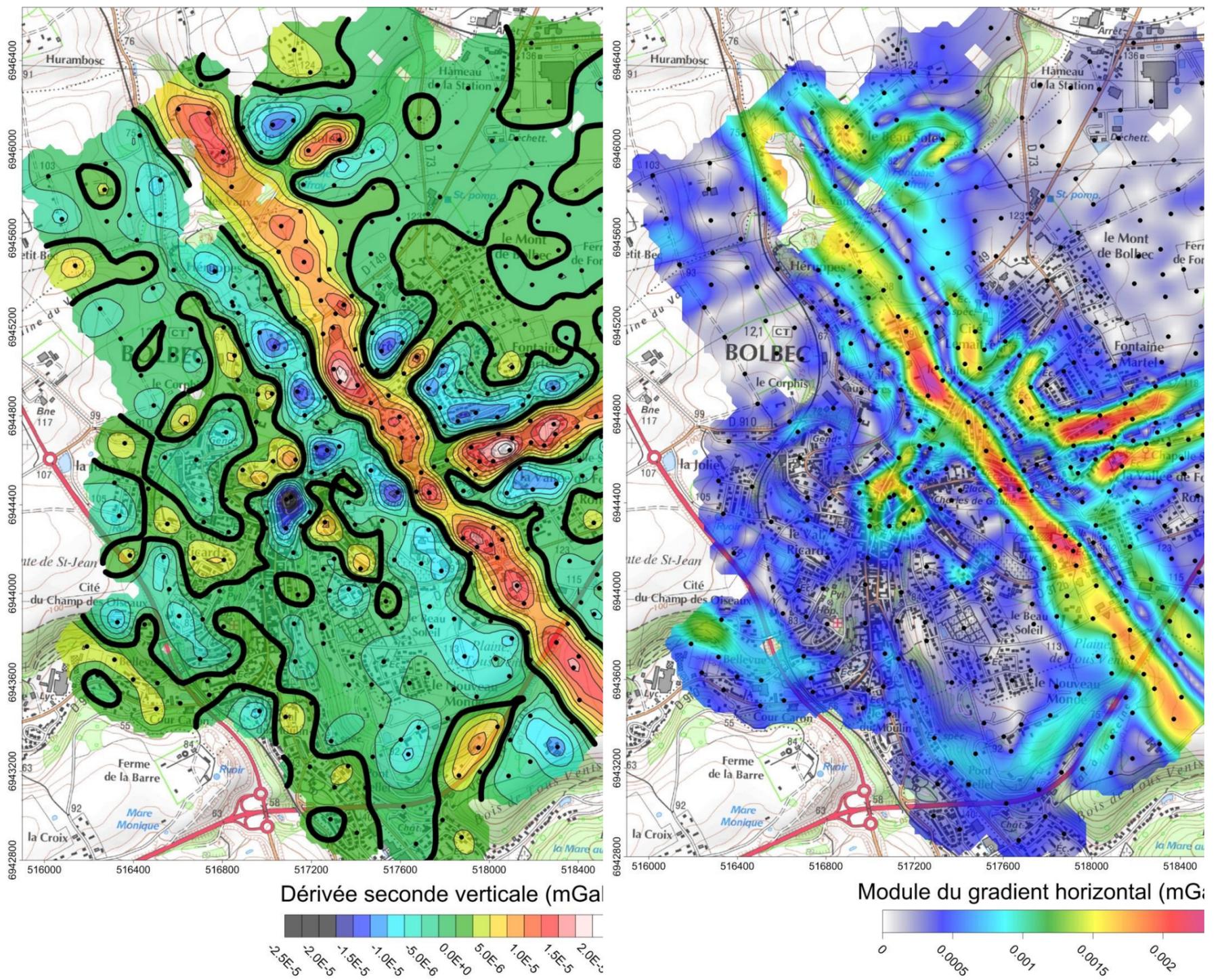


Illustration 45 : Gauche : dérivée seconde verticale de l'anomalie de Bouguer pour une densité de réduction de 2.06, droite : module du gradient horizontal

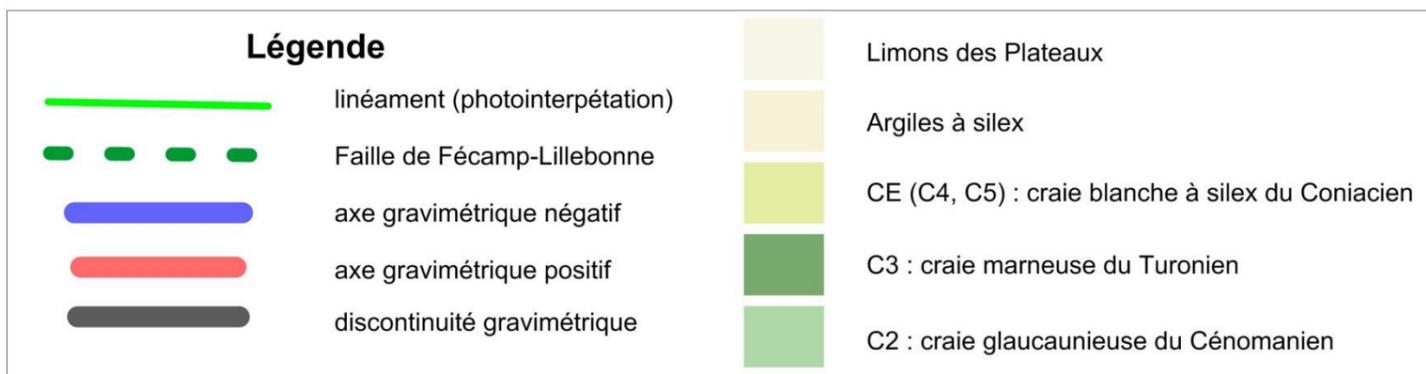
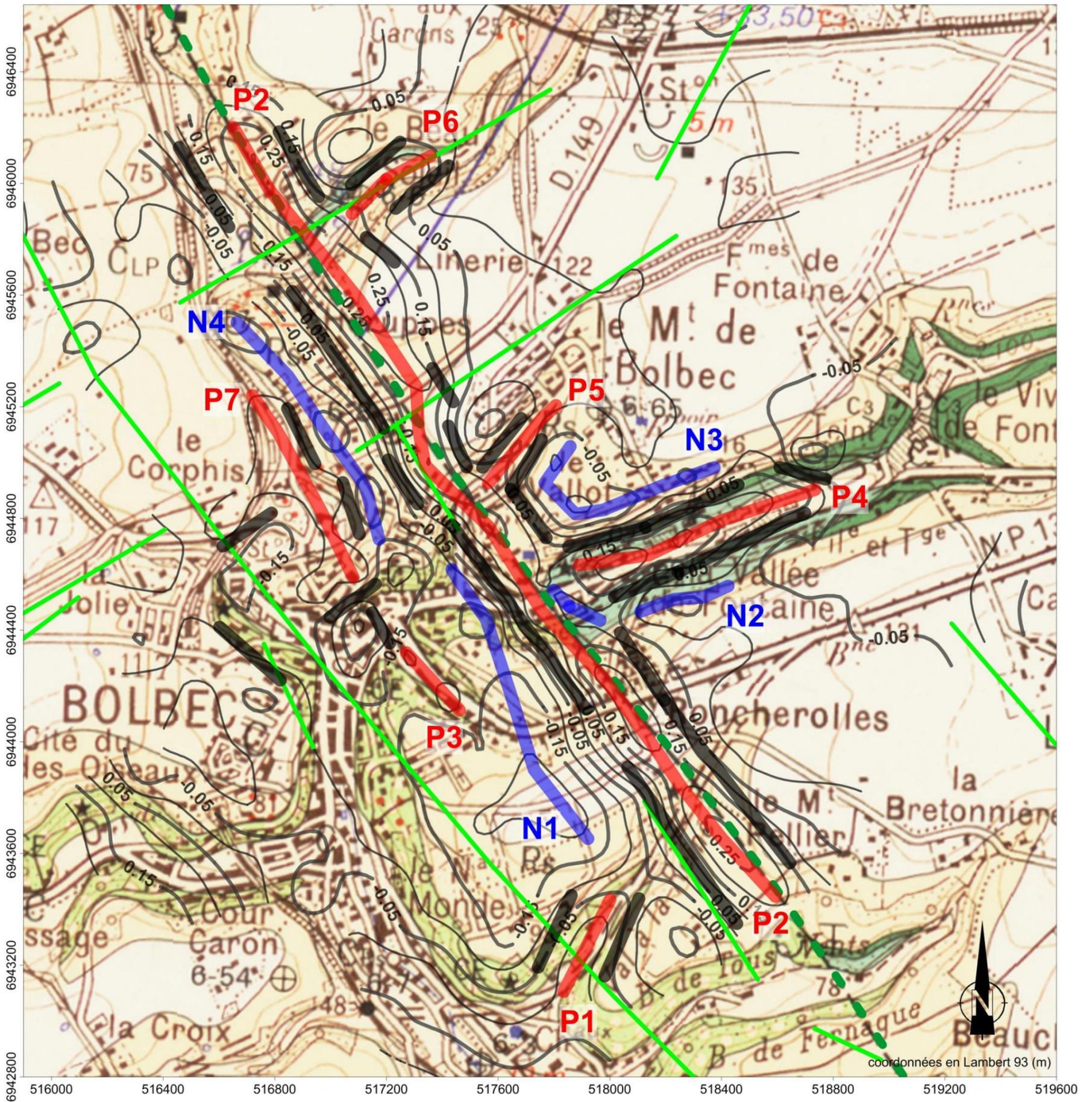


Illustration 46 : Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques (lignes noires parallèles aux axes), et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (tirets rouges) de P1 à P7, les axes négatifs (tirets bleus) de N1 à N4

Nous confrontons maintenant l'analyse structurale gravimétrique avec la carte géologique (Illustration 46), et des observations de linéaments par photo-interprétation. Les connaissances géologiques sur la zone qui peuvent être utilisées pour interpréter les observations gravimétriques sont les suivantes :

- L'axe lourd P2 correspond bien à la trace de la faille de Fécamp-Lillebonne, telle que définie sur la carte géologique à 1/50.000 (feuille Bolbec) ;
- Les discontinuités de part et d'autre de l'axe P2 correspondent pour certaines à des linéaments décelés par photo-interprétation ;
- Le décalage dextre observé sur l'axe P2 et sur ses discontinuités associées (position X= 517.3 km et Y = 6945.1 km) semblent coïncider avec un linéament de direction N070° décelé par photo-interprétation ;
- Les axes lourds P4, P5 et P6 correspondent à l'affleurement d'après la carte géologique de la craie glauconieuse du Cénomanién inférieur (notée c2), dont la densité a été mesurée en laboratoire (Tableau 1), donnant des densités plus élevées que les formations proches. D'après les données de sondage, ces formations sont sus-jacentes à la formation sableuse très glauconieuse des « Sables de Lillebonne », rencontrés par exemple en fond de la vallée de Bolbec sur une épaisseur d'une vingtaine de mètres. Il est plausible que ces anomalies positives soient à mettre en relation avec la densité plus élevée de ces formations glauconieuses. Néanmoins, nous nous trouvons dans le cas où un fond de vallée serait occupé par une formation dense, et où il y aurait anti-corrélation entre l'anomalie résiduelle et la topographie. L'inspection de l'illustration 37 montre que l'anomalie résiduelle au niveau des vallées où siègent P4, P5 et P6 est fortement influencée par la densité de correction : celle-ci passe de valeurs négatives à positives avec l'augmentation de la densité. Il subsiste donc une incertitude quant à la réalité des anomalies positives dans ces vallées. En effet, celles-ci pourraient être générées par la densité de réduction trop élevée, ou par les formations denses en fond de vallée, en admettant que la densité de réduction soit la bonne. Cette seconde hypothèse reste néanmoins à privilégier compte tenu des résultats obtenus dans la vallée du Commerce, à l'aval de la faille, au niveau de laquelle les formations plus denses glauconieuses de la base du Cénomanién et de l'Albien ne sont pas présentes en sub-surface ;

Nous énumérons ci-après les observations gravimétriques dont on ne pouvait supposer l'existence à partir des données géologiques en surface :

- Les axes négatifs décelés ne correspondent à aucune manifestation géologique connue en surface ;
- Des anomalies négatives ponctuelles de forte amplitude sont situées au centre de Bolbec, leur origine est probablement liée à la présence de vastes carrières souterraines dans ce secteur ;
- Les axes positifs P1 et P3 pourraient être liés soit à des formations plus denses, ou à un effet lié à la densité de réduction.

2.3.3. Interprétation et discussion

Interprétations

Une ébauche d'interprétation peut être effectuée, par anomalie, au regard des données géologiques et structurales disponibles en bibliographie.

- Anomalie P2 : compte tenu de son orientation N150° et de sa géométrie, cette anomalie positive majeure est clairement liée à la structure de Fécamp-Lillebonne. Quelle que soit la densité de réduction choisie, cette anomalie positive ressort sans ambiguïté. D'un point de vue géologique, cette anomalie positive traduit la présence de matériaux denses dans le sous-sol, très probablement argileux et/ou glauconieux (densité de la glauconie : 2,4 à 2,9). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la réponse gravimétrique de la structure de Fécamp-Lillebonne :
 - Une argilisation massive de la zone faillée, induite par l'altération des craies liée à des circulations d'eau favorisées par les failles ou par la bréchification mécanique des formations crayeuses. Pour information, des argilisations et des circulations d'eau sont fréquemment rencontrées au niveau des fractures de la craie, même sans déplacement (cf. observations réalisées dans l'ancienne carrière de la mairie de Bolbec chapitre 1) ;
 - La présence de méga-karsts calés sur la structure de Fécamp-Lillebonne, partiellement ou totalement remplis de matériaux argilo-sableux plus denses (formations résiduelles à silex, formations tertiaires). Concernant cette hypothèse, il est intéressant de constater que l'anomalie positive la plus forte, située au nord de l'anomalie P2, au niveau du lieu-dit « le Beau Soleil » (limite nord-ouest de la carte gravimétrique), est associée à une dépression topographique endoréique (sous le point-côté 112 de la carte IGN-Scan25 – bétoire n°5852 de l'inventaire régional²) dans laquelle s'infiltrent les eaux superficielles. Cette dépression a fait l'objet d'un traçage qui s'est avéré positif : les traceurs ont été retrouvés au captage d'Yport. Pour rappel, une structure endoréique de ce type est connue au large de Fécamp (cf. 1.1.1) et, point intéressant, cette structure juxtapose le tracé de la structure de Fécamp-Lillebonne. La similarité entre ces deux structures, en termes de géométrie et de relation avec la structure de Fécamp-Lillebonne est frappante. La présence de larges dolines d'engouffrement à proximité de la structure de Fécamp-Lillebonne témoigne donc de l'intense activité karstique dans la zone faillée, et le signal gravimétrique indique potentiellement la présence de matériaux plus denses dans ce secteur karstifié. Cette hypothèse semble donc particulièrement pertinente ;
 - La présence d'un axe anticlinal sur la bordure Est de l'accident de Fécamp-Lillebonne qui fait remonter en proche sous-sol les formations sablo-argileuses ou argilo-sableuses détritiques riches en glauconie de la base du Cénomaniens (faciès glauconieux) et du Crétacé inférieur, qui sont plus denses que les formations crayeuses. Pour rappel, les profils sismiques haute-résolution réalisés en mer au large de Fécamp ont bien mis en évidence cette structure anticlinale, qui par ailleurs est mentionnée sur terre et dans le secteur d'étude par différents auteurs (cf. chapitre 1). Notons que l'anomalie positive est aussi bien marquée sur les

² Inventaire régional du karst de Haute-Normandie - <http://sigessn.brgm.fr/>

plateaux qu'en vallée, ce qui exclut l'hypothèse d'un signal lié à un remplissage alluvionnaire par exemple ;

- La bréchification de la craie située dans la zone faillée accompagnée d'une recimentation par des matériaux plus denses (calcite ?) ;
- La conservation de matériaux post-crétacés essentiellement sableux et plus denses (Sables grésifiés, blocs de grès), à la faveur d'une structure synforme (structure en graben ou synclinal ?) ;
- Un sur-épaississement de la Formation Résiduelle à silex aux abords de la structure ;

Il n'est évidemment pas exclu que l'origine de l'anomalie positive P2 soit liée à une combinaison de ces différentes hypothèses. La réalisation d'un sondage de reconnaissance géologique dans cette anomalie positive a permis d'apporter des éléments de réponses concernant ces hypothèses (cf. chapitre 4).

Dans tous les cas, la bordure ouest de cette anomalie est franche et vient buter sur une anomalie négative, ce qui traduit un passage brutal entre deux ensembles de lithologies très différentes : des faciès denses argilo-sableux et glauconieux à l'est et des faciès moins denses crayeux à l'ouest. Le rejet et les contacts anormaux induits par la structure de Fécamp-Lillebonne sont donc clairement mis en évidence par la gravimétrie.

- Anomalies P4, P5 et P6 : ces anomalies sont orientées globalement N050°, soit à peu près perpendiculaires au tracé de la structure de Fécamp-Lillebonne. Elles viennent toutes les trois buter contre l'anomalie positive P2 qui longe la structure. Contrairement à l'anomalie P2, les anomalies positives P4, P5 et P6 ne sont localisées qu'en vallées à l'est de la faille, où les formations glauconieuses du Cénomanién inférieur, sableuses de (Sables de Lillebonne) et argilo-sableuses et glauconieuse du Crétacé inférieur sont situées à faible profondeur (Gault signalé à 24 m de profondeur dans le sondage BSS 00756X0006, en aval du vallon de la Fontaine Palfray). L'hypothèse d'un signal positif lié à la présence de ces faciès plus denses que la craie est mise en avant. Toutefois, il n'est pas non plus exclu que la fracturation de la craie et l'argilisation associée influe également sur l'anomalie résiduelle. En effet, les vallées et vallons creusés dans la craie sont des secteurs plus fracturés que les plateaux, et donc des secteurs où les circulations d'eaux souterraines (et donc les processus d'argilisation) sont davantage développées que sur les plateaux. A ce stade des investigations, l'influence de l'un ou de l'autre de ces facteurs sur l'anomalie gravimétrique est difficilement appréhendable. Enfin, compte tenu du fait que les 3 anomalies positives viennent buter contre l'anomalie P2, l'hypothèse d'un signal positif lié à un remplissage alluvionnaire des vallées est exclue puisque dans ce cas, le signal positif aurait été enregistré en aval de la faille, notamment dans la vallée vers Bolbec, ce qui n'est clairement pas le cas ;
- Anomalie N4 : cette succession d'anomalies négatives en « chapelet » suit clairement une orientation N150°, parallèle à la structure de Fécamp-Lillebonne. D'un point de vue géologique, cette anomalie négative traduit un déficit de masse qui peut s'expliquer par la présence de faciès moins denses, comme les craies blanches et tendres du Sénonien inférieur (Coniacien notamment). La structure en chapelet est peut-être liée à la présence d'une succession de petites failles de faibles rejets, orthogonales à la structure de Fécamp-Lillebonne, qui découpe les craies en blocs. Ces petites structures cassantes sont notamment supposées d'après le profil électrique n°2 (cf. partie électrique). L'une de ces structures identifiée par l'électrique (probablement F13 - Illustration 48) est également

indirectement supposée par la gravimétrie puisqu'elle semble induire un décalage décrochant dextre des discontinuités gravimétriques et de l'axe positif de l'anomalie P2 (cf. mise en parallèle des interprétations). Cet axe semble également correspondre à un linéament identifié par photo-interprétation ;

- Anomalies négatives sous Bolbec : cette importante anomalie négative est centrée sur la ville de Bolbec. Son origine n'est pas déterminée avec précision à ce stade des investigations, mais il s'agit probablement d'un signal lié à la présence d'une craie plus altérée, moins dense que la craie saine et compacte. Plus au nord, derrière la mairie, la seconde anomalie négative est probablement liée à la présence d'une vaste carrière souterraine ;
- Anomalie négative circulaire au nord du site ORIL : cette anomalie négative est bien individualisée au nord du site industriel ORIL, ce qui traduit un déficit de masse en sous-sol, qui d'un point de vue géologique peut s'expliquer par la présence de matériaux moins denses, ou par la présence de vides. Le profil électrique n°1 passe au droit de cette anomalie, mais son interprétation ne permet pas d'identifier clairement une origine « géologique » de cette anomalie. D'après une information orale transmise par M. Ragot, qui a effectué sa thèse dans ce secteur à la fin des années 1980, la position de l'anomalie négative coïncide avec l'emplacement d'une ancienne décharge à ciel ouvert, ce qui pourrait expliquer le signal gravimétrique. D'autre part, un groupement de cavités souterraines est identifié dans ce secteur dans la Base Nationale des Cavités Souterraines du BRGM (indice HNOAA0006907 et documents de la DDE). Cette anomalie pourrait donc s'expliquer soit par la présence d'une décharge à ciel ouvert (qui n'est actuellement plus visible), soit par la présence d'un groupement de marnières, soit par une combinaison de ces deux informations.

Limites de la gravimétrie

Cette étude montre les limites de la gravimétrie, notamment en ce qui concerne le choix de la 'bonne' densité de réduction. Il est vraisemblable qu'il n'existe en effet pas d'unique 'bonne' densité de réduction à l'échelle de la carte. La détermination de la 'bonne' densité de réduction est peu aisée, les éléments suivants contribuent à ce constat :

- Le contraste de densité pourrait être important entre la Formation résiduelle à silex / Limons des Plateaux et la craie sous-jacente, et ces deux formations affleurent sur la zone d'étude. Ainsi, au moins deux densités sont présentes à l'échelle de la carte. De plus, la présence de terrains de densité a priori différentes sur la partie Est et Ouest de la faille de Fécamp-Lillebonne semble avérée ;
- Le relief présente une forte rugosité sur la zone d'étude avec des vallées profondes incisant les plateaux, menant à des corrections topographiques localement importantes (voir Illustration 34). En conséquence, de faibles variations dans la densité de réduction mènent à des fortes variations sur l'anomalie de Bouguer (Illustration 37), à cause de variations importantes des corrections topographiques.

Pour toutes ces raisons, un doute subsiste concernant la densité de réduction utilisée dans cette étude, et l'interprétation des anomalies décelées.

Néanmoins, la densité de réduction choisie est dans la même gamme que celle des échantillons dans le forage de Nointot (Tableau 1) et a été également calée par plusieurs approches (à partir du signal lié à la présence de 2 cavités connues dans le secteur de Bolbec (ou une cavité et une

ancienne décharge, de la différence du signal gravimétrique entre les vallées situées en « amont » et en « aval » de la faille).

2.4. INVESTIGATIONS ELECTRIQUES

2.4.1. Mode opératoire

Matériel

Les acquisitions électriques ont été réalisées à l'aide d'un SYSCAL-Pro (Iris Instrument, France) relié à 12 flûtes de 8 électrodes, pour un total de 96 électrodes métalliques implantées au sol, avec un espacement inter-électrodes de 10 m (longueur totale d'un linéaire 950 m). L'énergie nécessaire au fonctionnement de l'appareil était fournie par une batterie externe. L'espacement inter-électrode de 10 m a été sélectionné afin d'assurer une bonne résolution sur les terrains de subsurface ainsi qu'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m. L'équipement utilisé comprend :

- 1 Syscal Pro (convertisseur interne DC/DC de 250 W) ;
- 12 flûtes de 8 traces ;
- 96 électrodes ;
- 96 cordons ;
- 3 massettes ;
- 2 claies de portages ;
- 3 batteries de voiture 70 Ah ;
- 10 connecteurs de flûtes ;
- 1 GPS différentiel Trimble GEOXH6000 ;
- 2 véhicules.

Acquisition des données

9 profils électriques ont été réalisés, d'une longueur variant de 390 m à 2870 m (Tableau 2). La réalisation des profils d'une longueur supérieure à 950 m (longueur totale d'un profil complet) s'est faite grâce à des *roll-along* de 400 m. Cette technique consiste à augmenter l'étendue horizontale de la zone d'investigation, en déplaçant une portion du matériel déjà en place, tout en optimisant les séquences d'acquisitions. Le linéaire total réalisé sur le secteur de Bolbec est de 12,630 km.

Le positionnement planimétrique (X, Y) et altimétrique (Z) des profils électriques a été réalisé avec un GPS différentiel (GEOXH6000). Les mesures GPS ont été post-traitées quotidiennement grâce aux données de la station permanente de Goderville (CTZ2) située à environ 12 km de la zone d'étude. La précision X, Y et Z est de l'ordre de quelques décimètres.

Nom du profil	Date d'acquisition	Longueur (m)	Nombre de mesures conservées (%)	
			Dipôle-Dipôle (DD)	Wenner-Schlumberger (WS)
Profil 1	16 au 19 /11/2016 23/11/2016	2870	10862 (82%)	8543 (93%)
Profil 2	10-11/11/2016	2150	8582 (93%)	5830 (97%)
Profil 3	21-22/11/2016	1350	4189 (88%)	3742 (98%)
Profil 4	08-09/11/2016	2070	8069 (90%)	4829 (96%)
Profil 5	24-25/11/2016	950	1997 (84%)	1828 (96%)
Profil 6	07/11/2016	470	658 (95%)	427 (86%)
Profil 7	14-15/11/2016	1430	3874 (82%)	3474 (91%)
Profil 8	12/11/2016	950	2141 (94%)	1754 (96%)
Profil 9	24/11/2016	390	564 (96%)	364 (98%)

Tableau 2 : Calendrier d'acquisition et caractéristiques des profils électriques mis en œuvre dans le cadre de cette étude.

Deux types de protocoles de mesures ont été mis en œuvre sur le terrain. Les protocoles d'acquisition varient en fonction de la configuration des électrodes, c'est-à-dire l'agencement géométrique de ces dernières. Il existe plusieurs configurations, chacune d'entre elles présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne le temps d'acquisition. La mise en œuvre d'au moins deux protocoles permet, dans un contexte géologique complexe, d'appréhender au mieux la géométrie et l'agencement des différentes formations géologiques en présence.

Dans le cadre de cette étude, deux protocoles d'acquisition ont été utilisés :

- Un dispositif **dipôle-dipôle** (DD) qui offre une très bonne résolution des terrains de proche surface ainsi qu'une bonne sensibilité aux discontinuités verticales. Moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger (décrit ci-après), ce dispositif a un rapport signal/bruit qui décroît rapidement et une profondeur d'investigation moins importante ;
- Un dispositif **Wenner-Schlumberger** (WS) dont la profondeur d'investigation est l'atout majeur (environ 150 m pour un profil de 950 m de long). Le rapport signal/bruit est également meilleur. En revanche, ce protocole est dit intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux.

Traitement et inversion

Après filtrage des données de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critères de qualité ($Q < 5\%$), de courant émis ($I > 100\text{ mA}$) ou de potentiel mesuré ($V > 0,3\text{ mV}$), celles-ci sont traitées avec le logiciel X2IPI (Robain et Bobachev, 2002), pour corriger les artéfacts dus aux à-coups de prise, puis inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke et Barker, 1996). Les données topographiques sont incluses lors des inversions de chaque panneau électrique.

La section de résistivité « vraie », résultat de l'inversion, est ensuite utilisée pour l'interprétation géologique. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités électriques calculées le long du profil en fonction de la profondeur.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion ont été choisis de manière à optimiser la réponse du modèle.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géo-électriques) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant un même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements...).

2.4.2. Résultats et interprétations

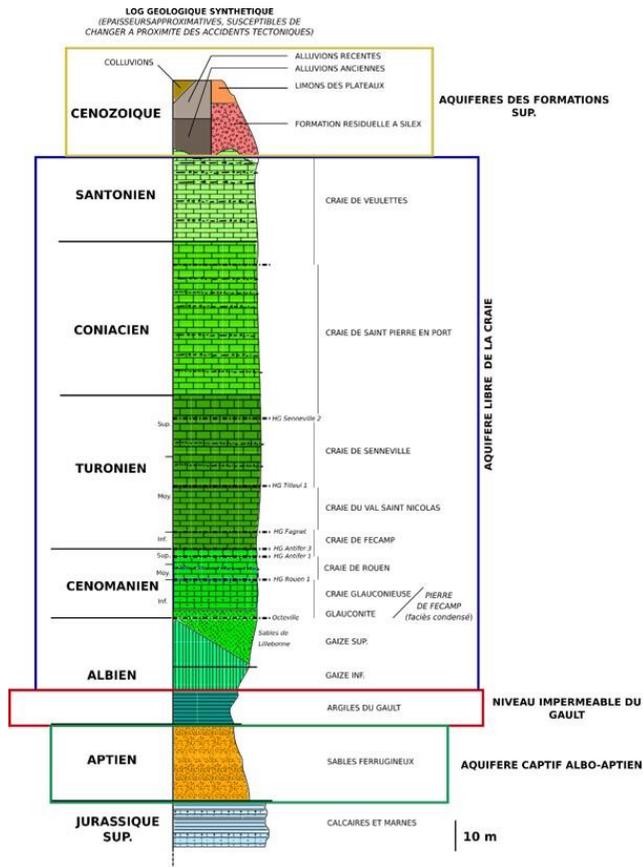
Les résultats des profils électriques ont été mis en relation avec les données géologiques disponibles dans la zone d'étude, notamment les forages géologiques disponibles en BSS (Illustration 31). En outre, la diagraphie gamma-ray et de résistivité électrique effectuée dans le sondage (BSS 00752X0209 – sondage de Nointot) a également été prise en compte pour établir un log géo-électrique de référence (Illustration 47).

Enfin, les données du forage réalisé par le BRGM en janvier 2019 (forage carotté SC-1 et diagraphies), situé le long du profil électrique ERT4, a permis de consolider les interprétations.

Clé d'interprétation des profils électriques

Une « clé d'interprétation » des profils électriques a été construite (Illustration 47) à partir des coupes de résistivité électrique inversées, des calages fournis par les logs géologiques des forages et par la connaissance globale de la géologie du secteur. Cette « clé d'interprétation » permet d'associer une réponse électrique à une entité géologique, et donc d'interpréter chaque profil électrique en coupe géologique.

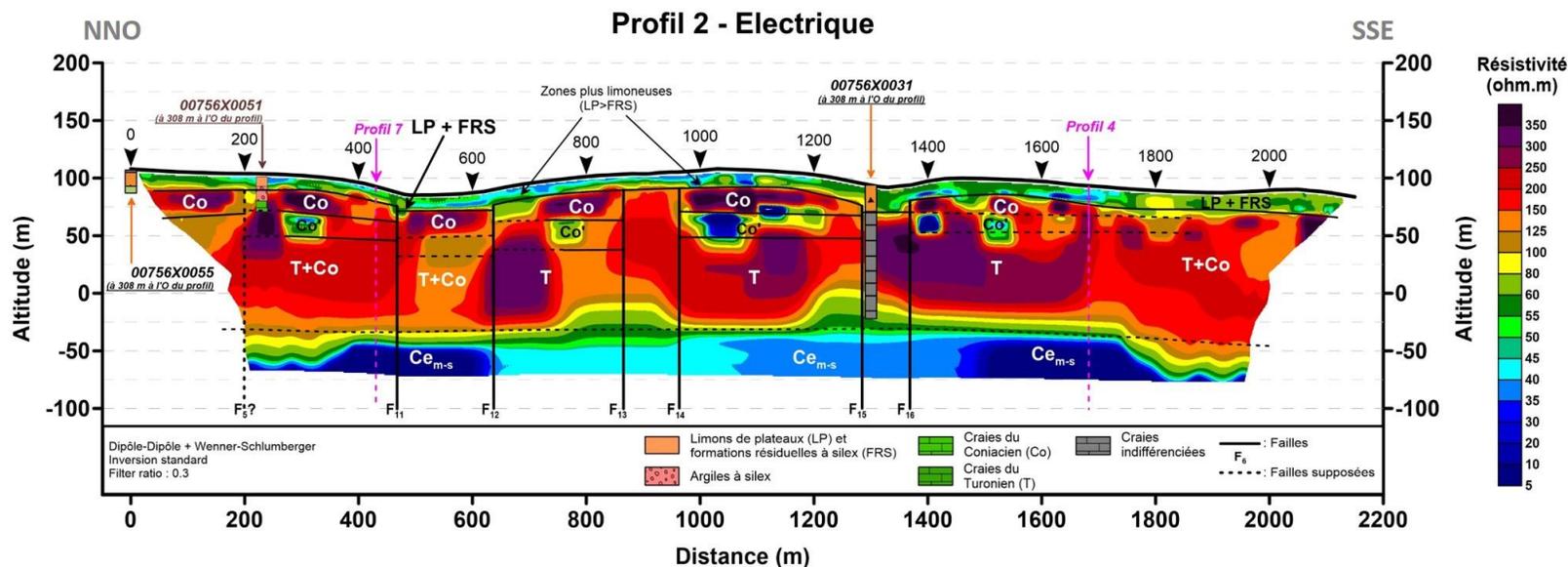
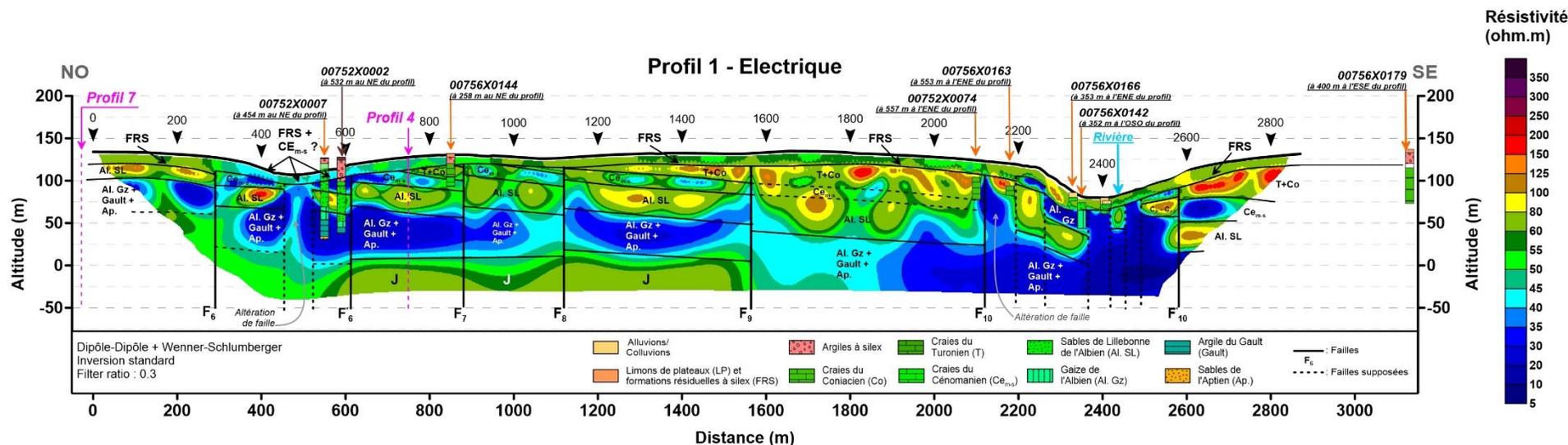
A noter que la réponse électrique des terrains géologiques est particulièrement sensible à la présence de matériaux argileux (l'argile et les minéraux argileux induisent une baisse de la résistivité), ainsi qu'à la présence d'eau (qui favorise également la baisse de la résistivité).

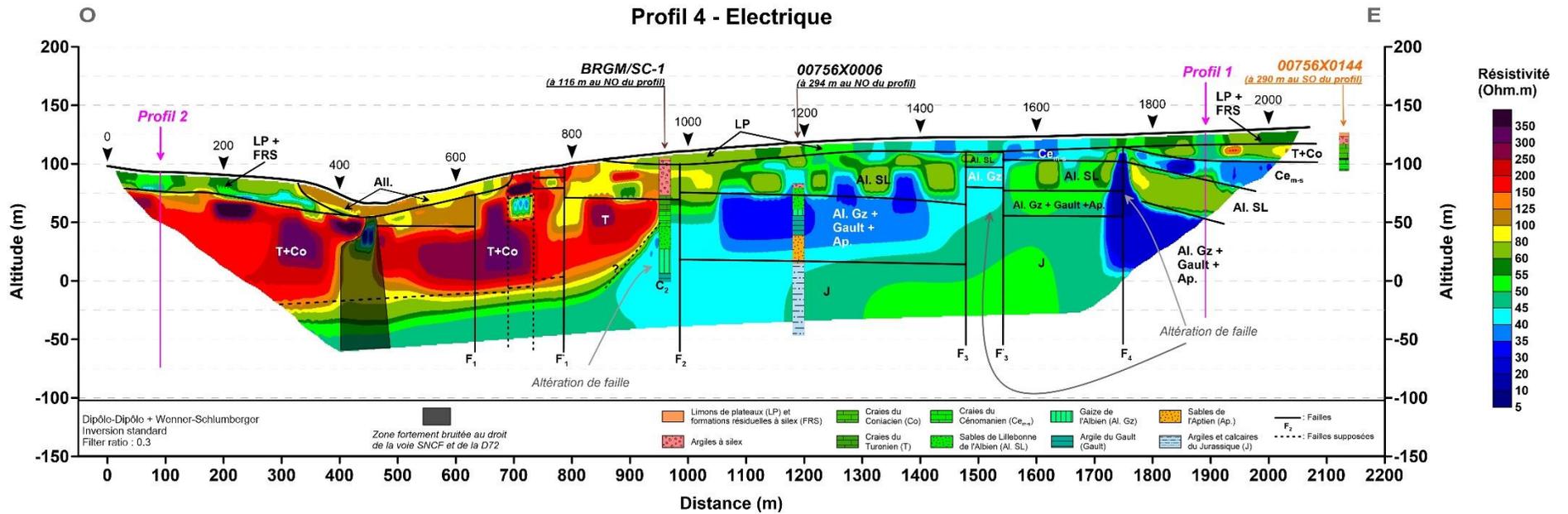
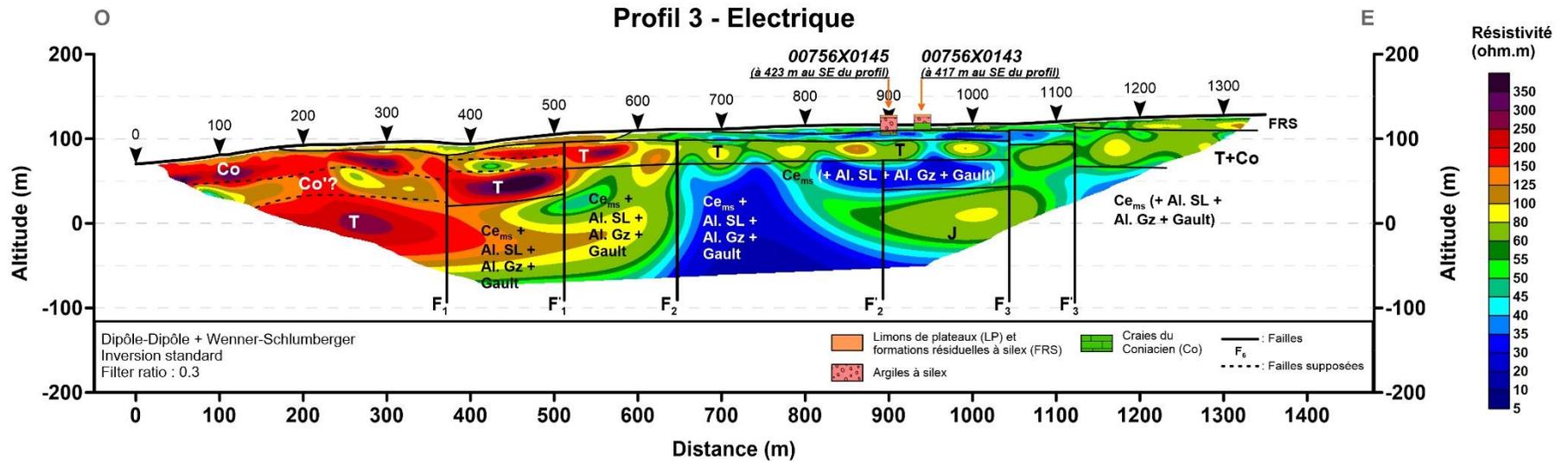


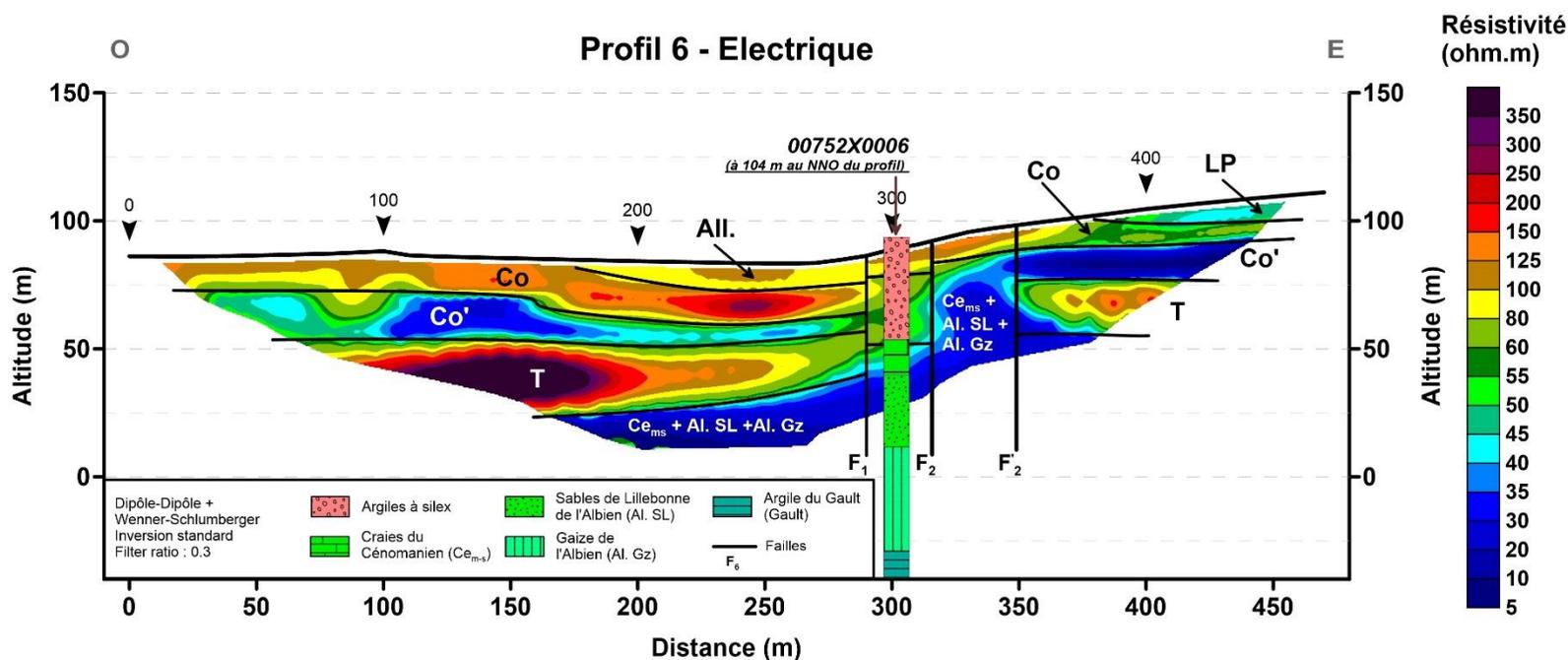
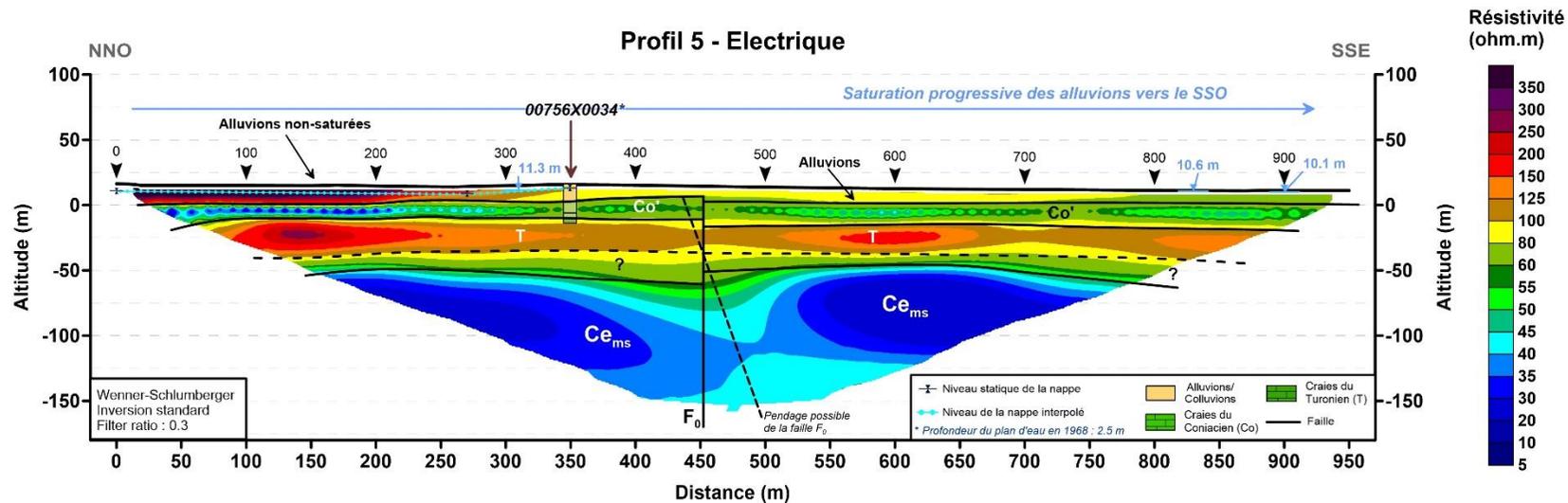
Lithologie	Code	Gamme de résistivité extraite des coupes géoélectriques (Ohm.m)	
		Ouest de la faille F1	Est de la faille F2
ALLUVIONS / COLLUVIONS	All. / Coll.	80 – 100 80 100 12	60 – 80 60 80
LIMONS DES PLATEAUX	LP	35 – 80 35 40 45 50 55 60 80	35 – 50 35 40 45 50
FORMATIONS RESIDUELLE A SILEX	FRS	40 – 125 35 40 45 50 55 60 80 100 125	45 – 60 35 40 45 50 55 60
CRAIE A SILEX (TURONIEN ET CONIACIEN INDIFF.)	T + Co	≥ 100 100 125 150 200 250 300 350	50 – 150 50 55 60 80 100 125 150
CRAIE DU CONIACIEN SUP.	Co	≥ 100 100 125 150 200 250 300 350	50 – 60 50 55 60
CRAIE GLAUC. DU CONIACIEN INF.	Co'	20 – 100 20 30 35 40 45 50 55 60 80 100	≤ 50 5 10 20 30 35 40 45 50
TURONIEN	T	≥ 100 100 125 150 200 250 300 350	60 – 150 60 80 100 125 150
CRAIE DU CENOMANIEN INDIFF.	Co _{ems}	≤ 60 5 10 20 30 35 40 45 50 55 60	≤ 35 5 10 20 30 35
SABLES DE LILLEBONNE	Al. SL		45 – 125 35 40 45 50 55 60 80 100 125
GAIZE ARGILES DU GAULT SABLES DE L'APTIEN	Al. Gz Gault Ap.		≤ 50 5 10 20 30 35 40 45 50
CALC. ET MARNES DU JURASSIQUE SUP.	J		45 – 100 35 40 45 50 55 60 80 100

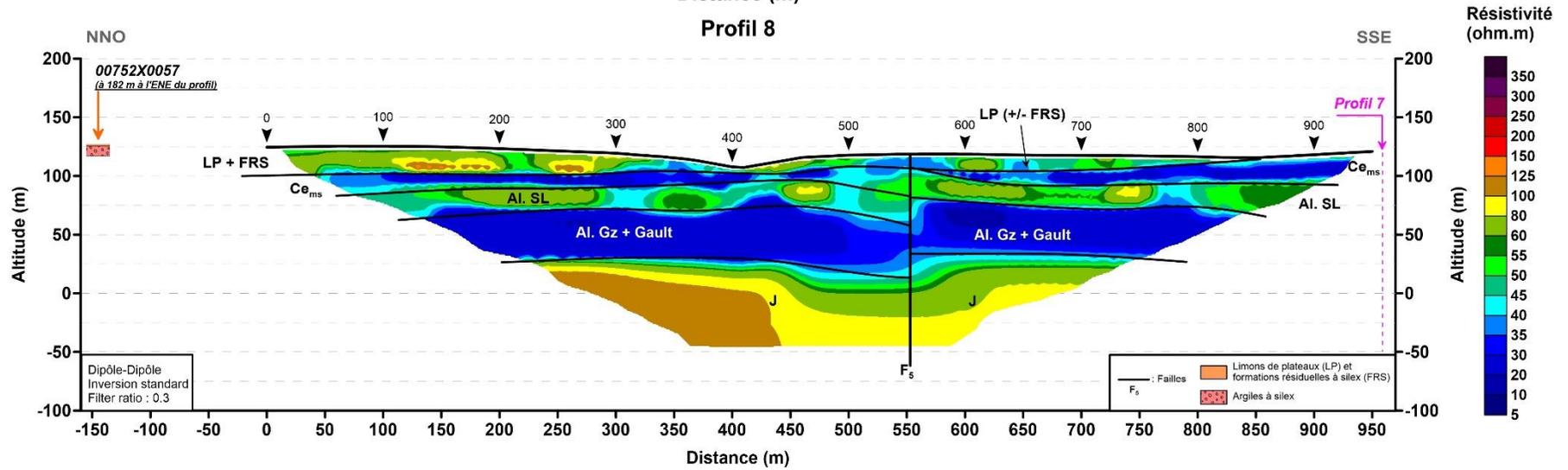
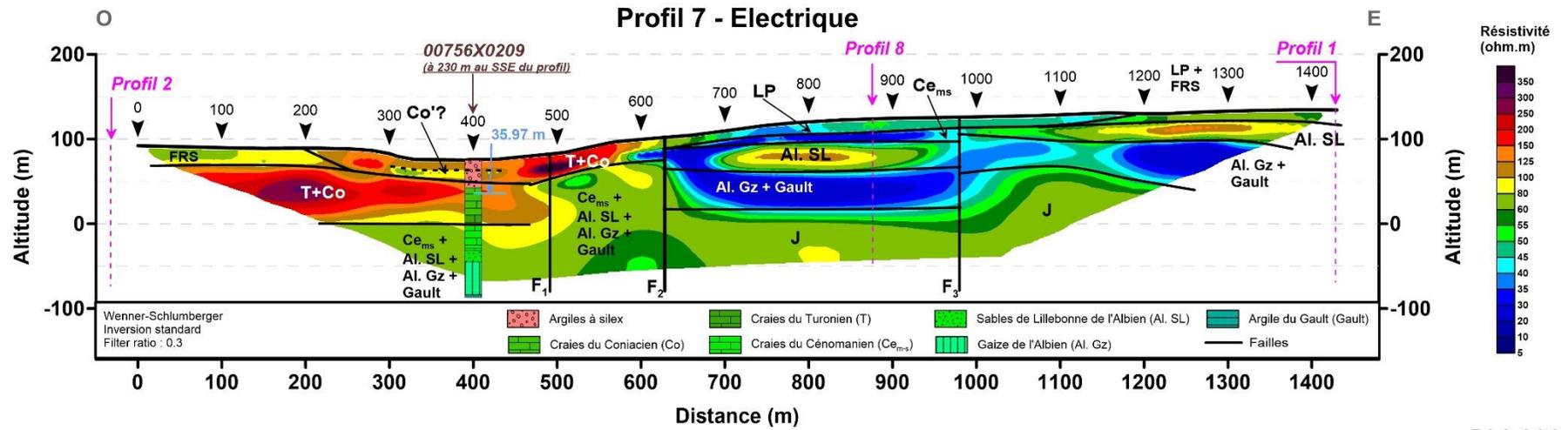
Illustration 47 : Clé d'interprétation des profils électriques, qui permet d'associer une réponse électrique à chaque faciès géologique identifié sur le secteur

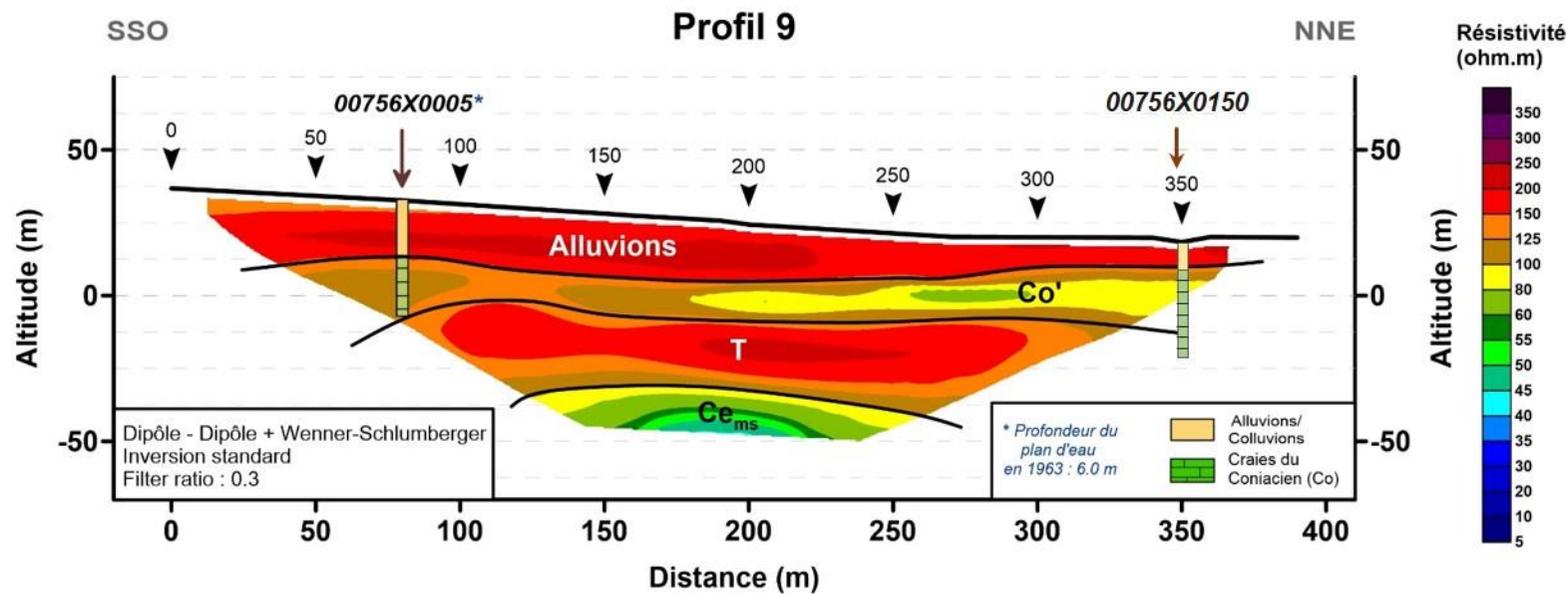
Interprétation des profils électriques en termes de géologie et d'hydrogéologie











L'interprétation globale des coupes géo-électriques montre une discontinuité majeure, caractérisée par un réseau de failles qui constitue la zone de faille de Fécamp – Lillebonne (F₁, F₂, F₃ et F₄). Cette dernière divise la zone d'étude en deux blocs, le bloc abaissé au sud-ouest et le bloc surélevé au nord-est. Une faille principale, F₂, marque le rejet majeur de la structure de Fécamp-Lillebonne.

Le schéma géo-électrique général serait, de haut en bas (de la surface en profondeur) :

- un premier terrain dont les résistivités électriques varient en fonction de la zone :
 - sur les plateaux, cet horizon géo-électrique est faiblement résistant (50 à 100 ohm.m) avec des zones plus conductrices (0 à 45 ohm.m). Le sondage projeté sur le profil 2 (00756X0051) contraint bien le mur de ce niveau et l'attribue à la Formation Résiduelle à silex (RS). Affleurant, son épaisseur est régulière, entre 10 et 15 m. On note un épaississement (jusqu'à 20 m) sur les pentes ouest de la vallée de Bolbec. Des zones plus conductrices, à la surface de cet horizon, sont attribuées aux limons de plateaux (LP), ou éventuellement à la présence de nappes perchées (signal plus conducteur de l'eau) ;
 - dans la vallée de l'abbaye de Gruchet-le-Valasse, un horizon géo-électrique résistant est identifié en subsurface (profils 5 et 9). Les sondages 00756X0005, 00756X0150 et 00756X0034 projetés sur les profils 9 et 5 respectivement, contraignent parfaitement le mur de cette unité et l'associe à des alluvions. Les épaisseurs varient de 20 m (profil 9 au nord-ouest) à 10 m (profil 5 au sud-est). Enfin, de fortes résistivités sont observées dans ce niveau (de 125 à plus de 350 Ohm.m), au nord du profil 5. Elles pourraient correspondre à une désaturation des alluvions, qui seaturent plus à l'aval du fait de la reconnexion entre la nappe et la rivière ;
- un deuxième terrain résistant (80 à >350 ohm.m) est présent principalement dans la partie sud-ouest de la faille de Fécamp – Lillebonne (F₂). Les forages projetés sur le profil 2 offrent un très bon calage du toit de cette unité et permettent de l'attribuer aux craies du Coniacien (Co). Ce niveau géo-électrique est majoritairement recouvert par la Formation résiduelle à silex et/ou Limons de plateaux (profil 2). A proximité des vallées au sud-ouest, et par le jeu du faisceau de failles F₁, cette formation est parfois sub-affleurante (profils 3, 4, 6 et 7). Son épaisseur est comprise entre 20 et 30 m ;
- un troisième niveau, dont la résistivité est comprise entre 30 et 80 ohm.m est identifié. Globalement, cet horizon n'est pas continu et d'une épaisseur très variable. Les informations géologiques disponibles sur le secteur (carte géologique et notice (*Ménillet*, 1969)) mentionnent la présence de deux « niveaux » de craies dans les formations du Coniacien dont l'épaisseur totale peut atteindre 100 m. Ce troisième niveau conducteur est attribué à la partie inférieure des craies du Coniacien (Co'), un faciès légèrement plus glauconieux. Une altération et/ou fracturation importante pourrait également affecter cette lithologie, expliquant les valeurs de résistivités observées. Enfin, d'un point de vue hydrogéologique, il est envisageable que cette partie inférieure des craies du Coniacien constitue un niveau aquifère. En effet, dans la vallée de l'abbaye de Gruchet-le-Valasse, ce troisième niveau apparaît conducteur au niveau du profil 5, et résistant sur le profil 9. Cette variabilité de la résistivité pourrait soit s'expliquer par la présence d'eau,

soit par des variations latérales de faciès. Les forages de calage (00756X0034, 00756X0150 et 00756X0005) permettent de parfaitement contraindre le toit de cette unité et de l'attribuer aux craies du Coniacien sur les deux profils. Le forage 00756X0034 permet également de contraindre le mur de cette unité, son épaisseur variant entre 15 et 20 m dans la vallée. Les données de forages indiquent également la présence d'eau à très faible profondeur (6.0 m en 1963 dans le forage 00756X0034 et 2.5 m en 1968 dans le forage 00756X0005) témoignant du potentiel aquifère de la formation, qui pourrait expliquer les variations de résistivités électriques observées. En revanche, les logs géologiques ne permettent pas d'identifier un faciès particulier des craies du Coniacien (C₅₋₄) ;

- un quatrième niveau résistant, dont les résistivités sont comprises entre 80 et plus de 350 ohm.m. Le toit de cet horizon géo-électrique est mis en évidence par le forage 00756X0034 projeté sur le profil 5, et le mur par le forage 00752X0006 projeté sur le profil 6, qui permettent d'attribuer ce niveau aux craies du Turonien (T). Son épaisseur est assez variable sur l'ensemble du secteur : les profils 5 et 9 situés dans la vallée de Gruchet-le-Valasse indiquent une épaisseur de 30 à 40 m. Dans le bloc abaissé (profil 2) les épaisseurs semblent plus importantes et assez irrégulières allant de 65 m à 80 m. A proximité de la faille de Fécamp-Lillebonne, les épaisseurs, plus faibles au nord-ouest (environ 30 m, profil 6), augmentent vers le sud-est (environ 75 m, profil 3). Enfin, sur le bloc soulevé (profil 1 et 8) cet horizon géo-électrique, absent du profil 8 au nord, apparaît progressivement vers le sud-ouest, avec des épaisseurs allant de 20 à 40 m, et un pendage vers le sud. Dans ce secteur, et lorsqu'elles sont présentes, les craies du Turonien sont directement en contact avec les formations argilo-limoneuses superficielles.

La signature électrique de cet horizon est constante sur l'ensemble du secteur d'étude mis à part sur le profil 6, entre les failles F₁ et F₂. Dans cette zone, la limite entre le troisième et le quatrième terrain est moins marquée, les gammes de résistivité électrique qui caractérisent ces terrains étant confondues (entre 45 et 100 Ohm.m).

- un cinquième terrain, conducteur (5 à 45 Ohm.m). Les forages 00752X0006 (projeté sur le profil 6) et 00752X0062 (projeté sur le profil 8), offrent un bon calage du toit et du mur de cette formation, permettant de l'attribuer aux craies glauconieuses du Cénomaniens (Ce). Cet horizon géo-électrique est présent à la base des coupes au sud-ouest de la faille de Fécamp-Lillebonne (profil 2 et profil 6 et partie sud-ouest des profils 4, 7 et 3) où la profondeur d'investigation limitée ne permet pas de contraindre son épaisseur. Au nord-est de la faille, son épaisseur varie entre 15 et 25 m sur le bloc soulevé (profil 8 et profil 1) avec un épaississement du nord vers le sud et un pendage également vers le sud. Dans ce secteur, cette lithologie est présente sous la Formation résiduelle à silex et les Limons de plateau (profil 3, 4, 7), et est affectée par un faible pendage vers le sud-est (profil 4). Notons que la projection de la coupe géologique du sondage carotté SC-1 sur le profil ERT4 a permis de bien contraindre et valider la limite entre ce cinquième terrain plutôt conducteur (attribué au Cénomaniens), avec le quatrième terrain résistant sus-jacent attribué au Turonien.
- un sixième terrain, résistant, entre 80 et plus de 350 Ohm.m. Absent du bloc abaissé au sud-ouest (profil 2), son épaisseur varie du nord-ouest (20 m en moyenne, profil 8) au sud-est (30 à 40 m, profil 1 et profil 3) à la faveur d'un pendage vers le sud. Depuis la faille de Fécamp-Lillebonne, vers l'est, l'épaisseur de cette lithologie est très irrégulière selon les blocs définis par les différentes failles qui recoupent le secteur (profils 3, 4 et 7) et semble affectée d'un faible

pendage vers l'est (profil 4). Le forage 00752X0002 indique que cet horizon géo-électrique pourrait correspondre aux faciès sableux de la base du Cénomaniens (C_e) et des « Sables de Lillebonne » de l'Albien supérieur (Al. SL). Dans ce secteur, les informations géologiques (notamment les coupes géologiques disponibles dans la Banque du Sous-Sol) indiquent que cette unité (Sables cénomaniens et Sables de Lillebonne) présente une épaisseur cumulée comprise entre 20 et 40 m cohérente avec les observations réalisées sur les coupes géo-électriques ;

A proximité immédiate de la faille de Fécamp-Lillebonne, du côté sud-ouest de cette dernière, les formations du Cénomaniens – Albien sup. (craies glauconieuses et sables) montrent des gammes de résistivité confondues et comprises entre 50 et 80 Ohm.m (profils 3, 4,7), ne permettant pas de distinguer les deux unités comme au niveau des plateaux est (profil 2) et ouest (profils 1 et 8). Cette différence provient probablement de variations lithologiques du Cénomaniens basal ou de l'Albien supérieur, comme par exemple une diminution de l'épaisseur des Sables de Lillebonne (remplacé par un faciès silteux de la Gaize supérieure ?), ce qui induit un signal potentiellement peu marqué en électrique. Pour rappel, dans le sondage de Nointôt réalisé par la CODAH (indice BSS 00756X0209), l'Albien supérieur n'est représenté que par une dizaine de mètres de « Sables de Lillebonne » sus-jacents à la Gaize inférieure silteuse.

- un septième horizon géo-électrique qui montre des gammes de résistivités différentes selon sa position par rapport à la faille de Fécamp-Lillebonne (profils 3, 4 et 7) :
 - au **sud-ouest de la faille F₂**, ce niveau géo-électrique montre des résistivités électriques intermédiaires, comprises entre 60 et 100 Ohm.m. Le forage 00756X0209 projeté sur le profil 7 indique la présence de Gaizes de l'Albien (Al. Gz) qui sont attribuées à cet horizon électrique. A noter que dans cette zone proximale à la faille, les coupes géo-électriques ne permettent pas de différencier les terrains associés aux formations cénomaniennes, des terrains sous-jacents attribués aux lithologies de l'Albien, ce qui suppose une convergence des propriétés des faciès. L'épaisseur de ces formations, qui constituent le substratum géo-électrique du bloc sud-ouest, ne peut pas être estimée non plus, en raison de la profondeur d'investigation insuffisante ;
 - au **nord-est de la faille F₂**, cet horizon géo-électrique est caractérisé par des résistivités électriques faibles (10 à 50 Ohm.m). Son épaisseur est irrégulière : entre 35-40 m au nord de la faille F₆ (profils 7 et 8, profil 1) et au sud de la faille F₁₀ (profil 3 et 1) et autour de 50 m entre ces deux failles (profil 4 et partie centrale du profil 1). Le forage 00752X0002 projeté sur le profil 1 associe la partie supérieure de cette unité aux Argiles de Gault. De plus, les informations géologiques disponibles en BSS sur le secteur suggèrent également la présence de Sables ferrugineux aptiens sous les Argiles de Gault qui pourraient faire partie de cet horizon conducteur au niveau du bloc nord-est.

Cette formation est associée à des anomalies conductrices d'épaisseur importante entre les failles F₂ et F'₂ (profil 3), entre les failles F₁ et F₂ (profils 7 et 4) ainsi que dans le faisceau de failles constituant F₁₀ (profil 1).

- un huitième et dernier niveau, caractérisé par des résistivités intermédiaires comprises entre 45 et 80 Ohm. Ce terrain constitue le substratum géo-électrique du bloc nord-est. Le toit de cet horizon est contraint par le forage 00756X0006

projeté sur le profil 4, permettant ainsi de l'associer aux formations du Jurassique. L'épaisseur de cette unité n'a pas été appréhendée du fait de la profondeur d'investigation insuffisante.

Cette interprétation permet de proposer une analyse géologique et structurale de chaque profil électrique :

- Profil ERT 1

Ce profil est orienté NE-SO, soit globalement parallèle à la structure de Fécamp-Lillebonne, et est situé sur le bord nord-est surélevé. Il recoupe transversalement la Plaine de Baclair, située en plateau, et les vallons de Bolbec et de Palfray. Les terrains présentent un pendage général vers le sud-ouest, et sont affectés par des structures cassantes, *a priori* orthogonales à l'orientation du profil, bien visibles notamment dans les deux vallons de Bolbec et de Palfray, où la disposition de ces accidents s'apparente à une structure en graben centrée sur les vallées (faisceau de failles F₆ et F₁₀). Notons que les centres de ces « grabens » sont marqués par des terrains conducteurs, à rapprocher très certainement aux formations du Crétacé inférieur au regard de ce qui est connu sous le vallon de Bolbec. Sur le plateau, les terrains situés sous la Plaine de Baclair sont également affectés de failles à rejets plurimétriques à décimétriques (failles F₇, F₈ et F₉). L'orientation précise de ces structures ne peut être déterminée avec précision. La base du profil est marquée par la présence des terrains jurassiques, bien contraints par le forage 00756X0006 du vallon Palfray.

- Profil ERT 2

Le profil électrique ERT 2 est situé sur le bloc sud-ouest affaissé de la faille, et est parallèle au profil ERT 1. Le contraste des résistivités entre ces deux profils est marquant, ce qui confirme bien les différences géologiques entre les deux blocs, et donc le rejet de la faille. Hormis l'horizon géo-électrique conducteur situé à la base du profil (qui correspond probablement aux terrains conducteurs de la base du Crétacé supérieur et/ou du Crétacé inférieur), les terrains sont caractérisés par des gammes de résistivité comprises entre 100 et 350 ohm.m. D'après les données géologiques disponibles (BSS et cartes géologiques), il s'agirait des craies du Coniacien au Turonien.

D'un point de vue structural, ces craies sont affectées d'accidents cassants de rejet métrique à plurimétrique, probablement perpendiculaires au profil (failles F₅, F₁₁, F₁₂, F₁₃, F₁₄, F₁₅ et F₁₆). L'orientation de ces accidents ne peut toutefois pas être confirmée à ce stade des investigations, hormis pour la faille F₅ qui semble avoir été reconnue sur le profil ERT 8. S'il s'agit de la même structure, elle serait orientée NE-SO, soit globalement parallèle aux structures en « graben » des vallons de Palfray ou de la vallée de Bolbec. Il est d'ailleurs très intéressant de remarquer que la situation de cette faille F₅ coïncide presque parfaitement (aussi bien en terme de situation que d'orientation) à une structure cassante mise en évidence par Cholley et Firmin en 1945. D'après ces auteurs, il s'agirait d'une faille à regard vers le nord-ouest, ce qui est cohérent avec ce qui est observé sur le profil ERT 8.

- Profil ERT 3

Ce profil, orthogonal à la faille de Fécamp-Lillebonne, longe la RD6015. Il met bien en évidence le contraste de résistivité des terrains situés de part et d'autre de la structure. En effet, sur le bloc nord-est surélevé, les horizons géo-électriques sont caractérisés par des résistivités relativement faibles, traduisant des terrains plus argileux ou glauconieux

(base du Crétacé supérieur et Crétacé inférieur), tandis que sur le bloc sud-ouest affaissé, les résistivités sont plus élevées (prédominance des craies du Crétacé supérieur – Turonien à Coniacien).

D'un point de vue structural, ce profil précise la structure de la faille de Fécamp-Lillebonne, qui semble constituée d'un ensemble de trois faisceaux de failles (F_1 , F_2 et F_3), elles-mêmes constituées par deux failles de rejet pluri-décamétrique. Le rejet principal semble localisé au niveau du faisceau F_2 , qui délimite un bloc dans lequel les terrains conducteurs attribués au Cénomaniens inférieur - Crétacé inférieur dessinent un dôme dont l'origine n'est pas connue (structure anticlinale ? zone argilisée ?). De part et d'autre de cette anomalie, les terrains ne semblent pas affectés par des pendages significatifs.

- Profil ERT 4

A l'instar du profil ERT 3, le profil ERT 4 est orthogonal à la faille de Fécamp-Lillebonne. Notons que le nouveau forage carotté réalisé par le BRGM en janvier 2019 est situé à proximité immédiate de ce profil, à une cinquantaine de mètres en aval de la faille F_2 , ce qui a permis de conforter nos interprétations, et notamment de valider la limite Turonien – Cénomaniens (passage entre des terrains résistants du Turonien et des terrains conducteurs du Cénomaniens).

D'un point de vue géologique, ce profil montre une nouvelle fois le contraste de résistivité des terrains situés de part et d'autre de la structure de Fécamp-Lillebonne, ce qui traduit une différence importante de lithologie, et donc le rejet de la structure. Les trois faisceaux de failles qui constituent la « structure » de Fécamp-Lillebonne identifiés sur ERT 3 se retrouvent également sur ce profil (F_1 , F_2 et F_3). Toutefois, le nombre de failles dans chaque faisceau varie, ainsi que les rejets. En effet, le faisceau de failles F_1 semble ici représenté par 4 failles de faible rejet (contre deux failles sur le profil ERT3) ; le faisceau de faille F_2 , constitué par 2 failles de rejet décimétrique sur ERT 3 est remplacé par une faille de rejet pluridécimétrique. Le faisceau de failles F_3 semble toujours constitué par deux failles à rejet métrique. Notons enfin que le profil ERT 4 est marqué par la présence de la faille F_4 , qui semble associée à une zone argilisée qui apparaît conductrice sur le profil. Cette faille n'a pas été reconnue sur le profil ERT 3, qui semble trop court vers l'est. A noter que si l'on prolonge cette faille F_4 vers le sud, selon une orientation N150° (similaire à la faille de Fécamp-Lillebonne), son passage dans le vallon de Bolbec coïnciderait avec la présence des sources situées sous le site ORIL. A l'est de cette structure F_4 , les terrains présentent un pendage assez fort et orienté vers l'est.

La réinterprétation de ce profil à partir des données du sondage SC-1 mettent en évidence un fort pendage vers l'OSO des formations turoniennes et anté-turoniennes dans le compartiment situé entre les failles F_1 et F_2 , ce qui serait à l'origine d'un épaississement de ces formations vers l'OSO, à mesure que l'on se rapproche de la faille F_1 . La nouvelle interprétation montre également que les formations de la base du Crétacé supérieur et du Crétacé inférieur sont portées en subsurface à l'amont de la faille F_2 , par l'intermédiaire à ce qui ressemble à une structure antiforme faillée.

Enfin, la projection de la coupe géologique du sondage 00756X0006 (situé à 300 m au nord, dans le fond du Vallon de la Fontaine Palfray) sur le profil ERT 4 ne permet pas de caler correctement les horizons géo-électriques, et notamment les Sables de Lillebonne qui ont une réponse plutôt résistante. Il n'est donc pas exclu qu'une structure cassante puisse séparer le profil électrique ERT4 du sondage 00756X0006. Il s'agirait d'une faille normale, à regard vers le nord / nord-ouest, probablement parallèle au profil ERT 4, soit

SO-NE (dans l'axe du vallon de la Fontaine Palfray), et à rejet décimétrique. Il pourrait s'agir de l'une des failles du faisceau F_6 identifié sur le profil ERT 1 (probablement la faille F'_6), qui délimiterait une structure en « graben » axée sur le vallon et orthogonale à la structure de Fécamp-Lillebonne.

- Profil ERT 5

Il s'agit d'un profil réalisé dans le fond de la vallée du Commerce, au niveau de l'abbaye de Valasse. Il est orienté NNO-SSE, soit parallèle à la vallée.

Ce profil met en évidence la géométrie des alluvions de la vallée du Commerce, qui sont bien contraints par les données de forages. Leur épaisseur est de l'ordre d'une dizaine de mètres. D'après les données géologiques disponibles dans la vallée, ces alluvions reposent sur les craies coniaciennes, ici caractérisées par des résistivités relativement faibles, ce qui pourrait se traduire soit par la présence de la nappe (craies saturées), soit par un faciès plus argilisé (craies fracturées / altérées), soit par une craie légèrement glauconieuse (Coniacien basal d'après *Ménillet*, 1969). Ces craies coniaciennes reposent sur un horizon plus résistant attribué au Turonien, ici épais de 30 à 40 m, et dont le toit semble parfaitement contraint par les données de forage. Cet ensemble repose sur un horizon conducteur, à rattacher aux faciès de base du Crétacé supérieur (Craie glauconieuse) et du Crétacé inférieur (Gaize, Gault ?). Il est intéressant de remarquer que les alluvions présentent de fortes résistivités dans la partie NNO du profil (> 300 ohm.m), et des résistivités plus faibles à l'extrémité SSE (50 à 80 ohm.m), et que ce passage est progressif. Nous proposons deux hypothèses pour expliquer ces variations de résistivité :

- une différence lithologique : liée à une géométrie lenticulaire des alluvions avec la présence de lentilles grossières (galets, graviers etc.) qui jouxte des lentilles plus fines (limons, argiles etc.) ;
- une différence de teneur en eau : les alluvions « conductrices » seraient saturées contrairement aux alluvions « résistantes ». Cette hypothèse est intéressante car ce secteur est marqué par la reconnexion entre la nappe et la rivière, ce qui pourrait être à l'origine de la saturation des alluvions vers le SSE, et donc les valeurs de résistivité décroissantes.

D'un point de vue structural, une seule faille a été reconnue sur le profil (F_0). Elle présente un rejet décimétrique qui n'affecte que les terrains cénomaniens et albiens, ainsi que la base du Turonien, ce qui traduit un jeu essentiellement antérieur au Turonien. Son orientation est probablement orthogonale au tracé du profil, soit globalement N050° - N060°, ce qui coïncide avec l'orientation de la vallée de la Fontaine Murée. Il en va de même pour sa position, alignée sur la vallée. Il est également intéressant de remarquer que la position de cette faille coïncide aussi avec l'emplacement de deux linéaments mis en évidence en 1978 par CPGF, et en 1998 par la CGG, ce qui tend à confirmer son existence. Aux abords de cette structure, la base du Turonien est marquée par de légers pendages.

- Profil ERT 6

Il s'agit d'un petit profil situé au nord de la zone d'étude, au niveau du lieu-dit « Le Goulet », juste au sud de Mirville. Il est orientée O-E, et est orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne. A l'instar des profils ERT3 et ERT4, il permet de préciser la structuration de l'accident de Fécamp-Lillebonne, ici représenté par deux faisceaux de

failles : F_1 réduit à une seule faille de rejet plurimétrique et F_2 représenté par deux failles qui délimitent un bloc caractérisé par la présence d'une anomalie conductrice (géométrie analogue au profil ERT 3). Les terrains situés de part et d'autre de la structure présentent de légers pendages.

L'un des objectifs de ce profil était de mettre en évidence la présence d'un conduit karstique connecté à l'entonnoir d'absorption dit du « Goulet », situé en fond de vallon. Toutefois, les données de résistivité ne montrent pas clairement d'anomalie qui pourrait être associée à ce conduit karstique. En effet, seul l'horizon conducteur « C_5 », situé à l'aval immédiat de la faille F_1 , présente une anomalie résistive circulaire qui pourrait être liée à la présence d'un conduit karstique (vide), mais cette hypothèse ne peut être confirmée sans forage de contrôle.

- Profil ERT 7

Le profil ERT 7 est orienté ENE-OSO (perpendiculaire à la faille de Fécamp-Lillebonne). Il s'inscrit donc dans la continuité des profils ERT 3 et ERT 4, situés plus au sud. La structure de Fécamp-Lillebonne est représentée sur ce profil par les trois faisceaux de failles F_1 , F_2 et F_3 (déjà identifiés sur les profils ERT 3 et ERT 4), constitués ici d'une unique faille de rejet pluri-décamétrique (rejet de l'ordre de 50 m pour F_1 et F_3 , plus difficile à estimer pour F_2 , soit un rejet total supérieur à 100 m ce qui corrobore les informations bibliographiques). A l'est de la structure F_3 , les horizons géo-électriques présentent un pendage vers l'est. Notons que les failles F_1 et F_2 délimitent un bloc dans lequel les terrains glauconieux de la base du Crétacé supérieur / Crétacé inférieur semblent confondus, avec des résistivités comprises entre 50 et 100 ohm.m. Cette géométrie est analogue à ce qui a pu être décrit précédemment sur les profils ERT 3 et ERT 6. Le pendage des couches entre F_1 et F_2 semble non négligeable et orienté vers l'ouest, tandis qu'entre F_2 et F_3 , plus à l'est, les couches semblent tabulaires.

D'un point de vue géologique, on remarque une nouvelle fois les différences dans les valeurs de résistivité entre le bloc nord-est et sud-ouest, qui sont associées à des lithologies différentes, et qui traduisent le rejet de la structure de Fécamp-Lillebonne. Sur le bloc nord-est surélevé, la base de la série semble constituée par les formations jurassiques qui présentent un léger bombement à l'est de la faille F_3 . Ces formations sont sous-jacentes aux faciès conducteurs de la base du Crétacé inférieur, puis à un horizon plus résistant épais d'une vingtaine de mètres qui pourrait correspondre aux Sables de Lillebonne. Cette information ne peut toutefois pas être confirmée faute de sondage de calage. Les lithologies du bloc sud-ouest affaissé sont en revanche bien contraintes par le forage 00756X0209 réalisé par la CODAH en 2015, qui a traversé des craies turoniennes représentées par des résistivités élevées, puis les faciès glauconieux du Cénomaniens puis de l'Albien caractérisées par des résistivités plus faibles.

- Profil ERT 8

Il s'agit d'un petit profil parallèle à la faille de Fécamp-Lillebonne et situé sur le bloc nord-est surélevé. Il traverse en son centre un petit vallon sec orienté N060°. D'une manière générale, on retrouve les gammes de résistivités qui caractérisent le bloc surélevé puisque le profil montre bien une succession d'horizons « résistants » (valeurs de l'ordre de 60 à 100 ohm.m) et d'horizons conducteurs (valeurs < 40 ohm.m). D'après les données géologiques disponibles et à partir de l'analyse des autres profils électriques, l'horizon géo-électrique situé en fin de profil correspondrait aux formations jurassiques, sous-jacentes aux faciès conducteurs du Crétacé inférieur, puis d'un horizon légèrement plus résistant d'une vingtaine de mètres d'épaisseur qui pourrait correspondre aux Sables de Lillebonne (information non confirmée faute de sondage de calage). Au-dessus, l'horizon « conducteur » correspondrait probablement aux Craies glauconieuses de la base du Cénomaniens, elles-mêmes recouvertes par la Formation résiduelle à silex.

D'un point de vue structural, les horizons géo-électriques sont décalés par la faille F₅, qui pour rappel avait été identifiée sur le profil ERT 2 situé de l'autre côté de la structure de Fécamp-Lillebonne, sur le bord sud-ouest affaissé. Cette faille F₅ est située au même emplacement et présente la même orientation que la faille NE-SO identifiée en 1945 par Cholley et Firmin, ce qui confirmerait son existence (faille à regard NO d'après ces auteurs). Enfin, les horizons géo-électriques présentent un pendage orienté vers le NNE à l'est de F₅, et vers le SSO à l'ouest de F₅, avec un léger bombement à proximité de cette faille.

- Profil ERT 9

Ce petit profil a été réalisé transversalement à la vallée du Commerce, en fond de vallée et en amont de l'Abbaye du Valasse. Il est orienté SO-NE. Il met en évidence une géométrie sub-tabulaire des horizons géo-électriques, présentant un très léger pendage vers le NNE (vers le centre de la vallée). Le sondage BSS 00756X0005 contraint parfaitement l'horizon résistant situé en sub-surface, et qui peut donc être interprété comme des alluvions (grossières). D'après ce sondage, ces alluvions reposent sur les craies coniaciennes, qui seraient marquées sur le profil ERT 9 par des résistivité plus faibles. Les terrains résistants pourraient soit être attribués au Turonien, soit à des craies coniaciennes moins altérées. D'un point de vue structural, aucune faille n'a été mise en évidence sur le profil.

Proposition d'un schéma structural d'après l'analyse des données géo-électriques

La corrélation des anomalies localisées sur les différents profils géo-électriques permet de proposer un nouveau schéma structural de la zone d'étude. Cette carte (Illustration 48) met clairement en évidence la géométrie en faisceau de la structure de Fécamp-Lillebonne (constituée par les familles de failles F₁, F₂ et éventuellement F₃ et F₄), ce qui tend à confirmer les observations réalisées sur le terrain par Ragot en 1988. Cette structure serait associée à des failles orthogonales (orientées probablement N050° à N060°), qui définissent une géométrie en « graben » centrée sur les vallons de Bolbec et de Palfray.

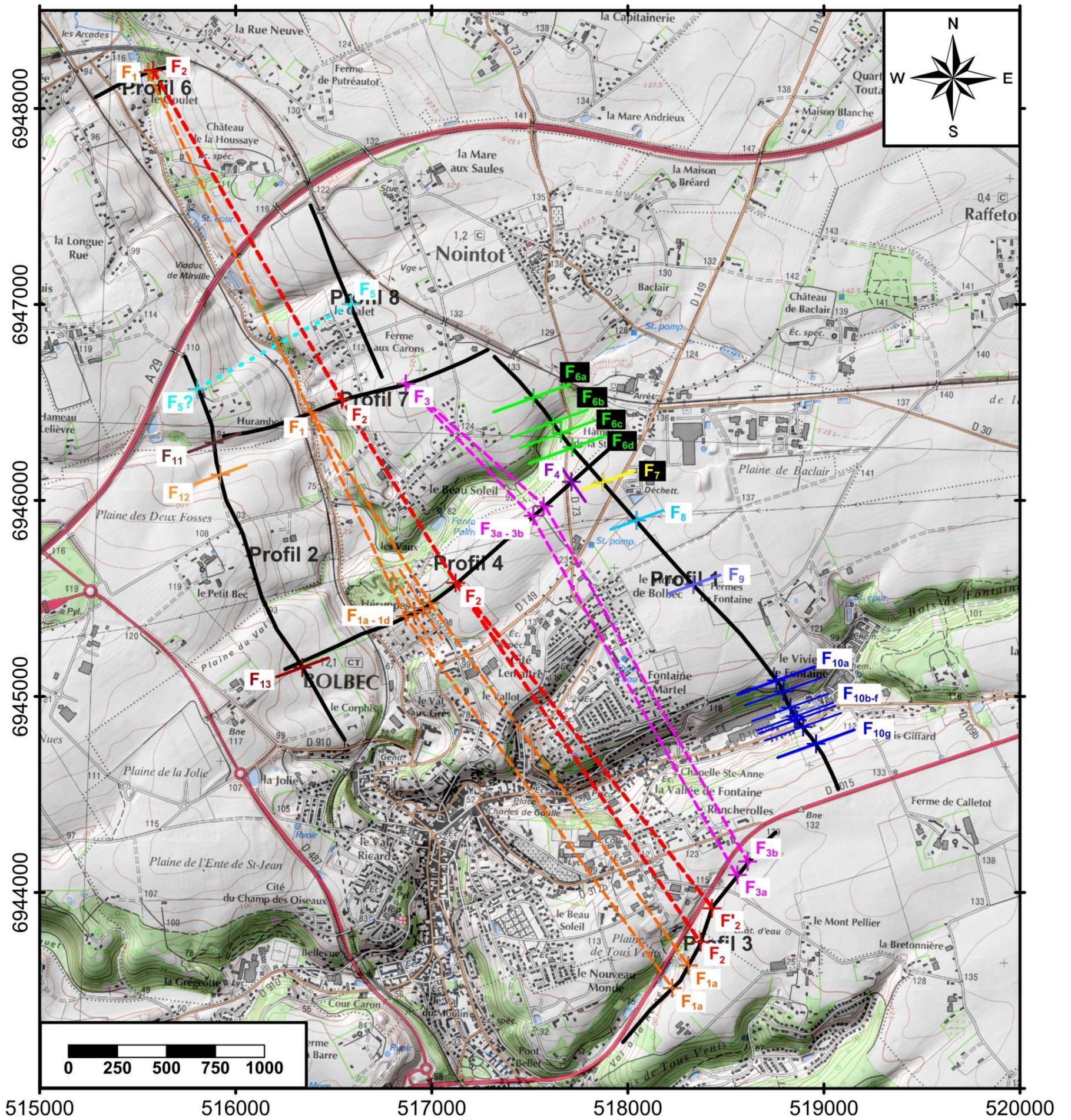


Illustration 48 : Schéma structural de la zone d'étude basé sur la corrélation des différents profils électriques. Cette carte montre clairement la structure en faisceau de la faille de Fécamp-Lillebonne

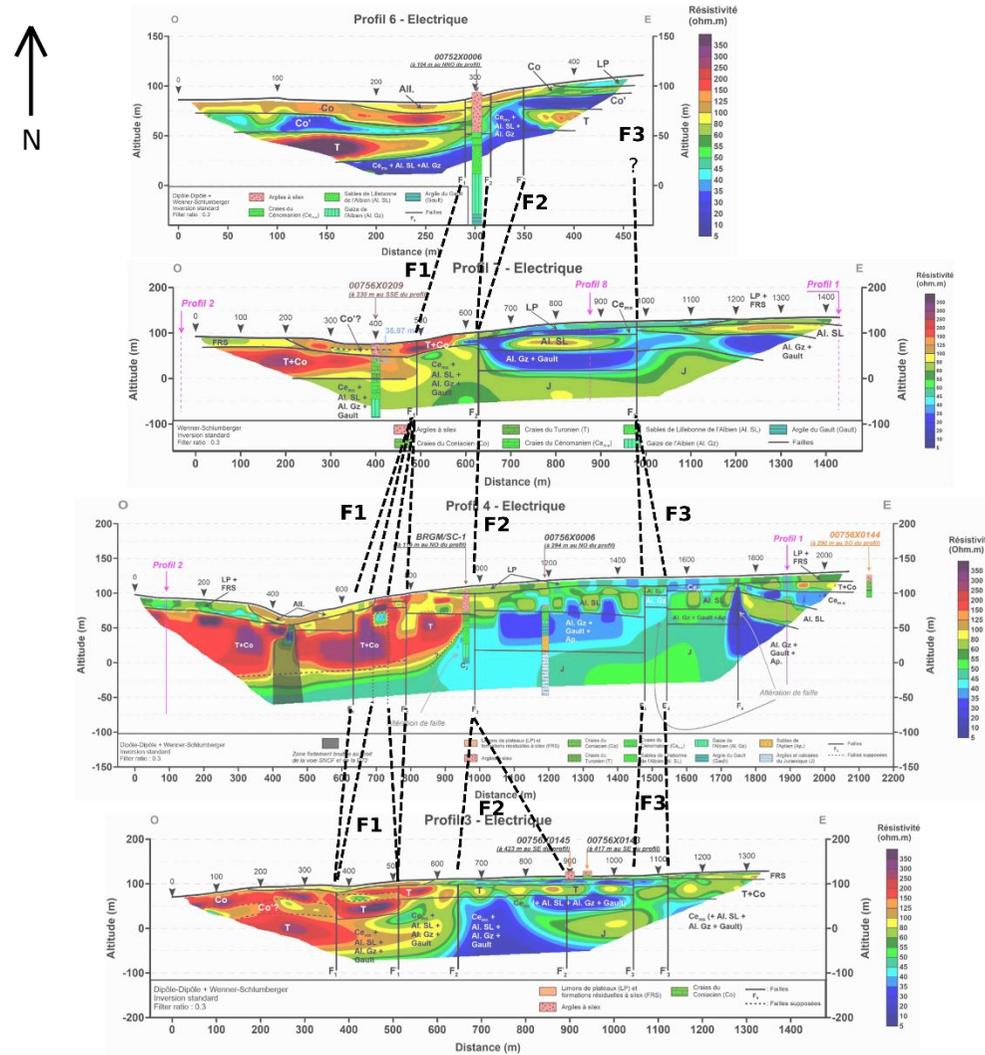


Illustration 49 : Mise en perspective des profils électriques orthogonaux au tracé de la structure de Fécamp-Lillebonne illustrant sa structure en faisceau

2.5. INVESTIGATIONS SISMIQUES

2.5.1. Mode opératoire

L'acquisition des profils sismiques a été réalisée à l'aide de centrales d'acquisition sismiques Stratavizor 48 traces et 3 Geode 24 traces (Geometrics, USA) connectées à 5 flûtes de 24 traces, soit 120 traces régulièrement espacées de 5 mètres sur 595 m. La source sismique était de type chute de poids accélérée A200P. L'espacement entre les points sources était de 10 m. Le matériel utilisé comprend :

- 1 Stratavizor NZ 48 traces Geometrics
- 3 Geode 24 traces Geometrics
- 5 flûtes sismiques d'inter-trace 5 m
- 120 géophones de fréquence centrale 10 Hz
- 1 source sismique chute de poids accélérée
- 2 claies de portages
- 5 batteries de voiture 110 Ah
- 1 GPS différentiel Trimble
- 1 micro-ordinateur portable
- 2 véhicules

Les profils sismiques 01 et 02 ont été acquis selon des directions E-O et SO-NE respectivement, et localisés de sorte qu'ils recoupent le tracé cartographique de la faille de Fécamp-Lillebonne (Illustration 50). L'interprétation sismique des profils a pour objectif la localisation la plus précise possible de la faille et la détermination de la géométrie générale des séries sédimentaires mésozoïques de part et d'autre de cet accident tectonique.

L'interprétation des deux profils sismiques acquis en 2016 (Illustration 51 et Illustration 52) a été réalisée à partir des recommandations méthodologiques établies par Mitchum et al. (1977). Les réflecteurs sismiques sont pointés et leurs éventuelles discontinuités sont associées soit à un accident structural (faille), soit à un biseau stratigraphique (érosion ou non-dépôt). Les surfaces majeures sont utilisées pour délimiter les grandes unités sismiques dont le faciès sismique interne est cohérent (amplitude, continuité et géométrie des réflecteurs sismiques). Les attributions stratigraphiques des unités sismiques ont été effectuées sur la base des informations cartographiques et bibliographiques (carte géologique de la France au 1/50 000 – Feuille Bolbec – *Ménillet*, 1969a et b ; *Juignet*, 1974 ; *Lasseur*, 2007) et des données de sub-surface disponibles (base de données BSS BRGM / Infoterre ; *Ménillet*, 1969).

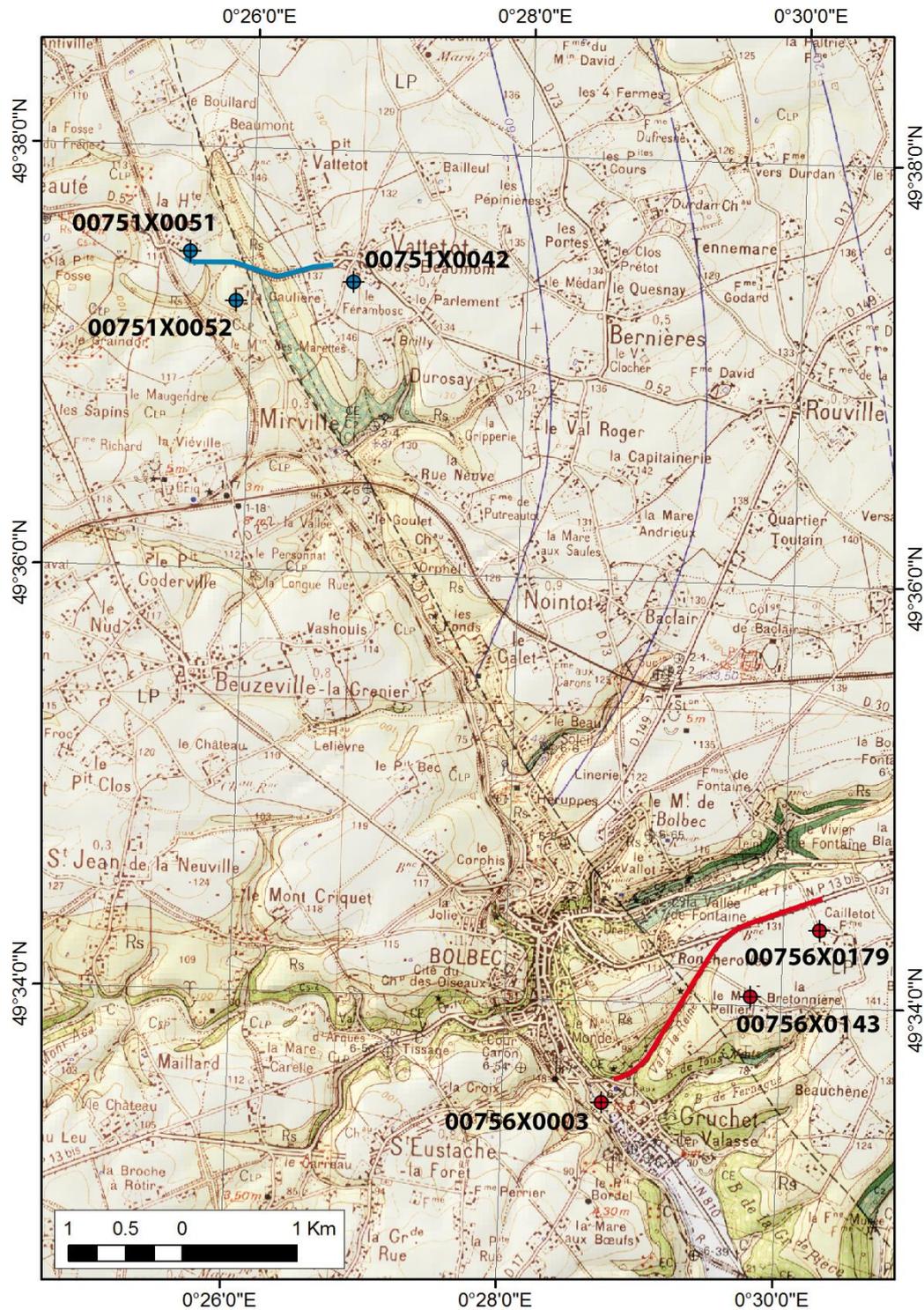


Illustration 50 : Carte de positionnement des profils sismiques 1 (bleu) et 2 (rouge), et des forages de calage stratigraphique (numérotation BSS), sur fond de la carte géologique de la France au 1/50.000 feuille de Bolbec (Ménillet, 1969a). Le tracé de la faille de Fécamp-Lillebonne est figuré en traits interrompus

2.5.2. Résultats et interprétations

Interprétation sismique – aperçu général

Les profils sismiques 01 et 02 présentent des réflecteurs sub-horizontaux, légèrement ondulés et affectés par une large discontinuité sub-verticale. Cet accident est identifié comme étant la faille de Fécamp-Lillebonne, qui était l'un des objectifs à imager lors de ce projet (à l'origine du positionnement et de l'orientation des profils sismiques). La géométrie de cette faille est connue (cf. chapitre 1) avec une orientation N150° et un jeu majeur normal ayant abaissé le bloc SO de l'ordre de 50 à 150 mètres selon les secteurs. Un tel décalage vertical des unités est donc attendu sur les profils.

D'après les profils sismiques, la faille de Fécamp-Lillebonne s'apparenterait davantage à une large zone de déformation de 100 à 200 m de large.

Interprétation sismique - surfaces et unités sismiques principales

L'interprétation permet de mettre en évidence trois unités sismiques sub-horizontales, séparées par deux surfaces majeures (Illustration 51 et Illustration 52). Ces surfaces et unités sont décrites ci-dessous depuis la surface, vers le bas :

- Unité Sismique 1 (US1) : elle est visible sur les 2 profils sismiques, et constitue la première unité visible sous la surface topographique. Elle est caractérisée par un faciès sismique quasiment sourd, avec de rares réflecteurs de faible amplitude. De fait, il est difficile de déceler d'éventuelles géométries sédimentaires au sein d'US1. Sa surface de base (S1) est caractérisée par un réflecteur de très forte amplitude. S1 est reconnue de part et d'autre de la discontinuité sub-verticale attribuée à la faille de Fécamp-Lillebonne et constitue ainsi un bon marqueur du jeu de la faille. US1 présente une forte variabilité de son épaisseur (20-80 m), qui résulte de la déformation liée à la faille de Fécamp-Lillebonne et à l'érosion ayant déterminé la surface topographique en plateau, caractéristique de la zone ;
- Unité sismique 2 (US2) : elle est également visible sur les 2 profils sismiques. Sa surface sommitale correspond à S1 avec une réflexion de forte amplitude. La surface de base S2, également de forte amplitude, est plus irrégulière que S1 et semble déformée (plis et/ou faille). Quelques réflecteurs internes à US2 semblent se terminer en onlap³ sur S2. Mais de manière générale, il est difficile de caractériser le faciès sismique de US2, du fait de la faible épaisseur de l'unité, qui varie entre 10 et 40 m. Il existe néanmoins une tendance de variation d'épaisseur dans US2, avec une tendance à l'amincissement vers l'ouest. Cependant, des variations d'épaisseur sont notables au niveau de la faille de Fécamp-Lillebonne et sur d'autres failles, a priori normales, qui affectent la base de l'unité US2 et l'unité sous-jacente ;
- Unité sismique 3 (US3) : elle est visible sur les deux profils sismiques. Sa surface sommitale correspond à la surface de forte amplitude S2. Elle présente un faciès sismique à réflecteurs continus de moyenne amplitude. La continuité des réflecteurs semble localement interrompue par des failles supposées. Aucune surface de base n'est identifiée pour US3, du fait de l'atténuation du signal vers le bas.

³ Terme utilisé en stratigraphie séquentielle pour définir la géométrie d'un réflecteur sismique caractéristique d'une période de transgression

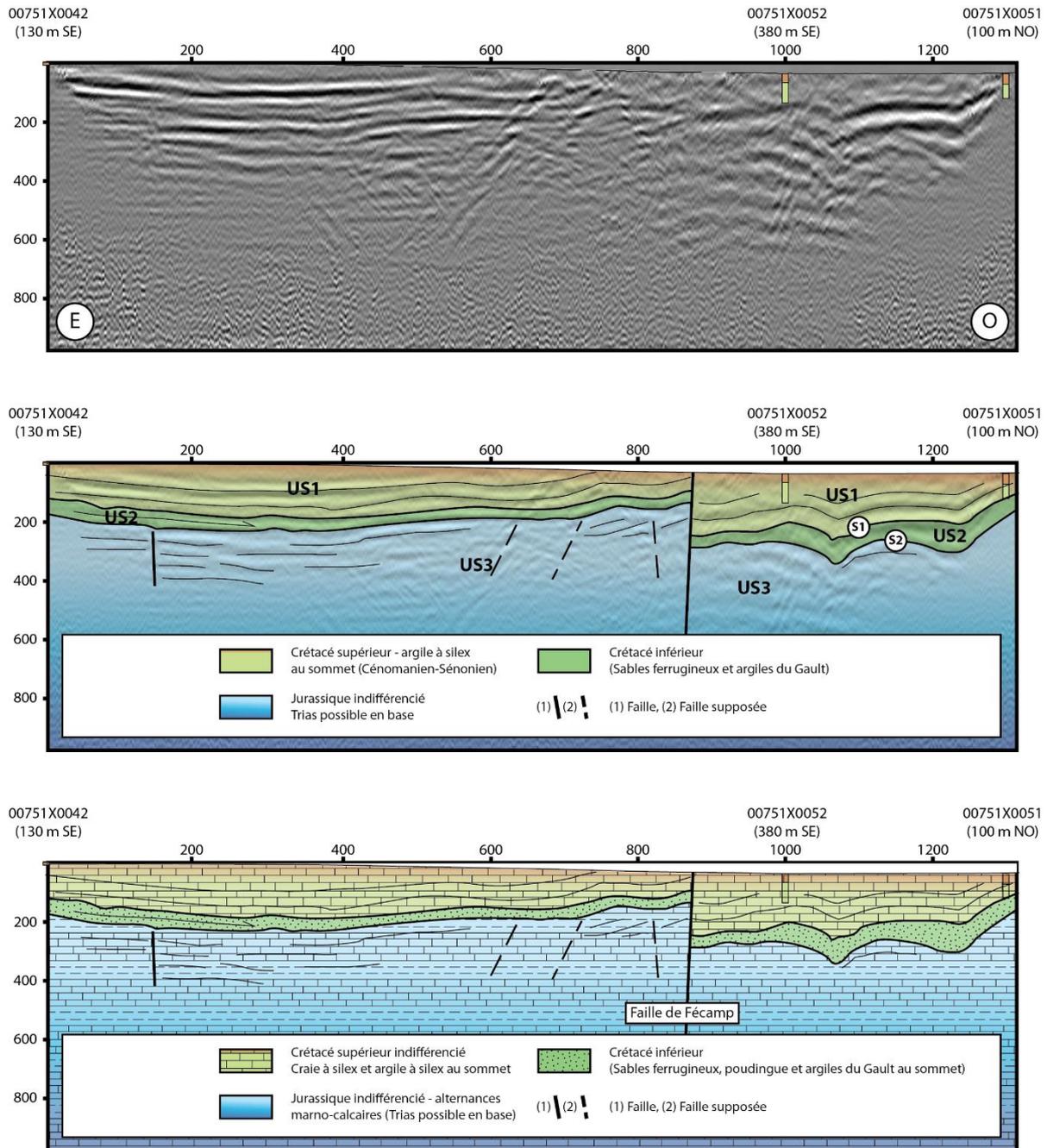


Illustration 51 : Planche d'interprétation du profil sismique 1 (orienté E-O), avec de haut en bas : le profil non-interprété, le profil interprété et habillé en stratigraphie, et le profil interprété et habillé en lithostratigraphie

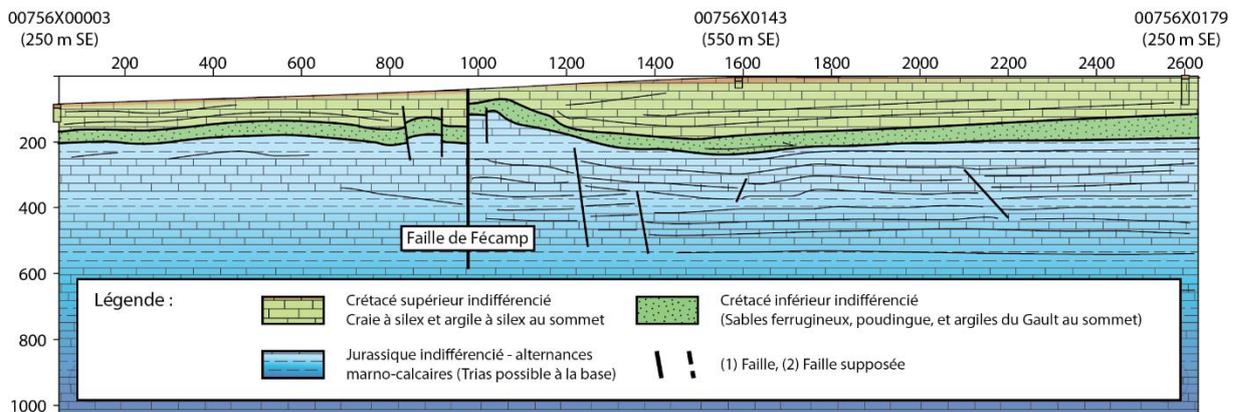
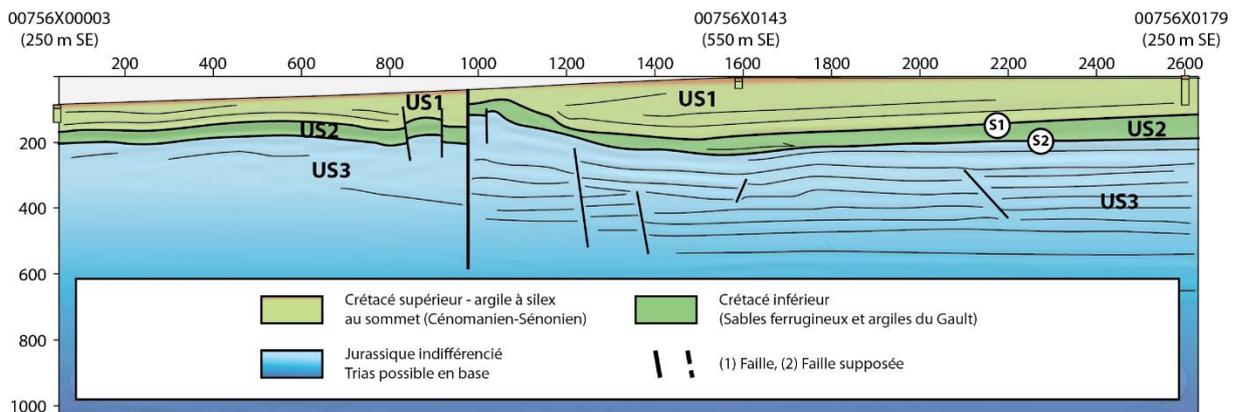
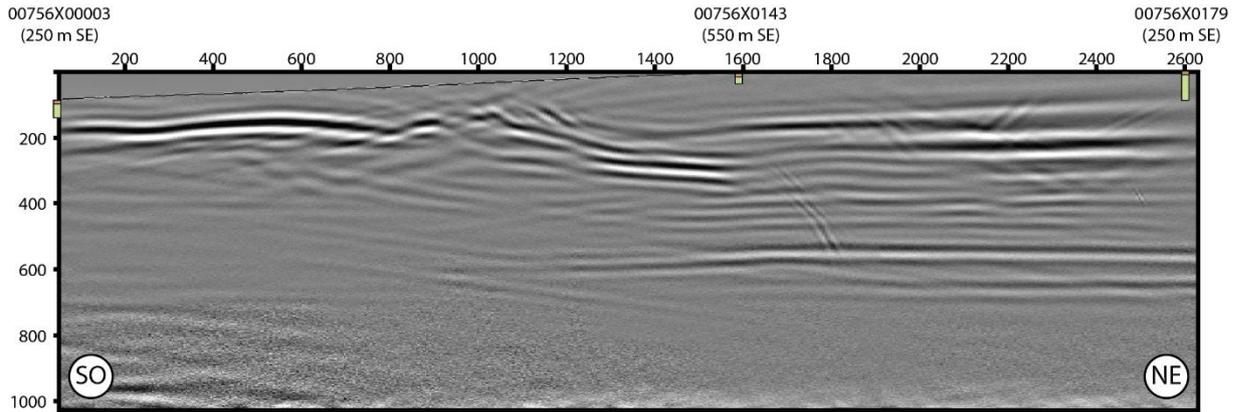


Illustration 52 : Planche d'interprétation du profil sismique 2 (orienté SO-NE), avec de haut en bas : le profil non-interprété, le profil interprété et habillé en stratigraphie, et le profil interprété et habillé en lithostratigraphie

Attributions stratigraphiques prévisionnelles

Les corrélations des unités sismiques et surfaces entre les profils et leurs attributions stratigraphiques sont testées en utilisant les données et informations géologiques disponibles (coupes géologiques des sondages BSS, bibliographie, cartographie géologique).

US1 : l'unité sismique US1 est atteinte par plusieurs sondages (profil 1 : 00751X0042, 00751X0052, 00751X0051 ; profil 2 : 00756X00003, 00756X0143, 00756X0179) situés sur ou à

proximité des profils sismiques (distance projection orthogonale avec la distance indiquée sur les Illustration 51 et Illustration 52). Cette unité US1 y est décrite comme l'ensemble des craies du Crétacé supérieur (Cénomaniens à Santonien). La craie décrite en forage est systématiquement altérée en surface en argile à silex, sur une épaisseur variable, pouvant atteindre localement plusieurs dizaines de mètres ;

US2 : l'unité sismique US2 est atteinte par un sondage sur le profil 1 (00751X0052) situé à 380 mètres du profil. Elle y est décrite comme l'ensemble sableux-argileux du Crétacé inférieur (Aptien-Albien) incluant l'Argile du Gault au sommet. Cette attribution est reportée sur le profil 2 sur la base des caractères sismiques analogues. Les onlaps observés dans US2 sont en accord avec le caractère transgressif des dépôts apto-albiens décrits régionalement et sur l'ensemble du bassin de Paris ;

US3 : l'unité sismique US3 est atteinte par un sondage sur le profil 1 (00751X0052) situé à 380 mètres du profil. Elle y est décrite comme l'ensemble marneux-calcaire du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Cette attribution est reportée sur le profil 2 sur la base des caractères sismiques analogues.

Aspects structuraux

Sur l'ensemble des profils sismiques obtenus, la déformation apparaît sous la forme de (i) failles sub-verticales ou à fort pendage, à jeu apparent normal métrique à hectométrique, ou de (ii) flexures et plissements de faible amplitude et grande longueur d'onde.

L'élément structural majeur visible sur les deux profils sismiques est la zone faillée de Fécamp-Lillebonne (aspect diffus en image sismique) qui affecte l'ensemble de la pile sédimentaire. Elle montre un mouvement relatif abaissant le compartiment sud-ouest avec un rejet de l'ordre de la centaine de mètres. La flexure anticlinale des séries sédimentaires sur le compartiment nord-est, parallèle à la faille est bien observée mais son amplitude et sa longueur d'onde varient spatialement.

Les autres structures faillées de moindre rejet n'affectent a priori que les séries sédimentaires du Jurassique et du Crétacé inférieur. Elles sont compatibles avec les failles observées régionalement et associées à la période d'extension liée à l'ouverture de l'Atlantique (Golfe de Gascogne, rift Manche).

Limites et incertitudes des investigations sismiques

Il est important de signaler que des incertitudes demeurent concernant l'interprétation des deux profils sismiques. En effet, malgré le protocole mis en place pour la réalisation des profils (source sismique ayant un fonctionnement optimal, acquisition de nuit pour minimiser le bruit, interprétation par plusieurs géophysiciens du BRGM, etc.), il ressort que :

- l'environnement du profil est particulièrement bruité (bruit probablement d'origine industriel) ;
- le milieu géologique est très hétérogène et les terrains de sub-surface sont très altérés et/ou fracturés, ce qui a pour conséquence d'atténuer fortement les signaux sismiques (diminution de la résolution et de la profondeur d'investigations) ;

Ce ne sont donc pas les conditions de mesures qui semblent la cause de la qualité des profils sismiques, mais bien l'environnement géologique local qui limite les performances de la sismique.

Il est donc possible de tirer des informations intéressantes sur la nature des formations du proche sous-sol. En effet, il est vraisemblable que la fracturation et/ou l'altération soit importante à proximité immédiate de la faille, et il est même tout à fait possible d'envisager le fait que les profils sismiques longent un couloir de faille, ou au moins une zone particulièrement fracturée, ce qui expliquerait bien la forte hétérogénéité visible dans le profil, et la forte atténuation des ondes. L'hypothèse de la présence, en sub-surface, de terrains sableux (Sables de Lillebonne ?) n'est également pas à exclure.

2.6. MISE EN PARALLELE DES INTERPRETATIONS GEOPHYSIQUES

De manière générale, la mise en parallèle des données sismiques, gravimétriques et électriques met en évidence une très bonne corrélation entre les anomalies, ce qui tend à confirmer leur présence en profondeur. Toutefois, à ce stade des investigations, la nature exacte de ces anomalies ne peut être définie avec certitudes et les différentes hypothèses proposées dans le chapitre 2 devront être vérifiées par sondages de reconnaissance géologique (chapitre 5).

2.6.1. Corrélation des résultats le long du profil ERT1 (bloc nord-est soulevé)

La comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil ERT 1 indique une assez bonne corrélation des anomalies conductrices et d'une anomalie gravimétrique négative au passage du vallon de Bolbec (Illustration 53). Notons toutefois un léger décalage entre l'anomalie gravimétrique négative et le centre de la vallée. Cette anomalie serait située sur le versant, en rive droite de la vallée de Bolbec. Elle correspond à l'anomalie gravimétrique circulaire située au nord du site ORIL et visible sur l'illustration 44, qui d'après nos informations, pourrait être liée soit à la présence d'une ancienne décharge, soit à la présence de vides (marnières), soit à une combinaison des deux. Ces anomalies pourraient également être d'origine lithologique ou hydrogéologique (terrains argileux, présence de la nappe, ...). A ce stade des investigations et sans sondage(s) de calage, il n'est pas possible de statuer sur la nature exacte de ces anomalies géophysiques.

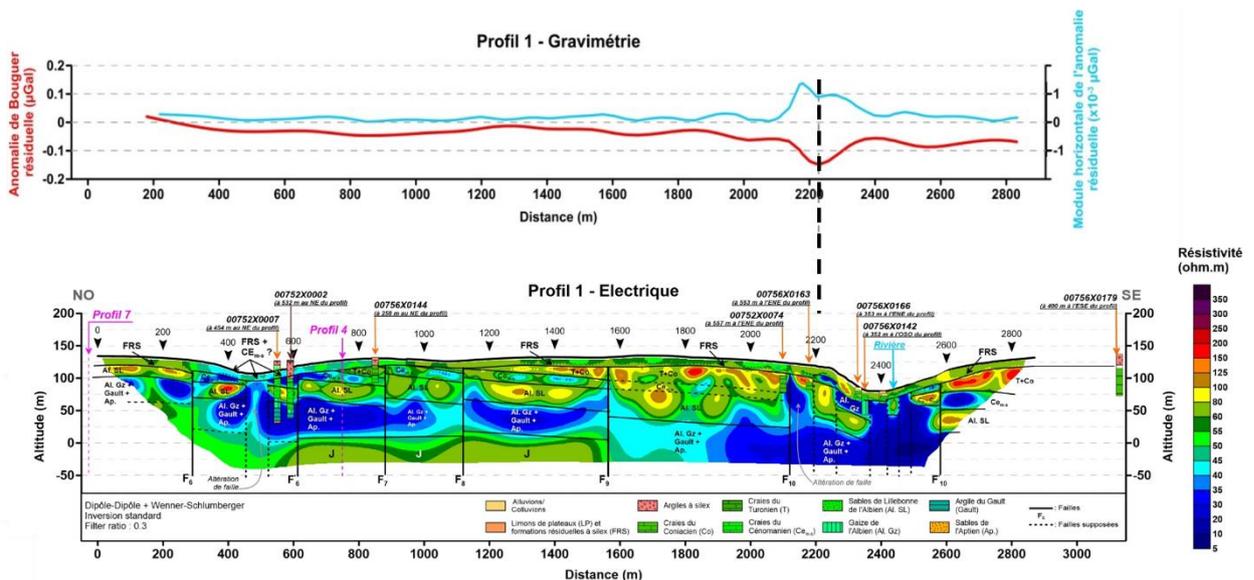


Illustration 53 : Comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil électrique ERT 1 NE-SO

2.6.2. Corrélation des résultats le long du profil ERT4 (orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne)

La comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil ERT4 (Illustration 54), orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne, montre une très bonne corrélation entre une anomalie gravimétrique positive et une anomalie conductrice au passage de la faille F2, qui pour rappel correspond à la faille principale de la structure de Fécamp-Lillebonne.

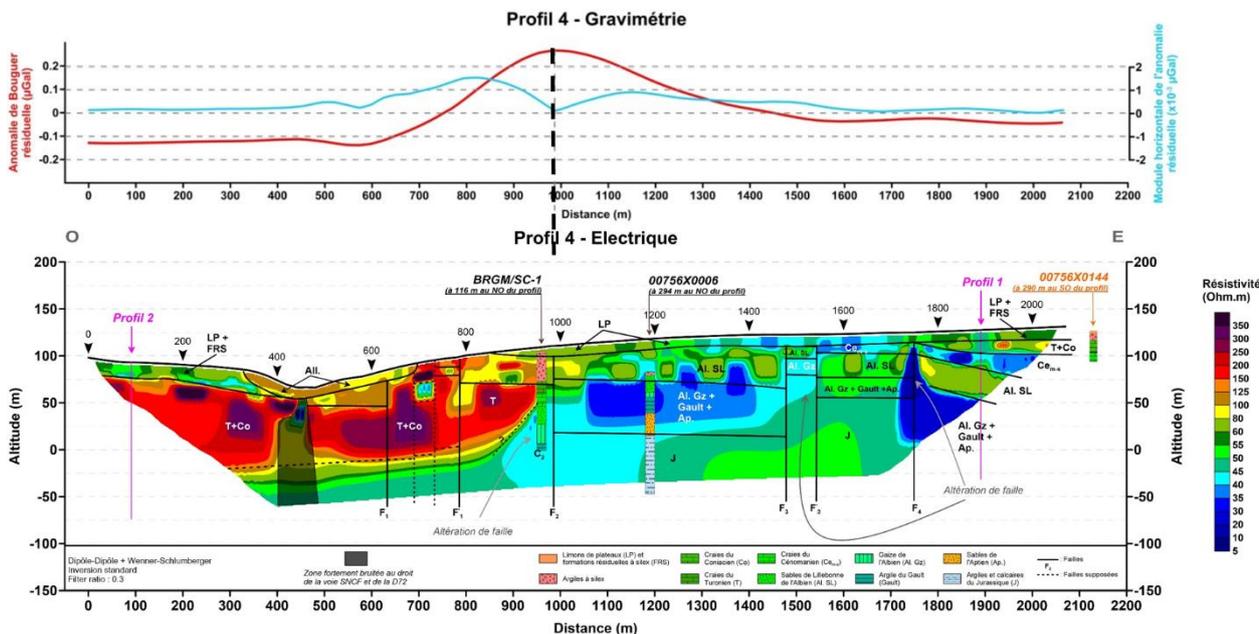


Illustration 54 : Comparaison des données gravimétriques et électriques le long du profil électrique ERT 4

2.6.3. Corrélation des résultats le long du profil ERT3 (orthogonal à la structure de Fécamp-Lillebonne, le long de la RD6015)

Enfin, la mise en parallèle des résultats gravimétriques, électriques et sismiques le long du profil électrique ERT 3 confirme la corrélation des anomalies déjà observées le long du profil ERT 4, dans la mesure où le passage de structure de Fécamp-Lillebonne, assez bien imagé par la sismique, est marqué par une large anomalie gravimétrique positive et une importante anomalie conductrice.

D'un point de vue structural, ces anomalies sont localisées au niveau d'une structure anticlinale, faillée sur son flanc ouest, dont l'axe se situe sur le bloc nord-est soulevé ce qui induit une remontée des terrains du Crétacé inférieur à environ 0 m NGF. Sur ce profil, l'horizon géo-électrique conducteur C1 correspondrait donc à l'unité sismique US2 qui marque la présence des faciès du Crétacé inférieur.

Cette mise en parallèle des résultats des trois méthodes géophysiques confirme le lien qui existe entre les anomalies décelées en gravimétrie et électrique avec le passage de la structure de Fécamp-Lillebonne, bien identifiée sur les profils sismiques. En outre, les horizons géo-électriques semblent se corréler avec les unités sismiques (notamment l'horizon géo-électrique C1 et l'unité sismique 2), ce qui confirme davantage les interprétations.

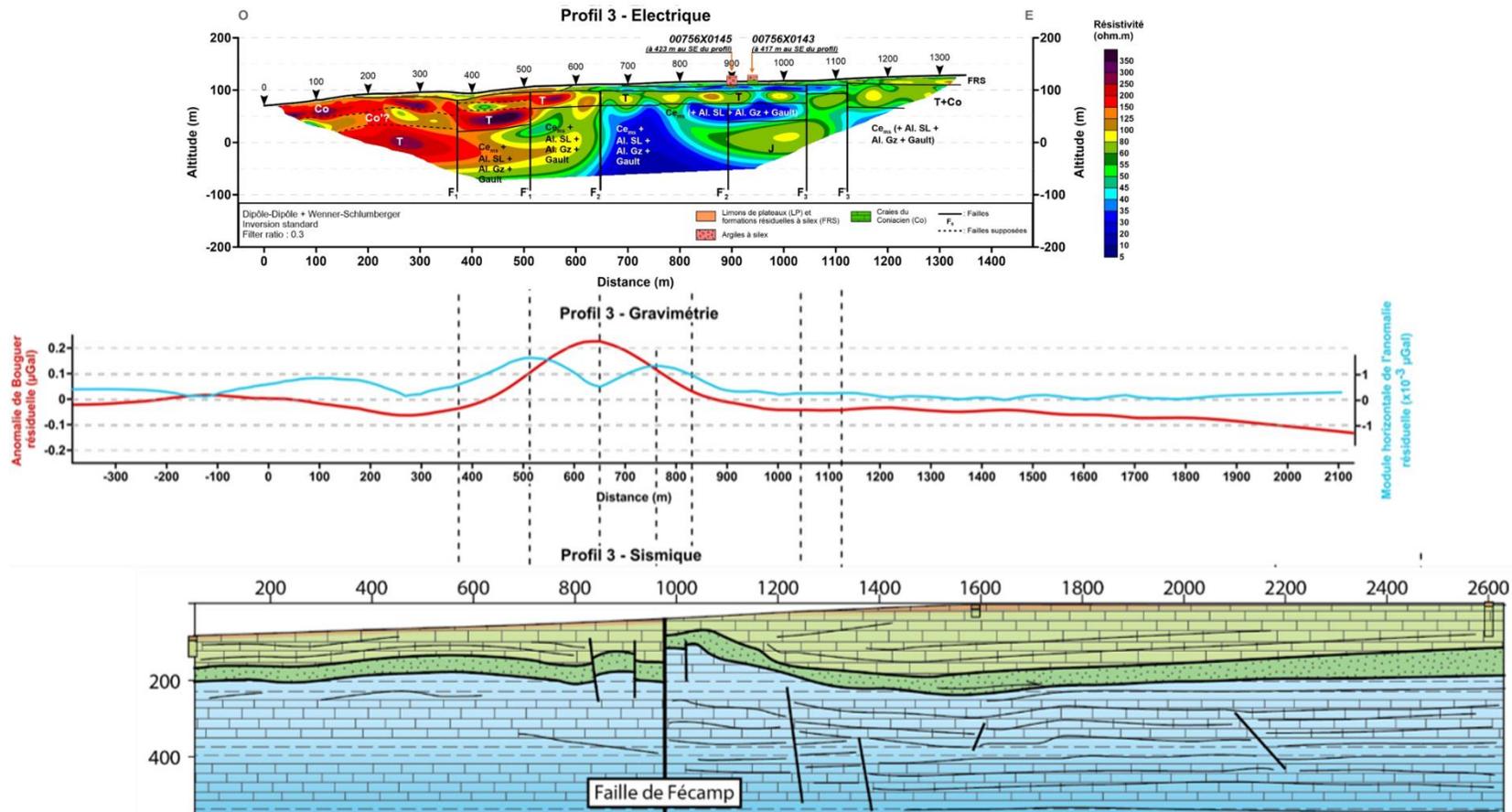


Illustration 55 : Analyse comparée des données gravimétriques, électriques et sismiques le long du profil électrique ERT 3, qui montre une très bonne corrélation entre les résultats au niveau du passage de la faille F2 (faisceau de failles F2 et F2')

3. Investigations géologiques : résultats et interprétations

3.1. SONDAGE CAROTTE SC-1

3.1.1. Objectifs des investigations géologiques

Les investigations géophysiques ont permis d'apporter des éléments nouveaux pour la compréhension du contexte géologique et structural du secteur situé entre Mirville et Gruchet-le-Valasse. Rappelons que les interprétations des données sismiques, électriques et gravimétriques reposent essentiellement sur leur corrélation avec les données géologiques disponibles dans la littérature (thèses, articles, cartes géologiques), et particulièrement sur les forages disponibles dans la Banque du Sous-Sol qui ont permis le calage des profils électriques et sismiques. De fait, les interprétations proposées sont tributaires de la qualité des données disponibles, notamment pour les forages BSS, pour lesquels la précision des informations, et leur qualité, varie d'un ouvrage à l'autre.

Dans le but d'appuyer les interprétations géophysiques, le BRGM a réalisé en janvier 2019 un sondage carotté (SC-1) de 106 m de profondeur situé dans la zone faillée de Fécamp-Lillebonne (Illustration 56), au sein de l'anomalie gravimétrique positive P2 (Illustration 57).

Les objectifs de ce forage sont les suivants :

- Objectif n°1 : valider / réfuter les hypothèses proposées pour expliquer l'anomalie gravimétrique P2 associée à la structure de Fécamp-Lillebonne ;
- Objectif n°2 : caler le profil « géo-électrique » ERT 4 à partir de données géologiques fiables pour une interprétation en profil « géologique » ;
- Objectif n°3 : préciser le rejet de la faille F2 identifiée sur le profil électrique ERT 4 via la corrélation avec le sondage BSS 00756X0006 situé dans le vallon de la Fontaine Palfray ;
- Objectif n°4 : préciser le rejet du faisceau de failles F1 identifié sur le profil électrique ERT 4 via la corrélation avec le sondage de Nointôt réalisé par la CODAH (indice BSS 00752X0209)

Les nouvelles connaissances acquises par les investigations géophysiques ont permis d'établir des recommandations concernant l'extension du réseau de piézo-qualitomètres visant à mieux définir l'extension du panache de pollution en MOR-NMOR, et à mieux caractériser l'impact des structures géologiques sur le comportement de la nappe. Si ces recommandations sont suivies, d'autres forages (destructifs ou carottés) seront réalisés dans le secteur. Chacun d'entre eux permettra également de conforter les interprétations géophysiques, et ainsi affiner davantage la connaissance géologique et structurale du secteur (Illustration 56).

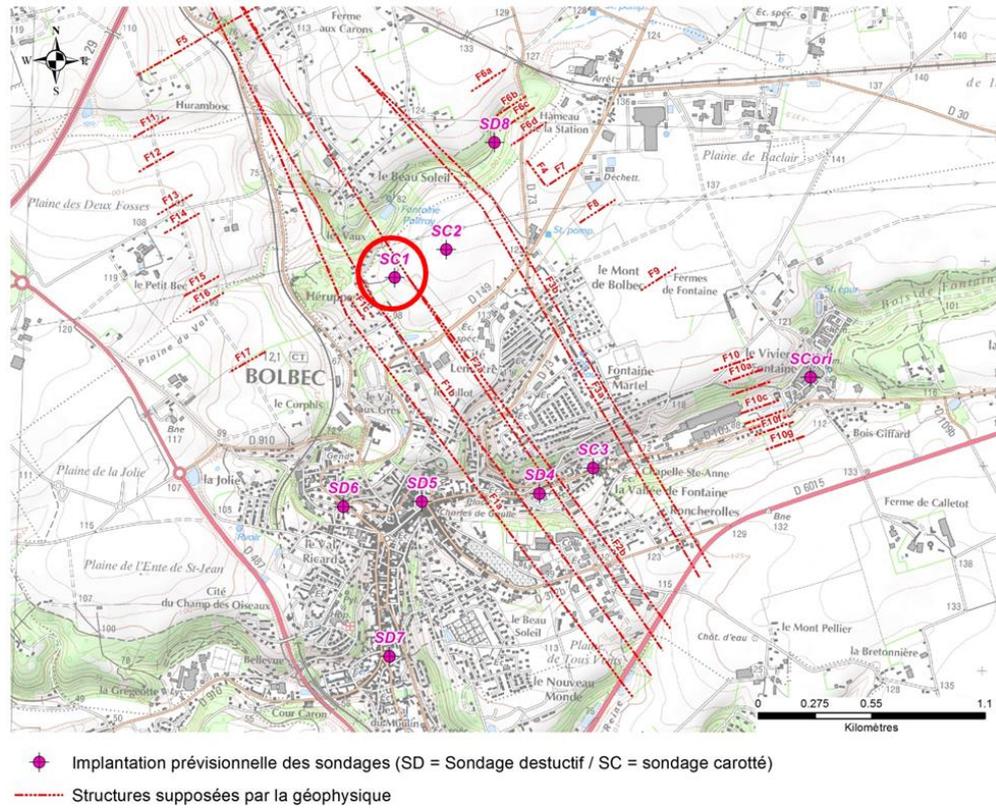


Illustration 56 : Situation du sondage carotté SC-1 réalisé par le BRGM en janvier 2019, et des autres forages destructifs (SD) ou carottés (SC) préconisés par le BRGM

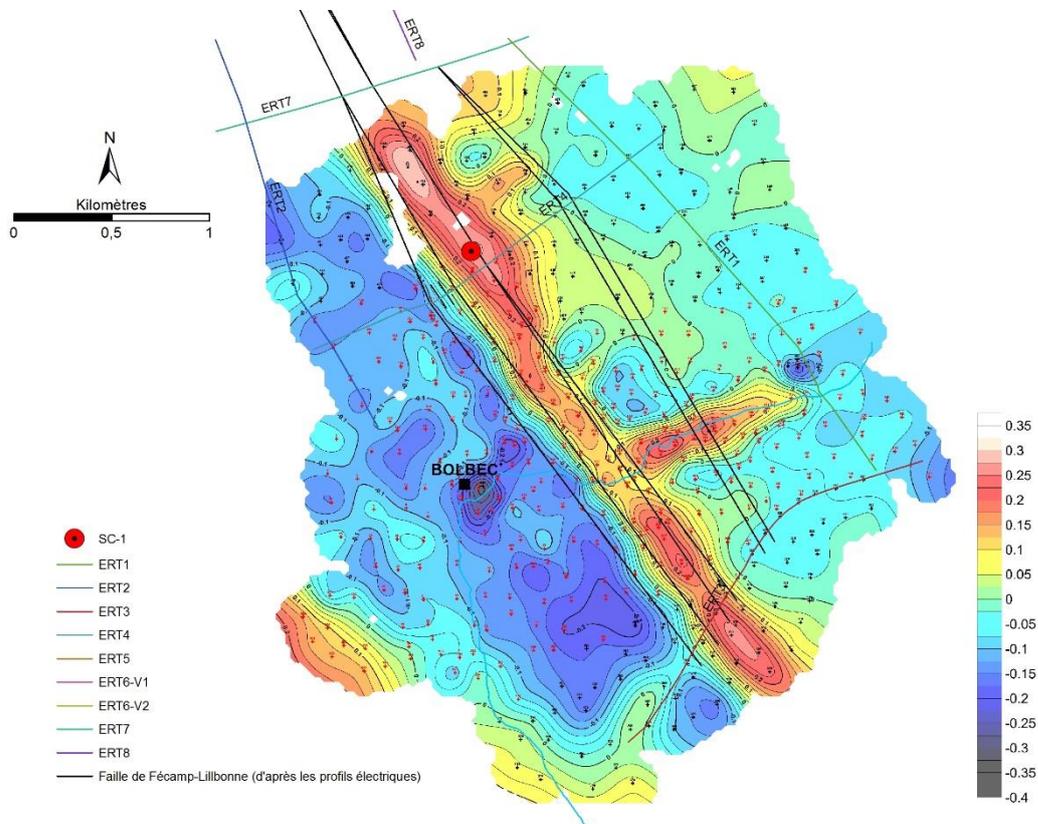


Illustration 57 : Situation du sondage carotté SC-1 vis-à-vis des investigations géophysiques

3.1.2. Déroulé des investigations

Les travaux de foration se sont déroulés en deux temps :

- Du 20 décembre 2018 au 31 janvier 2019 : réalisation d'un sondage carotté (SC-1) de 106 m de profondeur, effectué par l'entreprise GEOTEC à l'aide d'une sondeuse GEO602 en Ø 122,6 mm. Ce sondage est situé aux coordonnées suivantes (Lambert 93, en mètres) : X = 517 057 m ; Y = 6 945 639 m ; Z = 107 m ;
- Suite à une casse survenue lors de l'équipement en piézomètre du sondage SC-1 : réalisation d'un forage destructif à quelques mètres du sondage SC-1 pour la mise en place d'un piézomètre (SC1-bis), effectué par l'entreprise GTR FORAGES à l'aide d'une sondeuse FRASTE X en Ø 330 mm jusque 30 m de profondeur puis en Ø 180 mm jusqu'à 106 m de profondeur. Ce sondage est situé aux coordonnées suivantes (Lambert 93, en mètres) : X = 517 059 m ; Y = 6 945 635 m ; Z = 107 m

Suite à ces travaux de forage, des mesures diagraphiques (gamma-ray et conductivité des terrains) ont été réalisées par l'entreprise LIM LOGGING SA le 19 mars 2019, au niveau du sondage SC1-bis.

3.1.3. Description lithologique du sondage carotté SC-1

Le suivi du sondage carotté SC-1 a été réalisé par le BRGM Normandie, avec l'appui de M. Jacques Ragot, géologue spécialiste du secteur. La description lithologique du sondage et son interprétation stratigraphique est proposé en Illustration 58.

Les terrains traversés sont conformes à la succession stratigraphique connue dans le secteur et décrits dans le paragraphe 1.3, avec notamment (sous l'épaisse couverture d'altérites) :

- la présence d'une craie grisâtre marneuse, noduleuse, sans silex sur une dizaine de mètres d'épaisseur (altérée dans sa partie supérieure), interprétée comme étant la Craie de Fécamp du découpage lithostratigraphique (*Lasseur, 2007*) ou la Craie à *Inoceramus labiatus* du découpage biostratigraphique (*Juignet, 1974 ; Ragot, 1988*) – Turonien inférieur ;
- une craie gris blanchâtre, plus ou moins fracturée et karstifiée, à bancs de silex et hardgrounds, s'enrichissant en glauconie vers la base. Rencontrée sur une dizaine de mètres d'épaisseur, ce niveau est interprété comme étant la Craie de Rouen – Cénomaniens moyen à supérieur ;
- la présence de la Pierre de Fécamp et le niveau de glauconite sur 3,3 m d'épaisseur, caractérisée par un calcaire gréseux très glauconieux caractéristique, interprétée comme un horizon condensé du Cénomaniens inférieur. La base de ce niveau est notamment constituée d'un banc repère riche en coquilles d'huîtres, également observé dans le forage carotté de la CODAH, ou au niveau des affleurements de la Rue Fontaine Martel et du gymnase J. Anquetil à Bolbec – Cénomaniens inférieur ;
- la présence du faciès sableux très glauconieux des Sables de Lillebonne sur 19,5 m d'épaisseur, en remplacement de la Gaize supérieure – Albien supérieur ;
- la Gaize inférieur représentée par un faciès fin, silto-argileux, riche en gros cherts gris bleutés, marquée à la base par un niveau de glauconite sableuse – Albien supérieur,

- les argiles du Gault représentées par leur faciès caractéristique d'argiles silteuses sombres et compactes – Albien supérieur.

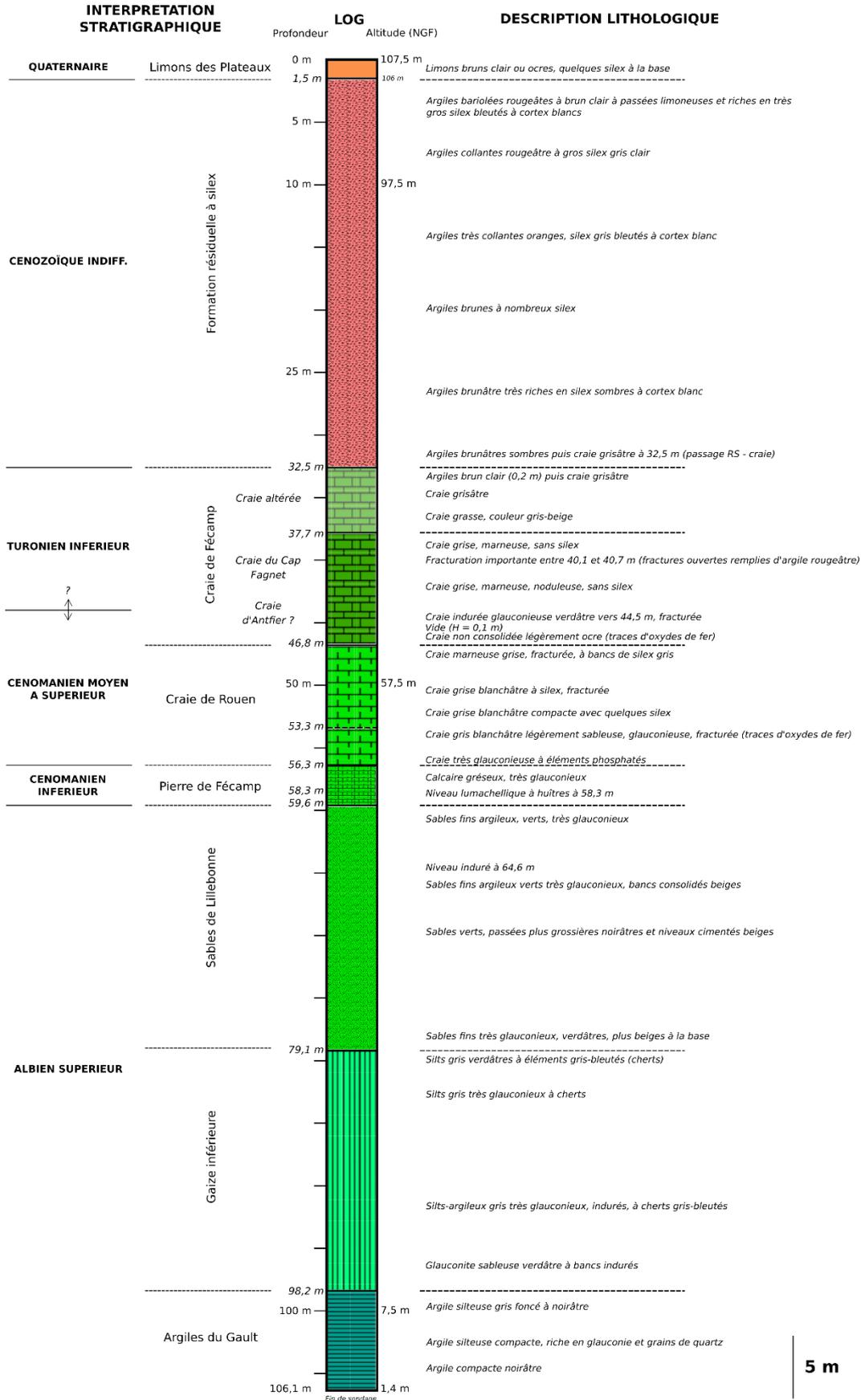


Illustration 58 : Description lithologique du sondage carotté SC-1, réalisé par le BRGM en janvier 2019

3.1.4. Analyse des données diagraphiques

Deux types de mesures diagraphiques ont été enregistrées au niveau du sondage SC1-bis, situé à quelques mètres du sondage carotté SC-1 :

- Radioactivité naturelle (Gamma-ray) : exprimée en API (American Petroleum Institute – unité standard), cette mesure est directement liée à la teneur en argile des formations géologiques (présence de potassium) et est donc sujette aux variations lithologiques (argiles, marnes, craies etc.) ;
- Conductivité des terrains : exprimée en mmho/m, cette mesure donne des indications sur la capacité des terrains à laisser passer un courant électrique. Il s'agit de l'inverse de la résistivité, mesurée sur les profils électriques (cf. 2.4). Cette mesure donne des indications sur la lithologie des terrains, et sur leur compacité.

L'illustration 59 propose la corrélation entre la description lithologique du sondage carotté SC-1 et son interprétation stratigraphique avec les valeurs de gamma-ray et de conductivité des terrains mesurés sur SC1-bis. Pour rappel, ces deux sondages sont distants de quelques mètres.

Gamma-ray

La Formation résiduelle à silex est représentée par des valeurs de gamma-ray variant de 40 à 80 API, caractéristique d'une formation argileuse. A partir de 27 - 28 m de profondeur, les valeurs de gamma-ray chutent jusqu'à être inférieures à 30 API, ce qui traduit le passage vers les craies altérées sous-jacentes, dans lesquelles les valeurs de gamma-ray restent voisines de 30 à 35 API. Notons qu'il existe un décalage d'environ 3 m entre la limite RS-craie identifiée sur le sondage SC-1 avec le log gamma-ray de SC1-bis, ce qui traduit une variation rapide d'épaisseur de la Formation résiduelle à silex entre ces deux ouvrages et donc la géométrie en « dents de scie », caractéristique de la surface RS-craie altérée.

Sous l'horizon altéré, les valeurs de gamma-ray chutent vers 40 m de profondeur, pour atteindre des valeurs de l'ordre de 7 à 8 API, ce qui se traduirait par des craies peu argileuses, pourtant d'aspect « marneuse » en sondage et attribuées à la Craie de Fécamp. Notons que cette chute des valeurs de gamma-ray pourrait être liée à la présence de la nappe, puisqu'il y a une très bonne corrélation entre l'altitude du niveau piézométrique et la baisse du gamma-ray. Sous cet horizon, les valeurs de gamma-ray remontent jusqu'à atteindre des valeurs homogènes de l'ordre de 25 à 30 API. D'après l'interprétation stratigraphique du sondage SC-1, ce changement semble être associé au passage Turonien inférieur – Cénomaniens supérieur à moyen (passage vers la Craie de Rouen).

Le passage Craie de Rouen - Pierre de Fécamp est bien marqué par une hausse des valeurs de gamma-ray qui atteint 85 API.

Le passage vers les Sables de Lillebonne sous-jacents n'est pas net, les valeurs de gamma-ray étant toujours voisines de 75 API. Vers 75 m de profondeur, les valeurs de gamma-ray chutent progressivement à mesure que l'on quitte la formation sableuse pour atteindre la Gaize inférieure, dans laquelle les valeurs de gamma-ray oscillent entre 40 et 50 API.

Enfin, le passage Gaize inférieure – Gault est parfaitement marqué sur la courbe du gamma-ray par un pic atteignant 95 API.

Conductivité des terrains

La conductivité de la Formation résiduelle à silex est très forte et homogène ce qui traduit des terrains argileux. Les valeurs de conductivité chutent vers 30 m de profondeur, ce qui marque le passage à la craie altérée sous-jacente. Le passage vers la craie saine s'enregistre par une hausse progressive des valeurs de conductivité, qui semblent plus élevées pour la Craie de Rouen que pour la Craie de Fécamp sus-jacente. Le passage entre la Craie de Rouen et la Pierre de Fécamp est marquée par une baisse brutale de la conductivité, ce qui traduit le passage d'une craie à un calcaire gréseux identifié en sondage.

Le passage Pierre de Fécamp – Sables de Lillebonne est marqué par une augmentation des valeurs de conductivité. Le passage entre les Sables de Lillebonne et la Gaize inférieure est caractérisé par une baisse des valeurs de conductivité, qui restent homogènes sur toute l'épaisseur de gaize.

Enfin, le passage entre la Gaize inférieure et les argiles du Gault est marqué par un pic de la conductivité.

L'analyse comparée du log géologique de SC-1 et des logs gamma-ray et conductivité effectués sur SC1-bis, séparés de quelques mètres (Illustration 59) montre qu'il existe une bonne voire une très bonne corrélation entre les changements de faciès identifiés en sondage et les valeurs de gamma-ray et de conductivité, particulièrement pour :

- le passage entre la Craie de Rouen et la Pierre de Fécamp qui est marqué par une hausse brutale du gamma-ray corrélée à une baisse de la conductivité, ce qui traduit un changement important de lithologie (passage d'une craie à silex à un calcaire gréseux compact) ;
- le passage entre la Gaize inférieure et les Argiles du Gault est marqué par un pic de gamma-ray associé à une hausse de la conductivité, ce qui traduit le passage vers une formation très argileuse ;

Ces données ont donc été utilisées pour caler le profil électrique ERT 4, qui passe à proximité du sondage SC-1, et ainsi affiner l'interprétation géologique des autres profils électriques (cf. 3.3.1).

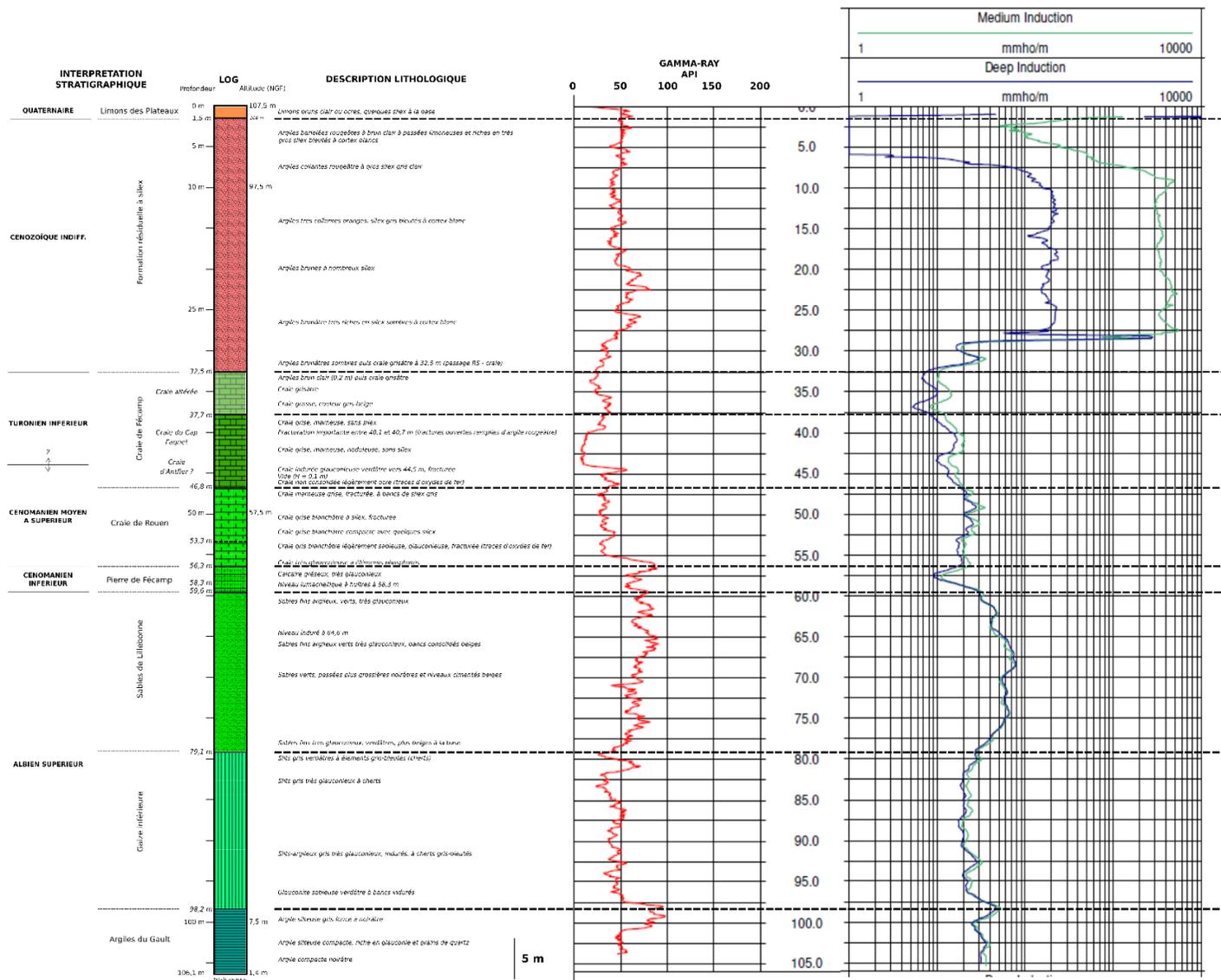


Illustration 59 : Corrélation des données lithologiques et diagraphiques pour le sondage carotté SC-1

3.2. DONNEES D’AFFLEUREMENTS

En complément de l’étude du sondage carotté SC-1, deux affleurements ont été étudiés par le BRGM. Il s’agit de l’affleurement dit de la rue Fontaine Martel à Bolbec (déjà décrit par Ragot dans sa thèse en 1988), et de l’affleurement situé derrière le gymnase Jacques Anquetil à Bolbec. La description de ces deux affleurements et leur interprétation stratigraphique permet de compléter / préciser les informations fournies par les sondages du vallon de Bolbec afin d’affiner les connaissances géologiques et structurales du secteur (cf. chapitre 4.1).

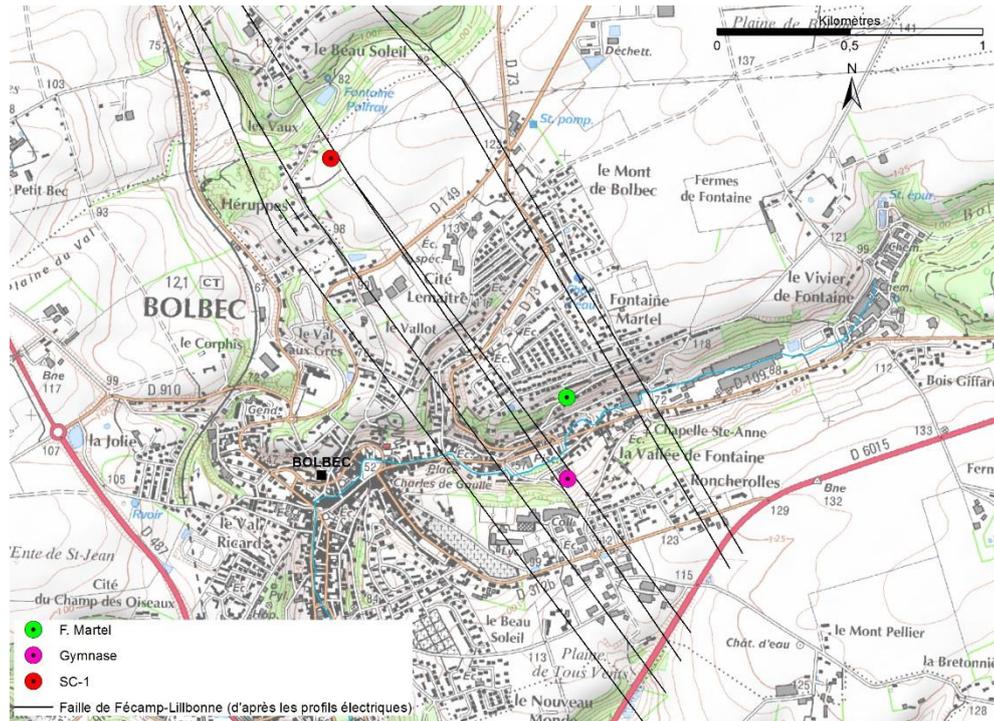


Illustration 60 : Situation des deux affleurements étudiés par le BRGM dans le vallon de Bolbec, vis-à-vis du sondage SC-1 et des structures mises en évidence par la géophysique

3.2.1. Affleurement de la rue Fontaine Martel (Bolbec)

Cet affleurement, orienté ouest-est (parallèle à la vallée de Bolbec), permet d’observer de haut en bas :

- la Pierre de Fécamp, horizon condensé du Cénomaniens inférieur, caractérisé par un calcaire gréseux compact, très glauconieux, ici épais d’environ 2 m ;
- le banc lumachelique à coquilles d’huîtres (*P. vesiculosa*), épais d’une trentaine de centimètres (Cénomaniens inférieur) ;
- la partie supérieure des Sables de Lillebonne (Albien supérieur) ;

A noter que ces trois niveaux ont été rencontrés dans le sondage carotté SC-1 sous les mêmes faciès. L’altitude du passage entre le banc lumachelique, qui correspond à la base de la Pierre de Fécamp du Cénomaniens inférieur, avec les Sables de Lillebonne (Albien supérieur) a été levé au GPS pour permettre d’effectuer une corrélation précise entre le sondage SC-1, les

observations de l’affleurement du gymnase J. Anquetil, et les données disponibles en sondage, ce qui a permis d’affiner les rejets des structures cassantes du secteur (cf. chapitre 4).

3.2.2. Affleurement du gymnase J. Anquetil (Bolbec)

Il s’agit d’un affleurement orienté ENE-OSO (parallèle à la vallée de Bolbec), qui permet d’observer les formations suivantes : des faciès crayeux plus ou moins glauconieux, la Pierre de Fécamp et le banc lumachelique, les Sables de Lillebonne. La qualité d’affleurement est assez médiocre, mais la disposition verticale et latérale de ces trois formations indique que nous sommes soit en présence d’une structure faillée (difficile à estimer précisément en raison de la mauvaise qualité d’affleurement, mais qui semble être de faible rejet), soit dans un bloc à fort pendage vers l’OSO. En effet, de l’ENE vers l’OSO (d’amont en aval de la vallée), sur une distance de 60 m environ et à une altitude constante, il est possible d’observer successivement les Sables de Lillebonne, puis la Pierre de Fécamp et le banc lumachelique à huîtres, un niveau de glauconite sus-jacent à la Pierre de Fécamp, puis un faciès crayeux glauconieux, et enfin des craies blanchâtres marneuses dépourvues de glauconie.

Notons que les niveaux de glauconite sus-jacents à la Pierre de Fécamp et la craie « glauconieuse » sont séparés par deux « veines » subverticales d’argiles brun-ocres sans éléments, parallèles, et larges de 0,3 à 0,5 m. Leur origine est inconnue, mais il pourrait s’agir de diaclases ou de petites failles argilisées. Leur orientation semble orthogonale au versant, soit approximativement NO-SE (parallèle à la structure de Fécamp-Lillebonne). A l’ouest immédiat de ces deux « veines » d’argile, la craie présente une texture marneuse, collante, altérée où les nombreuses petites fractures argilisées lui donnent une teinte beige. Ces observations traduisent l’état de fracturation et d’argilisation de la craie aux abords des principales failles, ce qui pourrait avoir une incidence sur les écoulements souterrains.

L’altitude des principaux niveaux repères ont été levés au GPS pour pouvoir effectuer des corrélations précises entre les données de sondages et les affleurements.

3.3. UTILISATION DES INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES POUR UNE NOUVELLE INTERPRETATION DES DONNEES GEOPHYSIQUES

3.3.1. Calage du profil électrique ERT 4 et réinterprétation des profils électriques

Le sondage carotté SC-1 a été réalisé à une centaine de mètres du profil électrique ERT 4, ce qui a permis de l’utiliser pour caler les résultats de l’électrique et ainsi fiabiliser l’interprétation des horizons géo-électriques en formations lithologiques.

Ainsi, la projection du sondage SC-1 sur le profil électrique a notamment permis de valider le passage Turonien – Cénomaniens, qui correspond à un passage de formations résistantes (Turonien) à conductrices (Cénomaniens). A noter que la réinterprétation du profil ERT 4 a validé le fort pendage vers l’ouest / sud-ouest des formations turoniennes et anté-turoniennes situées dans le bloc compris entre les failles F’1 et F2.

Concernant les formations du Cénomaniens inférieur et de l’Albien supérieur, la projection du sondage SC-1 sur le profil ERT 4 indique des valeurs de résistivité assez faibles et relativement proches, ce qui rend difficile la différenciation de ces formations.

Une nouvelle interprétation de chaque profil électrique a donc été réalisée sur la base du calage SC-1 – ERT 4 (cf. chapitre 2.4.2).

3.3.2. Origine des anomalies gravimétriques P2, P4, P5 et P6

Pour rappel, les investigations gravimétriques avaient mis en évidence un axe lourd (P2) orienté N150° calé sur le tracé de la faille de Fécamp-Lillebonne. 6 hypothèses avaient été proposées pour expliquer cette anomalie gravimétrique (cf. chapitre 2.3.3) :

- Une argilisation massive de la zone faillée ;
- La présence de méga-karsts calés sur la structure de Fécamp-Lillebonne, partiellement ou totalement remplis de matériaux argilo-sableux plus denses (formation résiduelle à silex, formations tertiaires) ;
- La présence d'un axe anticlinal sur la bordure Est de l'accident de Fécamp-Lillebonne qui fait remonter en proche sous-sol les formations sablo-argileuses ou argilo-sableuses détritiques riches en glauconie de la base du Cénomaniens (faciès glauconieux) et du Crétacé inférieur, qui sont plus denses que les formations crayeuses ;
- La bréchification de la craie située dans la zone faillée accompagnée d'une re-cimentation par des matériaux plus denses (calcite ?) ;
- La conservation de matériaux post-crétacés essentiellement sableux et plus denses (Sables grésifiés, blocs de grès), à la faveur d'une structure synforme (structure en graben ou synclinal ?) ;
- Un sur-épaississement de la Formation Résiduelle à silex aux abords de la structure ;

Suite à la réalisation du sondage carotté SC-1, situé au cœur de l'anomalie gravimétrique P2, il apparaît que seules deux hypothèses paraissent encore plausibles :

- la présence d'un axe anticlinal en bordure orientale de l'accident ;
- le sur-épaississement de la Formation Résiduelle à silex.

En effet, au centre de l'anomalie positive, le sondage a traversé une série stratigraphique « classique » pour le secteur, sans rencontrer de karsts majeurs, ni de zones massivement argilisées, bréchifiées ou calcifiées ou de formations post-crétacées sableuses ou gréseuses.

A ce stade des investigations, l'hypothèse à privilégier pour expliquer l'anomalie P2 serait donc la présence d'une structure antiforme (anticlinal ou horst ?), orientée N150°, faillée et située sur le bord nord-est de la structure de Fécamp-Lillebonne, potentiellement associée à un sur-épaississement des altérites. Cette structure serait à l'origine d'une remontée des terrains plus denses de la base du Cénomaniens et de l'Albien en sub-surface. Les données gravimétriques, électriques (ERT 4 notamment) et sismiques, ainsi que les données bibliographiques disponibles sur les structures du secteur (anticlinal de Bolbec, de Fécamp, de Grainville-Ymauville, hors de Vattetot) ou ailleurs en Seine-Maritime (anticlinal de Rouen, de Vernon, de Yerville), tendent en la faveur de cette hypothèse. En effet, toutes ces structures sont associées à une faille majeure N150° (faille de la Seine pour les anticlinaux de Vernon, de Rouen et de Yerville ; faille de Fécamp-Lillebonne pour les anticlinaux de Grainville-Ymauville, de Bolbec, de Fécamp et le horst de Vattetot), et toutes sont situées sur le bord nord-est surélevé.

Concernant les anomalies positives P4, P5 et P6 mesurées dans les principales vallées et vallons du bloc NE surélevé (cf. Illustration 46), elles semblent bien liées à la présence de matériaux denses associés aux faciès de la base du Cénomaniens inférieur et de l'Albien supérieur (Pierre

de Fécamp et Sables de Lillebonne), puisque ces formations affleurent largement dans le fond de ces vallons (cf. chapitre 4), et que leur zone d’affleurement coïncide assez bien avec la présence des anomalies positives.

4. Exploitation et corrélation des données géologiques et géophysiques à l'échelle de la zone d'étude

4.1. PROPOSITION DE COUPES GEOLOGIQUES DES VALLEES DE BOLBEC ET DE PALFRAY

L'objectif de ce chapitre est de préciser, dans la mesure du possible, la géométrie des formations géologiques qui constituent le sous-bassement des vallées de Bolbec et du Commerce, à partir de la corrélation :

- De données d'affleurements (observations de terrain, données de thèses ou de publications) ;
- De données de forage : données d'archives (Banque du Sous-Sol) et données inédites (forage carotté SC-1 réalisé par le BRGM en janvier 2019) ;
- Des résultats des investigations géophysiques présentées dans le chapitre 2.

Deux coupes ont ainsi été réalisées (Illustration 61) : l'une est longitudinale à la vallée de Bolbec, l'autre au vallon Palfray. L'objectif de ces coupes, qui sont orthogonales à la faille de Fécamp-Lillebonne, est de préciser la géométrie et les rejets de la structure, ainsi que la compartimentation des formations géologiques qui constituent le sous-bassement de la vallée.

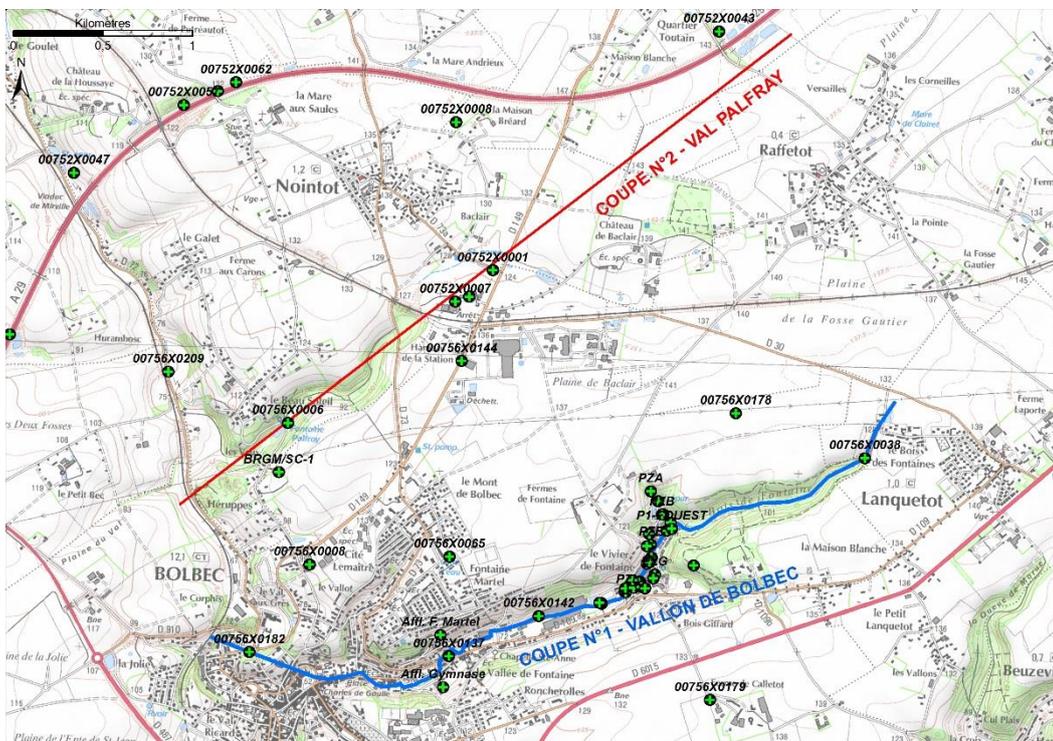


Illustration 61 : Localisation des coupes n°1 et 2

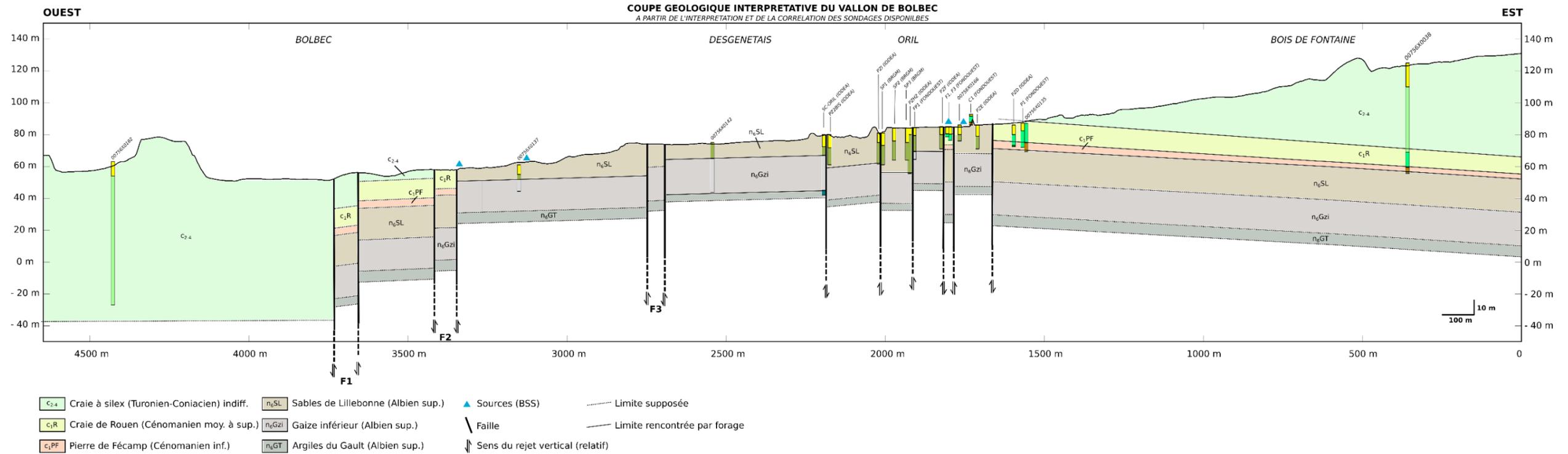


Illustration 62 : Coupe géologique synthétique du vallon de Bolbec (coupe n°1). A noter que seules les failles couvertes par les investigations géophysiques ont été nommées (F1, F2 etc.). Les formations superficielles ne sont pas représentées

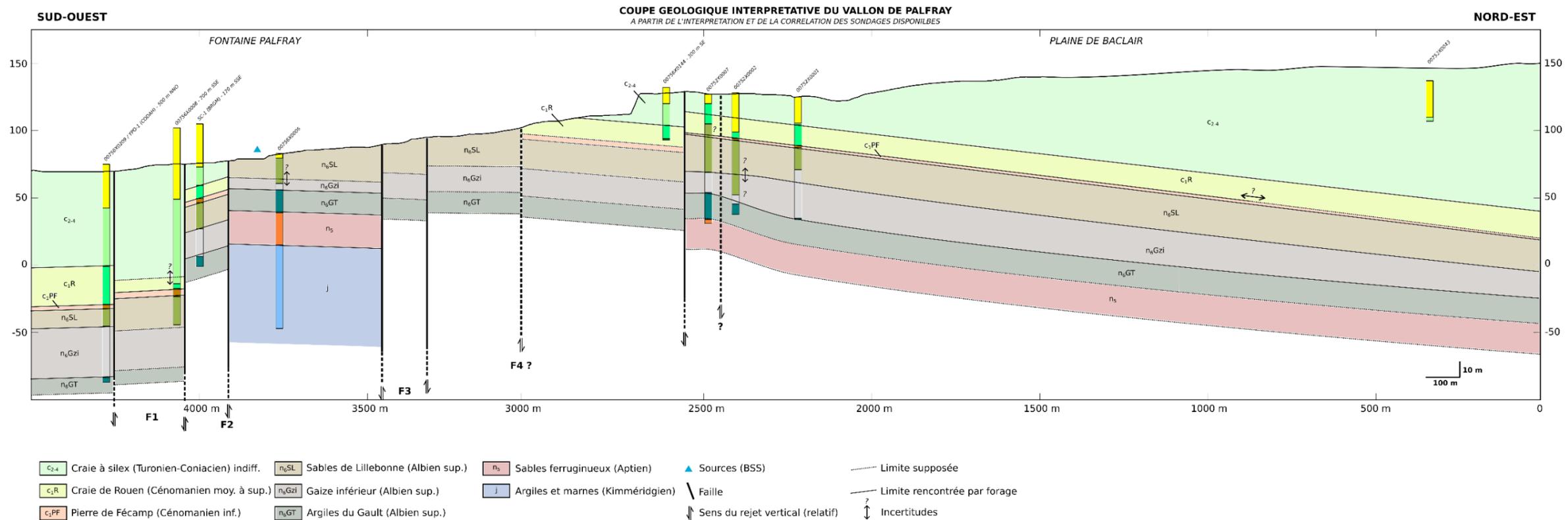


Illustration 63 : Coupe géologique synthétique du vallon Palfray (coupe n°2). A noter que seules les failles couvertes par les investigations géophysiques ont été nommées (F1, F2 etc.). Les formations superficielles ne sont pas représentées

4.2. PROPOSITION D'UN NOUVEAU SCHEMA STRUCTURAL

L'interprétation et la corrélation des investigations géologiques, gravimétriques, électriques et sismiques permet de proposer un nouveau schéma structural sur le secteur de Bolbec (Illustration 64).

Cette carte apporte un éclairage nouveau sur la structure de Fécamp-Lillebonne et les structures associées, avec notamment des informations inédites sur :

- La structure en faisceau de la faille de Fécamp-Lillebonne, constituée de 3 à 4 faisceaux de failles (F_1 , F_2 , F_3 et potentiellement F_4), eux-même constitués de plusieurs failles normales (rejet apparent actuel) à regard vers le SE, dont le nombre et la valeur de rejet vertical varient le long de la structure, qui isolent des blocs parfois basculés, géométries cohérentes avec celles proposées par Ragot (1988) ;
- La présence d'une structure antiforme dissymétrique faillée sur le bord nord-est surélevé de la structure, axée N150°, à l'origine de la remontée en sub-surface des formations de la base du Crétacé supérieur et du Crétacé inférieur et d'un pendage général des couches vers le NNE. Cette structure s'intègre dans la continuité sud de l'anticlinal de Grainville-Ymauville, de Bolbec et du horst de Vattetot-sous-Beaumont ;
- La présence de deux « grabens », orientées NE-SO, axées sur le vallon de la Fontaine Palfray et sur la vallée de Bolbec. A noter que pour le « graben du vallon Palfray », la zone de croisement de sa faille bordière nord (F_6) avec le faisceau de faille F_2 de la structure de Fécamp-Lillebonne est associée à la présence de la bétouille de « Beau Soleil », également située au cœur de l'anomalie gravimétrique positive P2. La zone d'intersection de ces structures présente probablement une densité plus grande de fractures, ce qui a pu favoriser les processus de karstification. Concernant le « graben de la vallée de Bolbec », il est situé dans l'axe des dépôts tertiaires de la sablière d'Herrupples, dans la continuité sud-ouest d'une structure synclinale identifiée par Hauchard et al. (2002) et dans la continuité nord-est d'une faille à pendage nord-ouest identifiée par Hauchard et al. (2002). Ces informations tendent donc à proposer une continuité de cette structure vers le SO et vers le NE. Le même type de prolongation est supposé pour le graben du vallon Palfray. Ces grabens sont probablement à l'origine du creusement de ces deux vallées, en ayant eu un rôle de drain préférentiel pour les écoulements souterrains et de surface. On peut supposer le même mode formation pour les autres vallons et vallées orientés NE-SO situés entre Bolbec et Notre-Dame-de-Gravenchon ;
- La présence d'une faille mineure environ NNE-SSO à NE-SO (située dans l'axe de la vallée de la Fontaine Murée), identifiée sur le profil ERT5 dans le vallon de l'Abbaye, à pendage SE et à l'origine d'un rejet vertical pluri-métrique;

En outre, ces investigations ont permis de valider la présence de structures supposées par l'analyse des linéaments, et notamment :

- La faille dite du « galet », située au nord de Bolbec, identifiée par Chollet et Firmin (1945), avec un pendage nord-ouest et un rejet vertical de l'ordre de 25 m ;
- La présence d'une faille NE-SO, à pendage nord-ouest d'après le profil ERT1, avec un rejet vertical décimétrique. Son jeu horizontal dextre est appuyé par un décalage de l'anomalie gravimétrique positive P2. Cette faille est située à l'emplacement d'un

linéament identifié par photo-interprétation par le CPGF en 1978 et à proximité d'une faille déjà identifiée par Hauchard et al. (2002) à pendage NO ;

Cette carte témoigne de la complexité structurale de la zone située entre Mirville et Lillebonne, héritée du polyphasage tectonique sur des structures de nature, d'âge et d'orientations différentes. Cette activité tectonique a conditionné la nature et la géométrie des dépôts albiens et cénomaniens (cas de la Pierre de Fécamp et des Sables de Lillebonne notamment), et plus récemment la mise en place d'un système karstique très développé, calé sur la structure de Fécamp-Lillebonne.

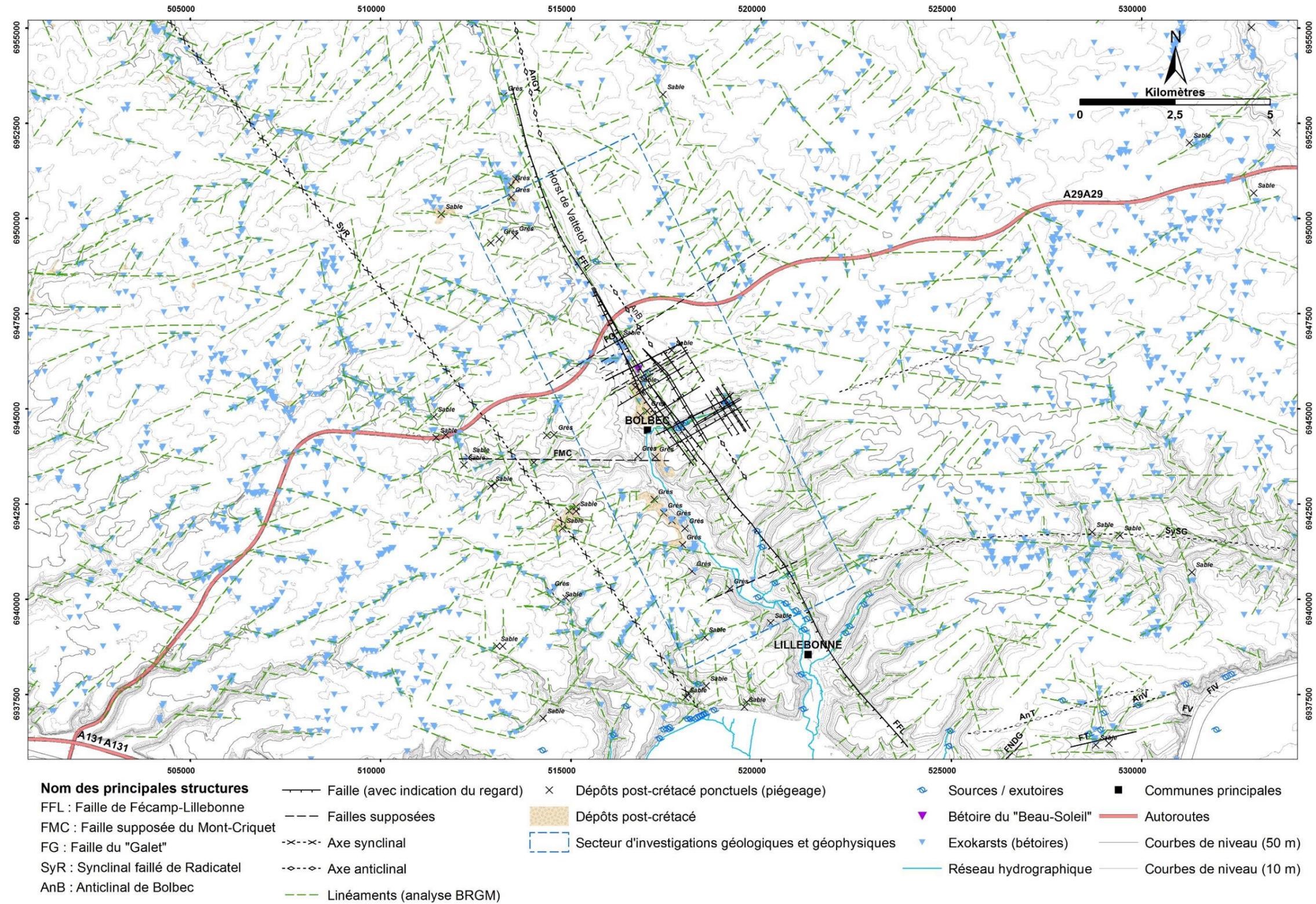


Illustration 64 : Proposition du nouveau schéma structural pour la zone d'étude, entre Notre-Dame-de-Gravenchon et Mirville

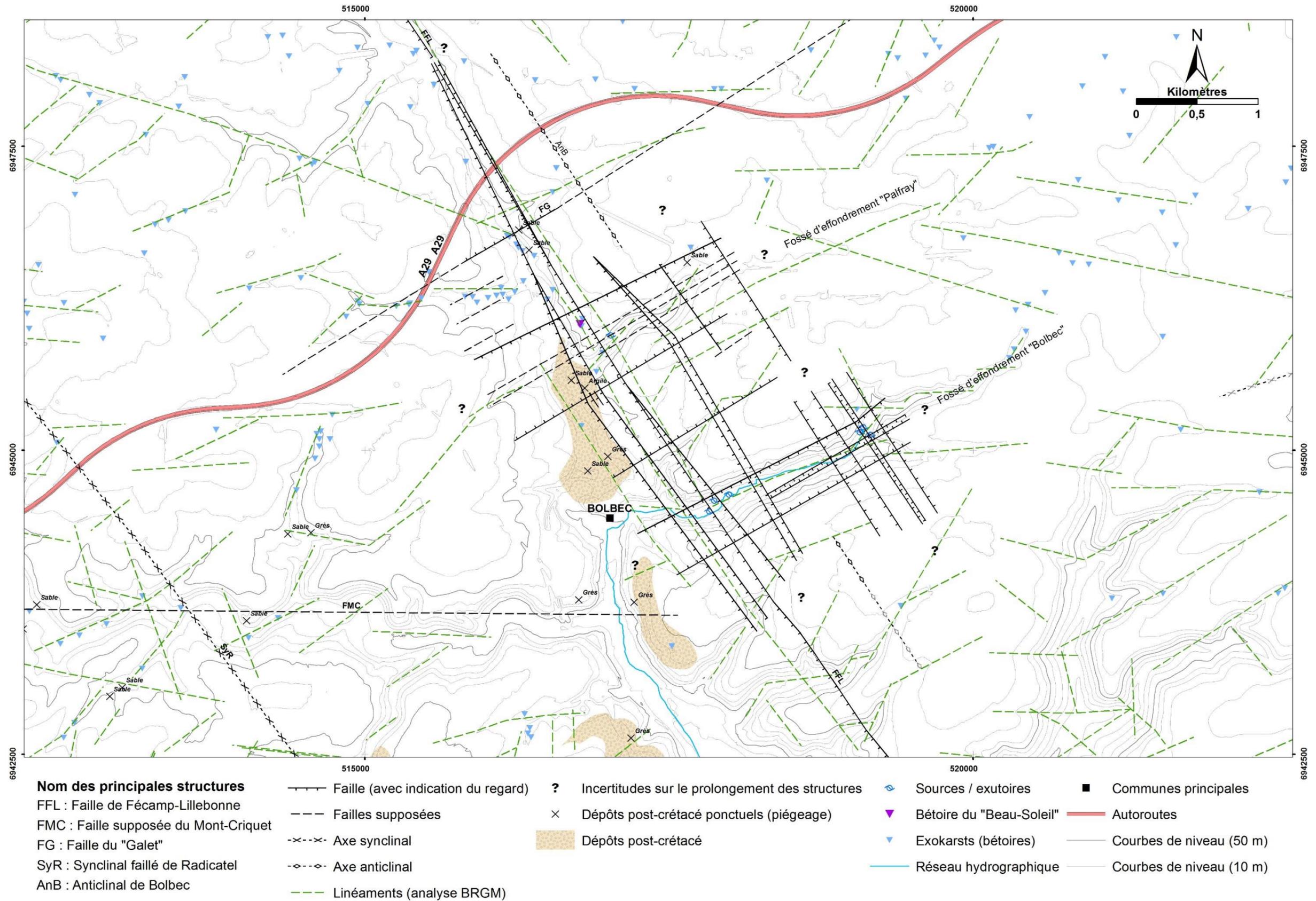


Illustration 65 : Proposition d'un nouveau schéma structural pour le secteur de Bolbec, basé sur l'interprétation des données géophysiques, géologiques et morphologiques

5. Conclusions et perspectives

La synthèse des données géologiques disponibles dans la littérature a permis de faire un état des lieux relativement exhaustif des différents faciès et structures rencontrées dans le secteur d'étude, ce qui a permis d'avoir une vue d'ensemble des travaux déjà effectués sur la zone avec leurs éléments communs et leurs incohérences. Ainsi elle a permis de mieux cibler le positionnement des investigations géophysiques, puis géologiques, qui ont été menées sur des secteurs clés de la zone d'étude.

Les investigations géophysiques ont consisté en la réalisation d'une carte gravimétrique, de 9 profils électriques et de deux profils sismiques. L'interprétation des résultats géophysiques a été effectuée à partir de l'analyse des données de sondage disponibles dans le secteur (Banque du Sous-Sol), calée et étayée par la réalisation d'un sondage carotté réalisé en janvier 2019 par le BRGM, au cœur de la zone faillée (sondage SC-1) ainsi que par l'observation de différents affleurements et de cavités souterraines dans le secteur de Bolbec.

Ces investigations géophysiques et géologiques ont permis d'améliorer notre connaissance du contexte géologique et structural entre Mirville au nord et Lillebonne au sud, et particulièrement dans le secteur de Bolbec. Ainsi, la corrélation des données géologiques et géophysiques a permis de proposer un nouveau schéma structural, qui met notamment en évidence certaines structures jusqu'alors ignorées :

- La structure en « faisceaux » de la faille de Fécamp-Lillebonne, qui délimite des blocs parfois basculés ;
- la présence d'une structure antiforme faillée à l'aplomb du bord nord-est surélevé du faisceau principal axé N150°, à l'origine de la remontée en sub-surface des formations de la base du Crétacé supérieur et du Crétacé inférieur ;
- la présence de « graben », orientés NE-SO aux droits des vallons de la Fontaine Palfray et de Bolbec ;

En outre, plusieurs structures supposées dans le cadre d'études antérieures ont pu être validées, ce qui complète la connaissance structurale de la zone. Ce nouveau schéma structural, plus complexe qu'initialement statué dans la zone entre Mirville et Lillebonne, résulte de l'activité tectonique polyphasée sur des structures de nature, d'âge et d'orientations différentes. Cette activité tectonique a conditionné la nature et la géométrie des dépôts albiens et cénomaniens (cas de la Pierre de Fécamp et des Sables de Lillebonne notamment). Plus récemment, ces structures ont largement favorisé la mise en place d'un système karstique très développé, empruntant la structure de Fécamp-Lillebonne. Ces données inédites ont permis donc d'établir de nouvelles hypothèses sur la géométrie de l'aquifère.

D'un point de vue opérationnel, pour comprendre les cheminements des eaux souterraines et des relations nappes rivières :

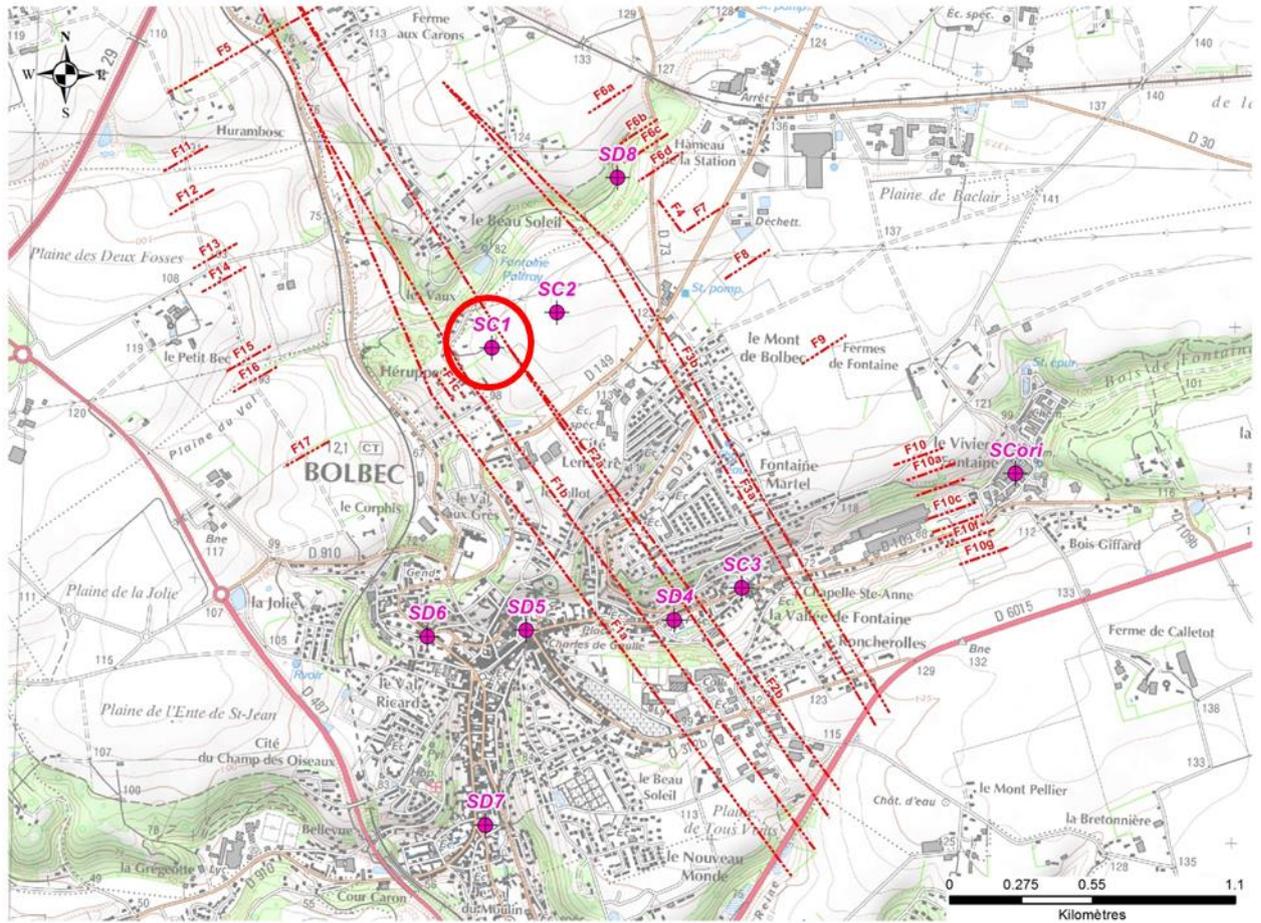
- les nouvelles failles et structures mises en évidence ont été cartographiées (Illustration 64, Illustration 65)
- des coupes de synthèse ont été établies notamment au droit des deux grabens qui peuvent constituer des voies de transfert préférentielles des pollutions vers les captages (vallée de Bolbec - des sources du Commerce jusqu'au centre-ville - et vallon Palfray) (Illustration 62 et Illustration 63).

Ces nouvelles connaissances ont déjà permis d'établir des recommandations concernant l'extension du réseau de piézo-qualitomètres. La réalisation de ces ouvrages permettra de :

- Compléter les données géologiques au cœur de la zone d'étude, pour affiner et valider le nouveau schéma géologique et structural particulièrement complexe du secteur ;
- Confirmer/infirmer les hypothèses géologiques et structurales ;
- Caractériser l'impact de ces structures géologiques sur le comportement de la nappe et donc sur les voies de transfert des polluants ;
- Définir l'extension du panache de pollution en MOR-NMOR dans les eaux souterraines dans le secteur de partage des eaux entre le captage d'Yport et ceux de la vallée du Commerce.

Les objectifs respectifs de chaque ouvrage sont détaillés dans le tableau suivant. Leurs localisations (approximatives à préciser ultérieurement) sont présentées sur l'illustration 66.

Enfin, ces nouvelles connaissances acquises lors de la phase 1, contribueront largement à améliorer l'interprétation des résultats de la deuxième phase de l'étude (investigations hydrologiques et hydrogéologiques) et à mieux appréhender les cheminements possibles que peuvent emprunter la morpholine et la nitrosomorpholine dans leur migration vers les captages AEP. Ceci permettra ensuite d'avoir des éléments fiables pour mettre en place les mesures de suivi et de protection nécessaires les plus adaptées.



- Implantation prévisionnelle des sondages (SD = Sondage destructif / SC = sondage carotté)
- Structures supposées par la géophysique

Illustration 66 : Proposition d'implantation du réseau de piézomètres-qualitomètres. Le sondage SC-1 a été réalisé en janvier 2019

N° FORAGE	SITUATION VIS-A-VIS DE LA STRUCTURE DE FECAMP-LILLEBONNE	SITUATION GEOMORPHOLOGIQUE	OBJECTIF(S)
SONDAGE N°SC2	Entre le faisceau de faille F3 et F2	Plateau	<p><i>Objectif 1</i> – Caler le profil géoélectrique ERT4 en amont de la faille F2 et valider les interprétations</p> <p><i>Objectif 2</i> – Préciser le rejet de la faille F2 identifiée sur le profil électrique ERT4 via la corrélation avec le SC1</p>
SONDAGE N°SC3 et SD4	Respectivement entre le faisceau de faille F3 et F2 et entre le faisceau de faille F2 et F1 « Graben de la vallée de Bolbec »	Fond de vallon Aval du site ORIL Bolbec	<p><i>Objectif 1</i> – Compléter le profil géologique réalisé dans le vallon en amont de Bolbec et préciser les rejets des faisceaux de failles F1, F2 et F3</p> <p><i>Objectif 2</i> – Mise en place d'un piézomètre pour suivre l'évolution de la nappe dans le vallon et la relation nappe / rivière</p> <p><i>Objectif 3</i> – Mise en place d'un qualitomètre pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines en aval du site ORIL et dans la zone faillée</p>
SONDAGE N°SD5	Bloc SO abaissé	Fond de vallée (Vallée de Bolbec)	<p><i>Objectif 1</i> – Mise en place d'un piézomètre pour suivre l'évolution de la piézométrie dans le vallon et la relation entre la nappe et la rivière</p> <p><i>Objectif 2</i> – Mise en place d'un qualitomètre pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines en aval du site ORIL et dans la zone faillée</p>
SONDAGE N°SD6	Zone faillée	Fond de vallée (Vallée de Bolbec)	<p><i>Objectif 1</i> – Mise en place d'un piézomètre pour suivre l'évolution de la piézométrie à la sortie du vallon en direction des captages AEP et la relation nappe / rivière</p> <p><i>Objectif 2</i> – Mise en place d'un qualitomètre pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines en aval du site ORIL en direction des captages AEP</p>
SONDAGE N°SD7	Bloc SO abaissé	Fond de vallée	<p><i>Objectif 1</i> – Mise en place d'un piézomètre pour suivre l'évolution de la piézométrie dans le vallon et la relation nappe / rivière</p> <p><i>Objectif 2</i> - Mise en place d'un qualitomètre pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines en aval de Bolbec, sur le compartiment sud-ouest abaissé</p>
SONDAGE N°SD8	Bloc NE soulevé « Graben du vallon Palfray »	Fond de vallée (Vallon de la Fontaine Palfray)	<p><i>Objectif 1</i> – Préciser le rejet de la structure de Fécamp-Lillebonne et les différents faisceaux de failles via la corrélation avec les sondages SC-1, n°2, n°3 et le sondage BSS 00756X0006 situé dans le vallon de la Fontaine Palfray</p> <p><i>Objectif 2</i> – Caler le profil géoélectrique ERT1 pour une interprétation en profil géologique</p> <p><i>Objectif 3</i> – Mise en place d'un piézomètre pour suivre l'évolution de la piézométrie dans le vallon</p> <p><i>Objectif 4</i> - Mise en place d'un qualitomètre pour suivre l'évolution de la qualité des eaux souterraines sur le bloc NE soulevé en aval du site ORIL Baclair</p>
SONDAGE N°SCoril	Bloc NE soulevé à l'amont de la faille F3	Fond de vallon site ORIL Bolbec	<p><i>Objectif 1</i> – Caler le profil géoélectrique ERT1 pour une interprétation en profil géologique</p> <p><i>Objectif 2</i> – Préciser le rejet de la faille F3 via la corrélation avec le SC3</p>

6. Bibliographie

AGBP (2014) – Coupe géologique du Bassin Parisien et du Fossé Rhénan.

Pour le livre : Gély Jean-Pierre et Hanot Franck (dir.), Amédéo Francis, Bergerat Françoise, Debeglia Nicole, Delmas Jocelyne, Deroin Jean-Paul, Doligez Brigitte, Dugué Olivier, Durand Marc, Edel Jean-Bernard, Gaudant Jean, Hanzo Micheline, Houel Pascal, Lorentz Jacqueline, Robaszynski Francis, Robelin Christian, Thierry Jacques, Vicelli Joséphine, Violette Sophie, Vrielynck Bruno, Wyns Robert et coll. (2014) – Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, Mémoire hors-série n°9, 228 p., 1 pl.

Pour la planche : Gély Jean-Pierre et Hanot Franck (coord.), Bergerat Françoise, Debeglia Nicole, Durand Marc, Houel Pascal, Le Roux Jacques, Robelin Christian, Thierry Jacques, Vicelli Joséphine et Wyns Robert (2014) – Coupe géologique du Bassin parisien et du Fossé rhénan. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, Mémoire hors-série n°9, 1 pl.

BLAKELY R. J, SIMPSON R. W. (1986) - Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51(7), 1494-1498

BENABDELLOUAHED M., DUGUE O., TESSIER B., THINON I., GUENNOC P., BOURDILLON C. (2014) – Nouvelle cartographie du substratum de la baie de Seine et synthèse géologique terre-mer : apports de nouvelles données sismiques et biostratigraphiques. *Géologie de la France*, n°1, 2014, p. 21-45, 8 fig.

CALBA F. (1979) – Relations entre le développement du karst de la craie, la dynamique et la qualité des eaux souterraines du Pays de Caux. Bull. Soc. Géol. Norm, LXVI, fasc. 4, p. 46 à 68

CALBA F. (1980) – Hydrogéologie du karst crayeux du Pays de Caux (France). Etude de deux bassins. Thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie – Paris VI, Paris, 189 p.

CATTIN R., MAZZOTTI S., BARATIN L. M. (2015) - GravProcess: An easy-to-use MATLAB software to process campaign gravity data and evaluate the associated uncertainties. *Computers & Geosciences*, 81, 20-27.

CAVELIER C., MEDIONI R. (1980) – Carte géologique de la France à 1/250.000, feuille de Rouen (n°4) et notice explicative de la feuille. Ed. BRGM

CETE (1978) –Projet de réservoir d'eau. Bolbec. Reconnaissance des sols. Affaire n°8882/1

CGG (1998) – Géologie et géométrie de l'aquifère de la craie – Département de la Seine-Maritime

CHOLLEY A., FIRMIN H. (1945) – La vallée et les méandres de la Basse-Seine

COOPER G. R. J., COWAN D. R (2006) - Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585-1591.

CPGF (1978) – Etude des ressources en eau du bassin de la rivière du Commerce. Rapport préliminaire 1ere phase – syndicat mixte d'études de la vallée du Commerce. Rapport d'étude 1803 – phase 1. 1978, 32 p.

DAVID P.Y., PENNEQUIN D. (2013) – Pollution par la morpholine et la N-nitrosomorpholine dans le secteur de Bolbec et au-delà – Avis du BRGM, rapport final BRGM/RP-62004-FR., 95 p., 39 ill., 7 annexes.

DE LA QUERIERE P., MARTIN P. (1970) – Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31 décembre 1969 sur le territoire de la feuille topographique au 1/50.000 Fécamp.

D'ERRICO J. (2005) - Surface Fitting using gridfit, MATLAB Central File Exchange. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998>

DOLLFUS G.-F (1929) – La faille de Bolbec-Lillebonne (Seine-Inférieure). Bull. Soc. Géol. France., p. 232-250

DUPERRET A., VANDYCKE S., MORTIMORE R.N., GENTER A. (2012) – How plate tectonics is recorded in chalk deposits along the eastern English Channel in Normandy (France) and Sussex (UK). Tectonophysics, Elsevier, 2012, 581, pp. 163-181

FAY DE LESTRAC H. (1991) – Ville de Lillebonne (76). Reconnaissance géophysique dans la vallée de la Fontaine Murée. Note BRGM 91-HNO-123 de décembre 1991. 16 p., 2 fig. 3 ann.

GINGER (2005) – SIDEDA de Bolbec-Gruchet le Valasse. Rapport de fin de phase 1, synthèse des données générales. Réalisation d'une étude de protection des captages de Saint-Marcel et Saint-Antoine-la-Forêt.

HANIN G. (2010) – Contrôles structural et hydrogéologique sur la dynamique d'un champ captant en contexte crayeux karstique et sa sensibilité aux variations du signal climatique : implications en matière de vulnérabilité de la ressource. Thèse de l'université de Rouen.

HAUCHARD E., LAIGNEL B., DELAHAYE D. (2002) – Proposition d'un nouveau schéma structural du Nord-Ouest du bassin de Paris reposant sur l'analyse fractale des réseaux de thalwegs et les données récentes de la géologie régionale. C.R. Geoscience 334 (2002) p. 295-302

HAUCHARD E., LAIGNEL B. (2008) – Evolution morphotectonique de la marge nord-occidentale du Bassin de Paris. Z. Geomorph. N. F. p 463-488. Décembre 2008

ID SCOPE (2011) - Parc éolien en mer de Fécamp. Reconnaissance géophysique du champ éolien offshore de Fécamp. Rapport final et cartographie.

JACOBSEN B. H. (1987) – A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. *Geophysics*, 52(8), 1138-1148.

JAMAL (2014) - RegularizeData3D, MATLAB Central File Exchange - <http://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46223-regularizedata3d>

JUIGNET P. (1970) – Précisions stratigraphiques et sédimentologiques sur le Cénomaniens du Pays de Caux entre Saint-Jouin-Bruneval et le cap d'Antifer (Seine-Maritime). Bulletin du BRGM (deuxième série) Section I, n°1 – 1970, p. 11-15, 2 fig.

JUIGNET P. (1974) – La transgression crétacée sur la bordure orientale du Massif Armoricaïn. Thèse d'état. Université de Caen. 786 p.

- JUIGNET P. (1988)** – La craie de Normandie – prédisposition au karst. Actes du Museum de Rouen - Colloque sur le karst et le Quaternaire de la Basse-Seine. p 39-52.
- LAINEL B. (1997)** – Les altérites à silex de l'Ouest du Bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Thèse. 219 p.
- LANGVIN C. (1998)** – Vallée du Commerce (Seine-Maritime, France) relations nappe / rivière. Rapport BRGM/RP-40488-FR. 73 p.
- LASSEUR E. (2008)** – La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campaniens, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Thèse de l'université de Rennes 1. 410 p.
- LECHEVALIER C. (1993)** – Formes et formations quaternaires de la région de Lillebonne. Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum du Havre, t. 80, fasc. 1 & 2, année 1993, 1 & 2 trim.
- LEFEBVRE D. (1988)** – Les aspects majeurs de l'histoire géologique de la Basse vallée de la Seine dans ses rapports avec le karst. Actes du Museum de Rouen - Colloque sur le karst et le Quaternaire de la Basse-Seine. p 135-145
- LEFEBVRE D., LA QUERIERE P., LEBOULANGER T. (1993)** – Nappe captive et sous-écoulements : le rôle des alluvions en Basse-Seine. In : Quaternaire, vol. 4, n°2-3, 1993. pp. 103-110
- LOKE M. H., BARKER R.D (1996)** - Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophys. Prospect., 44: 131-152.
- LONGMAN I. M (1959)** – Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. Journal of Geophysical Research, 64(12), 2351-2355.
- MAILLARY J-C., DE LA QUERIERE P. (1970)** – Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 15 mars 1970 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/50.000 Bolbec et Pont-Audemer. BRGM/70-SGN-242-PNO
- MENILLET F. (1969)** – Carte géologique de la France au 1/50.000, feuille de Bolbec (n°75) et notice explicative. Ed. BRGM
- MORITZ H. (2000)** – Geodetic reference system 1980. Journal of Geodesy, 74(1), 128-133.
- NETTLETON L. L (1939)** – Determination of density for reduction of gravimeter observations. *Geophysics*, 4(3), 176-183.
- NICOLESCO C.-P., (1931)** – Contribution à l'étude de la faille de Lillebonne à Bolbec (Seine-Inférieure). CR sommaire Soc. Géol. France., p. 39-41
- NICOLESCO C. -P., (1934)** – Sur quelques faits nouveaux dans la région du Havre et d'Yvetot (Seine-Inférieure). Extrait du C.R.S de la Société Géologique de France. N°15, p. 221 à 223.
- NICOLESCO C.-P (1931)** – Révision de la feuille d'Yvetot au 80.000^{ème} – nouvelles observations à l'étude de la géologie normande. Extrait du bulletin de la carte géologique de France. n°179. Tome XXXIV

PAQUET F., ALLANIC C., LASSEUR E., CALINE B., THINON I. (2017) - Reactivation and interactions of cadomian and variscan inherited structures within the intracratonic Anglo-Parisian Basin revealed by offshore studies: The Fécamp-Lillebonne and Nord-Baie-de-Seine faults. International Meeting of Sedimentology, Toulouse.

PARASNIS D. S (1952) - A study of rock densities in English Midlands: *Geophysical Journal International*, 6, 252-271.

QUESNEL (1996) – Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du Bassin de Paris. Thèse. 430 p.

QUESNEL F., COUEFFE R., DURIEZ M., LASSEUR E. (2007) – Carte géologique harmonisée du département de la Seine-Maritime. Rapport BRGM/RP-56185-FR, 118 p., 17 fig., 4 pl. hors-texte.

RAGOT J. (1988) – La sédimentation crétacée aux abords de l'accident Fécamp-Lillebonne-Villequier (Seine-Maritime, France). Biostratigraphie et contrôle structural. Mémoire de Diplôme d'Etudes Doctorales, université de Rouen. 141 p., 69 fig.

RAO V. B., MURTY B. V (1973) - Note on Parasnis' method for surface rock densities. *Pure and Applied Geophysics*, 110(1), 1927-1931.

ROBAIN H., BOBACHEV (2002) - X2IPi tool box for 2D DC measurements with syscal equipment. User Manual, pp: 25

RODET J. (1988) – L'évolution karstique en Basse-Seine. Actes du Museum de Rouen - Colloque sur le karst et le Quaternaire de la Basse-Seine. p 91-99

SAFEGE (2012) – Etude du bassin d'alimentation du captage de Radicatel. Délimitation du bassin d'alimentation et analyse de la vulnérabilité intrinsèque du bassin. Rapport 09NRE023

SAFEGE (2013) – Etude du bassin d'alimentation du forage d'Yport. Phase 1 : délimitation du bassin d'alimentation et analyse de la vulnérabilité intrinsèque du bassin. Rapport 11NRH006 version 5

SCANVIC J-Y., WEECKSTEEN G. (1978) – Application de la télédétection à la recherche d'eau en milieu crayeux. Note BRGM 78-SGN-209 GEO

SCANVIC J-Y. et al., (1977) – Tectonique du Nord-Ouest de la France d'après les photographies de satellites. Carte à 1/500.000. Document. BRGM Orléans

SCANVIC J-Y. (1977) – Commentaires sur l'étude des photographies aériennes de la région de Bolbec (Seine-Maritime). Note BRGM SGN/GEO JYS/NC/675 de décembre 1977

SCANVIC J-Y. (1977) – Etude photogéologique du bassin d'Yport. Note BRGM SGN/GEO JYS/NC/554 d'octobre 1977

TERNET Y. (1968) – Carte géologique de la France au 1/50.000, feuille de Fécamp (n°57) et notice explicative. Ed. BRGM

VERNHET Y., DORE F., LAUTRIDOU J.P., TALBO H., VERRON G., DHELLEMES R., ENOUF C. (1995) – Carte géologique de la France à 1/50.000, feuille de Domfront (n°249) et notice explicative. Ed. BRGM

WAZI N., LEBOULANGER T., TOMAT A. (1988) – Relations structurales entre fracturation et karstification : un exemple de collaboration entre géologues et spéléologues. Actes du Museum de Rouen - Colloque sur le karst et le Quaternaire de la Basse-Seine. p 53-60

WAZI N. (1988) – Le crétacé du Roumois (vallée de l'Oison) et le Tertiaire-Quaternaire des régions voisines de la basse vallée de la Seine (Haute-Normandie). Stratigraphie et tectonique. Thèse de l'université de Rouen



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 - www.brgm.fr

Direction régionale Normandie

Parc de la Vatine

14 route d'Houpeville

76130 – Mont-Saint-Aignan – France

Tél. : 02 35 60 12 00