



ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau



Rapport final

BRGM/RP-70301-FR

Novembre 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau

Rapport final

BRGM/RP-70301-FR

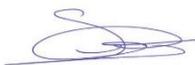
Novembre 2020

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche MODGEAU
Convention BRGM-Agence de l'Eau Loire-Bretagne n°2016C006

**E. Rouxel, E. Lasseur, V. Baudouin, J. Briais, S. Andrieu,
G. Badinier, Y. Assy, L. Tahon, C. Allanic, J. Baptiste, P. Chrétien, B. Bourguine,**
Avec la collaboration de
E. Bellette, E. D'incau Bayal, J. Fournely, E. Genre-Grandpierre, G. Bodere.

Vérificateur :

Nom : Olivier Serrano
Fonction : Responsable unité
DGR/GBS
Date : 23/11/2020

Signature : 

Approbateur :

Nom : Xavier Rachez
Fonction : Directeur Régional Pays
de la Loire
Date : 25/11/2020

Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés :

Bassin de Paris, Jurassique, Cénomanién, aquifère, géométries sédimentaire, séquentielle, paléogéographie, Sarthe, Maine-et-Loire.

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

Rouxel E., Lasseur E. Baudouin V., et al., (2020) ModGeau : Synthèse et Modélisation géologique du mésozoïque de Sarthe et de Maine-et-Loire, pour une gestion améliorée des ressources en eau. Rapport final. BRGM/RP-70301-FR , 129p., 88 fig. 1 ann.

Synthèse

Le projet MODGEAU (MODèle Géologique pour la gestion des ressources en EAU), réalisé dans le cadre de la convention n°2016C006 avec l'Agence de l'Eau Loire – Bretagne, vise à mieux comprendre la géométrie des grands ensembles aquifères de la partie Ouest du bassin de Paris, et leurs interactions possibles.

Les travaux présentés dans ce rapport portent sur la synthèse géologique des formations Jurassique et Crétacé des départements de Sarthe et de Maine-et-Loire. Elle a pour objectif principal une amélioration des connaissances sur la géométrie (extension, biseaux connexion entre aquifères multicouches) des aquifères du Jurassique et du Cénomaniens qui concentrent les réservoirs aquifères les plus vastes de cette zone. Recomposer les géométries de ces aquifères nécessite une approche de type stratigraphie séquentielle qui n'est possible qu'à partir de données fiables et précises telles que forages très bien décrits ou diagraphie. De ce fait, ces travaux se sont déroulés en plusieurs étapes :

- Une grande campagne de récupération et de valorisation des données qui a permis de disposer d'une grande quantité de données de bonne qualité. Le projet tire part de la grande quantité de données diagraphiques, en particulier dans le département de la Sarthe qui a mené une politique incitative, récupérées auprès des opérateurs et bureaux d'étude.
- Une phase de synthèse de bassin sur les dépôts jurassique et cénomaniens, incluant :
 - Des travaux de terrain avec identification des principaux environnements de dépôts ;
 - L'analyse et la corrélation de données diagraphiques restituées sous forme de transects diagraphiques imageant les géométries principales ;
 - La définition de cartes paléogéographiques des principaux intervalles ;
 - La synthèse des données lithostratigraphiques plus ou moins disparates sous forme de diagrammes de Wheeler synthétiques établis sur la base de la compréhension acquise ;
 - La compilation de cartes géologiques harmonisées sur la base de ces diagrammes ;
 - Une compilation des données structurales, qui a permis de disposer d'un schéma structural synthétique et représentatif des accidents les plus importants.
- La réalisation d'un modèle géologique 3D, facilement interrogeable et actualisable, basée sur :
 - Une réinterprétation des différents forages corrélés, ré-interprétés en termes de lithostratigraphie pour s'adapter aux méthodes de modélisations pratiquées couramment au BRGM ;
 - Le choix d'une pile sédimentaire à modéliser en fonction des données disponibles et des attendus hydrogéologiques ;
 - L'intégration de l'ensemble des données de puits, cartes et structurales validées via des tests de cohérences géométriques.

Les principaux résultats de cette étude, retranscrits partiellement par le modèle géologique 3D sont :

- Pour le Cénomaniens, aquifère le plus sollicité et le plus renseigné par des données de forages : la distinction de quatre aquifères sableux, correspondant à des édifices deltaïques successifs (Sables de la Trugalle, Sables du Mans, Sables du Perche, Sables à Catopygus, ce dernier de moindre extension spatiale). La géométrie et la paléogéographie de ces ensembles, identifiés à l'affleurement mais dont la géométrie en profondeur était mal contrainte est restituée par les corrélations et des cartes paléogéographiques successives. Ces ensembles sableux sont localement connectés dans la partie Ouest de la zone d'étude (Sables du Maine), formant un aquifère multicouche. Ces précisions géométriques amènent à redéfinir les ensembles BDLISA en trois dimensions, et permettront à terme de modéliser de façon réaliste les circulations hydrauliques dans ces aquifères complexes.
- Pour le Jurassique, l'étude confirme l'existence d'un aquifère bajo bathonien, recouvert par une rampe argileuse du Callovo Oxfordien puis par un aquifère oxfordien. Un grand nombre de séquences ont été corrélées et permettent de recomposer précisément l'évolution paléogéographique de la zone. Les travaux montrent en particulier l'existence de faciès profonds, aquitards et peu épais dans la région de Saumur, qui séparent les dépôts de plate-forme carbonatée, aquifère, présents au Nord et au Sud. Cette précision a pu être faite à proximité de la bordure du Massif Armoricaïn. Cependant la rareté des forages atteignant le Jurassique dans la moitié Est du modèle, fait que ces horizons n'ont pas pu être modélisés. Des données supplémentaires seraient nécessaires si un modèle possédant cette extension spatiale devait être réalisé.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Récupérations et valorisations des données	15
2.1. DONNEES GEOLOGIQUES.....	15
2.2. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES.....	20
3. Etude géologique.	23
3.1. METHODOLOGIE.....	23
3.1.1 geometries sédimentaires.	23
3.1.2. Codage, harmonisation bancarisation des données.	26
3.1.3. Schéma structural.	27
3.2. JURASSIQUE	29
3.2.1. Faciès sédimentaires	29
3.2.2. Evolution temporelle et spatiale des architectures et facies sédimentaires	34
3.3. CENOMANIEN.....	49
3.3.1 Faciès sédimentaires	49
3.3.2 Découpage séquentiel et lithostratigraphie du Cénomaniens.....	51
3.3.3 Schéma des géométries 2D	53
3.3.4 Carte de faciès.....	57
3.3.5 Comparaison avec les codages de la BDLisa	65
3.4. PILE STRATIGRAPHIQUE, CARTE HARMONISEE ET SCHEMA STRUCTURAL	67
3.4.1. Choix de la pile stratigraphique	67
3.4.2. Analyses et schéma structural.....	71
3.4.3. Carte harmonisée de la zone d'étude.....	81
3.4.4. Bancarisation des résultats et log validés.....	85
4. Modélisation géologique 3D	89
4.1. METHODE DE MODELISATION :	89
4.1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ET DU PRINCIPE DE MODELISATION ...	89
4.1.3. MNT ET MAILLAGE	91
4.1.5. LES DONNEES D'ENTREE DU MODELE	92
4.2. RESULTATS : COUPES ET CARTE ISOPROFONDEUR DES DIFFERENTS HORIZONS MODELISES.	99
4.2.1. Coupes tirées du modèle.	99

4.2.2. Cartes isopaques tirées du modèle.....	107
4.3. LIMITATIONS DU MODELE.....	114
4.3.1. contradictions entre carte géologique et information de forages.	115
4.3.2. Géométries imprécises par manque de calage.....	115
4.3.3. Failles et rejets.	115
4.3.4. utilisation du modèle et Recommandations	116
5. Conclusions et Implications hydrogéologiques	119
5.1. LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE MAILLEE	119
5.2. INTERET DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D POUR L'ELABORATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE MAILLE.....	120
6. Bibliographie.....	123

Liste des figures

Figure 1 : Emprise du projet	12
Figure 2: Coupe à travers la Sarthe montrant les géométries à grande échelle du Cénomani- en. (Juignet 1974).	13
Figure 3: Diagramme de Wheeler entre la Sarthe et l'Anjou. (Louail, 1981).....	14
Figure 4 : Localisation et contenu des dossiers de forage Pierson, après comparaison avec les données déjà présentes en Banque du Sous-Sol (BSS).....	16
Figure 5 : Localisation des diagraphies présentes en BSS après chargement des nouvelles données collectées auprès des bureaux d'étude Pierson et Géo Hydro Investigation) ...	17
Figure 6 : Localisation des diagraphies vectorisées.....	18
Figure 7 : Points d'affleurement identifiés grâce à l'inventaire du patrimoine géologique.	19
Figure 8 : Récupération des données de pompage d'essai lors du projet	21
Figure 9 : Transects de corrélation pour le Jurassique et le Cénomani- en.....	26
Figure 10: Exemple de représentation de projection stéréographique de Schmidt (hémisphère inférieur) et tenseur de paléocontraintes associé pour un site compressif.....	28
Figure 11 : Les différents états de contrainte en fonction du rapport de forme $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ pour les régimes compressifs, décrochants et extensifs (Ritz et Taboado, 1993).28	
Figure 12 : Légende des figures de la partie 3.2.....	30
Figure 13 : Profil de dépôt synthétique de la zone d'étude depuis l'offshore inférieur jusqu'au continent avec emplacement des grands types de faciès sédimentaires.....	31
Figure 14 : Qualités réservoirs des grands types de faciès distingués et environnement de dépôt correspondants	31
Figure 15 : A. Alternance de marnes et de calcaires argileux – Port-en-Bessin – Formation des Marnes de Port-en-Bessin, séquence MJVIII. B. Packstone bioclastique à bivalves (Bi.), crinoïdes (Cr.) et bryozoaires (Br.) dont l'espace intergranulaire est rempli par de la micrite (marron) - carrière de Ségrie - Formation du Calcaire à Montlivaltia, séquence MJX. C. Grainstone oolithique (Oo.) dont la porosité a été intégralement	

cimentée (sparite blanche au microscope) - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation de l'Oolithe de Villaines-la-Carelle – séquence MJVII. **D.** Sable oolithique (Oo.) dont la porosité intergranulaire préservée apparaît en bleu - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation de l'Oolithe de Villaines-la-Carelle – séquence MJVII. **E.** Sables silicoclastiques estuariens présentant des stratifications obliques (sous le marteau) - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation des Sables et graviers de Tessé - séquence MJIII. **F.** Sables à quartz et échinodermes dont la porosité intergranulaire préservée apparaît en bleu - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation des Sables et graviers de Tessé - séquence MJIII. **G.** Calcaire boueux rudstone à nérinées (gastéropodes) et oncolithes - carrière d'Appenai-sous-Bellême - Formation du Calcaire corallien de Mortagne - séquence LJIV. **H.** Rudstone à oncolithes (On.), gastéropodes (Ga.) et échinodermes (Ech.) - carrière d'Appenai-sous-Bellême - Formation du Calcaire corallien de Mortagne - séquence LJIV.33

- Figure 16 : Séquences de la zone d'étude replacées dans leur cadre temporel et comparées aux séquences européennes (Hardenbol et al., 1998) 36
- Figure 17 : Schéma lithostratigraphique remplaçant les formations sédimentaires du Jurassique moyen et de l'Oxfordien entre Argentan et Poitiers en fonction de leur étendue temporelle et géographique (diagramme de Wheeler). Le cadre séquentiel au troisième et deuxième ordre est présenté. Les biozones à ammonites et séquences européennes standards sont issues de Hardenbol et al. (1998), les durées sont celles de Ogg et al. (2016)..... 37
- Figure 18 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région d'Argentan avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements étudiés. Cette coupe est issue des observations de terrain complétées par les travaux de Kuntz et al. (1989) et Moguedet et al. (1998)..... 38
- Figure 19 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région de Thouars avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements étudiés, réalisé au cours de cette étude..... 39
- Figure 20 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région de Poitiers avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements. Cette coupe est issue des observations de terrain complétées par les travaux de Mourier et al. (1986) et Cariou et Joubert (1989)..... 40
- Figure 21 : Carte de localisation des forages et affleurements étudiés, et des transects de corrélation effectués..... 41
- Figure 22 : Corrélation des séries du Jurassique moyen et supérieur sur un transect de Rouille à Noyen-sur-Sarthe, avec un zoom sur la partie centrale du transect. Les corrélations sont basées sur la biostratigraphie (ammonites, brachiopodes) et sur les cycles stratigraphiques de troisième ordre reconnus (MJI à LJVII) délimités par des limites de séquences (Aa1 à Ox7).ratigraphiques de troisième ordre reconnus (MJI à LJVII) délimités par des limites de séquences (Aa1 à Ox7). 42
- Figure 23 : Corrélation des séries du Jurassique moyen et supérieur sur un transect de Saint-Christophe-en-Champagne à Teloche, avec un zoom sur la partie centrale du transect. Les corrélations sont basées sur la biostratigraphie (ammonites, brachiopodes) et sur les cycles stratigraphiques de troisième ordre reconnus (MJI à LJVII) délimités par des limites de séquences (Aa1 à Ox7). 43
- Figure 24 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIII de l'Aalénien supérieur (cortège régressif)..... 44

Figure 25 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIII du Bajocien supérieur (cortège régressif)	45
Figure 26 : carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIX du Bathonien moyen (cortège régressif)	46
Figure 27 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJXII du Callovien inférieur (cortège régressif)	47
Figure 28: Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence LJV de l'Oxfordien moyen (cortège régressif)	48
Figure 29 : Planche de photographies des différents environnements de dépôt du Cénomaniens: - a: dépôt fluviatile; b: Plaine deltaïque et barre d'embouchure; c : estuaire interne; d: Estuaire médian à externe; e: Front de delta et plaine deltaïque au sommet. ...	50
Figure 30 : Propriétés réservoirs relatives des différents environnements de dépôt	51
Figure 31: Diagramme de Wheeler (coupe espace-temps) du Cénomaniens. L'ensemble des formations sont représentées sur ce diagramme, ainsi que les équivalences latérales. La pile stratigraphique pour le modèle est définie à partir de ce wheeler.	52
Figure 32: Schéma des géométries selon un transect de corrélation diagraphique Sud (Loudun) - Nord (La Ferté-Bernard). Chaque couleur correspond à un environnement de dépôt, les passages latéraux ainsi que les différentes surfaces corrélées sont reportés sur ce schéma.....	54
Figure 33 : Schéma des géométries du Cénomaniens selon un transect Nord-Sud traduit en aquifère pour les formations sableuses et en aquitard pour les formations argileuses...	56
Figure 34 : Carte de faciès du delta des Sables de la Trugalle (progradation des marnes de Ballon jusqu'à C1), les transects diagraphiques utilisés figurent sur la carte.	57
Figure 35 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables de la Trugalle-Lamnay et localisation des Sables et Grès de Jumelle fluviatiles (C1-C2 rétrogradation).....	58
Figure 36 : Carte de faciès du delta sommital (mineur) des Sables de la Trugalle-Lamnay (C2-C3 progradation)	59
Figure 37 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables de la Trugalle-Lamnay et localisation des Sables et Grès de Jumelle fluviatiles (rétrogradation entre C3 et C4)	60
Figure 38 : Carte de faciès du delta des Sables et Grès du Mans (C4-C5 progradation)	61
Figure 39 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables et Grès du Mans (C5-C6 rétrogradation)..	62
Figure 40 : Carte de faciès du delta des Sables du Perche (progradation entre C7 et C8).....	63
Figure 41 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables du Perche (rétrogradation entre C8 (MRS) et C8 MFS).....	64
Figure 42 : Carte de faciès du delta des Sables à Catopygus ou de Bousse (Progradation post MFS C8 anté Craie).....	65
Figure 43 : Exemple de comparaison entre les géométries des dépôts du Cénomaniens (bleu : sables aquifères et gris clair : argiles et marnes aquitards) et les entités BDLISA replacées sur les forages (orange : aquitard ; bleu : aquifère ; blanc : non attribué)	66
Figure 44 : Puits atteignant la base du Jurassique.	67
Figure 45 : Puits atteignant la base de l'intervalle Bajo-Bathonien.	68
Figure 46 : Pile stratigraphique retenue pour la modélisation géologique	70
Figure 47 : Correspondance entre les entités de la pile stratigraphique retenues et celle de la BDLISA	71

Figure 48: Localisations des 9 affleurements sur lesquels il a été possible de procéder à des observations structurales. Les structures faillées présentes sur la carte BRGM au million sont figurées en noir.	72
Figure 49 : Fracturation de type décrochante observée sur le site M001, à l'échelle de l'affleurement (en haut) et à l'échelle microtectonique (en bas).....	73
Figure 50 : Mesures de failles effectuées sur le site M001 (azimuth à gauche de 0 à 360° et pendage à droite de 0 à 90°) avec séparation de 2 sous-familles : une famille décrochante (en haut à droite) et une famille inverse (en bas à droite).	74
Figure 51 : Représentation stéréographique des couples failles/stries associée au tenseur de paléocontraintes calculé (gauche). Histogramme des erreurs entre la strie optimale calculée et la strie mesurée sur chaque plan de faille (en haut à droite) et cercle de mohr avec les mesures (en bas à droite).	74
Figure 52 : Représentation des mesures structurales sur un digramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique des densité de répartition des pôles de plans de failles (à droite).....	75
Figure 53 : Représentation stéréographique des couples failles/stries associée au tenseur de paléocontraintes calculé (gauche). Histogramme des erreurs entre la strie optimale calculée et la strie mesurée sur chaque plan de faille (en haut à droite) et cercle de mohr avec les mesures (en bas à droite).	75
Figure 54 : Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite). Stratification moyenne subhorizontale (en vert).	76
Figure 55: Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).....	76
Figure 56 : Illustration des grands plans de fractures NW-SE (gauche). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (centre) et sur une projection stéréographique (droite).	77
Figure 57 : Illustration des grands plans de fractures NE-SW (haut). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).	77
Figure 58: Illustration des grands plans de fractures N-S décrochants (haut, gauche) et tectoglyphes associés (haut, droite) . Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).	78
Figure 59: Illustration des grands plans de fracture verticaux NE-SW (haut). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).	79
Figure 60: Schéma structural simplifié de la zone d'étude.....	80
Figure 61: Corrélation entre le schéma structural et les cartes gravimétriques (gauche) et magnétiques (droite).	81
Figure 62: Carte harmonisée à l'échelle de la zone du modèle	83
Figure 63 : Exemple de pointé des surfaces séquentielles (MFS en bleu ; MRS en rouge) réalisées dans le module "Cross-Section" du logiciel GEOGRAPHIX (image de gauche) et export des surfaces au format "txt" (image de droite) pour le Jurassique.	85
Figure 64 : Exemple de pointé des surfaces séquentielles et des faciès réalisés dans le module Cross-Section du logiciel GEOGRAPHIX (image de gauche) et export des faciès au format "txt" (image de droite) pour le Cénomaniens.....	85
Figure 65 : Exemple des modifications qui ont pu être effectuées sur les Logs Validés de la BSS grâce aux corrélations séquentielles.	86

Figure 66: Localisation des Logs Validés révisés dans le cadre du projet MODGEAU. <u>Carrés verts</u> : LGV révisés précisément pour le Cénomaniens (limites de formation et lithologies) ; <u>Carrés bleus</u> : LGV révisés précisément pour le Jurassique (limites de formation et lithologies) ; <u>Carrés violets</u> : LGV dont seules les limites des formations ont été vérifiées (hors transects). <u>Points noirs</u> : forages corrélés en stratigraphie séquentielle (LGV non révisés).....	87
Figure 67 : Exemple de coupe verticale avec une pile stratigraphique.....	90
Figure 68 : Pile stratigraphique.....	92
Figure 69: Carte de positionnement des forages	93
Figure 70 : Carte géologique GDM - avec Légende.....	94
Figure 71 : Carte de positionnement des forages avec réseau failles Carte Géol 50K	95
Figure 72 : Carte de positionnement des forages avec réseau failles simplifié utilisé pour le modèle	96
Figure 73 : Schéma conceptuel expliquant le codage des données de sondages dans GDM Multilayer.....	97
Figure 74 : Variogramme expérimental et modèle du toit des Marnes de BALLON	98
Figure 75 : Schéma de combinaison de surfaces modélisées indépendamment	98
Figure 76 : Coupe 1	102
Figure 77 : Coupe 6.....	103
Figure 78 : Coupe 7.....	104
Figure 79 : Coupe 4.....	105
Figure 80 : Coupe 5.....	106
Figure 81 : Carte isopaques des Sables à Catopygus (CEN8), figuré sur le fond de carte géologique, en jaune l'extension des Sables à Catopygus.	107
Figure 82 : Carte d'isopaques des Marnes à Ostracées (CEN9), projetées sur la carte géologique.	108
Figure 83 : Carte d'isopaques des Sables du Perche (CEN10), projeté sur la carte géologique harmonisée.	109
Figure 84 : Carte d'isopaques des Marnes de Bouffry (CEN11) projetée sur la carte géologique.	110
Figure 85 : Carte d'isopaques des Sables du Mans (CEN12) projetée sur la carte géologique.	111
Figure 86 : Carte d'isopaques des Marnes de Nogent inférieures (CEN 125), projetée sur la carte géologique.....	112
Figure 87 : Carte d'isopaques des Sables de la Tugalle et de Lamnay (CEN13), projetée sur la carte géologique.....	113
Figure 88 : Carte d'isopaques des Marnes de Ballon, Craie glauconieuse et dépôt barrémo albien (CEN14), projetée sur la carte géologique.	114

Liste des annexes

Annexe 1 Données de forages utilisées pour le modèle	127
--	-----

1. Introduction

Le projet MODGEAU (MODèle Géologique pour la gestion des ressources en EAU), réalisé dans le cadre de la convention n°2016C006 avec l'Agence de l'Eau Loire – Bretagne, vise à mieux comprendre la géométrie des grands ensembles aquifères de la partie Ouest du bassin de Paris, et leurs interactions possibles. Ce projet a pour vocation d'améliorer la connaissance géologique des formations sédimentaires de la bordure Sud-Ouest du Bassin Parisien, depuis l'amont de la Sarthe dans l'Orne au nord jusqu'à la Dive dans les Deux-Sèvres, depuis l'extrémité du Massif Armoricaïn à l'Ouest, à la Touraine et au Vendômois à l'Ouest. Cette extension géographique correspond à celle de l'aquifère principalement étudié au cours de cette étude i.e. l'aquifère des sables du Cénomaniën.

Cette caractérisation porte sur les aquifères principaux de la zone, l'aquifère des sables cénomaniens (largement exploité sur l'ensemble de la zone), et l'aquifère du Jurassique moins utilisé et moins connu mais qui pourrait représenter des ressources valorisables. L'objectif de l'étude présentée dans ce rapport est d'intégrer l'ensemble des données géologiques existant dans la zone afin de restituer au mieux les géométries des deux aquifères. Elle s'appuie en particulier sur l'utilisation de diagraphies qui permettent de réaliser des corrélations à haute résolution selon les principes de la stratigraphie séquentielle, et ainsi de restituer les géométries sédimentaires. Nous détaillerons les principales étapes de cette étude, en premier lieu la récupération des données utiles, les interprétations réalisées, leurs apports sur la compréhension des géométries et des variations de faciès des deux aquifères et sur les référentiels géologiques et hydrogéologiques actuels (Logiso et BDLISA).

Un produit important de cette interprétation était de restituer les connaissances acquises sous forme de modèle géologique facilement interrogeable et actualisable. L'objectif était de réaliser un modèle pérenne et évolutif, qui deviendra un outil de gestion et protection des eaux souterraines. Dans une volonté de pédagogie, les interprétations ont été modélisées sous forme de formations géologiques principales harmonisées à l'échelle de la zone d'étude, cela représente une perte d'information par rapport à l'interprétation géologique mais a l'avantage de correspondre avec des référentiels géologiques utilisés dans la zone. Outre la modélisation, cette harmonisation est appliquée à la révision des cartes géologiques des départements concernés et des entités de la BDLISA.

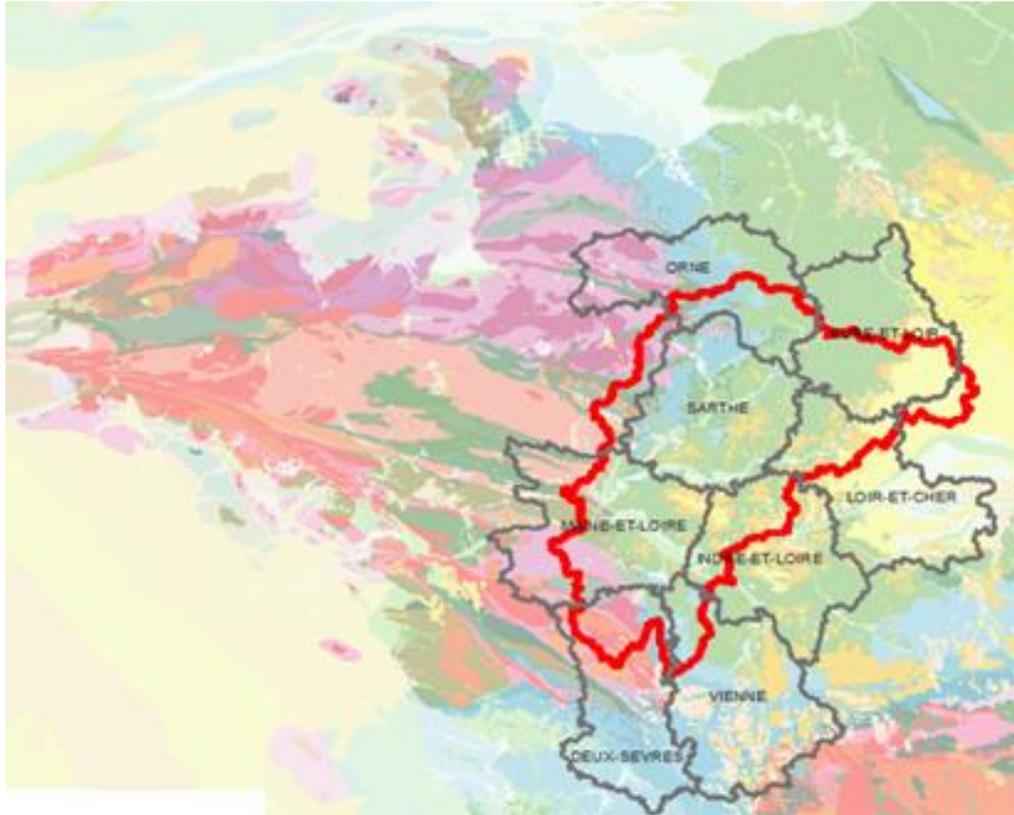


Figure 1 : Emprise du projet

a) *Etat des connaissances*

L'aquifère Cénomaniens est connu principalement par deux travaux de thèse réalisés il y a près de 40 ans, les thèses de Pierre Juignet (1974) dans la Sarthe et de Jacques Louail (1981) en Anjou. Ces travaux, de très grande qualité, permettent de disposer d'un cadre stratigraphique solide, en particulier dans la zone du stratotype du Cénomaniens de la région du Mans et de premières interprétations sédimentologiques. Ces travaux montrent bien l'existence de trois séquences deltaïques formant trois ensembles sableux qui sont autant d'aquifères, de bas en haut, les Sables de Lamnay et de la Trugalle (Cénomaniens inférieur), les Sables du Mans (Cénomaniens moyen) et les Sables du Perche (Cénomaniens moyen à supérieur). Ces trois ensembles deltaïques avaient probablement leur source dans la partie Sud du massif Armoricaen (Juignet, 1974). Ils se pincent du Nord-Est (Perche) où ils sont le plus développés vers le Sud-Ouest (Poitou) où ils passent à des zones continentales, avec des terminaisons en *onlap*. Ces géométries à grande échelle ont été bien comprises dans les coupes de Juignet (1974) et le diagramme de Wheeler proposé par Louail (1981) qui synthétise les passages latéraux entre les principales formations de la Sarthe et de l'Anjou (Louail, 1981). Cependant, pour restituer en 3D de façon précise les géométries des différents ensembles sableux, et leur relation entre eux (contact, amalgame, ou à l'inverse intercalation d'intervalles argileux aquitard), il est nécessaire de compléter ces connaissances par une interprétation des données de subsurface. Restaurer de façon intelligible les géométries complexes que présentent systématiquement des ensembles deltaïques (Plint, 1996) nécessite de disposer d'une densité importante de données de qualité, interprétables et corrélables.

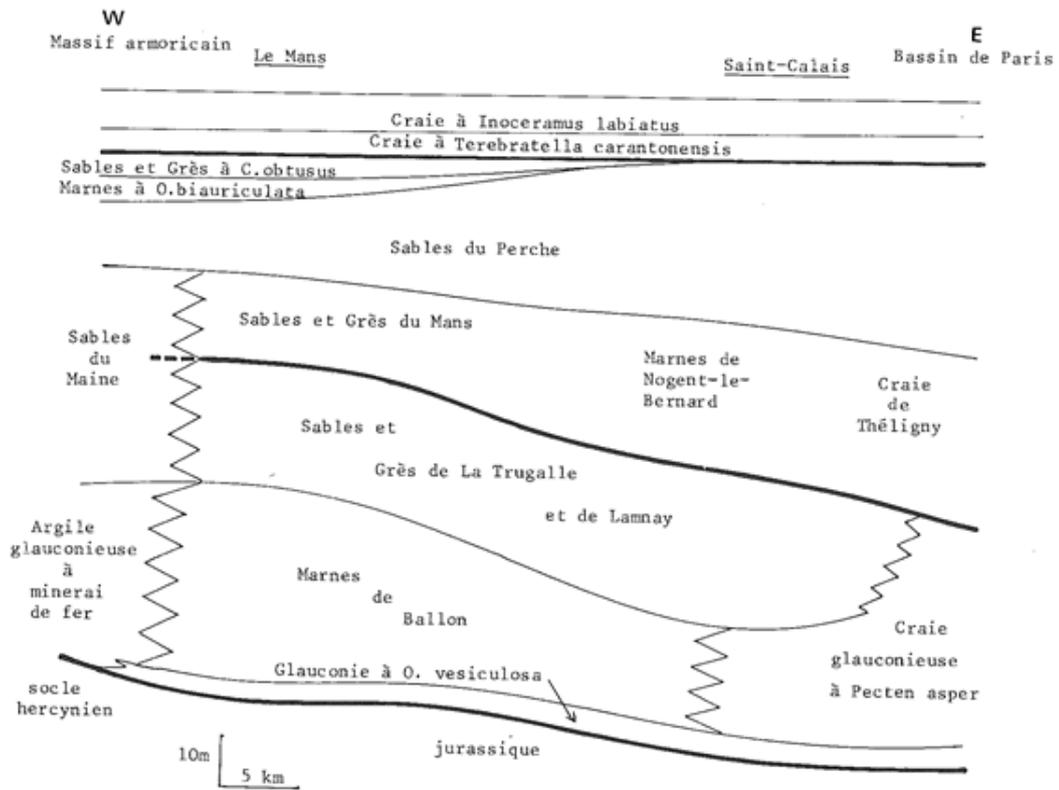


Figure 2: Coupe à travers la Sarthe montrant les géométries à grande échelle du Cénomaniens. (Juignet 1974).

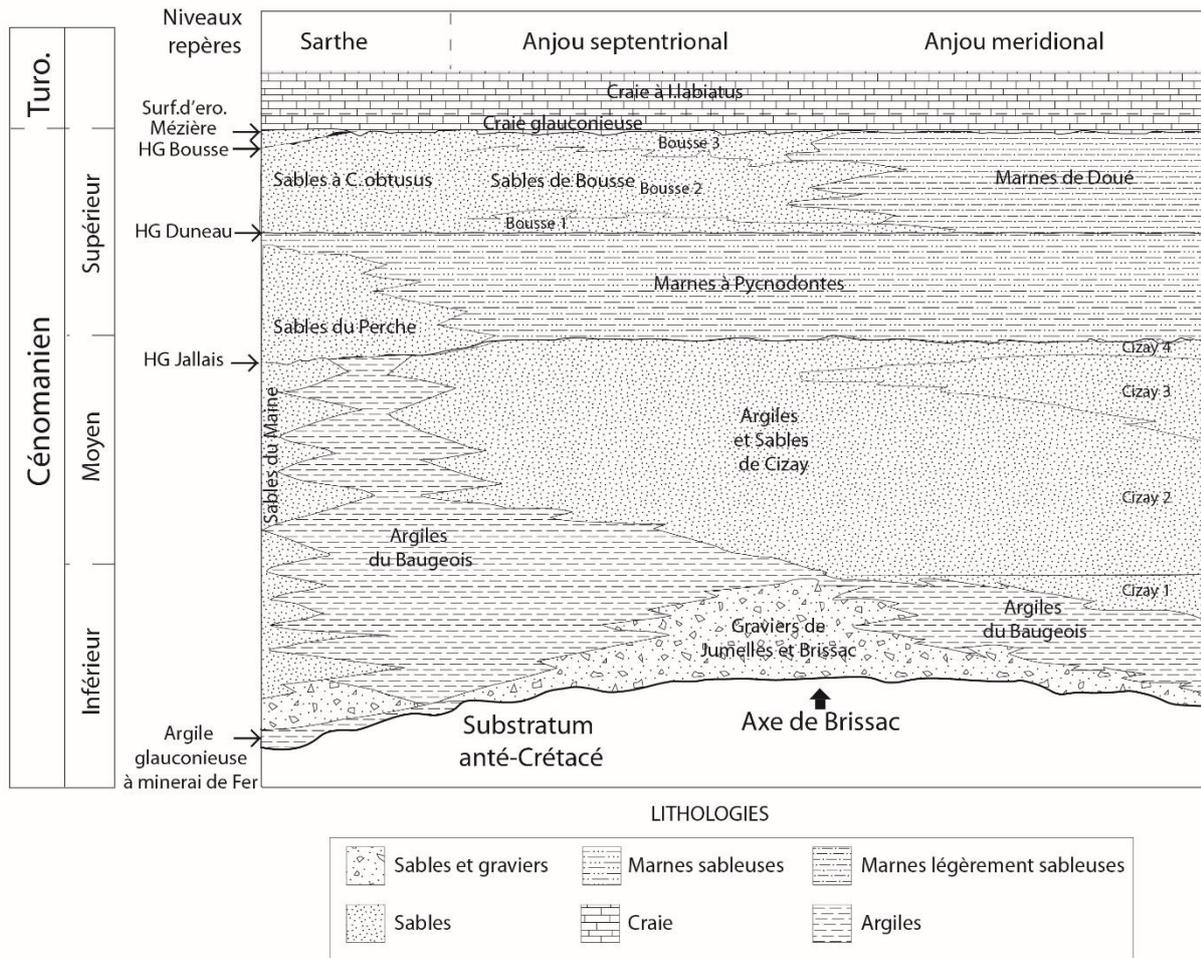


Figure 3: Diagramme de Wheeler entre la Sarthe et l'Anjou. (Louail, 1981).

Le Jurassique est principalement connu à l’affleurement par les travaux de Dugué (1989) en Normandie, et de Gonnin et al (1993) dans le Poitou, puis plus récemment dans le cadre des thèses de Fabien Lenoir (2012) et Simon Andrieu (2016). Ces derniers travaux ont permis une première compréhension intégrée de la stratigraphie et des géométries sédimentaires entre la Normandie et le Poitou et entre données d’affleurement et rares données de subsurface disponibles. Ces travaux ont été continués dans la présente étude, en particulier grâce à la récupération, de nouvelles données diagraphiques.

2. Récupérations et valorisations des données

2.1. DONNEES GEOLOGIQUES

Les données géologiques à collecter pour la réalisation du projet sont des données diagraphiques et géologiques (coupes, références bibliographiques, observations de terrain, données structurales). Sur le plan des données hydrogéologiques, les données importantes à collecter pour la réalisation du projet dans son volet hydrogéologique sont des données hydrodynamiques (essais réalisés et caractéristiques hydrodynamiques) et les coupes techniques des ouvrages testés.

En amont et au début de ce projet, une importante quantité de coupes géologiques et surtout de diagraphies a été collectée auprès des archives départementales, de services de l'État, de bureaux d'étude et de foreurs, ce qui a permis de densifier significativement la base de données en Sarthe et en Maine-et-Loire, ainsi que les départements voisins inclus dans l'emprise de la zone d'étude (Vienne, Deux-Sèvres, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher, Eure-et-Loir, Orne).

Le plus important réservoir de données de diagraphies sur le secteur d'étude concerne les archives du bureau d'études Pierson, stockées dans les locaux de la société SADE CGTH / Montavon à Saint-Avertin (37). Le résultat de ce travail préparatoire a permis de capitaliser, après leur numérisation en haute résolution, 1650 documents de diagraphies au format PDF (pour un total de plus de 700 ouvrages investigués par diagraphie), localisés, recoupés avec les données existantes puis chargés en Banque de données du Sous-Sol (BSS).

Ces données ont permis d'injecter en BSS 434 nouvelles diagraphies, 146 nouvelles coupes lithologiques, ou encore 171 nouveaux dossiers de forages d'eau (Figure 4).

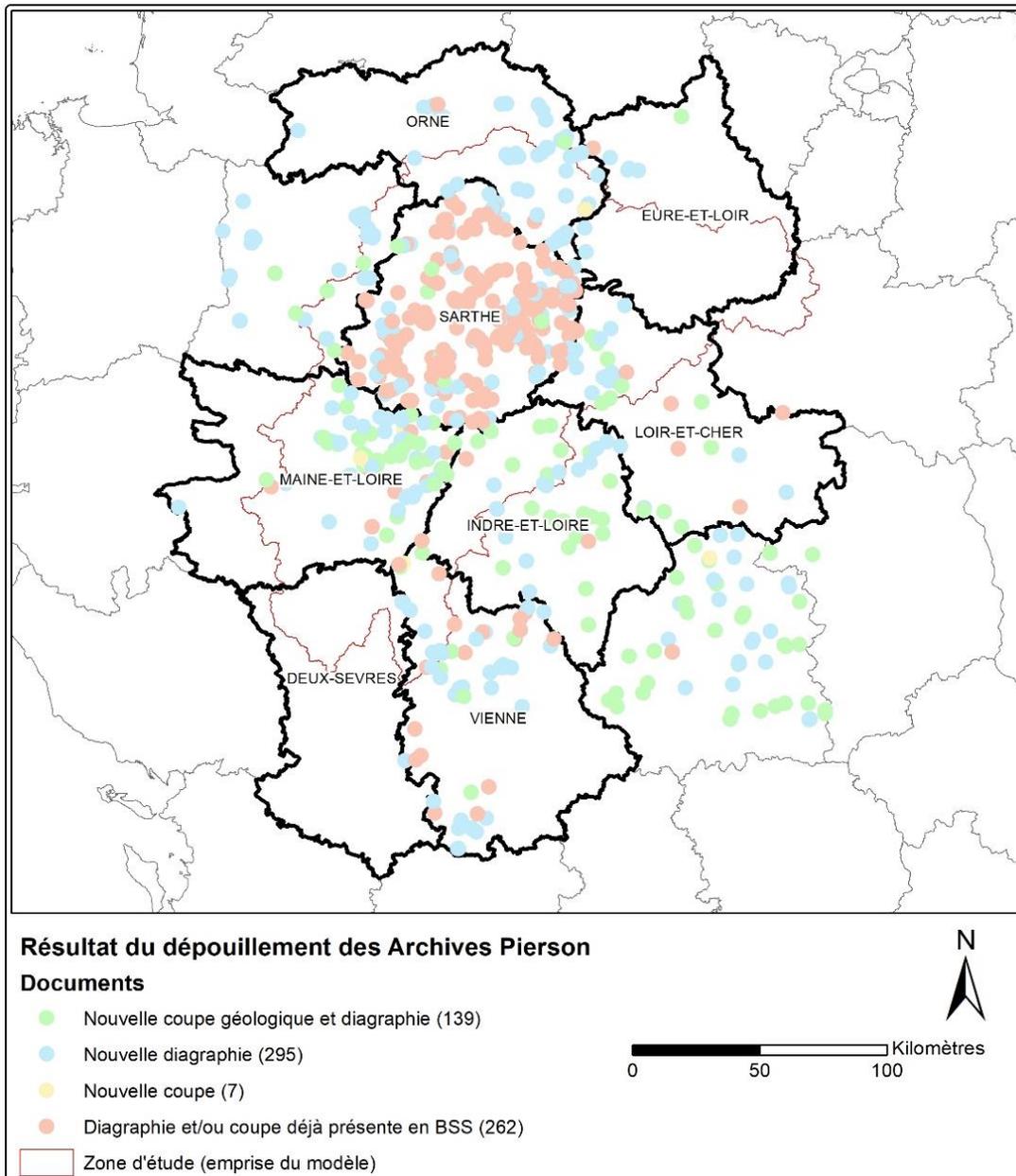


Figure 4 : Localisation et contenu des dossiers de forage Pierson, après comparaison avec les données déjà présentes en Banque du Sous-Sol (BSS)

A l'issue de l'ensemble de ces différentes opérations de complétude du corpus de données pour l'étude, il en résulte un vivier de 1432 forages identifiés avec des diagraphies sur l'ensemble de la zone d'étude (2726 en incluant la totalité sur les 8 départements), comme présentées sur la Figure 5.

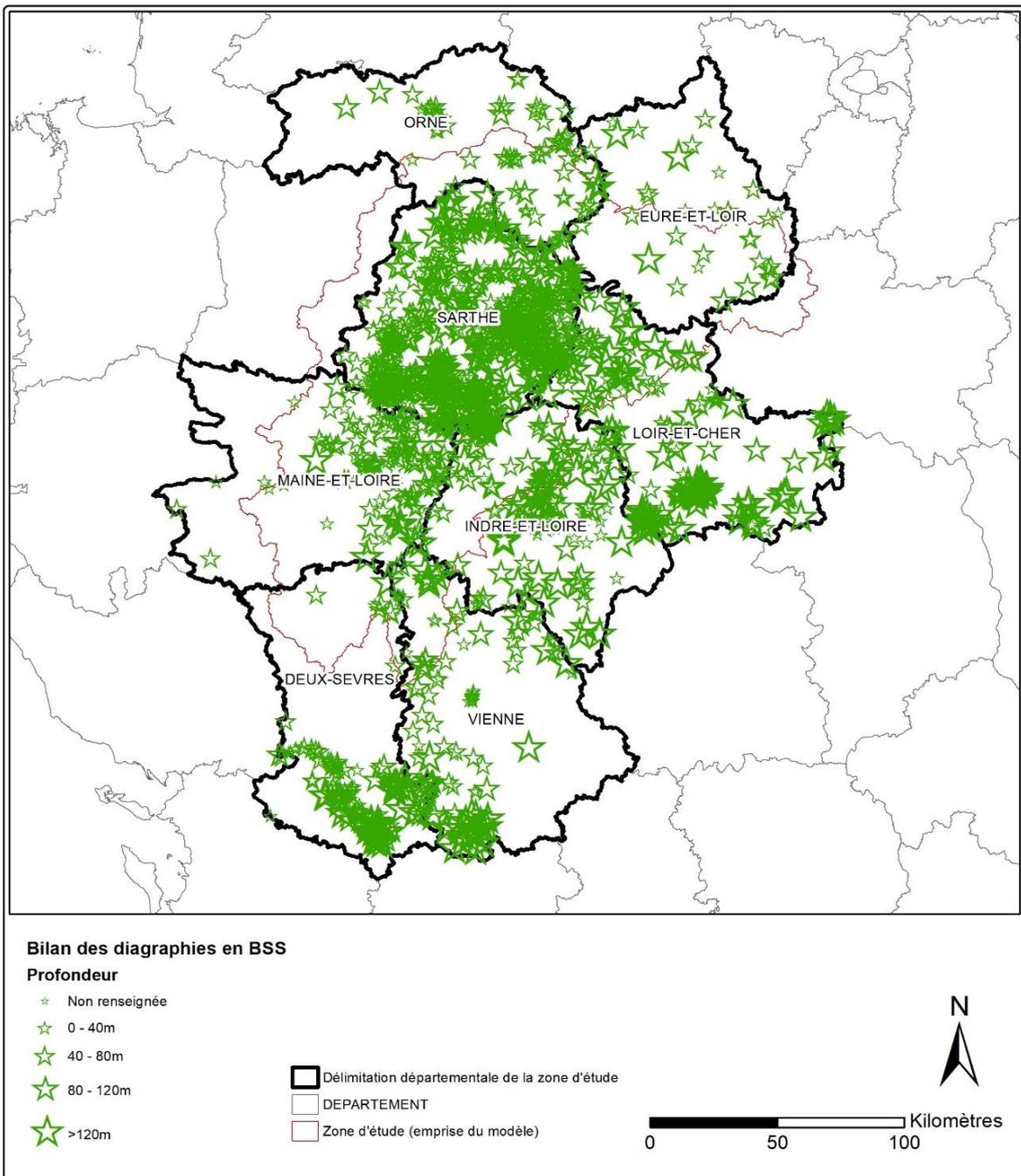


Figure 5 : Localisation des diagraphies présentes en BSS après chargement des nouvelles données collectées auprès des bureaux d'étude Pierson et Géo Hydro Investigation)

Les diagraphies utilisées pour le travail d'interprétation en stratigraphie-séquentielle ont été numérisées puis vectorisées en priorité. Cette étape vise à convertir les données papier collectées en données numériques exploitables pour la suite du projet. 414 diagraphies scannées ont ensuite été vectorisées avec le logiciel Neuralog, avec une valeur captée tous les 5 cm, soit un total de 878 165 valeurs, soit 43 908 m cumulé de forage (Figure 6). Ces valeurs correspondent à 3 types de mesures :

- La radioactivité naturelle, en CPS (Coup Par Seconde) : 665 718 valeurs pour 308 forages

- La polarisation spontanée, m.V : 36 060 valeurs
- La résistivité, en Ohm.m : 176 387 valeurs pour 102 forages

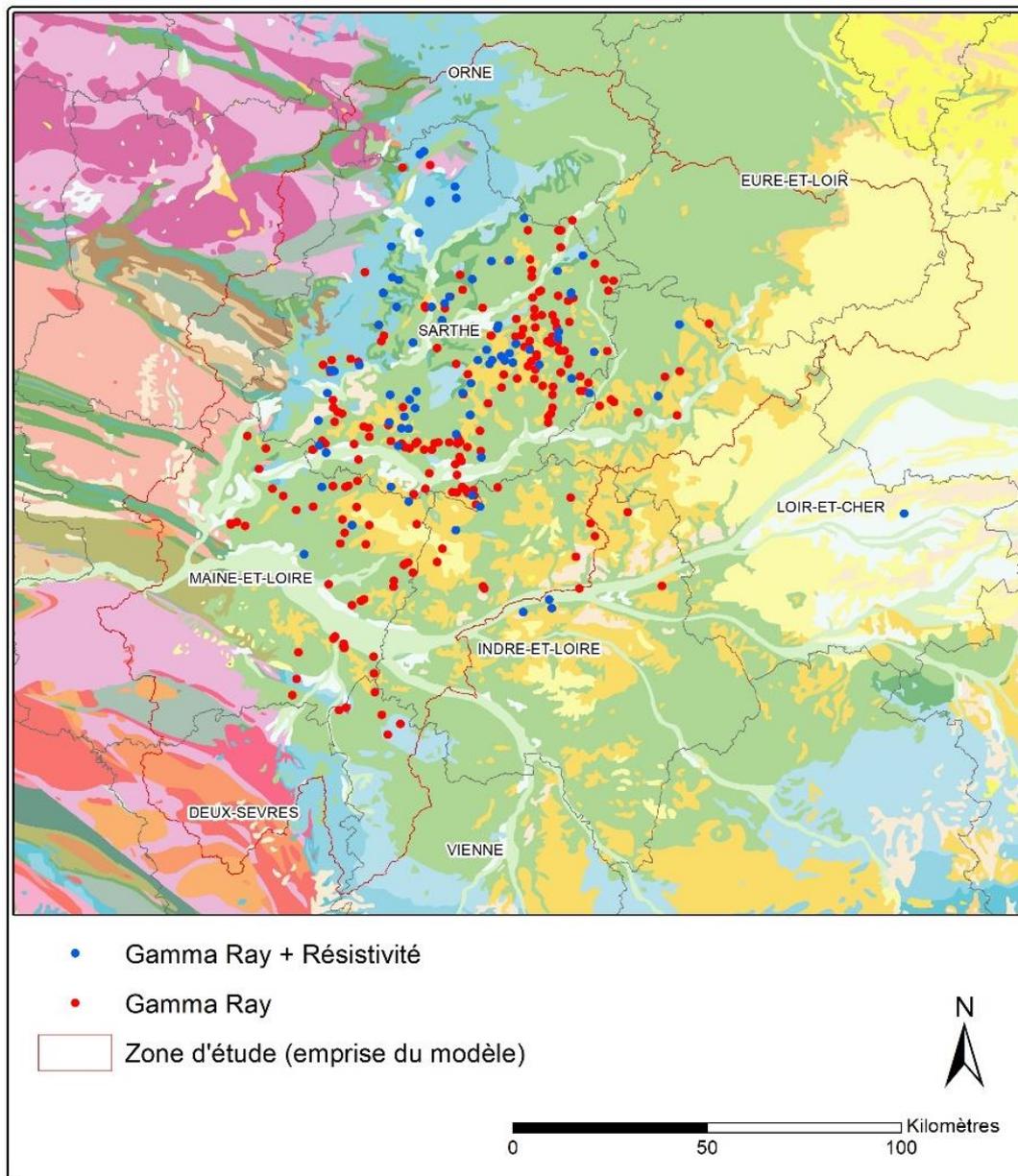


Figure 6 : Localisation des diagraphies vectorisées

Après leur vérification, les données ainsi acquises ont été compilées dans une base de données Access permettant ensuite de travailler par requêtes.

Afin de réaliser les observations de terrain primordiales à l'interprétation de données diagraphiques, les points d'affleurements de l'inventaire du patrimoine ont permis de cibler les campagnes de terrain (Figure 7).

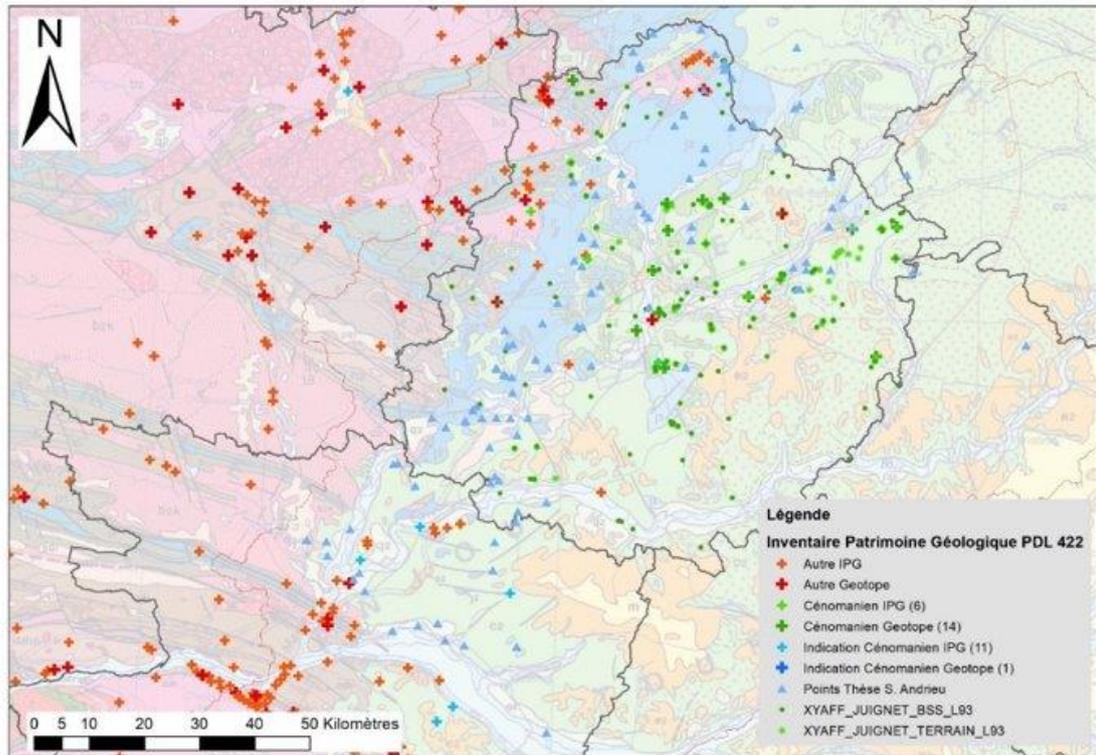


Figure 7 : Points d'affleurement identifiés grâce à l'inventaire du patrimoine géologique.

2.2. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES.

Concernant les données hydrogéologiques, les dossiers des forages en BSS ou collectés en début de projet contenant des documents relatifs à des essais ont été repris pour en extraire les données utiles. Afin de disposer d'un corpus de données homogène pour la suite de l'étude, une base de données exclusivement dédiée à l'hydrogéologie a été créée. Pour chaque ouvrage, ont été renseignées dans cette base les informations d'ordre général (localisation, maître d'ouvrage), les types d'essais de pompage réalisés (date, débit, durée, code de qualité), les paramètres hydrodynamiques calculés, les informations relatives à l'équipement de l'ouvrage (position des crépines, des parties cimentées et des autres parties, du massif filtrant en particulier) et enfin les aquifères captés (nature, type de porosité, entités correspondantes dans le référentiel BDLISA).

Les données considérées comme nouvelles ont été ajoutées à la banque de données du sous-sol (BSS et BSSEAU). Ceci a impliqué un travail de saisie et de vérification des données conséquent.

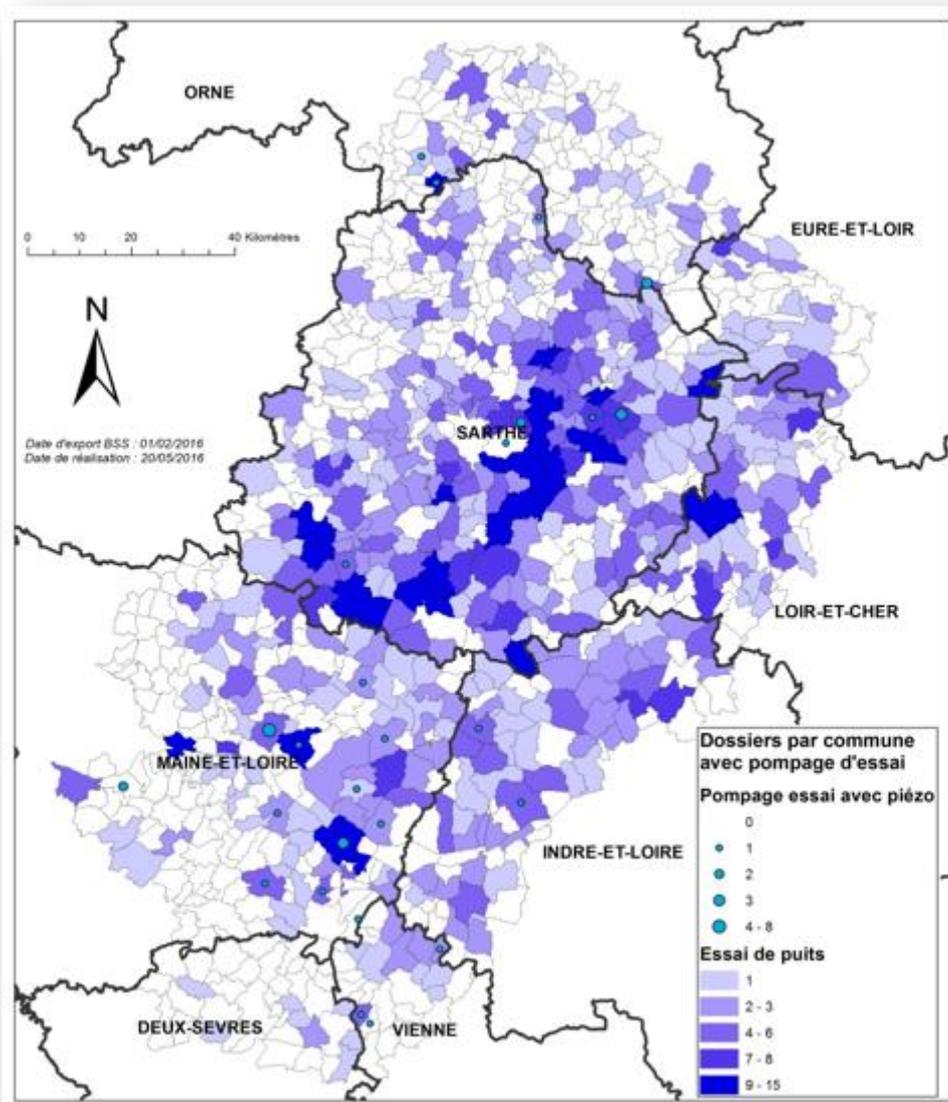


Figure 8 : Récupération des données de pompage d'essai lors du projet .

Les données hydrogéologiques collectées seront mises à profit lors de l'élaboration du modèle hydrodynamique des aquifères sédimentaires de la Sarthe et du Maine-et-Loire, qui sera développé dans une prochaine phase d'étude. Cela concerne principalement les valeurs de transmissivité, perméabilité et coefficient d'emmagasinement.

3. Etude géologique.

L'interprétation géologique et hydrogéologique a été en grande partie concentrée sur le Jurassique et le Cénomaniens compte tenu des enjeux en eaux souterraines qu'ils représentent et du réel besoin d'amélioration des connaissances.

3.1. METHODOLOGIE

L'objectif de cette tâche est de disposer de données harmonisées cohérentes pour la modélisation des différents aquifères. Elle nécessite une amélioration de la compréhension des géométries sédimentaires, qui débouche sur une définition des entités géologiques modélisées. Ces entités sont identifiées alors sous forme de codage en formations lithostratigraphiques, qui sont codées de façon cohérente en subsurface (forages) et en surface (cartes géologiques harmonisées), et mises en relation avec les entités hydrogéologiques connues. Les principales failles et leur cinématique sont hiérarchisées sous forme d'un schéma structural synthétique. L'ensemble de ces travaux fournit un corpus de données qui sont alors intégrées dans la modélisation sous GDM Multilayer©.

3.1.1 GEOMETRIES SEDIMENTAIRES.

Le travail de reconstitution des géométries et de l'architecture des systèmes sédimentaires qui a été mené dans cette étude se base sur les principes de la stratigraphie séquentielle haute résolution (Homewood et al., 1992, Van Wagoner et al., 1988 ; Mitchum et al., 1991).

Les étapes de cette méthode sont :

- La compilation ou l'acquisition de données de calage temporel de différents dépôts géologiques, permettant de disposer d'âges relatifs et d'établir leur succession dans le temps ;
- La définition de modèle(s) de faciès permettant de repositionner les différents faciès observés sur un profil de dépôt ;
- L'identification et la corrélation des séquences de dépôts basées sur l'empilement vertical des faciès et la reconnaissance de surfaces clefs, en premier lieu sur des données 1D, puis 2D ;
- Une validation des corrélations en 3D par maillage (= croisement) entre les différents transects de corrélation permettant de reconstruire les géométries 2D de l'intervalle étudié ;
- Un retour pour validation sur les modèles de faciès établis après les corrélations et les architectures sédimentaires définies.

Calage temporel des dépôts

Les affleurements du Sud-Ouest du bassin de Paris sont rares (carrières et bordures du bassin) et rendent l'observation stratigraphique discontinue. Afin de caractériser au mieux la pile stratigraphique dans son ensemble, il est donc indispensable de travailler avec des données de subsurface (forages diagraphiés) à travers le bassin. Les données de diagraphies et les descriptions lithologiques des forages permettent de réaliser des coupes sur lesquelles les unités géologiques sont corrélées selon les principes de la stratigraphie séquentielle.

Afin de bien contraindre les corrélations, il est nécessaire au préalable de faire l'inventaire des formations datées et de définir le cadre chronostratigraphique basée sur les études biostratigraphiques disponibles dans la littérature (articles, thèses, notice de cartes géologiques).

Sédimentologie de faciès et modèle de faciès

La base de la démarche relève du domaine de la **sédimentologie de faciès**. Cette première étape a pour but de définir les faciès sédimentaires, que ce soit sur un affleurement, sur carottes ou en *cuttings*.

Ces différents faciès sont caractérisés par :

- Leur lithologie, pétrologie, granulométrie et texture ;
- Des structures sédimentaires ;
- Leur contenu biologique, incluant la bioturbation.

L'ensemble de ces caractéristiques permet de définir les conditions de dépôt des différents faciès identifiés et de les rattacher à un environnement de dépôt.

La substitution latérale et/ou verticale de faciès permet de reconstruire un modèle de faciès, c'est-à-dire de reconstruire un profil paysage (profil de dépôt) sur lequel sont repositionnés les différents faciès sédimentaires.

Un seul faciès ne permet que rarement de définir un milieu de sédimentation : c'est une association de faciès qui se succèdent dans le temps (ou séquence de dépôt), en d'autres termes, c'est la position d'un faciès par rapport à un autre sur une section verticale, qui permet d'identifier un environnement de dépôt.

Proposition d'un découpage séquentiel sur une coupe 1D

Suite à l'étude des faciès sédimentaires, le mode d'empilement sédimentaire vertical des faciès est étudié pour définir un découpage séquentiel 1D.

Dans ce travail, des cycles sont identifiés, limités par deux surfaces de régression maximale (**Maximum Regressive Surface : MRS** ; Catuneanu *et al.*, 2009). Ces surfaces correspondent au maximum de la progradation ; elles sont caractérisées par les faciès les plus proximaux (= amont). Un cycle enregistre donc, entre deux MRS, une phase de **rétrogradation (transgression)**, puis une phase de **progradation (régression)**. L'inversion de tendance au sein d'un cycle est enregistrée par le maximum d'inondation (**Maximum Flooding Surface : MFS** ; Van Wagoner *et al.*, 1988) et est représenté par les faciès les plus distaux (= aval).

Les paramètres à l'origine des alternances de phases progradantes et rétrogradantes sont l'eustatisme, la tectonique (subsidence) et le climat (précipitations, flux sédimentaires, production carbonatée) et seules les MFS et MRS produites sous l'effet de variations qui affectent l'ensemble du bassin constituent des lignes temps corrélables à grande échelle.

L'attribution des surfaces temps sur une coupe 1D n'est validée que par corrélations 2D.

Méthode de corrélation

Cette méthode consiste à corréler les cycles de puits à puits, espacés de moins de 10 km, par des corrélations à haute résolution. Les données servant aux corrélations consistent en des coupes sédimentologiques (carottes, affleurements, *cuttings*) et/ou des diagraphies.

La correspondance entre observations faciologiques réalisées sur les coupes géologiques et les diagraphies s'opère au travers de la définition des électrofaciès. Ceux-ci sont définis sur la base

des caractéristiques des diagraphies : paramètres de forme (cloche, entonnoir etc.) et paramètres quantitatifs tels que l'intensité du signal. Les électrofaciès sont alors traduits en environnements de dépôt à partir des diagraphies les plus proches des affleurements ou des sondages décrits. Afin de bien contrôler les corrélations, il est nécessaire de choisir un niveau de référence. Il doit être isochrone (e.g. Marnes à Ostracées), identifiable facilement, avoir la continuité la plus large possible sur l'ensemble du bassin et il doit être contraint par la biostratigraphie. Après avoir défini une MFS (ou une MRS) de référence, les MFS et MRS des cycles qui constituent les variations élémentaires corrélables de milieu de dépôt sont tracées de puits à puits. Cette méthode permet de réaliser des corrélations à haute résolution et, par l'observation de la disparition de cycle(s) d'un puits à l'autre, de mettre en évidence (1) des niveaux condensés (souvent associés à des géométries en *downlap*) et (2) des troncatures (géométries en *toplap* et *onlap*) (Homewood et al., 1992). Ces dernières surfaces, bien que diachrones et donc non corrélables, donnent de précieux indices sur la dynamique sédimentaire et la paléogéographie. Ces discontinuités peuvent condenser plusieurs cycles, ou encore, en supprimer.

Validation des corrélations par maillage et identification des géométries

Les corrélations puits à puits permettent de reconstituer les géométries des corps sédimentaires (2D). La validité de ces corrélations est testée par leur cohérence spatiale à partir d'un « maillage » des transects. Le maillage consiste à réaliser des croisements des transects de corrélation, en de nombreux points.

Les corrélations validées permettent alors d'obtenir les géométries des dépôts sédimentaires à haute résolution et d'identifier ainsi par exemple les corps réservoirs et les couvertures.

Le degré de validité des corrélations dépend bien entendu fortement de la qualité de l'analyse verticale, de la densité de l'information et du calage biostratigraphique.

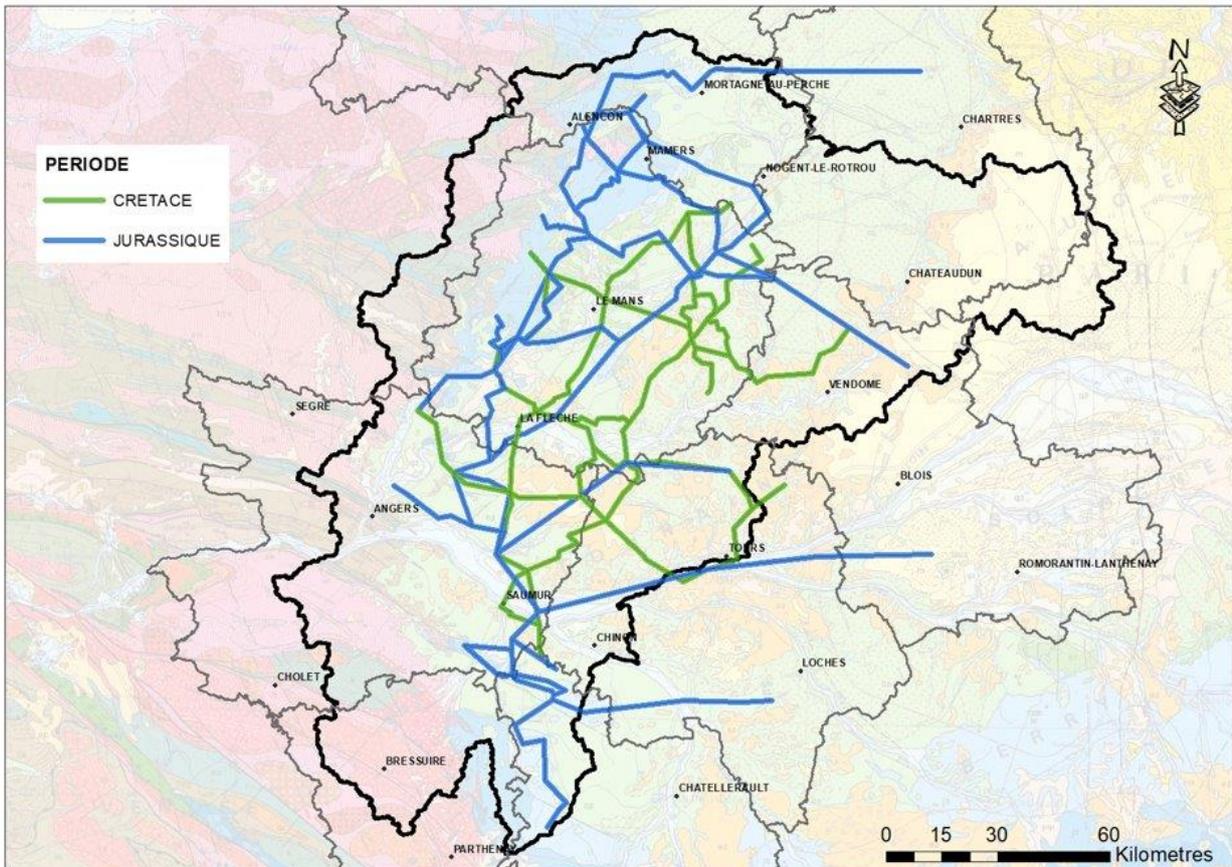


Figure 9 : Transects de corrélation pour le Jurassique et le Cénomanién

3.1.2. CODAGE, HARMONISATION BANCARISATION DES DONNEES.

Définition de la pile modélisée.

A partir des géométries reconstituées par corrélations entre subsurface et affleurement, de la complexité des géométries et de la quantité de données disponibles en subsurface pour les restituer, la pile stratigraphique retenue pour la modélisation est alors définie.

Harmonisation à l'affleurement.

Outre le levé de coupes qui servent d'affleurements de références, les codages et contours des entités géologiques retenues dans la pile modélisée ont été harmonisés sur l'ensemble de la zone du projet *i.e.* Sarthe et Maine-et-Loire, ainsi que les zones géographiques couvertes par le modèle dans les départements de l'Orne, de l'Eure-et-Loir, du Loir-et-Cher, de l'Indre-et-Loire et de la Vienne.

Bancarisation.

Les transects de corrélations ont été réalisés sur le module "Cross-Section" du logiciel GEOGRAPHIX. Ce logiciel, utilisé dans le domaine pétrolier, permet de gérer des données de forages, de les spatialiser, d'effectuer des interprétations géologiques (classiques ou en

stratigraphie-séquentielle), d'en assurer la cohérence par maillage et surtout de sauvegarder ces interprétations en base de données.

Dans un deuxième temps, la modélisation et l'hydrogéologie utilisant comme référence les formations lithostratigraphiques, un codage ou un recodage suivant les cas, en log validés a été réalisé pour l'ensemble des forages étudiés. Ces ouvrages ont été saisis dans l'application Logiso et seront visibles à terme sur Infoterre. Les formations définies et harmonisées dans les diagrammes de Wheeler du Jurassique et du Cénomaniens ont été utilisées pour réaliser les codages.

Tests de cohérence BDLISA.

Les codages des forages en termes de masse d'eau ont été comparés aux codages révisés d'après les logs validés. De même, les formations harmonisées ont été comparées avec les différentes entités BDLISA cartographiées. Ceci permet de faire un premier bilan des évolutions à apporter sur les données BDLISA actuelles.

3.1.3. SCHEMA STRUCTURAL.

Les schémas structuraux des différentes cartes géologiques de la zone d'étude, sont assez hétérogènes, et présentent fréquemment de très nombreux accidents observés et supposés sans qu'il y ait de hiérarchisation en structures majeures et structures mineures. De plus la cinématique de ces accidents est peu connue. Les travaux réalisés dans ce projet avaient pour objectifs :

- De caractériser les cinématiques et structures internes de failles sur certains grands accidents tectoniques notifiées sur les cartes géologiques
- De définir un schéma structural régional simplifié sur la zone d'étude sur la base des observations de terrain réalisées et de la littérature, qui sera intégré au modèle géologique 3D.

Méthodologies et représentations utilisées.

Sur le terrain, les observations microstructurales consistent à relever les différents tectoglyphes afin d'en déduire la ou les cinématiques à l'origine des déformations observées dans les roches.

L'orientation et pendage de ces tectoglyphes sont mesurés et reportés soit sur un diagramme en rose (0 à 360°) soit sur une projection stéréographique (hémisphère inférieure). Si les tectoglyphes sont suffisamment nombreux, il est parfois possible de procéder à une inversion de paléocontraintes (Angelier, 1990 ; Angelier, 1994). Les résultats des calculs de paléocontraintes incluent :

- L'orientation des axes de contraintes principales majeur, intermédiaire et mineur (σ_1 , σ_2 et σ_3 , respectivement), représentée sur toutes les figures respectivement par un cercle rouge (σ_1), un carré non coloré (σ_2) et un triangle bleu (σ_3) (Figure 10).
- L'angle d'erreur (l'angle entre la strie optimale calculée sur le plan de faille et celle mesurée, avec le tenseur de contrainte déterminé). L'histogramme doit afficher une courbe de style gaussien avec une erreur minimale (si possible avec des angles inférieurs à 20 °).
- Le paramètre de forme ellipsoïde $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ (Figure 11)

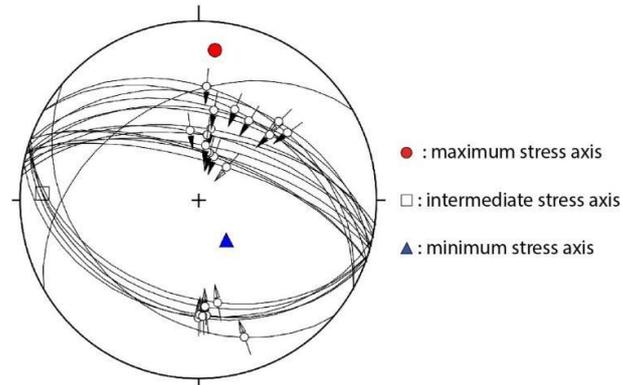


Figure 10: Exemple de représentation de projection stéréographique de Schmidt (hémisphère inférieure) et tenseur de paléocontraintes associé pour un site compressif.

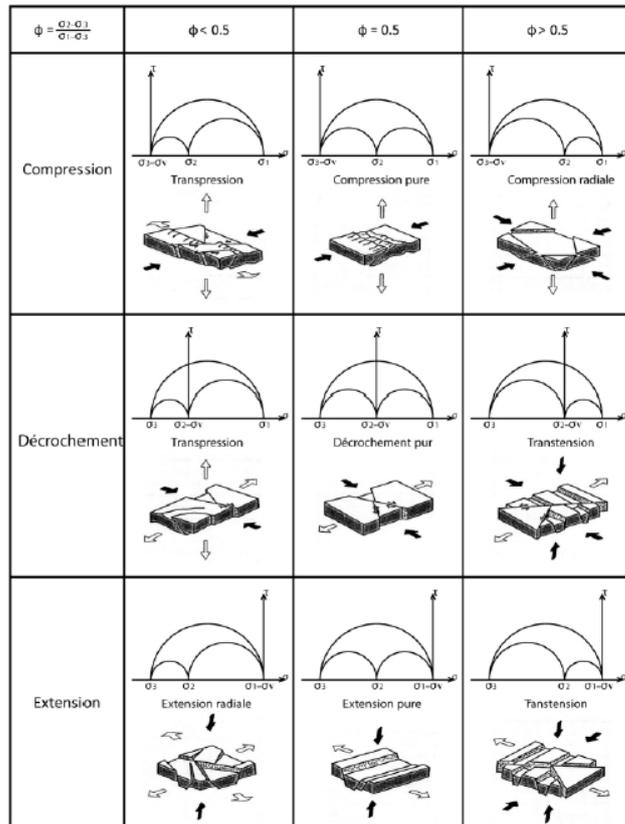


Figure 11 : Les différents états de contrainte en fonction du rapport de forme $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ pour les régimes compressifs, décrochants et extensifs (Ritz et Taboado, 1993).

3.2. JURASSIQUE

3.2.1. FACIES SEDIMENTAIRES

Sept environnements de dépôt ont été identifiés (Figure 13), au sein desquels se distinguent 9 grandes typologies de faciès aux qualités de réservoir variables (Figure 14) :

1. L'offshore inférieur se marque par des faciès à dominante marneuse, qui se déposent en dessous de la limite d'action des vagues de tempête, à des bathymétries supérieures à 40 m ; (2) l'*offshore* supérieur présente soit des calcaires boueux bioclastiques (*wackestone - packstone*) soit des dépôts argilo-sableux, qui se déposent à des bathymétries intermédiaires (>10-15 m) entre la limite d'action des vagues de tempête et de beaux temps ;
2. Les milieux agités de *shoreface*, au-dessus de la limite d'action des vagues de beau temps (bathymétrie <10-15 m), se caractérisent par des dépôts granulaires carbonatés à mixte (*grainstone*) formant des barrières ou cordons ;
3. L'estuaire se marque par des dépôts de sables silicoclastiques et grès ;
4. Le lagon où se déposent des calcaires à dominante boueuse (*mudstone* à *packstone*) avec localement des bioconstructions coralliennes ;
5. Les environnements supratidaux, proches de la ligne de côte mais au-dessus du niveau de la mer à marée haute, qui présentent des faciès très variables (marnes, sables, calcaires) ;
6. Les milieux continentaux où se forment des paléosols. Les caractéristiques des faciès par environnement de dépôt sont détaillées ci-dessous.

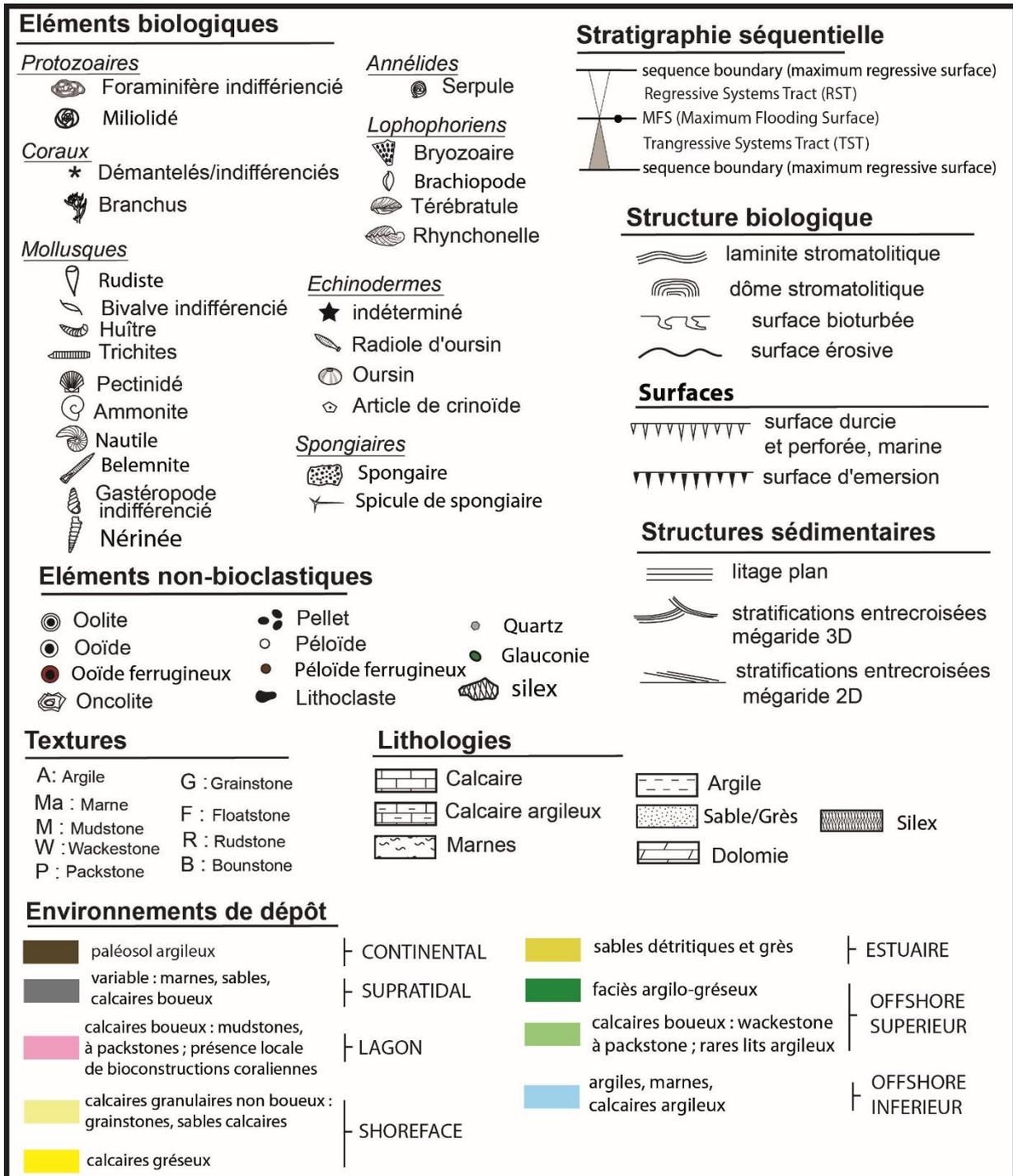


Figure 12 : Légende des figures de la partie 3.2

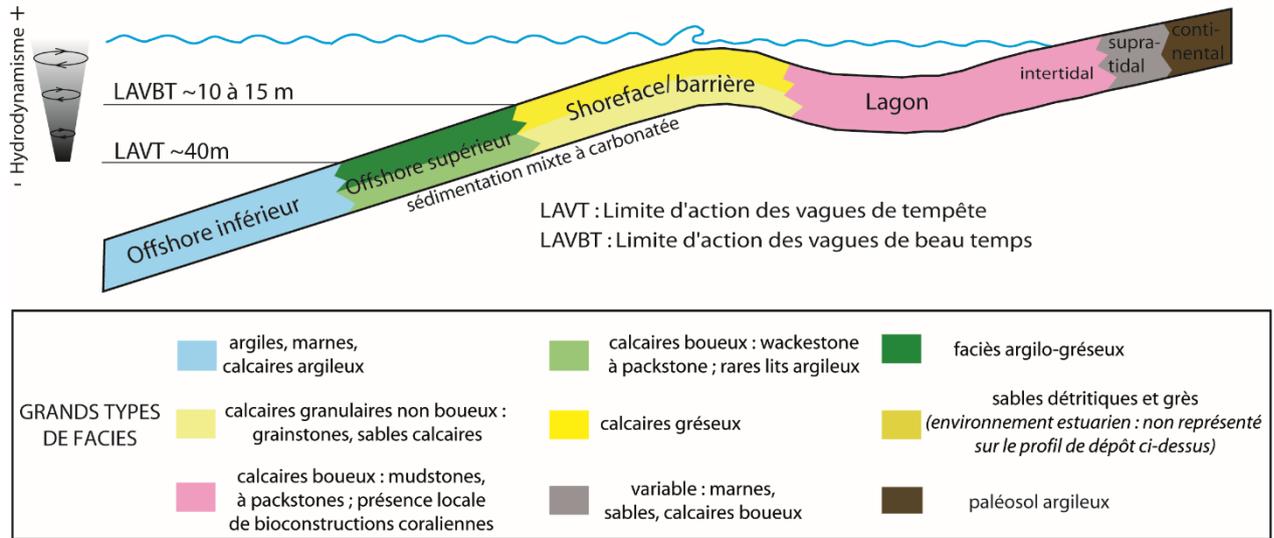


Figure 13 : Profil de dépôt synthétique de la zone d'étude depuis l'offshore inférieur jusqu'au continent avec emplacement des grands types de faciès sédimentaires

QUALITÉ DU RÉSERVOIR	FACIES CORRESPONDANTS	ENVIRONNEMENTS DE DÉPÔT
MODÉRÉE À TRÈS BONNE (dépendant de la diagenèse)	grès, sables détritiques	estuaire
	calcaires gréseux calcaires granulaires non boueux : grainstones, sables calcaires	shoreface, cordon
MODÉRÉE À BONNE	calcaires boueux : mudstones, wackestones, packstones présence locale de bioconstructions coralliennes	lagon
	variable : marnes, sables, calcaires boueux	supratidal
MODÉRÉE	calcaires boueux : wackestone à packstone rares lits argileux	offshore supérieur
	faciès argilo-gréseux	
MAUVAISE	argiles, marnes, calcaires argileux	offshore inférieur
	paléosol argileux	continental

Figure 14 : Qualités réservoirs des grands types de faciès distingués et environnement de dépôt correspondants

- L'offshore inférieur

Des argiles, marnes, alternances marnes-calcaires (Figure 15A), et des calcaires ferrugineux à glauconieux se déposent dans cet environnement. La granulométrie très fine, l'absence de figures sédimentaires, la bioturbation abondante et la présence de bélemnites et d'ammonites indiquent un environnement de dépôt très calme en dessous de la limite d'action des vagues de tempête. Les faciès sont peu perméables et constituent généralement des aquitards.

- L'offshore supérieur

Dans cet environnement se déposent soit (1) des calcaires boueux (de texture wackestone à packstone ; Figure 15B) pouvant alterner localement avec des interlits marneux, soit (2) des

sables argileux. La présence de niveaux d'accumulation de fragments de bivalves, de gouttières d'érosion et de *hummocky cross-stratification* (HCS) suggèrent que la sédimentation s'est effectuée dans un milieu à hydrodynamisme variable, sous l'influence des tempêtes. Ces faciès sont peu favorables à la formation de réservoirs car la porosité intergranulaire est remplie de boue carbonatée (micrite) ou d'argiles. Néanmoins, ils présentent une microporosité et peuvent être fracturés postérieurement au dépôt. Ils forment des aquifères de qualité mauvaise à moyenne.

- Le *shoreface*

Les faciès de *shoreface* sont des calcaires granulaires non-boueux de texture *grainstone* à *rudstone*, oolithiques (Figure 15 C et D), bioclastiques ou silicoclastiques. La présence de stratifications obliques et entrecroisées dans des dunes (2D à 3D) indiquent un dépôt dans un milieu de haute énergie sous l'influence des vagues ou des marées. Ces faciès sont favorables à la formation de très bons réservoirs comme illustré en Figure 15D. Sur cette photographie au microscope d'un sable oolithique, la porosité intergranulaire, colorée en bleue, dépasse 25 %. Néanmoins, cette porosité peut localement être remplie par des ciments carbonatés au cours des transformations diagénétiques (Figure 15C). Ces faciès forment donc des aquifères de qualité modérée à très bonne, en fonction de l'évolution diagénétique.

- L'estuaire

L'environnement d'estuaire se caractérise par des dépôts de sables bien triés à quartz, feldspaths, glauconie et éléments bioclastiques plus rares : échinodermes, bivalves, gastéropodes (Figure 15E et F). Ils sont constitués de dunes tidales enregistrant le courant de marée. Tout comme les faciès de *shoreface*, ils forment des aquifères de qualité modérée à très bonne, en fonction de l'évolution diagénétique. (Figure 15F).

- Le lagon

Les faciès sont des calcaires boueux à nérinées (gastéropodes), oncolithes et bioconstructions coralliennes (Figure 15G et H). La présence de miliolles, de coquilles bien préservées et de microbialites argumente pour un environnement de lagon protégé. Ces faciès forment des aquifères de qualité variable : mauvaise lorsque la porosité est remplie par de la micritique, bonne lorsqu'une partie est préservée (Figure 15H).

- Les environnements supratidaux

Les faciès correspondants sont argileux, sableux ou calcaires. Ils présentent des niveaux ligniteux, des ostracodes et gyrogonites de characées, indiquant un environnement de dépôt très calme et protégé des apports marins, malgré la proximité du trait de côte. La qualité réservoir est très variable, avec l'alternance de niveaux aquitards (argiles) et aquifères (sables et calcaires).

- Les environnements continentaux

Le faciès associé est un paléosol décrit par Dugué (1989) et Ménillet *et al.* (1999) dans la région d'Argentan. Il est composé de silts, argiles et grains de quarts d'un diamètre moyen de 0,1 mm. La présence de gyrogonites de characées et de racines atteste d'un environnement continental. Ce faciès argileux forme un niveau aquitard d'épaisseur métrique, dont l'importance hydrogéologique reste limitée.

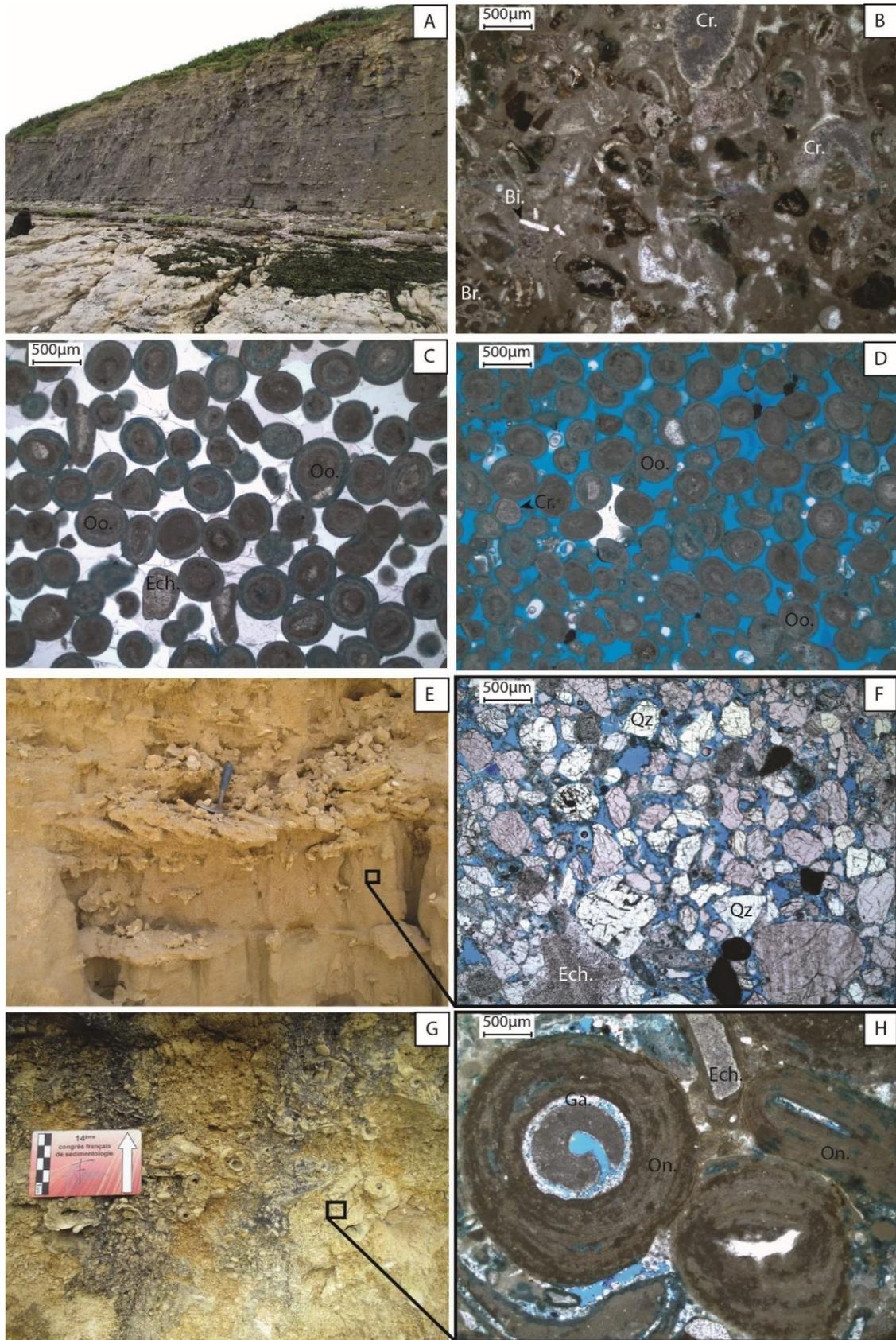


Figure 15 : **A.** Alternance de marnes et de calcaires argileux – Port-en-Bessin – Formation des Marnes de Port-en-Bessin, séquence MJVIII. **B.** Packstone bioclastique à bivalves (Bi.), crinoïdes (Cr.) et

bryozoaires (Br.) dont l'espace intergranulaire est rempli par de la micrite (marron) - carrière de Ségrie - Formation du Calcaire à Montlivaltia, séquence MJX. C. Grainstone oolithique (Oo.) dont la porosité a été intégralement cimentée (sparite blanche au microscope) - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation de l'Oolithe de Villaines-la-Carelle – séquence MJVII. D. Sable oolithique (Oo.) dont la porosité intergranulaire préservée apparaît en bleu - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation de l'Oolithe de Villaines-la-Carelle – séquence MJVII. E. Sables silicoclastiques estuariens présentant des stratifications obliques (sous le marteau) - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation des Sables et graviers de Tessé - séquence MJIII. F. Sables à quartz et échinodermes dont la porosité intergranulaire préservée apparaît en bleu - carrière de Villaines-la-Carelle – Formation des Sables et graviers de Tessé - séquence MJIII. G. Calcaire boueux rudstone à nérinées (gastéropodes) et oncolithes - carrière d'Appenai-sous-Bellême - Formation du Calcaire corallien de Mortagne - séquence LJIV. H. Rudstone à oncolithes (On.), gastéropodes (Ga.) et échinodermes (Ech.) - carrière d'Appenai-sous-Bellême - Formation du Calcaire corallien de Mortagne - séquence LJIV.

3.2.2. EVOLUTION TEMPORELLE ET SPATIALE DES ARCHITECTURES ET FACIES SEDIMENTAIRES

Vingt-deux séquences de dépôt de troisième ordre sont identifiées et corrélables sur l'ensemble de la zone d'étude pour l'intervalle temporel de l'Aalénien à l'Oxfordien (Figure 17, Figure 22, Figure 19).

Elles sont nommées MJ1 à MJXV pour le Jurassique moyen (Aalénien, Bajocien, Bathonien, Callovien) et LJI à LJVII pour le Jurassique supérieur (Oxfordien). L'intégralité des formations lithostratigraphiques sont représentées dans le diagramme de Wheeler en Figure 17, où sont reportées les interprétations de stratigraphie séquentielle. Les formations lithostratigraphiques sont ainsi harmonisées et ont pu être utilisées pour la saisie ou la correction des logs validés.

Les géométries principales sont décrites ci-dessous :

Le Tithonien et le Kimméridgien moyen à supérieur sont absents sur la majorité de la zone d'étude car érodés au cours du Crétacé. Ils apparaissent localement à l'extrême Nord-Est de la zone d'étude (Eure-et Loir, Nord de Chartres). Le Kimméridgien inférieur est localement présent à l'Est comme à l'Ouest de la zone d'étude (noms des formations et faciès en Figure 17).

Le Jurassique moyen et supérieur se marque par une dominance de dépôts carbonatés à marneux, déposés dans une vaste mer épicontinentale peu profonde (généralement <100m). Trois grands types de géométries se succèdent au cours du temps : la rampe carbonatée oo-bioclastique, la rampe argileuse et la plateforme barrée à coraux ou oolithes. La rampe oolithique à bioclastique, qui se développe de l'Aalénien au Bathonien, est faiblement pentée et se marque par une continuité latérale (jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres) des environnements de dépôts, des faciès et donc des réservoirs (Figure 17, Figure 18, Figure 21, Figure 24, Figure 25, Figure 26).

Les aquifères associés présentent de qualités variables. Au cours du Callovien et l'Oxfordien inférieur, une géométrie de rampe marneuse succède à la rampe oo-bioclastique bajo bathonienne. Elle se marque par le dépôt d'une épaisse formation marneuse formant un aquitard quasi continu à l'échelle de la zone d'étude. La géométrie de plateforme barrée apparaît à l'Oxfordien moyen et se maintient à l'Oxfordien supérieur. Elle se caractérise par l'abondance des faciès de lagon et par une transition abrupte entre les faciès carbonatés peu profonds (aquifère), au Nord, et les faciès argileux d'*offshore* inférieur au Sud (aquitard), associée à une rupture de pente (Figure 17, Figure 18, Figure 19, Figure 20).

- Les variations très importantes d'épaisseur de la série du Jurassique moyen et supérieur (de plusieurs centaines à quelques dizaines de mètres) sont associées à la disparition latérale de séquences ou à la condensation des dépôts ;
- La zone nord-saumuroise présente des dépôts très condensés et essentiellement argileux : l'intégralité du Bathonien, Callovien et de l'Oxfordien inférieur à moyen sont absents. Elle sépare deux zones géographiques à sédimentation plus continue :
 - la zone Sud, entre Saumur et Poitiers, où seuls les dépôts du Callovien et de l'Oxfordien inférieur sont condensés ou lacunaires ;
 - la zone Nord, entre La Flèche et Argentan où les lacunes et condensation sont essentiellement présentes à la base de la série (Aalénien à Bajocien inférieur).

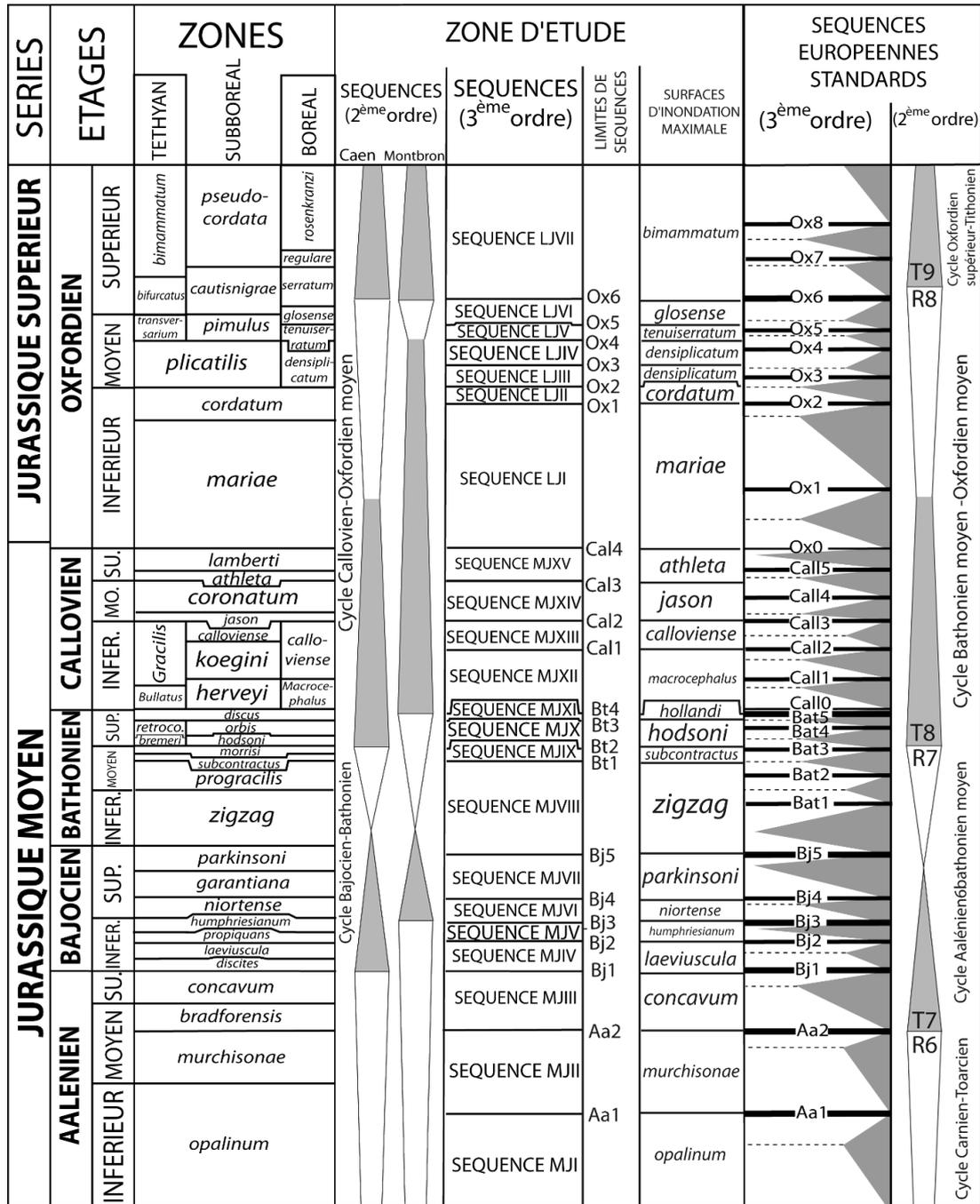


Figure 16 : Séquences de la zone d'étude replacées dans leur cadre temporel et comparées aux séquences européennes (Hardenbol et al., 1998)

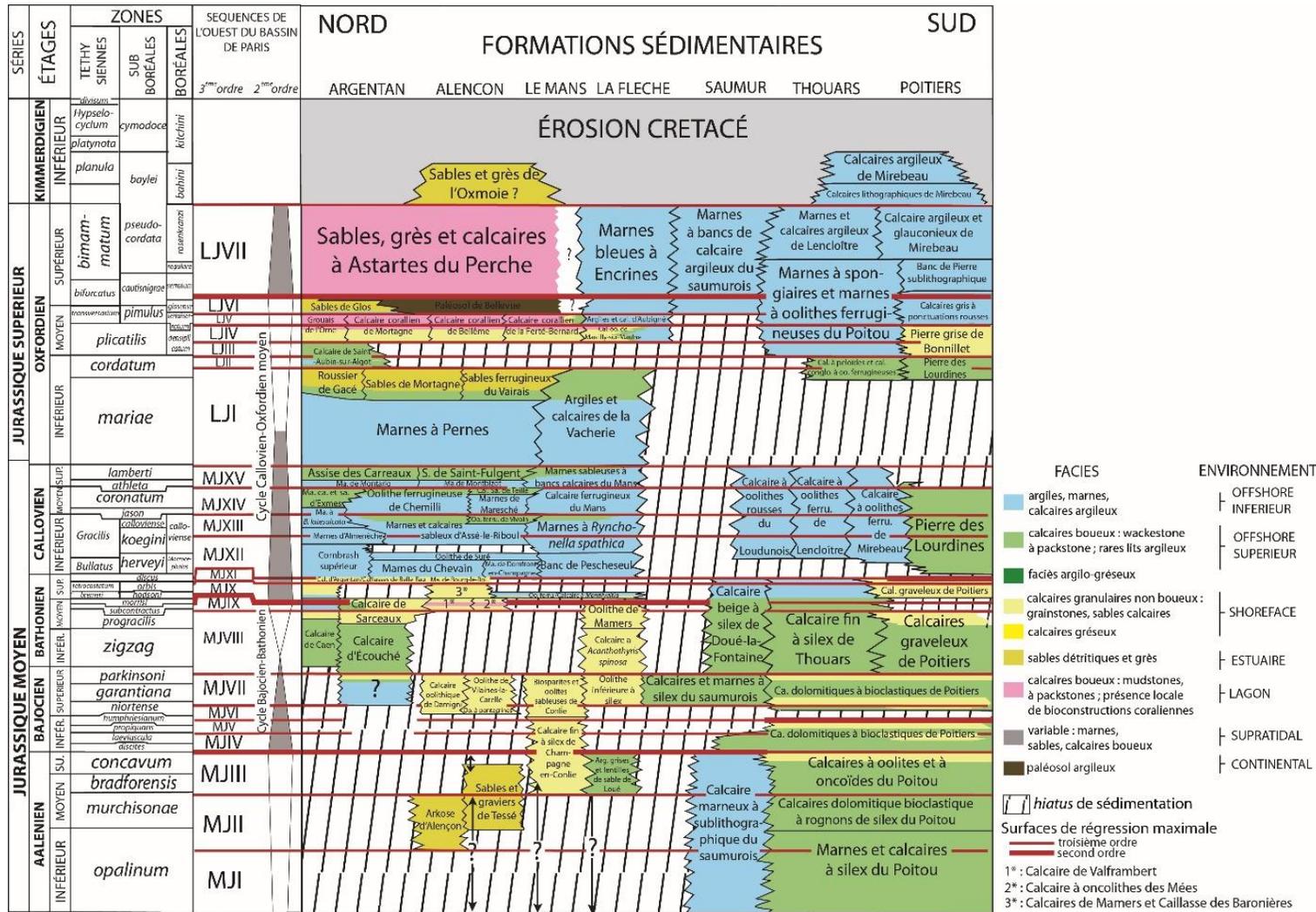


Figure 17 : Schéma lithostratigraphique replaçant les formations sédimentaires du Jurassique moyen et de l'Oxfordien entre Argentan et Poitiers en fonction de leur étendue temporelle et géographique (diagramme de Wheeler). Le cadre séquentiel au troisième et deuxième ordre est présenté. Les biozones à ammonites et séquences européennes standards sont issues de Hardenbol et al. (1998), les durées sont celles de Ogg et al. (2016).

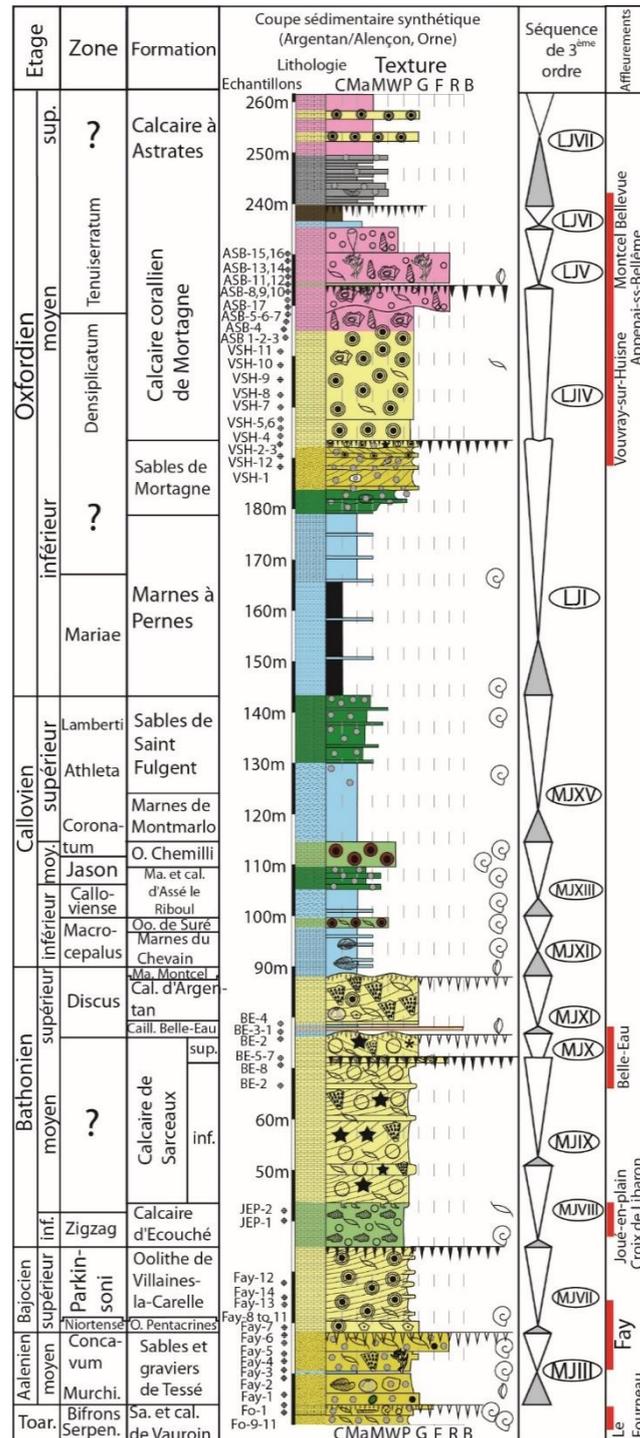


Figure 18 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région d'Argentan avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements étudiés. Cette coupe est issue des observations de terrain complétées par les travaux de Kuntz et al. (1989) et Mogueudet et al. (1998).

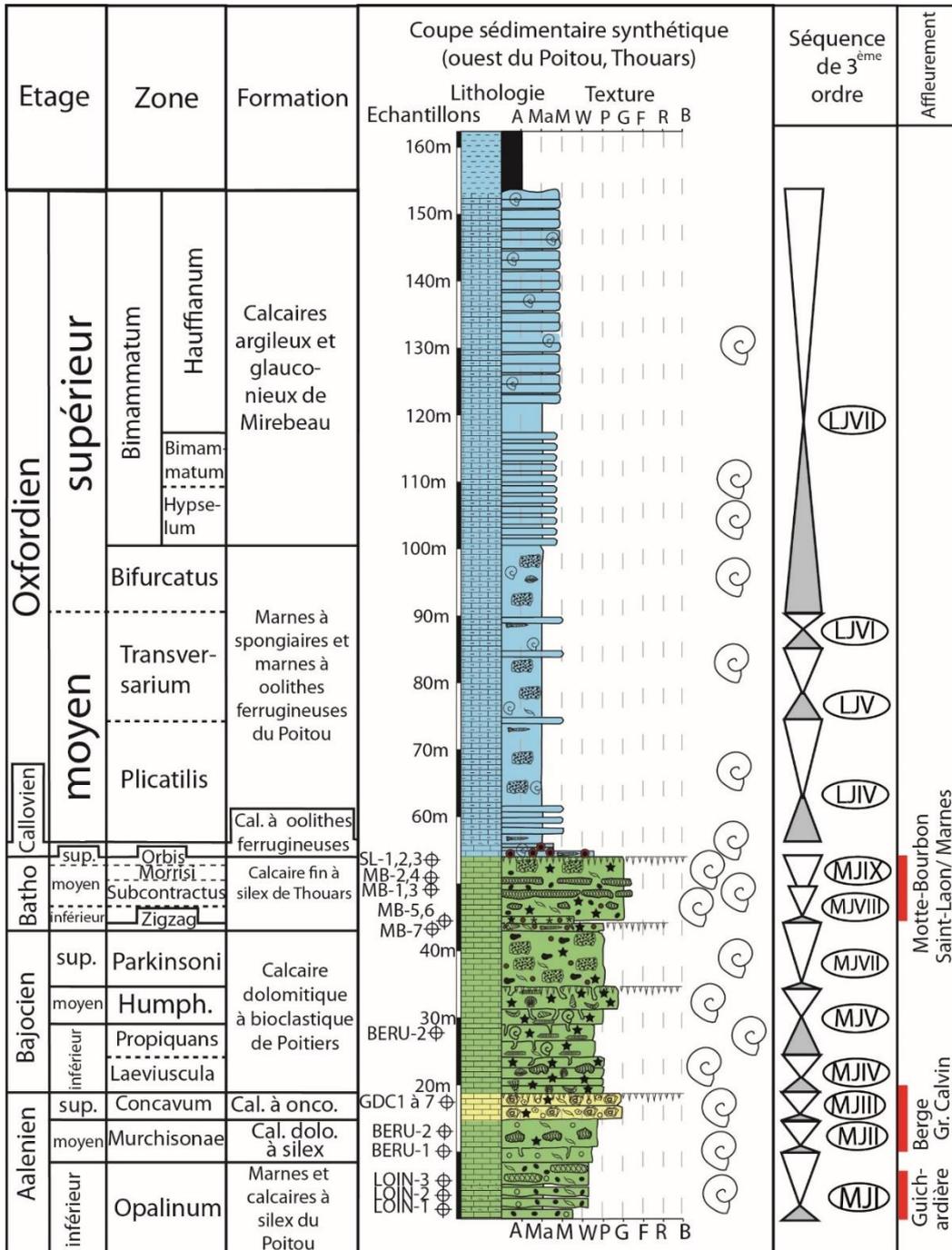


Figure 19 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région de Thouars avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements étudiés, réalisé au cours de cette étude.

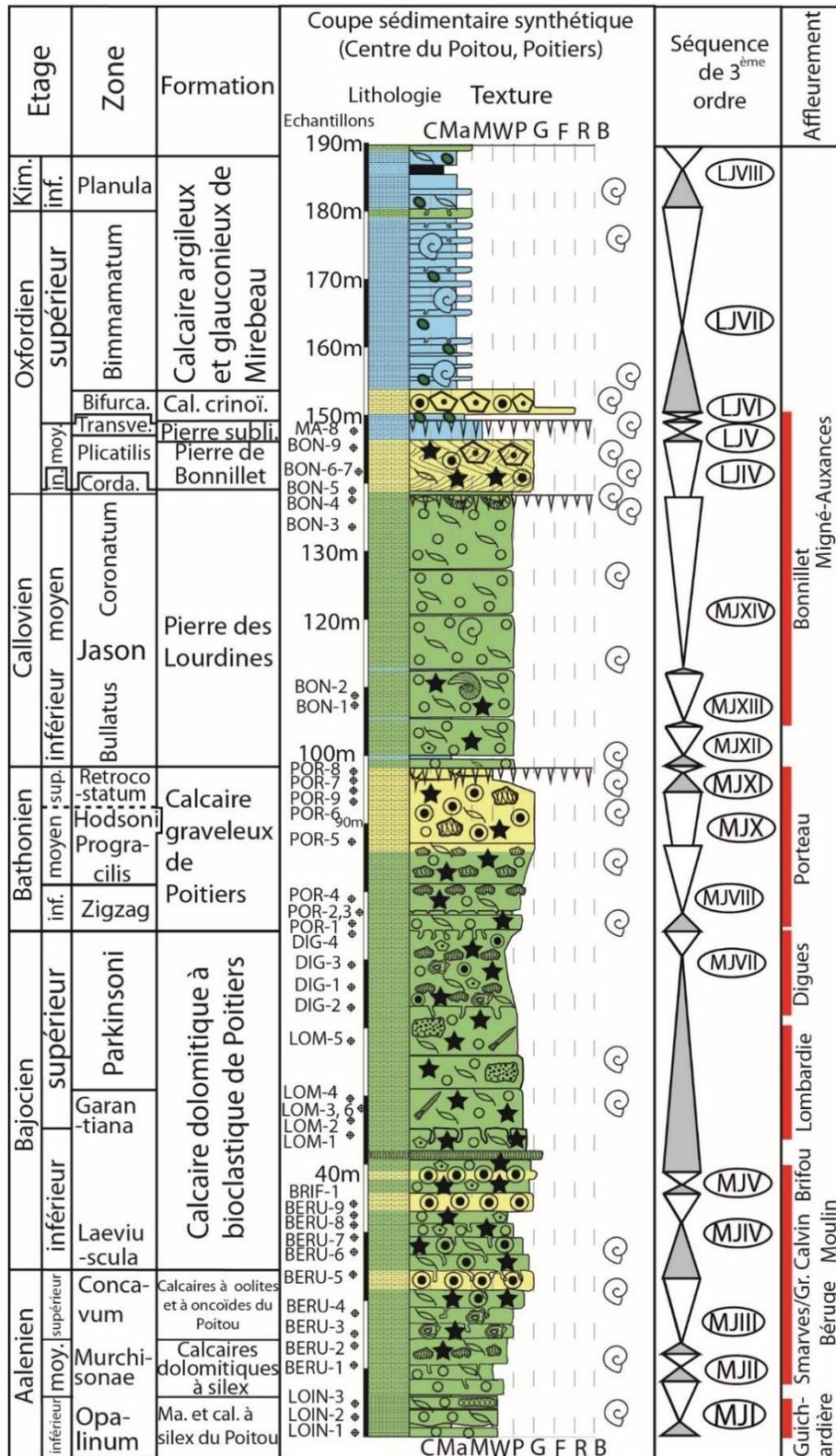


Figure 20 : Coupe sédimentaire synthétique du Jurassique moyen et de l'Oxfordien dans la région de Poitiers avec indication des étages géologiques, formations lithostratigraphiques, zones à ammonites, données biostratigraphiques, textures des carbonates, environnements et séquences de dépôt, et affleurements. Cette coupe est issue des observations de terrain complétées par les travaux de Mourier et al. (1986) et Cariou et Joubert (1989).

L'évolution temporelle et spatiale des architectures sédimentaires, des faciès et des environnements de dépôts est effectuée sur la base de neuf transects de corrélation longs de cinquante à deux cents kilomètres, représentés en Figure 21: sept transects de corrélation d'orientation Est-Ouest et 2 transects de corrélation Nord-Sud.

Un aperçu de la partie Nord du transect de corrélation Nord-Sud est présenté en Figure 22. On peut y observer clairement une séparation entre deux ensembles qui se succèdent verticalement : (1) des dépôts carbonatés aquifères - aux qualités réservoirs variables - d'âge Aalénien à Bathonien et (2) des dépôts marneux aquitards d'âge Callovien à Oxfordien. Les corps sédimentaires qui présentent des faciès homogènes, figurés par les variations de couleur ont des extensions latérales pluri-kilométriques, voire pluri-décamétriques (Figure 23). Leur puissance varie de plusieurs mètres à dizaines de mètres. Au sommet, les surfaces d'érosion d'âge Crétacé et Quaternaire tronquent les dépôts d'âge Jurassique (Figure 23). L'épaisseur des dépôts jurassiques augmentent de l'Ouest vers l'Est comme observable sur le transect en Figure 23. Sur la partie Ouest de la zone d'étude, les formations du Jurassique moyen-supérieur se déposent directement sur le socle Paléozoïque et leur épaisseur totale ne dépassent pas quelques mètres à dizaines de mètres. Vers le centre du bassin, à l'Ouest, l'épaisseur des séries est de plusieurs centaines de mètres.

L'évolution temporelle des faciès et architectures est présentée ci-dessous par étage géologique, en se basant sur les cartes de faciès (Figure 24, Figure 25, Figure 26, Figure 27, Figure 28).

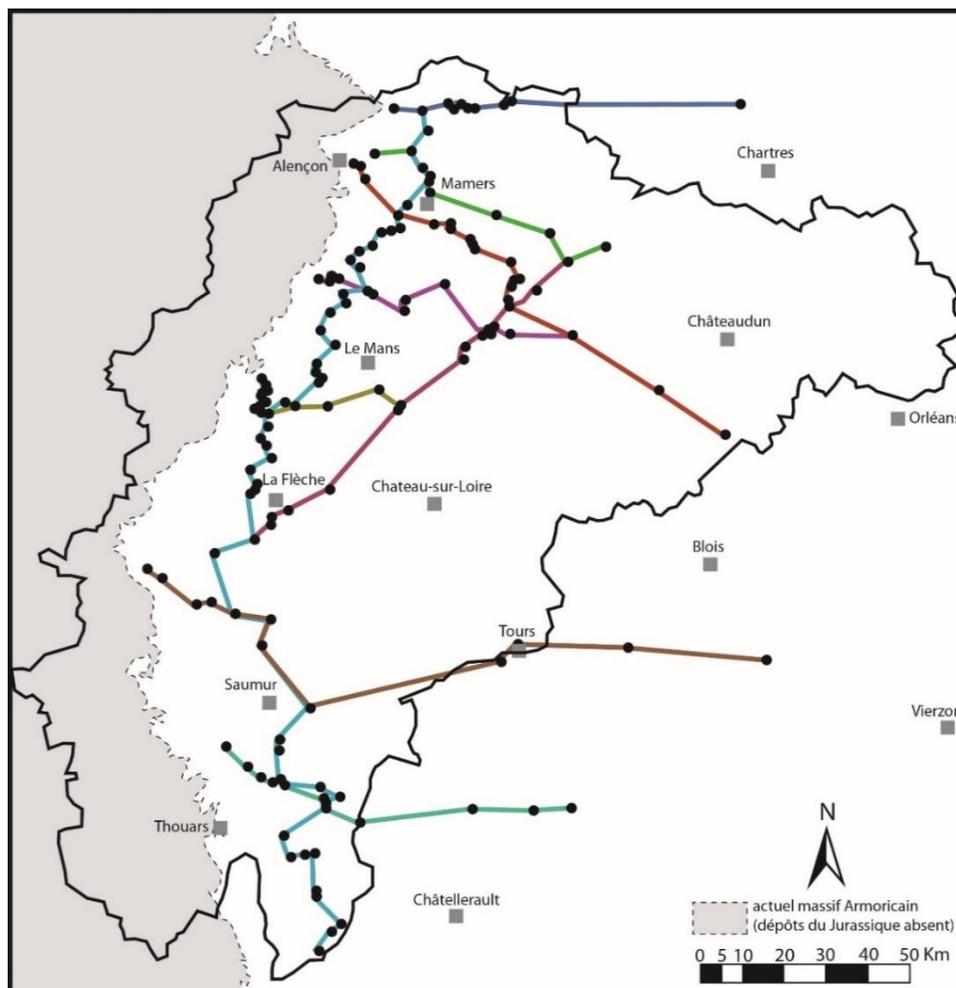


Figure 21 : Carte de localisation des forages et affleurements étudiés, et des transects de corrélation effectués

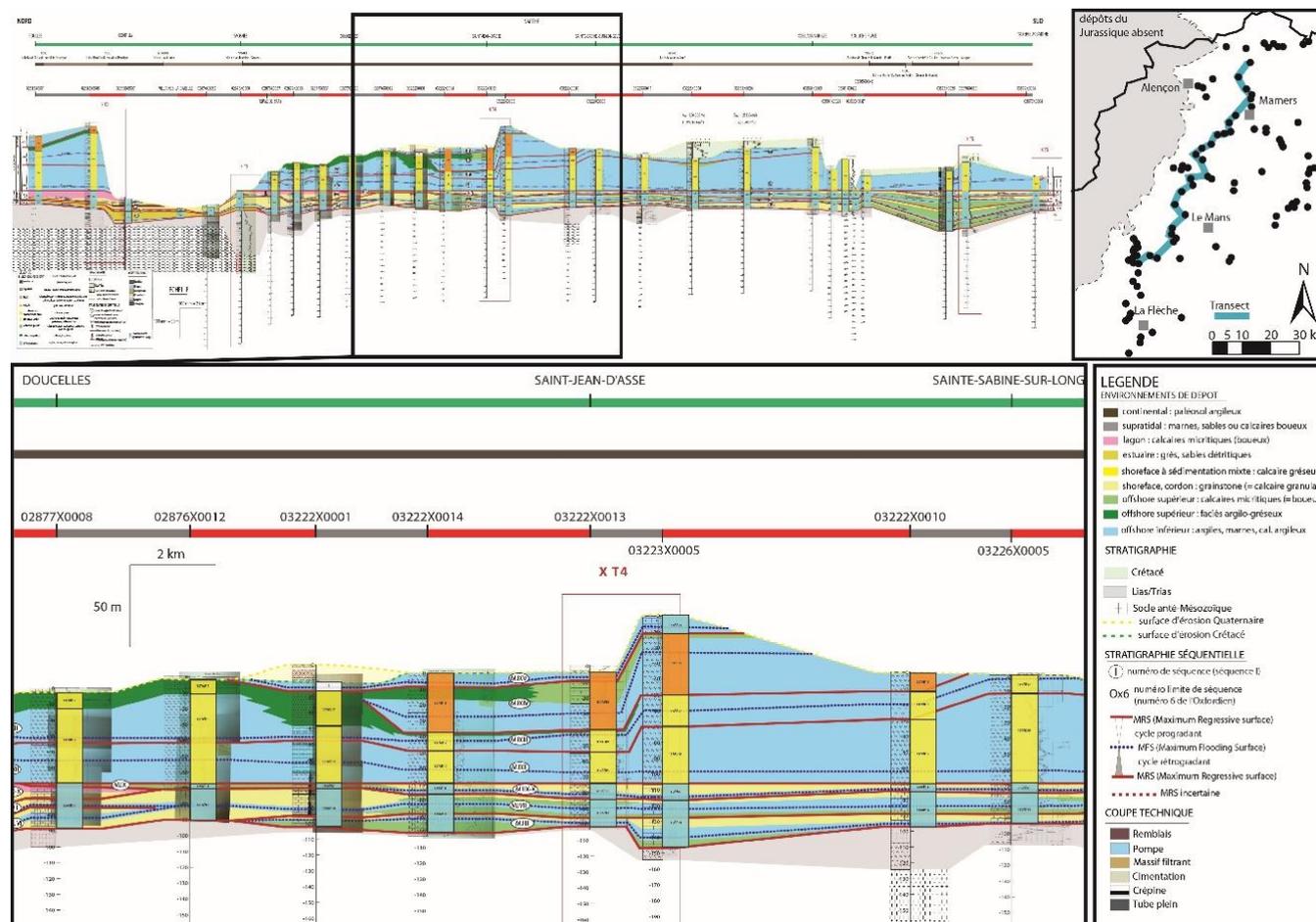


Figure 22 : Corrélation des séries du Jurassique moyen et supérieur sur un transect de Rouille à Noyen-sur-Sarthe, avec un zoom sur la partie centrale du transect. Les corrélations sont basées sur la biostratigraphie (ammonites, brachiopodes) et sur les cycles stratigraphiques de troisième ordre reconnus (MJI à LJVII) délimités par des limites de séquences (Aa1 à Ox7).

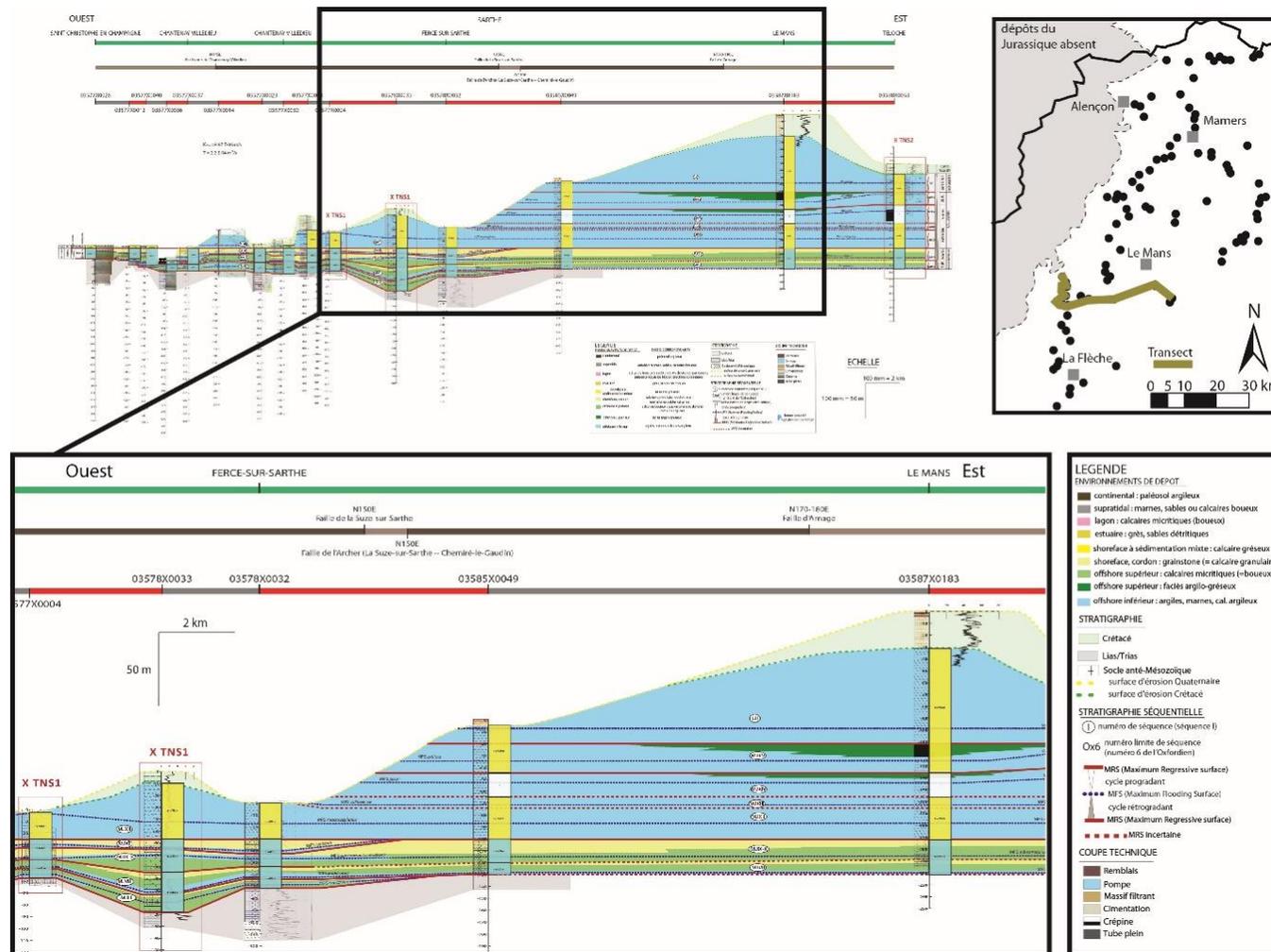


Figure 23 : Corrélation des séries du Jurassique moyen et supérieur sur un transect de Saint-Christophe-en-Champagne à Teloche, avec un zoom sur la partie centrale du transect. Les corrélations sont basées sur la biostratigraphie (ammonites, brachiopodes) et sur les cycles stratigraphiques de troisième ordre reconnus (MJ1 à LJVII) délimités par des limites de séquences (Aa1 à Ox7).

- Aalénien (séquence MJ1 à MJIII) : rampe carbonatée à silicoclastiques

Les dépôts aaléniens sont assez lacunaires et peu épais à l'échelle de la zone d'étude. La production carbonatée est faible. La tendance est régressive jusqu'au toit de la séquence MJIII. La partie Nord de la zone d'étude est alors émergée à sub-émergée, propice au développement de faciès réservoirs : les dépôts estuariens (Formation des *Sables et Gravieres de Tessé*) aux alentours de Mamers passent à des faciès de barrière Oolithique en direction du Mans (Figure 24). Une zone de plateforme profonde, lacunaire, s'étend de la Flèche à Saumur. Au Sud, entre Saumur et Châtellerault, se déposent des calcaires boueux d'*offshore* supérieur (Formation du *Calcaire argileux d'Airvault*).

À l'Aalénien, les faciès présentant les meilleures qualités d'aquifère se déposent au Nord de la zone d'étude, aux alentours de Le Mans-Mamers.

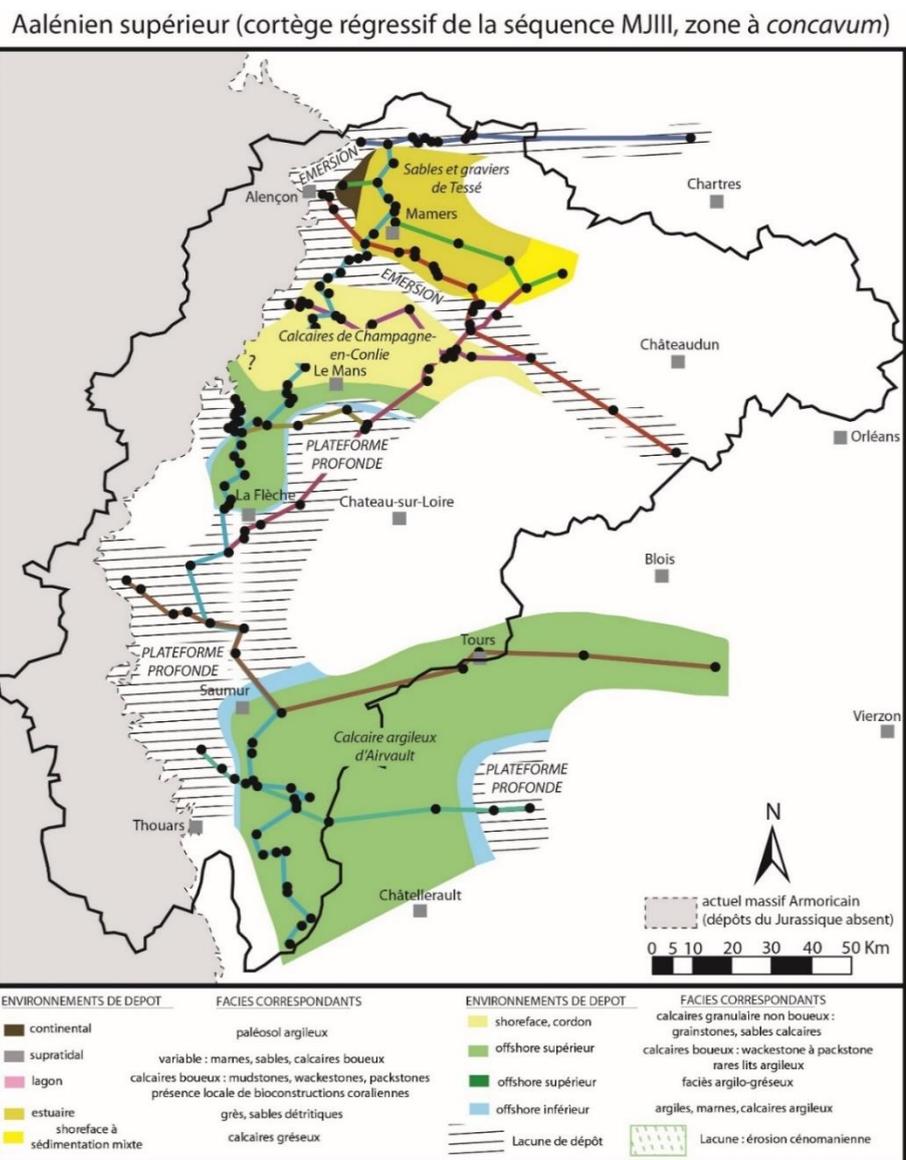


Figure 24 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIII de l'Aalénien supérieur (cortège régressif)

- Bajocien (séquence MJIV à MJVII) : rampe carbonatée oo-bioclastique

Le Bajocien correspond à une période de reprise de la production carbonatée. Des faciès granulaires Oolithiques (Formations de l'*Oolithe de Villaines-la-Carelle* et du *Calcaire de Champagne-en-Conlie*), présentant localement de très bonnes porosités, se développent au Nord de la zone d'étude, entre Mamers et Le Mans, ainsi que localement au Sud (Saumur, Châtelleraut Figure 25). Ces zones de plateforme peu profonde (bathymétrie <10-15m) sont entourées par des environnements d'*offshore* supérieur à inférieur ou se déposent des calcaires boueux à argileux (Formation du *Calcaire dolomitique à bioclastique de Poitiers*). Une zone de plateforme profonde, d'extension Nord-Sud limitée (<20km) est présente à mi-chemin entre Saumur et La Flèche.

Bajocien supérieur (cortège régressif de la séquence MJVII, zone à *parkinsoni*)

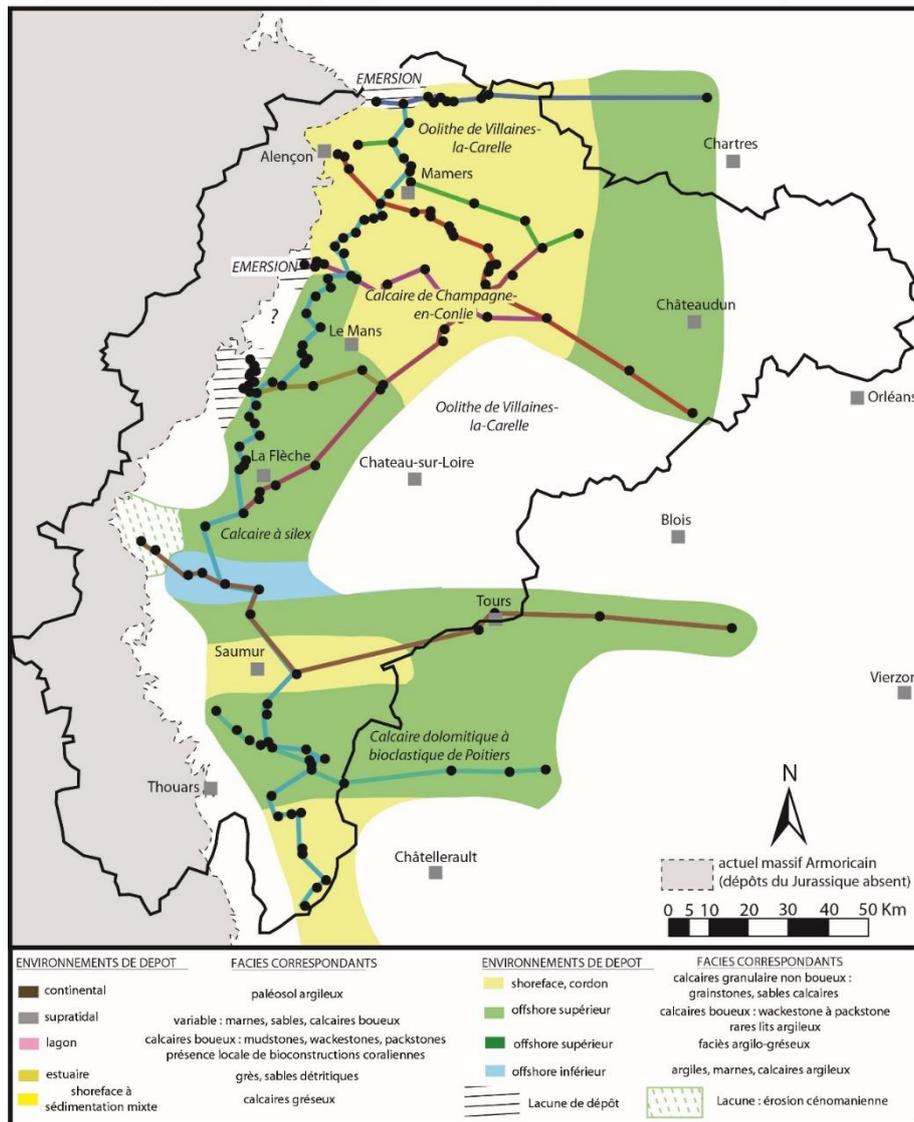


Figure 25 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIII du Bajocien supérieur (cortège régressif)

- Bathonien (séquence MJVIII à MJXI) : rampe carbonatée oo-bioclastique, barrée dans la partie Nord

Le Bathonien correspond au maximum de production carbonatée du Jurassique moyen sur la zone d'étude. La partie Nord se marque par une géométrie de rampe barrée : les faciès de lagon dominant au Nord de Mamers (Formation du *Calcaire de Valframbert*), cédant place à l'Est et au Sud à des faciès de cordons oolithiques qui descendent jusqu'à La Flèche (Figure 26). Une plateforme profonde, d'extension réduite, occupe néanmoins les alentours du Mans, où se développent des faciès plus argileux. Cette rampe barrée au Nord passe au Sud de La Flèche à une zone profonde marquée par une absence de dépôt. La partie Sud de la zone d'étude se caractérise par la présence de calcaires boueux d'*offshore* supérieur (Formation du *Calcaire fin à silex de Thouars*) et localement de calcaires granulaires oo-bioclastiques. Les meilleurs aquifères sont localisés au sein des dépôts de cordons et *shoreface* apparaissant en jaune sur la Figure 26

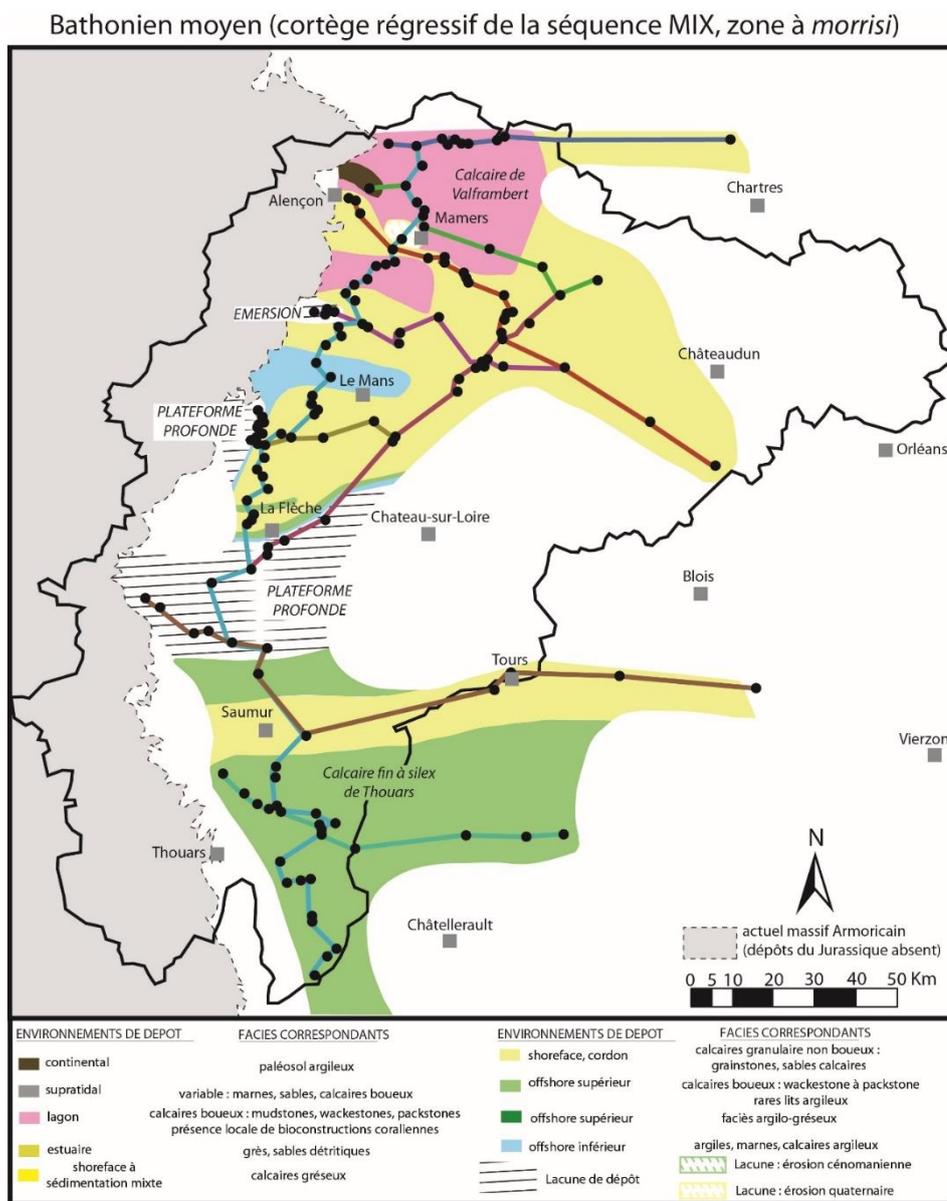


Figure 26 : carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJIX du Bathonien moyen (cortège régressif)

- Callovien et Oxfordien inférieur (séquence MJXII à LJIII) : rampe marneuse

Le Callovien et l'Oxfordien inférieur marquent une transgression généralisée et le développement d'une vaste rampe marneuse au Nord de la zone d'étude (Formations des *Marnes du Chevain* et des *Marnes de Domfront-en-Champagne* ; Figure 27). Ces dépôts constituent un niveau aquitard à grande échelle. Aucun dépôt n'est préservé entre La Flèche et Saumur. Au Sud, le Callovien se limite à un niveau de calcaire ferrugineux métrique à plurimétrique (Formation du *Calcaire à oolithes ferrugineuses*).

Callovien inférieur (cortège régressif de la séquence MJXII, zone à *calloviense*)

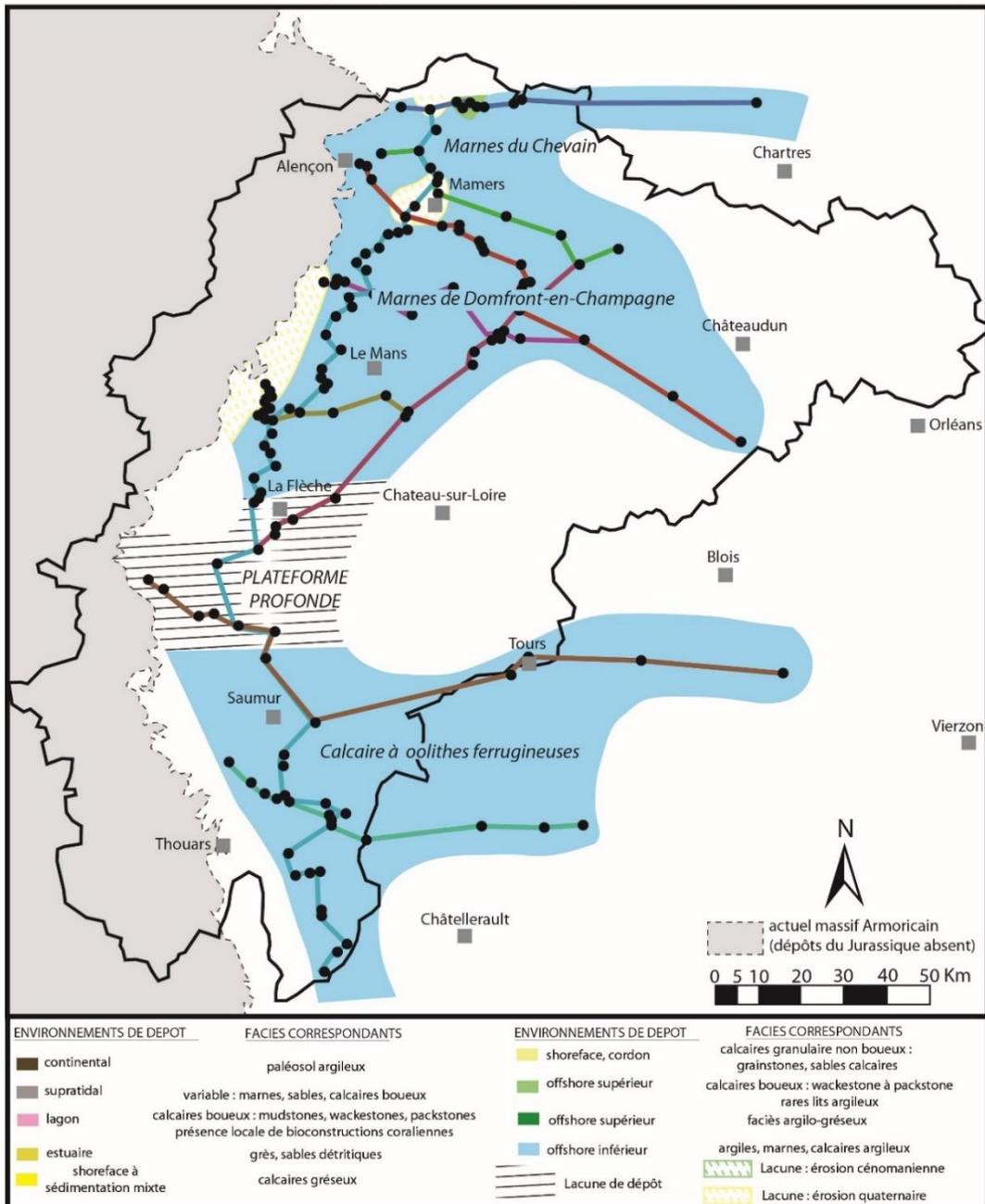


Figure 27 : Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence MJXII du Callovien inférieur (cortège régressif)

- Oxfordien moyen à supérieur (séquence LJIV à LJVII) : plateforme barrée au Nord / rampe argilo-carbonatée au Sud

Les dépôts de l'Oxfordien moyen et supérieur sont absents sur la partie Ouest de la zone d'étude, du fait de l'érosion du Crétacé inférieur (Figure 28). Au Nord-Ouest (Ouest de Mamers), cette période se caractérise par le développement d'une plateforme carbonatée peu profonde, marquée par un lagon largement étendu et délimité par une barrière oolithique à corallienne (Formations du *Calcaire corallien de Mortagne* et du *Calcaire corallien de la Ferthé-Bernard*). Les environnements s'approfondissent vers l'Est et le Sud, et les faciès passent à des calcaires boueux d'*offshore* supérieur et des marnes d'*offshore* inférieur (Figure 28). La région de La Flèche est une zone de lacune de dépôt en domaine de plateforme profonde. Des environnements d'*offshore* inférieur caractérisés par le dépôt de marnes s'étendent aux alentours de Saumur et plus au Sud (Formation des *Marnes à spongiaires*). Ils passent vers l'Est à des calcaires boueux d'*offshore* supérieur.

Oxfordien moyen (cortège régressif de la séquence LJV, zone à *tenuiserratum*)

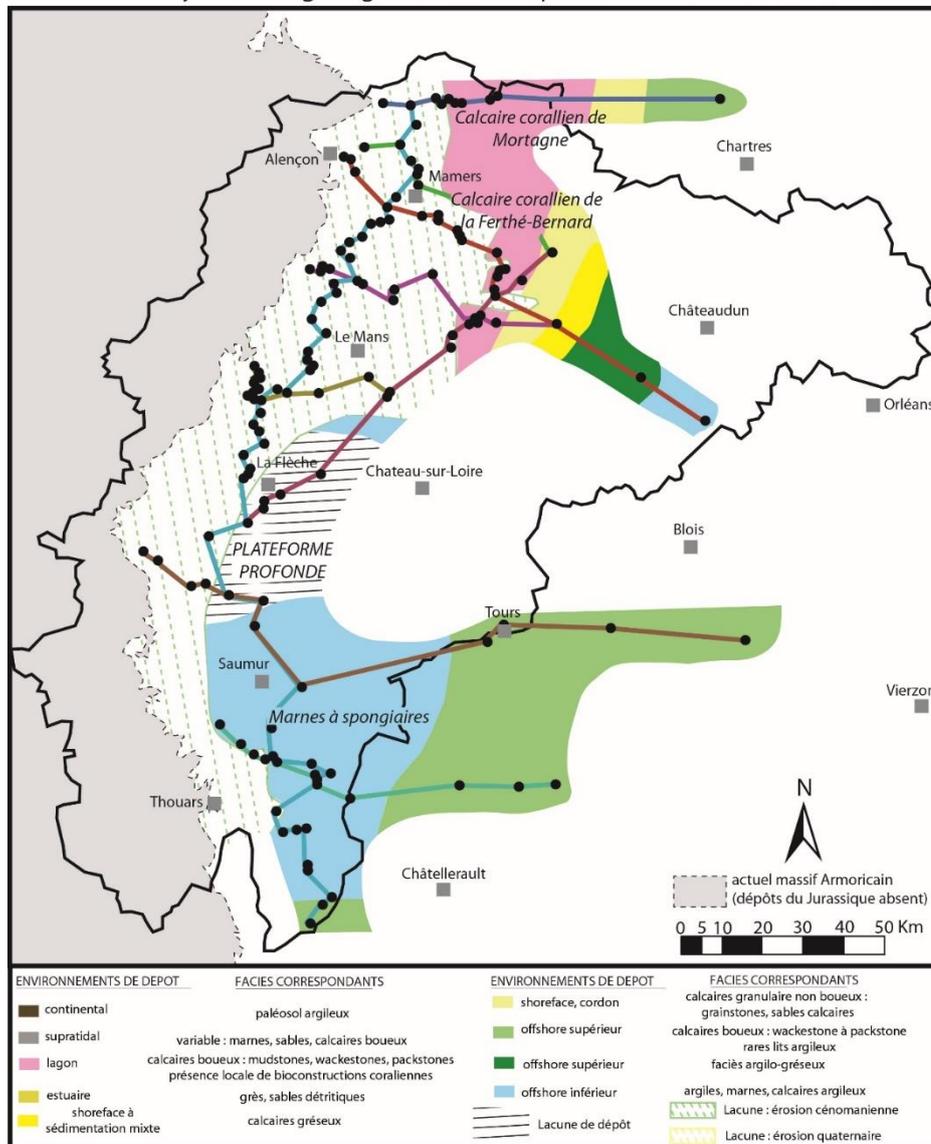


Figure 28: Carte des faciès et environnements de dépôt de la séquence LJV de l'Oxfordien moyen (cortège régressif)

3.3. CENOMANIEN

3.3.1 FACIES SEDIMENTAIRES

Le Cénomaniens de la Sarthe et du Maine-et-Loire présente 6 environnements de dépôt principaux (Figure 29) qui regroupent plusieurs faciès sédimentaires. Seuls ces grands environnements de dépôts seront décrits du plus proximal au plus distal (marin profond).

- **Dépôts fluviatiles (a)**

L'environnement de dépôt fluvatile regroupe des faciès argileux de plaine d'inondation et des faciès sableux des chenaux. Ces derniers sont caractérisés par des graviers (base des chenaux) à sables grossiers, mal triés et constituent des lentilles discontinues. Des lentilles argileuses sont également présentes et constituent des niveaux de plaine d'inondation à paléosols. Ces faciès ont été identifiés essentiellement au Sud de la zone, vers Brissac où la formation des Sables et Grès de Jumelle témoigne de la présence de distributaires fluviatiles venant du Sud.

- **Plaine deltaïque – barre d'embouchure (b)**

Cet environnement se situe entre le système fluvatile amont et le delta marin à l'aval. Nous regroupons la plaine deltaïque essentiellement argileuse et les barres d'embouchure sableuse. Ces barres présentent un litage oblique et montrent une alternance entre des graviers et des sables grossiers. L'ensemble est en général très mal trié et peut contenir des niveaux d'argiles. Les faciès de type barre d'embouchure ont été décrits dans la partie ouest de la zone d'étude, dans les Sables et Grès du Mans. Des faciès de plaine deltaïque sont également visibles au sommet des Sables de Bousse (e).

- **Estuaire interne – lagune (c)**

Les estuaires internes et les lagunes sont essentiellement argileux. Des alternances de sables fins et d'argile sont néanmoins visibles dans les estuaires interne marquant les cycles des marées. Ces alternances sont constituées de rides de courant drapées par des argiles d'étalement de marée. Ces faciès sont visibles dans les Sables du Maine à l'extrémité Ouest de la zone d'étude.

- **Estuaire médian - externe (d)**

L'environnement d'estuaire médian à externe plus distal, constituent des dépôts de sables propres, bien triés. Ils sont constitués de dunes tidales enregistrant le courant de marée. La géométrie de ces estuaires sont très continues et peuvent recouvrir de larges zones.

- **Front de delta (e)**

Les fronts de delta constituent la partie la plus distale avant le milieu de mer ouvert. Contrairement aux barres d'embouchure juste en amont, les fronts de delta sont très bien triés et propre, pauvre en argile. Leur structure interne est constituée de litages obliques pentés (e) montrant des alternances de sables grossiers à des sables fins. Le sommet de ces fronts sont principalement recouverts par un niveau de graviers puis par des argiles de plaine deltaïque comme c'est le cas à Courcelles-la-Forêt dans les Sables de Bousse. A noter que les pieds des litages obliques (plus argileux) montrent des mégarides dans le sens inverse attestant de l'influence de la marée sur ces systèmes deltaïques. Les fronts delta sont de très bons aquifères, mais ils recouvrent une zone plus restreinte que les estuaires médians à externes.

- **Milieu ouvert (f)**

Le milieu ouvert, où l'hydrodynamisme est plus faible correspond aux environnements d'offshore supérieur à inférieur. Ces environnements sont essentiellement marneux ou argileux telles qu'au

moment du dépôt des Marnes de Nogent-le-Bernard / Bouffry et les Marnes à Ostracées. Les différents faciès n'ont pas été identifiés sur le terrain, mais sont facilement identifiables sur les diagraphies. La géométrie de ces niveaux marneux est très continue.

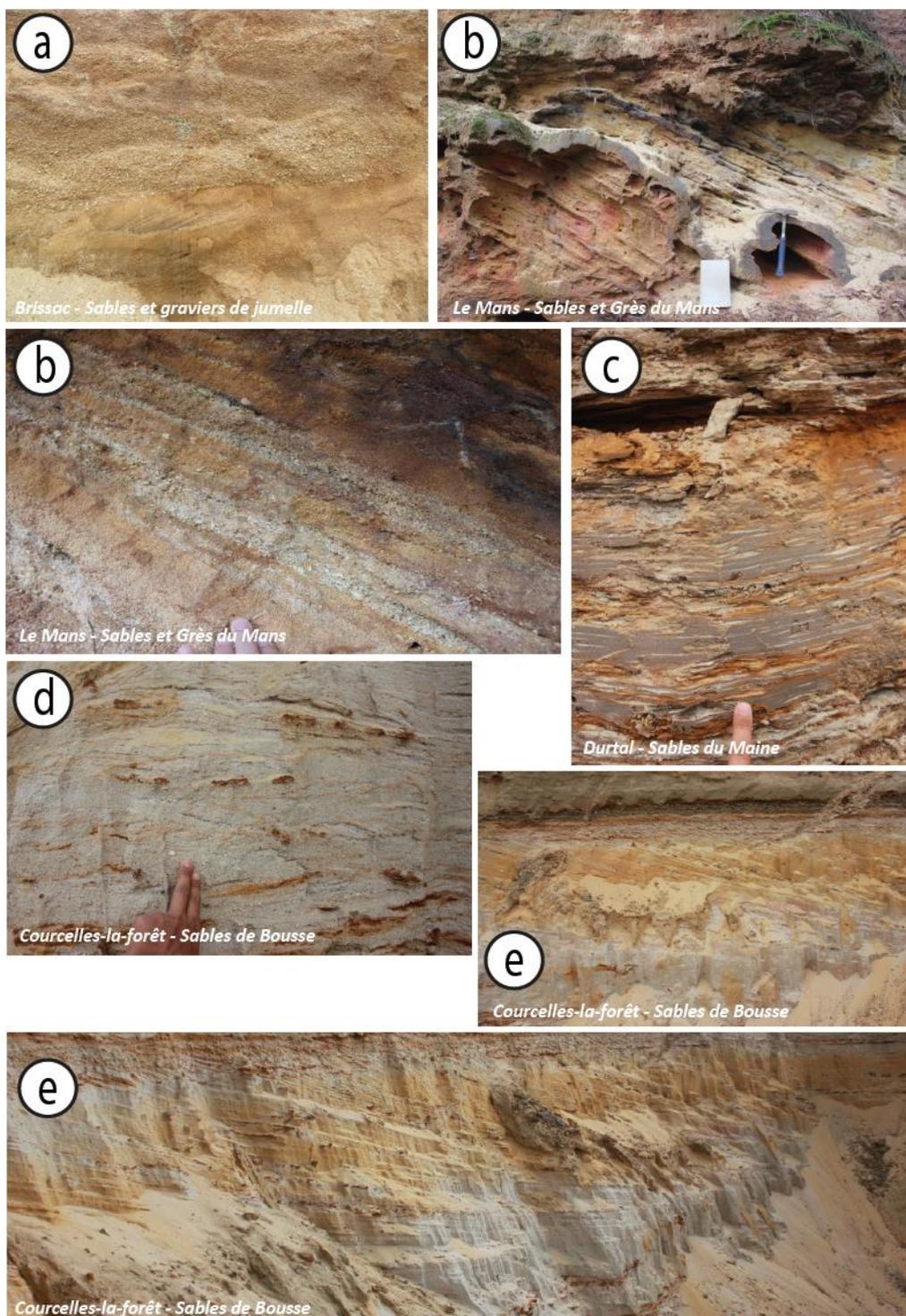


Figure 29 : Planche de photographies des différents environnements de dépôt du Cénomanien: - a: dépôt fluvial; b: Plaine deltaïque et barre d'embouchure; c : estuaire interne; d: Estuaire médian à externe; e: Front de delta et plaine deltaïque au sommet.

Propriétés réservoirs hydrogéologique des différents environnements

Les fronts de delta sont de très bons réservoirs, car ils correspondent à des sables propres bien triés. Ils présentent également une géométrie continue, mais ils recouvrent des zones plus restreintes que les estuaires qui sont également de très bons réservoirs. Les systèmes fluviatiles et les plaines deltaïques peuvent être aussi réservoirs mais la géométrie des corps sableux est complexe et discontinus. Enfin les environnements d'estuaire interne, de lagune, ou encore de milieu ouvert ne sont pas aquifères car en général, dépourvus de niveaux poreux connectés.

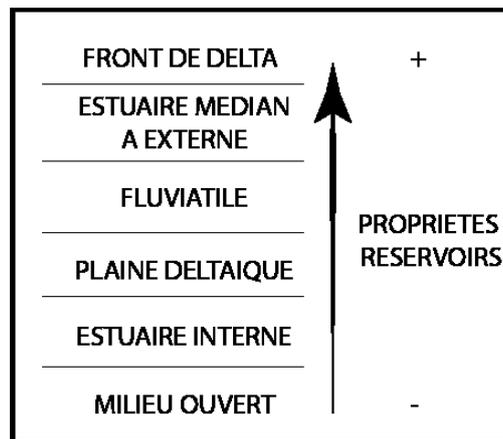


Figure 30 : Propriétés réservoirs relatives des différents environnements de dépôt

3.3.2 DECOUPAGE SEQUENTIEL ET LITHOSTRATIGRAPHIE DU CENOMANIEN

L'ensemble des formations du Cénomaniens rencontré en Sarthe et Maine-et-Loire sont reportées sur un diagramme de Wheeler (coupe espace-temps). Il permet de positionner les formations dans le temps et d'identifier les lacunes de dépôts et donc les discontinuités majeures du remplissage sédimentaire. En revanche, ces diagrammes ne permettent pas de restituer la géométrie des corps sédimentaires qui sera expliquée par la suite (cf. § 3.3.3).

Le diagramme de Wheeler ci-dessous est bâti à partir d'un transect de corrélation de puits du Sud (Loudun) vers le Nord (la Ferté-Bernard) ; il est construit à partir de :

- Données biostratigraphiques permettant de donner un âge aux formations lithostratigraphiques (échelle des ammonites) ;
- La connaissance géométrique des formations (e.g. passages latéraux) et des environnements de dépôt.

Les formations ainsi définies et harmonisées sont utilisées pour le codage des logs validés, l'harmonisation des forages et des cartes permettra de réviser les regroupements effectués dans le cadre de la BDLISA (cf infra).

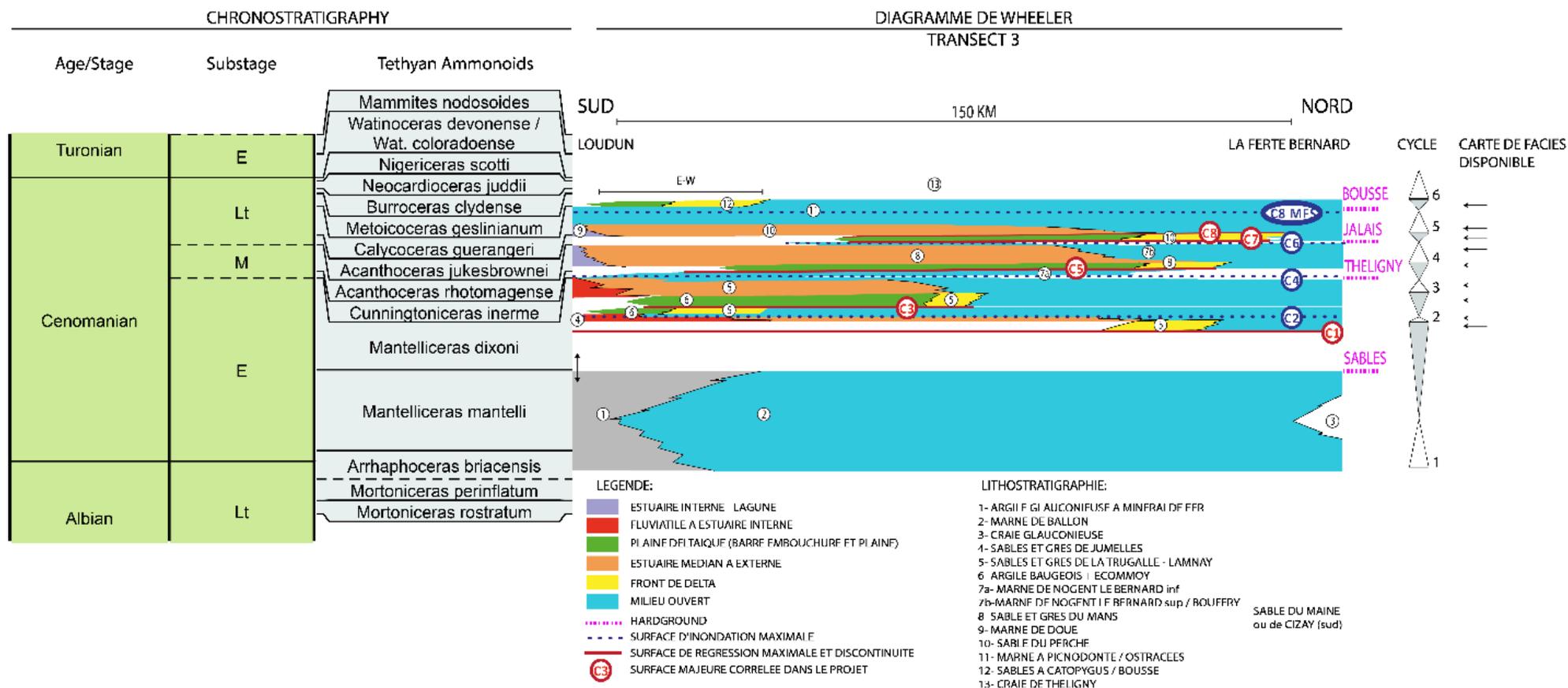


Figure 31: Diagramme de Wheeler (coupe espace-temps) du Cénomanién. L'ensemble des formations sont représentées sur ce diagramme, ainsi que les équivalences latérales. La pile stratigraphique pour le modèle est définie à partir de ce wheeler.

La base du Cénomaniens est caractérisée par le dépôt des Marnes de Ballon qui représentent un milieu ouvert et qui passent latéralement à la craie glauconieuse au Nord et à l'Est et aux argiles glauconieuses à minerai de Fer au Sud. Une lacune majeure intra-cénomaniens inférieur est identifiée entre ces marnes et les premiers dépôts fluviatiles des Sables et Grès de Jumelles et de la Trugalle. Ces dépôts constituent le premier **cycle sédimentaire C1**.

Par la suite, l'ensemble du remplissage du Cénomaniens est interrompu par des lacunes mineures associées :

- A des niveaux condensés (à faible taux de sédimentation) lors des approfondissements majeurs dans le domaine profond (distal) ;
- Et à des zones de non-dépôt où des érosions dans les domaines peu profonds (proximaux), i.e. sur le continent ou le littoral lors de chute du niveau marin.

Quatre cycles sont identifiés, délimités par les maximas des chutes du niveau marin. A chaque cycle, quatre ensembles sableux se mettent en place durant les phases de chute de niveau marin et le début des phases transgressives :

- Les sables de la Trugalle-Lamnay (**cycle 2**) ;
- Les Sables et Grès du Mans (**cycle 3**) ;
- Les Sables du Perche (**cycle 4**) ;
- Les Sables à Catopygus / Bousse (**cycle 5**).

Ces différents ensembles sableux sont séparées par des intercalations argileuses correspondant à des maximas de transgression et formant des périodes de haut niveau marin. Ces intercalations correspondent :

- Aux Marnes intra-Trugalle-Lamnay (MFS cycle 2) ;
- Aux Marnes de Nogent le Bernard inférieur (MFS cycle 3) ;
- Aux Marnes de Nogent-le Bernard supérieur (Bouffry) (MFS cycle 4) ;
- Aux Marnes à Ostracées / à Pycnodontes (MFS cycle 5) ;

Seules les formations principales sont évoquées ici ; les formations secondaires ainsi que les passages latéraux sont reportés sur le diagramme de Wheeler ci-dessus.

Implications sur la pile stratigraphique utilisée pour le modèle :

La pile stratigraphique de référence servant au modèle a été définie à partir du diagramme de Wheeler. Des regroupements (Maine, Cizay) et des individualisations (Marnes intra-trugalle, MNB inférieures et MNB supérieures) sont faits pour assurer la cohérence géométrique.

3.3.3 SCHEMA DES GEOMETRIES 2D

Les géométries 2D sont définies à partir du travail de corrélation séquentielle des différents puits disponibles (diagraphie). Les surfaces corrélées correspondent aux maximas de chute du niveau marin ou à l'inverse aux maximas des hausses du niveau marin. La corrélation de ces surfaces majeures (x 9) permet de restituer les géométries et la répartition des faciès de manière la plus juste (cf. Partie méthodologie).

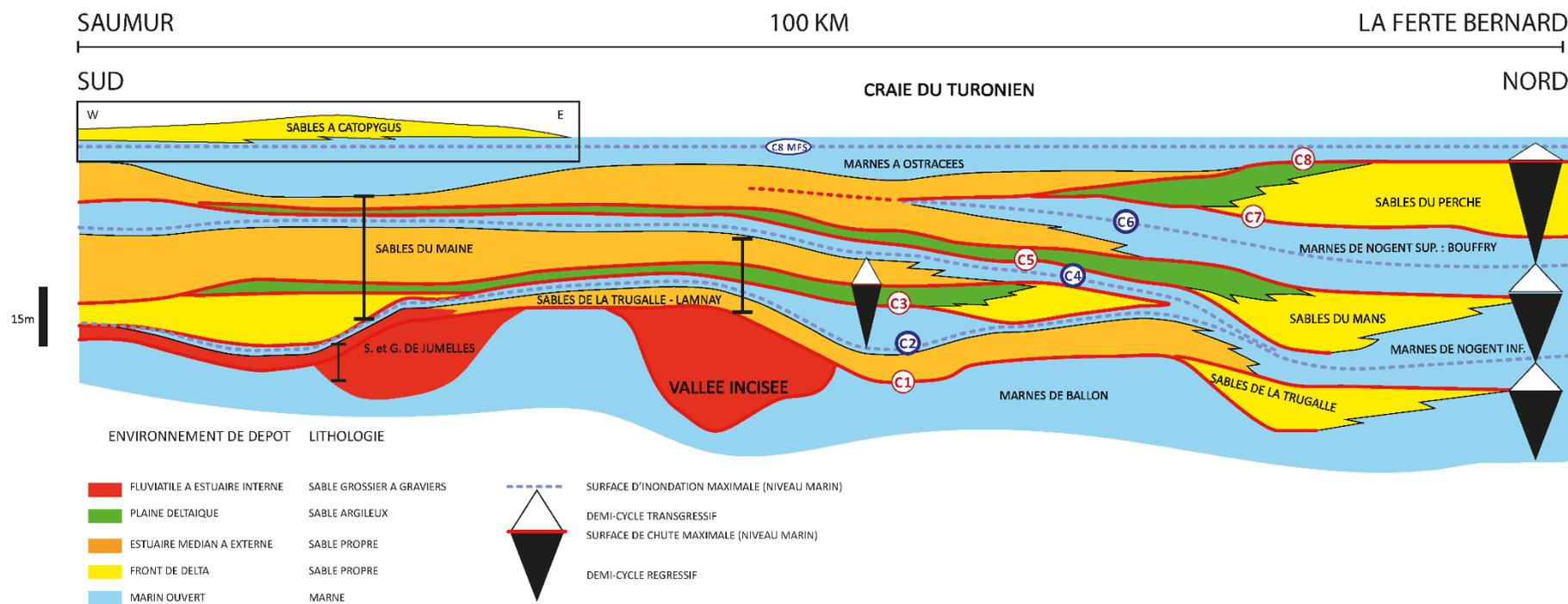


Figure 32: Schéma des géométries selon un transect de corrélation diagraphique Sud (Loudun) - Nord (La Ferté-Bernard). Chaque couleur correspond à un environnement de dépôt, les passages latéraux ainsi que les différentes surfaces corrélées sont reportés sur ce schéma.

Cycle 1 - Le schéma des géométries Sud (Loudun) - Nord (La Ferté-Bernard) montre à la base, les Marnes de Ballon homogènes sur l'ensemble du profil. Une chute du niveau marin implique la création de vallée incisée dans la moitié Sud et la mise en place d'un delta en direction du Nord, correspondant aux Sables de la Trugalle.

Cycle 2 - Lors de la hausse du niveau marin dont le maxima est représenté par la surface C2 (Marne intra-Trugalle), les Sables de la Trugalle et de Lamnay reculent en direction du Sud et constituent la mise en place d'un estuaire qui passera latéralement à des environnements fluviatiles représentés par les Sables et Grès de Jumelles. Une nouvelle chute est marquée par l'avancée d'un petit delta marquée par la surface C3 ; On notera également le développement d'une plaine deltaïque en arrière du delta. Ce cycle correspond toujours aux Sables de la Trugalle, mais aussi aux Sables de Lamnay.

Cycle 3 - Le cycle suivant est enregistré par l'installation d'un petit estuaire transgressif, rétrogradant qui passe latéralement à des dépôts fluviatiles. Le maxima d'inondation est atteint lors de l'installation des Marnes de Nogent-le-Bernard inférieur qui scellent cet estuaire. Au-dessus de ces Marnes, la mise en place des Sables et Grès du Mans deltaïques (C5) marque la nouvelle chute du niveau marin. Ce delta se positionne au même endroit que celui des Sables de la Trugalle, avec une plaine deltaïque en amont.

Cycle 4 - Les Sables et Grès du Mans sont également transgressifs par la suite avec la mise en place d'épais dépôts estuariens dans la partie Sud, qui passe latéralement à des dépôts d'estuaire interne. Cette série est nommée les Sables du Maine ou de Cizay (Sud). On notera que les Sables et Grès du Mans individualisent les Marnes de Nogent-le-Bernard en deux ensembles : les MNB inférieures (C4) et les MNB supérieures (C6), à savoir les Marnes de Bouffry.

Cycle 5 - Le dernier cycle est enregistré par l'installation des Sables du Perche deltaïques qui se propagent beaucoup plus au nord, lors de la chute du niveau marin entre les surfaces C7 et C8. Au cours de la transgression, se développe un estuaire dans la partie Sud dont les sables correspondent aux Sables du Maine ou de Cizay non différenciés par rapport au cycle précédant. Enfin l'ensemble est scellé par les Marnes à Ostracée (C8 MFS) qui se déposent de manière homogène sur le profil. On notera la mise en place des Sables à Catopygus, qui correspondent à un nouveau delta qui se développe de l'Est vers l'Ouest et qui marque la fin du cycle C5.

Ce schéma des géométries peut être traduit en aquifères et en aquitards. Dans la partie Nord, les différents corps réservoirs que sont les Sables de la Trugalle, du Mans et du Perche sont d'excellente qualité (front de delta et estuaire externe), mais sont déconnectés par des niveaux marneux. A l'inverse plus au Sud, les niveaux marneux disparaissent et mettent en connexion les différents corps réservoirs, qui seront cependant, de moins bonne qualité par la présence de plaine deltaïque.

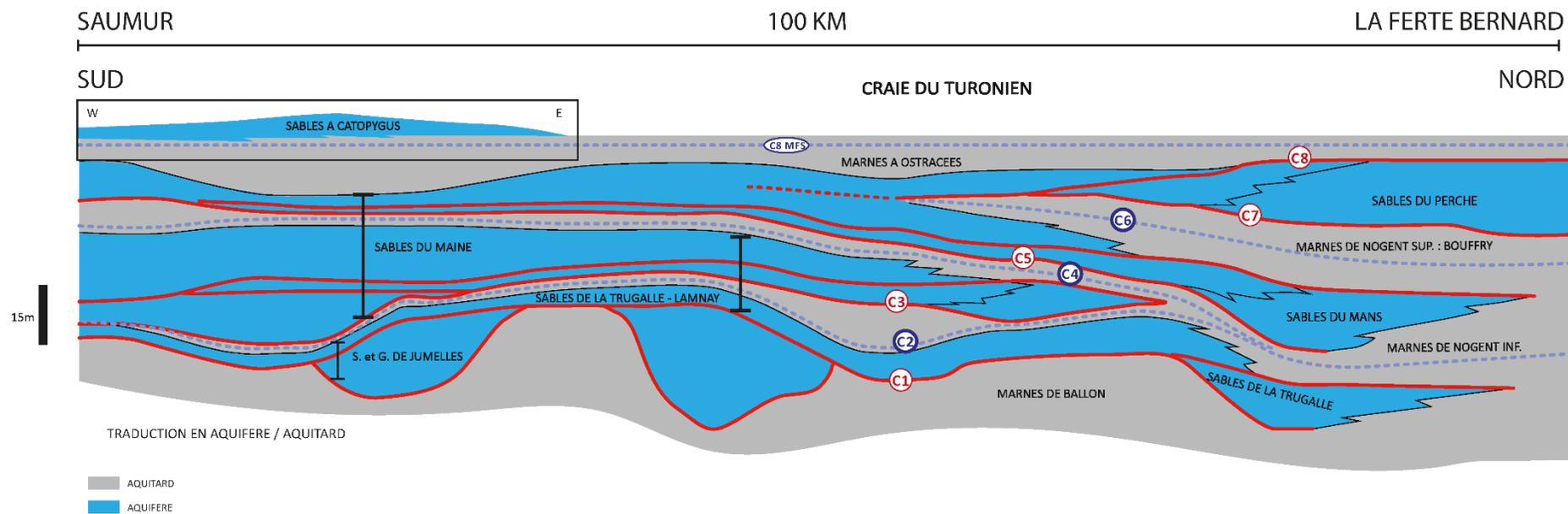


Figure 33 : Schéma des géométries du Cénomaniens selon un transect Nord-Sud traduit en aquifère pour les formations sableuses et en aquitard pour les formations argileuses

3.3.4 CARTE DE FACIES

Les cartes de faciès sont bâties sur la corrélation de diagraphie le long de transects qui permettent d'identifier les géométries et les passages latéraux de faciès. Neuf cartes de faciès ou d'environnement de dépôts sont disponibles représentant les différents stades du remplissage Cénomaniens décrit plus haut. A noter, que seuls les niveaux sableux sont représentés, c'est à dire, chaque deltas progradants et chaque estuaires rétrogradants. Les maxima des transgression (MFS) caractérisés par les maxima de recul des faciès argileux vers le continent ne sont pas représentés ici, des maxima d'extension des principaux intervalles argileux ont été compilés pour la modélisation.

La paléogéographie du Cénomaniens inférieur et moyen est orientée selon une direction NE-SW avec un domaine proximal situé au SW et un domaine distal au NE ;

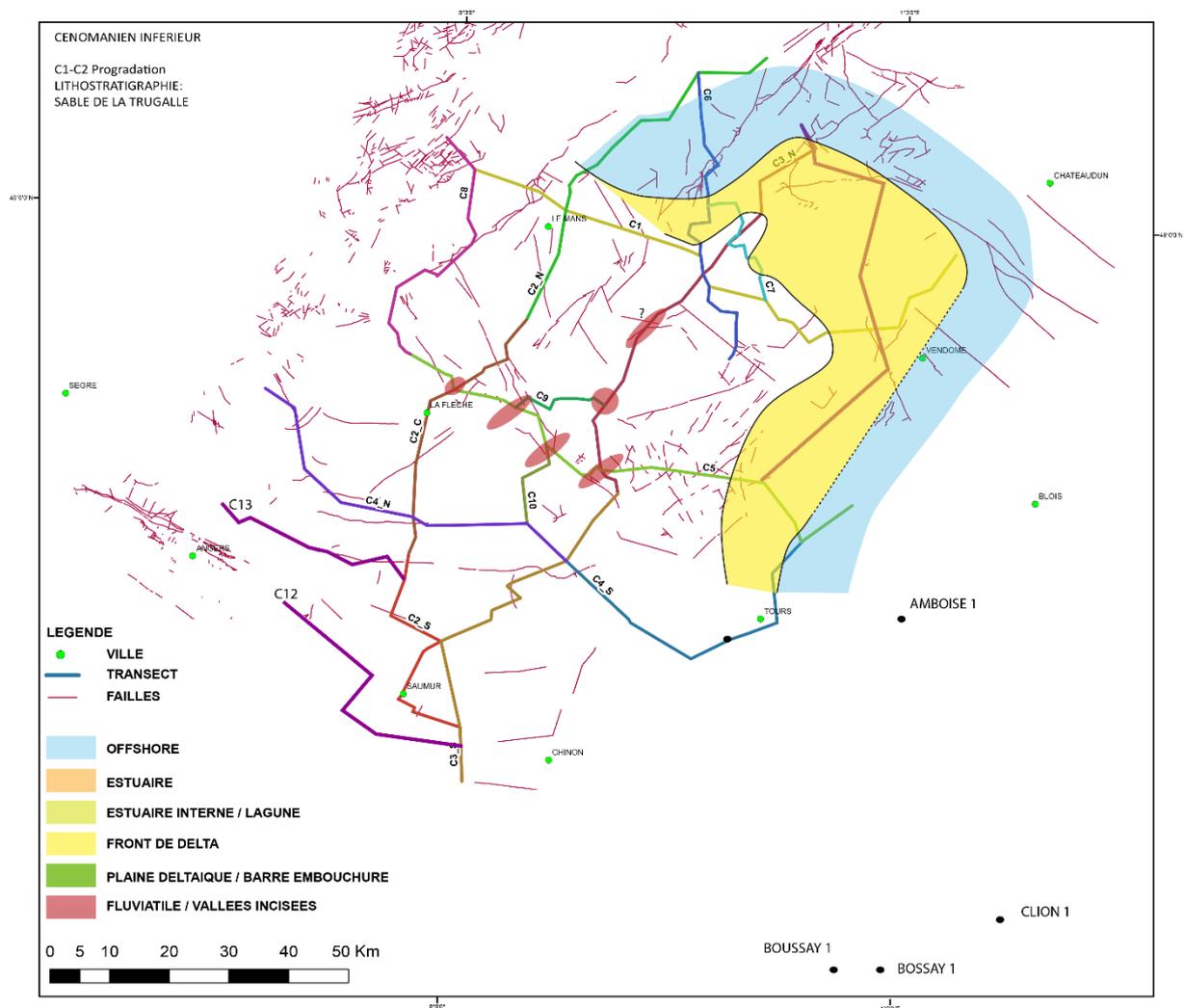


Figure 34 : Carte de faciès du delta des Sables de la Trugalle (progradation des marnes de Ballon jusqu'à C1), les transects diagraphiques utilisés figurent sur la carte.

Les Sables de la Trugalle deltaïques se mettent en place au Nord sur une zone d'extension très large. Ce front de delta passe latéralement à des marnes de milieu ouvert au Nord et à l'Ouest. En domaine proximal, au Sud, quelques vallées qui incisent dans les Marnes de Ballon et les

niveaux antérieurs sont identifiées. Elles correspondent localement aux Sables et Gravieres de Jumelles (Figure 32).

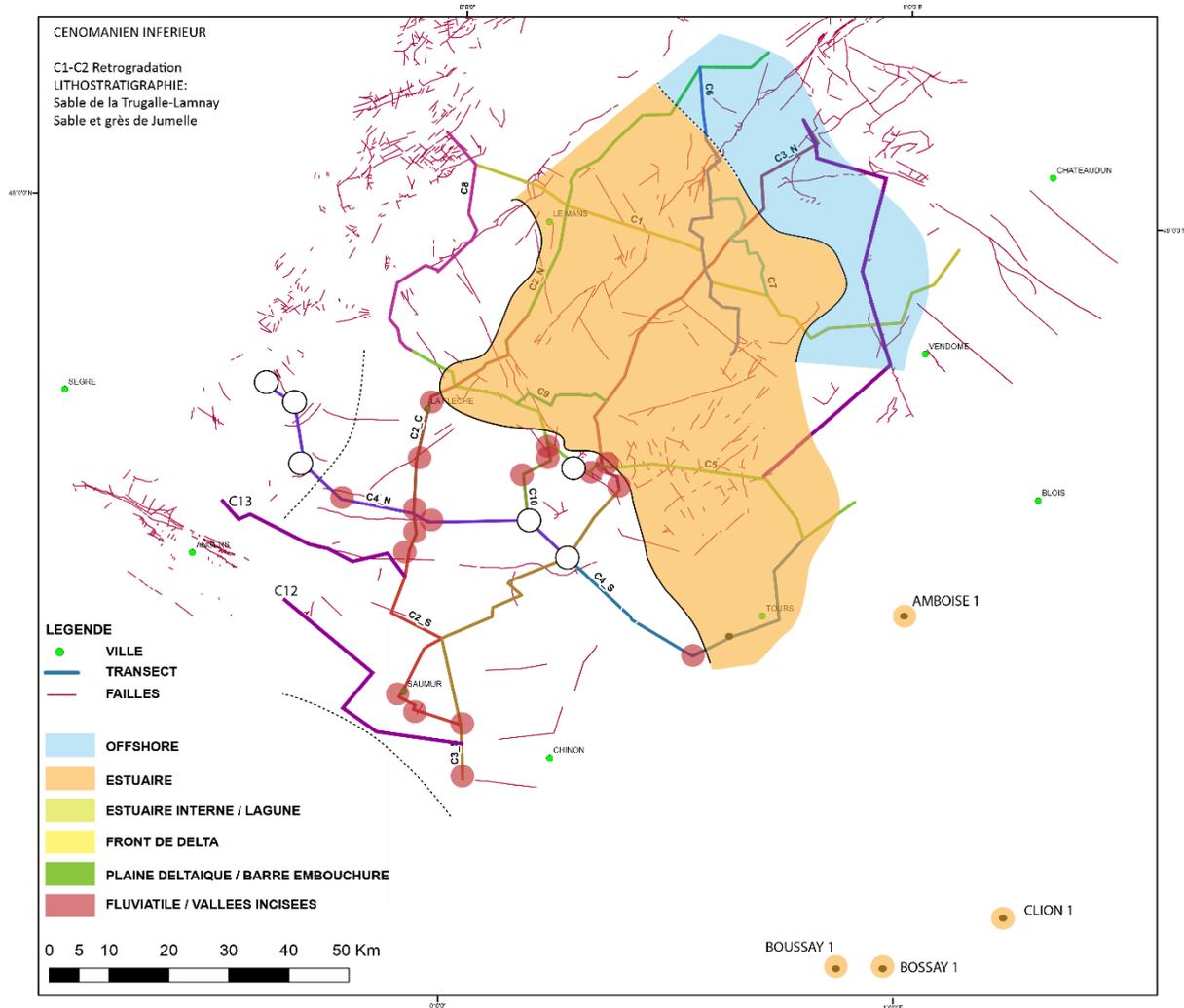


Figure 35 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables de la Trugalle-Lamnay et localisation des Sables et Grès de Jumelle fluviaux (C1-C2 rétrogradation)

La partie supérieure des Sables de la Trugalle et de Lamnay estuariens recouvre une très large zone depuis Le Mans jusqu'à Tours. Ces sables passent latéralement à des Marnes de milieu ouvert (aquitard) au Nord-Ouest de Vendôme qui correspondent aux Marnes intra-Trugalle. En domaine proximal, dans la partie Sud, plusieurs occurrences de dépôts fluviaux sont identifiées sans pour autant pouvoir contraindre un contour paléogéographique car ces dépôts remplissent des vallées incisées très discontinues (Figure 33).

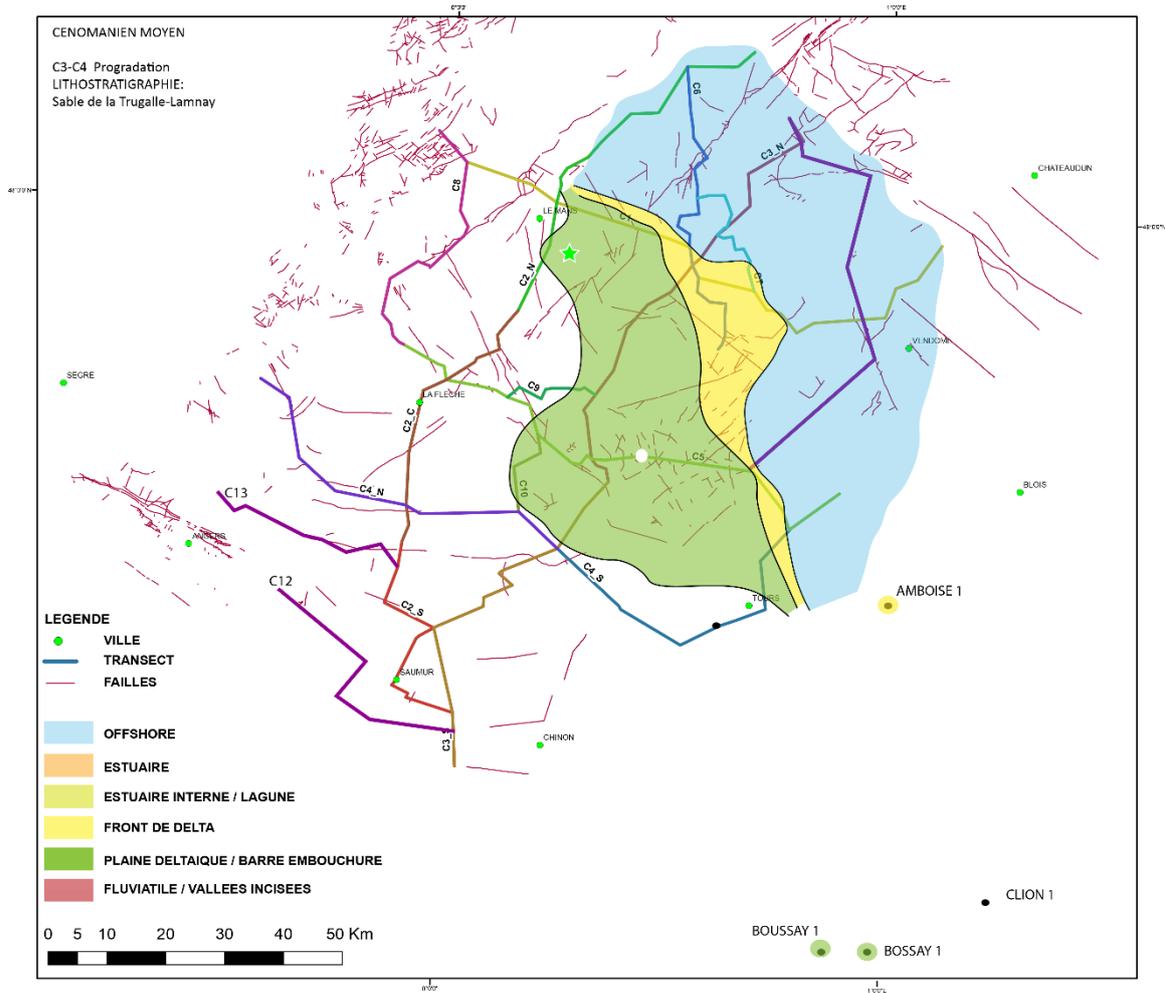


Figure 36 : Carte de faciès du delta sommital (mineur) des Sables de la Trugalle-Lamnay (C2-C3 progradation)

Dans la partie terminale des Sables de la Trugalle et de Lamnay, un dernier édifice deltaïque se met en place, entre Tours et Le Mans. Il correspond à un cycle régression transgression (MFS C2-MRSC3-MFSC4). La progradation entre C2 et C3 n'est enregistrée que par un front de ce delta de faible extension (Figure 31), en revanche une plaine deltaïque très large s'individualise en arrière (Figure 34). Aucun système fluvial distributaire n'a pu être identifié au sein de cette plaine deltaïque ou en amont de celle-ci.

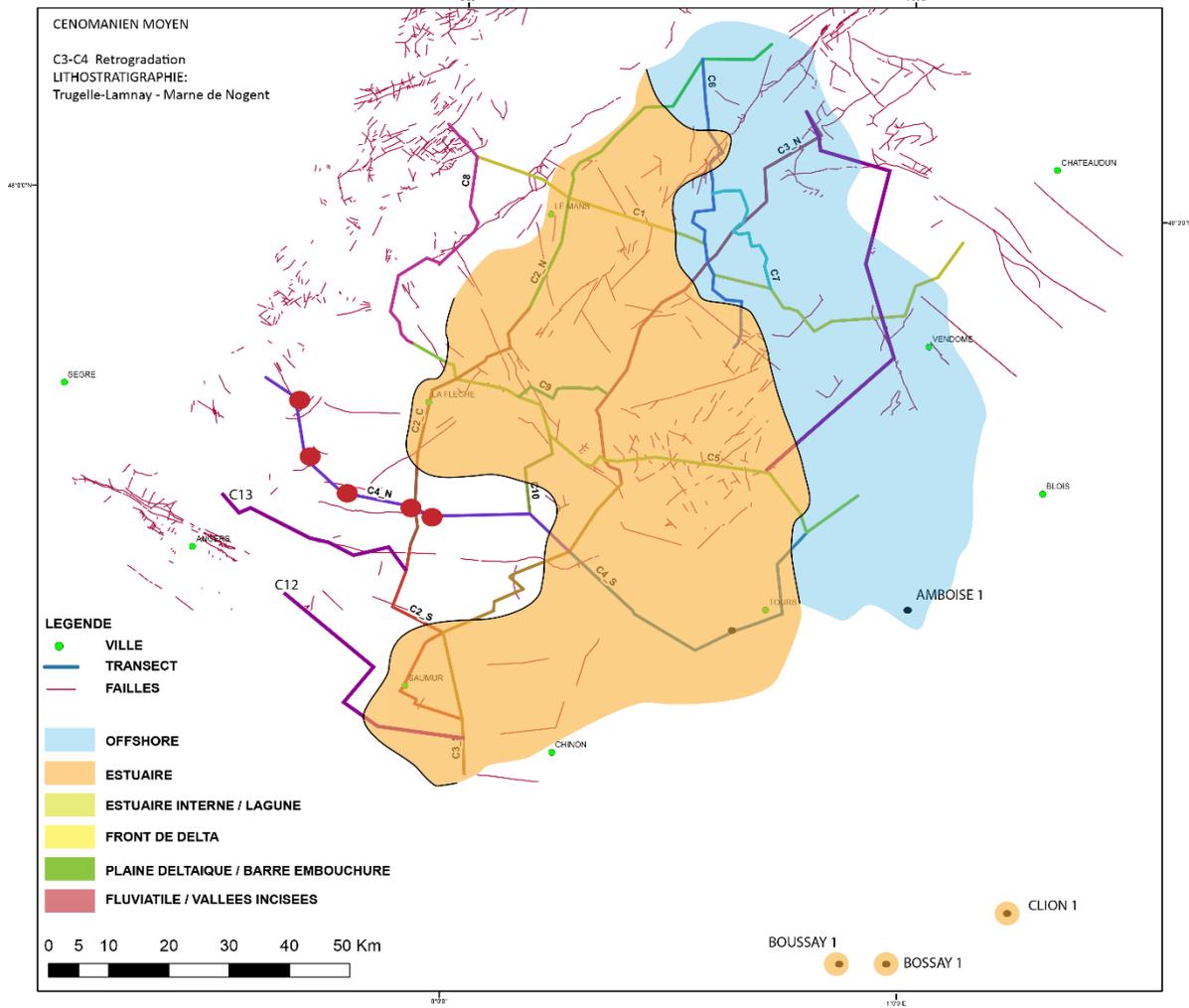


Figure 37 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables de la Trugalle-Lamnay et localisation des Sables et Grès de Jumelle fluviatiles (rétrogradation entre C3 et C4)

Au cours de la transgression entre C3 et C4, les Sables de la Trugalle et de Lamnay estuariens recouvrent une très large zone depuis Le Mans jusqu'à Tours (Figure 37). Ces sables passent latéralement à des marnes de milieu ouvert (non aquifères) qui correspondent aux Marnes de Nogent-le-Bernard inférieures puis Craie Glauconieuse. En domaine proximal, dans la partie Est, quelques dépôts fluviatiles sont identifiés, mais ne peuvent être cartographiés sur la base des seuls puits disponibles.

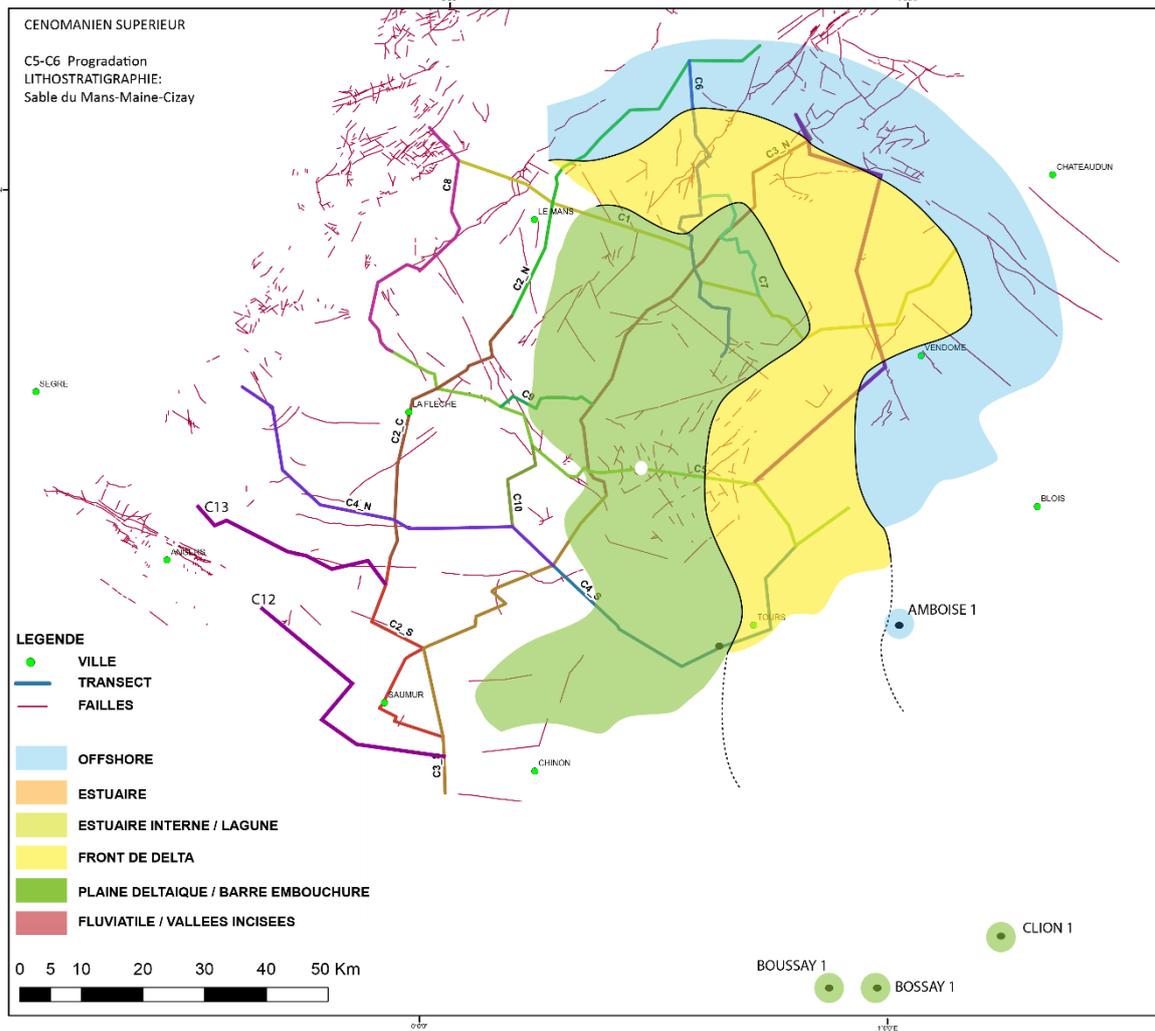


Figure 38 : Carte de faciès du delta des Sables et Grès du Mans (C4-C5 progradation)

Le front de delta des Sables et Grès du Mans présente une extension spatiale similaire à celui des Sables de la Trugalle. La plaine deltaïque à l'aval est très développée entre Le Mans et Chinon et pourrait se prolonger jusqu'à Boussay au sud (Figure 36). Enfin, en domaine distal, ce front de delta passe latéralement aux Marnes de Nogent-le-Bernard supérieures (Marnes de Bouffry) puis à la Craie de Théligny.

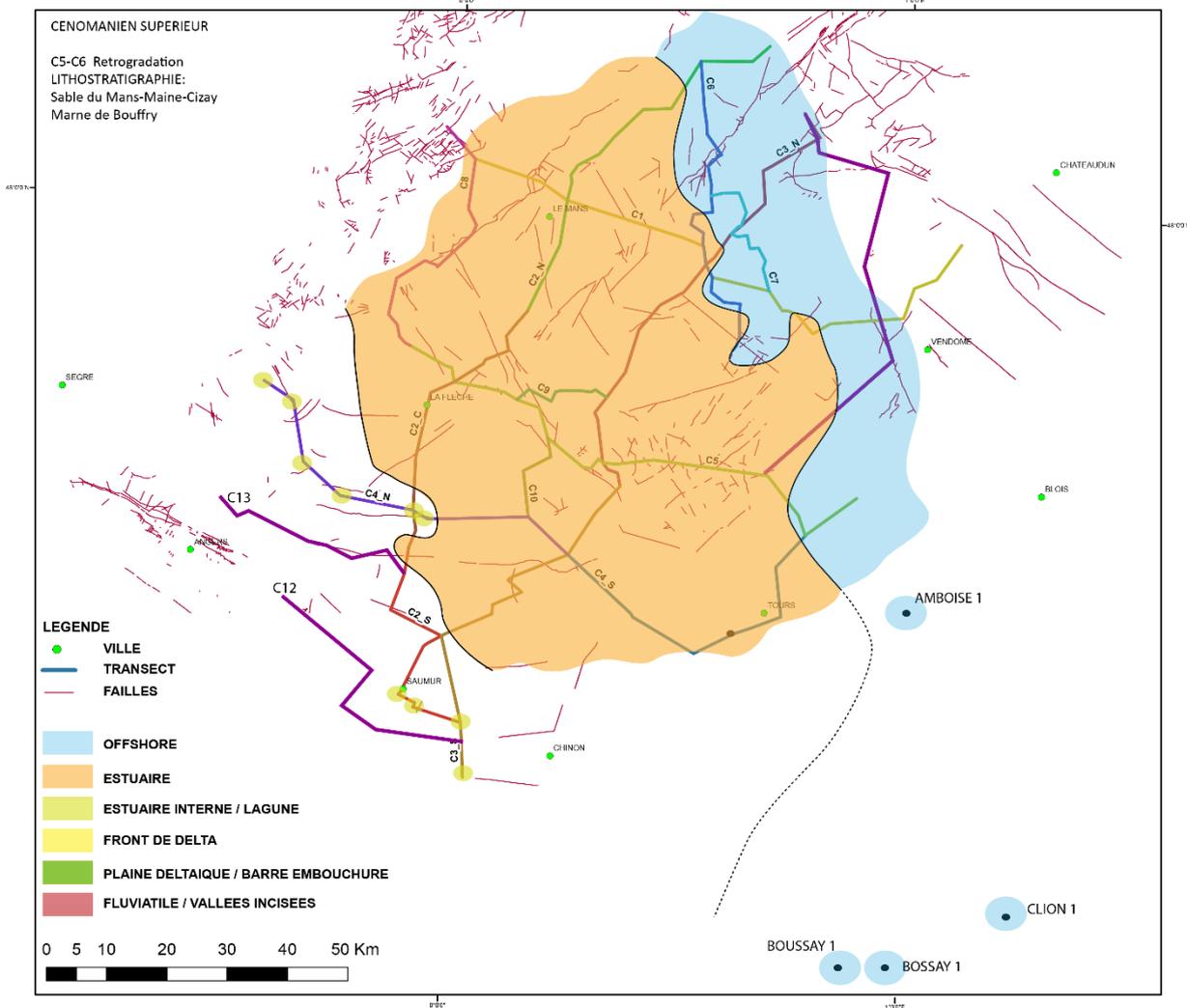


Figure 39 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables et Grès du Mans (C5-C6 rétrogradation)

Les Sables et Grès du Mans estuariens, transgressifs sur le système deltaïque précédent se déposent sur une large zone. En arrière de cet estuaire dans la zone Sud-Est, s'installe des dépôts lagunaires ou d'estuaire interne peu aquifères. Enfin le domaine distal, de milieu marin ouvert correspond à l'extension des Marnes de Nogent-le-Bernard supérieures (ici nommées Marnes de Bouffry afin d'éviter les ambiguïtés entre Marnes de Nogent inférieures et supérieures) au début de la transgression.

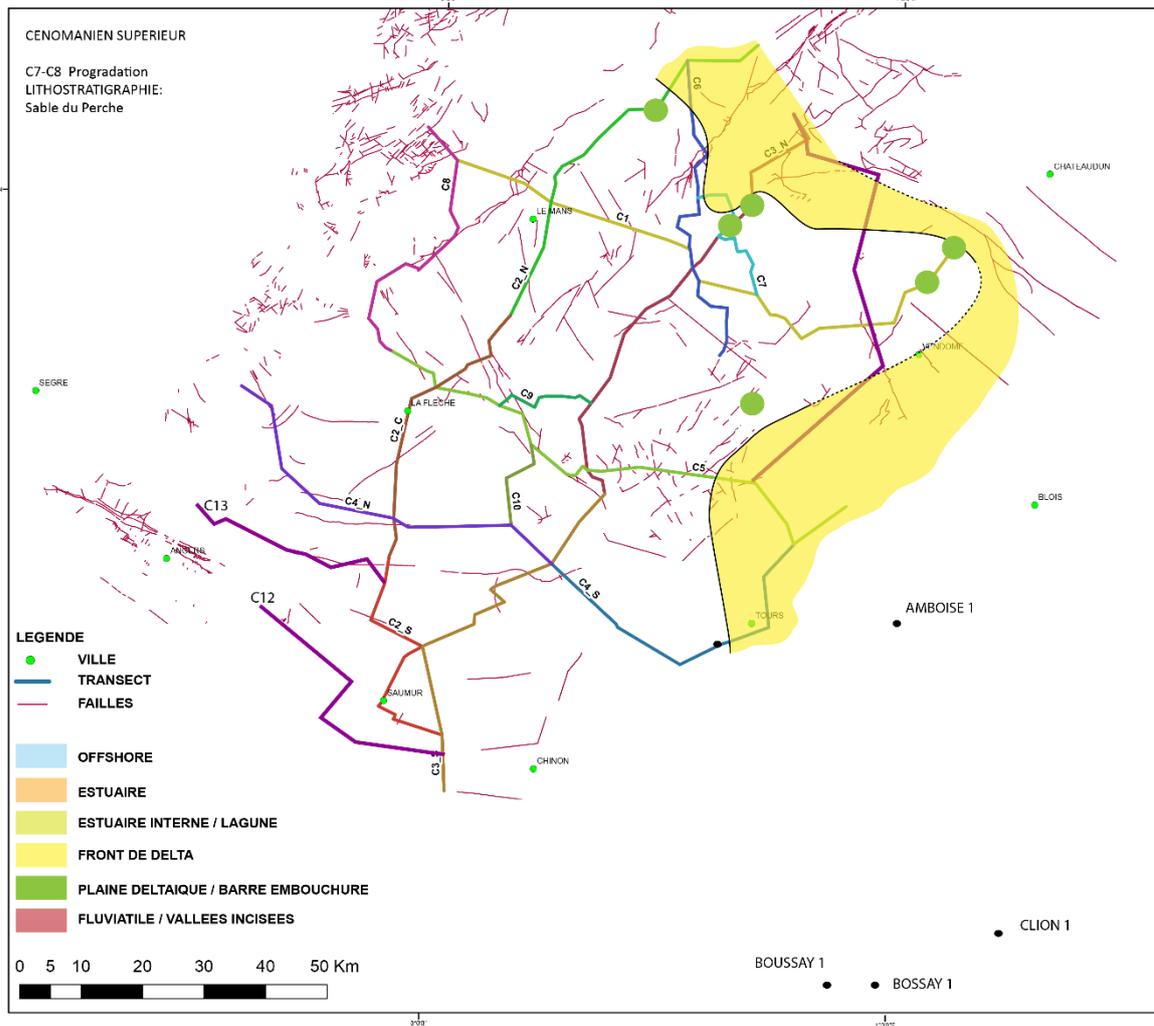


Figure 40 : Carte de faciès du delta des Sables du Perche (progradation entre C7 et C8)

Cette carte de faciès représente l'extension des Sables du Perche sous faciès deltaïque progradants (demi-cycle régressif C7-C8). Ces sables s'étendent largement dans la partie Nord et dans la partie Est et correspondent à une avancée majeure (progradation des dépôts sableux) lors d'une phase de chute du niveau marin. Cette chute ne favorise pas la préservation des faciès de plaine deltaïque qui ne sont caractérisés que de manière ponctuelle sur quelques forages. Le domaine distal, marin ouvert n'est pas reconnu par les forages et n'a pas été représenté. Il s'agit de marnes qui passent rapidement à des craies argileuses (Lasseur, 2007)

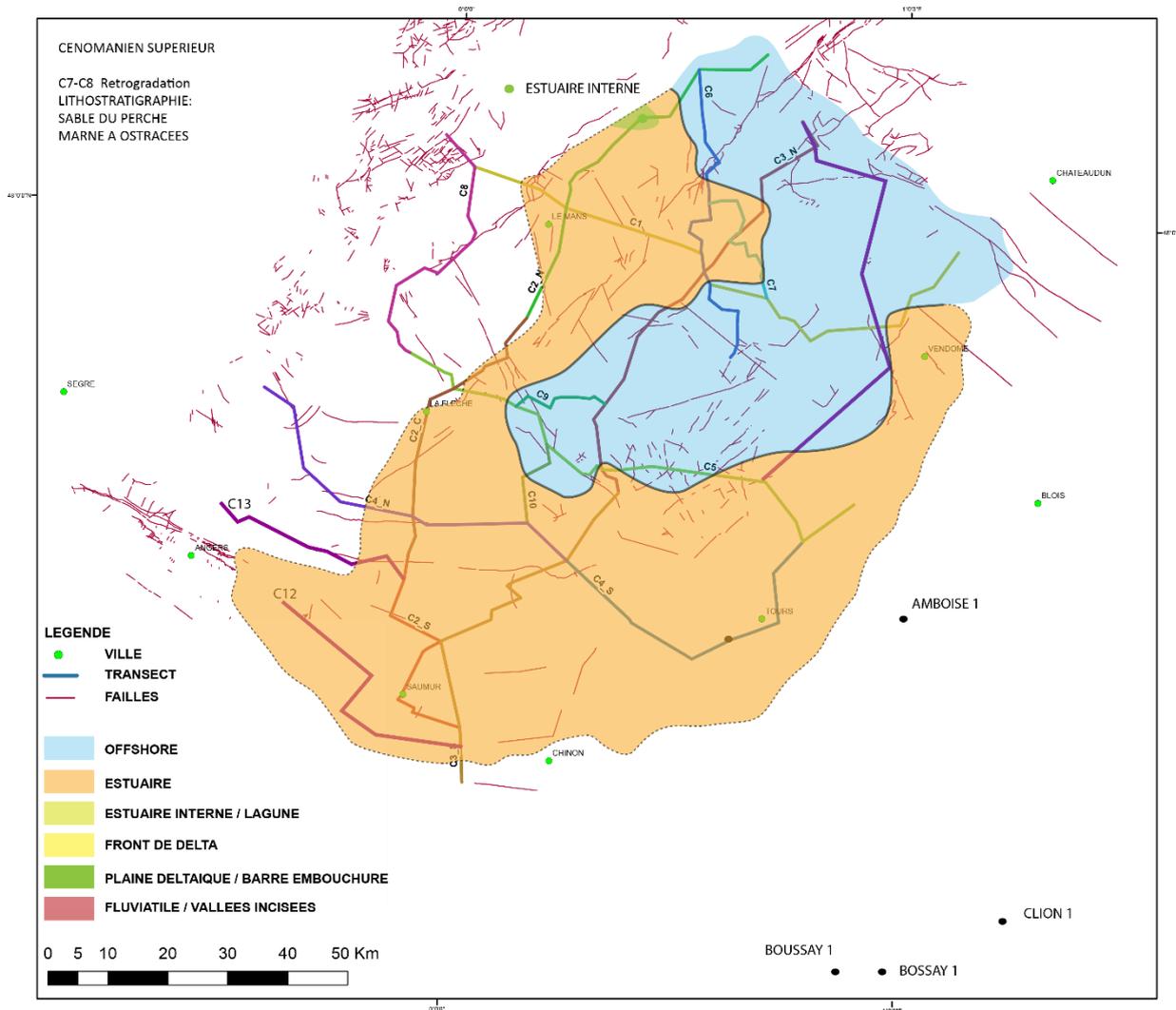


Figure 41 : Carte de faciès de l'estuaire des Sables du Perche (rétrogradation entre C8 (MRS) et C8 (MFS)).

Cette carte de faciès (Figure 39) correspond à une transgression majeure dans la partie supérieure des Sables du Perche qui atteint la bordure Sud et Ouest. Elle se traduit par un atterrissement important du domaine qui se matérialise par l'extension vers l'Ouest des faciès sableux et leur dépôt directement sur les dépôts Jurassiques et de socle. Le domaine distal représenté en bleu correspond à une zone subtidale dans laquelle prennent place progressivement les marnes à huîtres (Marnes à Ostracées).

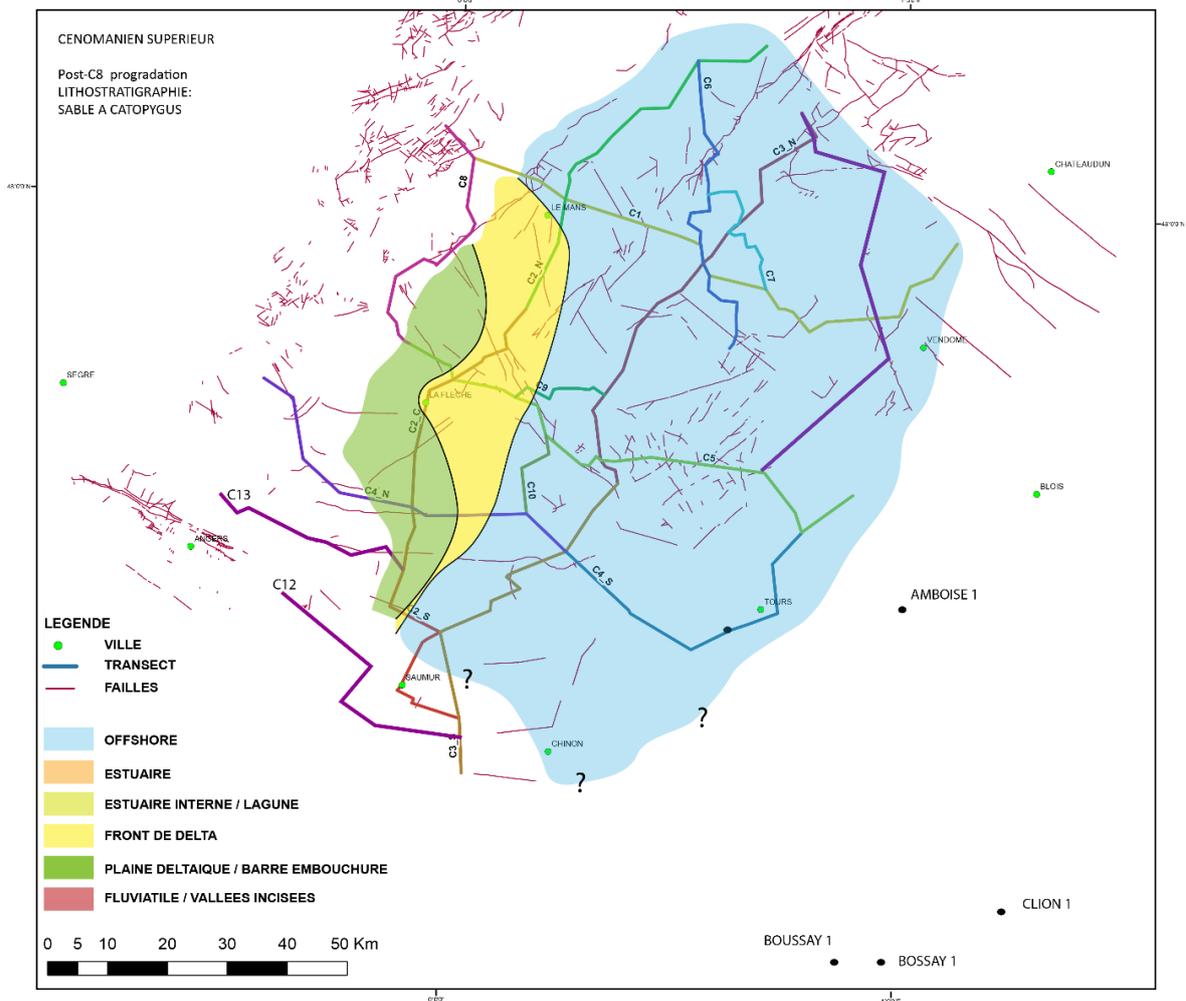


Figure 42 : Carte de faciès du delta des Sables à Catopygus ou de Bousse (Progradation post MFS C8 anté Craie)

Enfin, le delta des Sables à Catopygus, qui prend place après le dépôt massif et relativement continues des Marnes à Pycnodontes, ou Marnes à Ostracées, est aligné selon un axe N-S dans la partie Ouest de la zone. Cette carte témoigne, avec celle des Sables du Perche (Figure 41) de la grande transgression du Cénomaniens supérieur et du Turonien. Le delta des Sables à Catopygus correspond à une chute de faible amplitude à l'intérieur d'une grande tendance progradante. Il est de faible extension spatiale, il passe latéralement vers l'Ouest à des dépôts de plaine deltaïque. En domaine distal (Est), ce front de delta passe latéralement à la partie supérieure des Marnes à Ostracée et aux Marnes de Doué. Au-dessus de ces dépôts, prend place l'inondation majeure du Turonien, marquée par le dépôt de la Craie.

3.3.5 COMPARAISON AVEC LES CODAGES DE LA BDLISA

Une comparaison entre les géométries des dépôts cénomaniens et les entités de la BDLISA a été effectuée et concerne la partie Nord de la zone. Sont identifiées 1) des erreurs d'attribution de masse d'eau et 2) des limites d'entités mal localisées. Un exemple de ces erreurs sont illustrées en Figure 43.

Ces erreurs ont été localisées en cartes, ceci permettra de réactualiser la base de données BDLISA pour une meilleure identification des différentes masses d'eau.

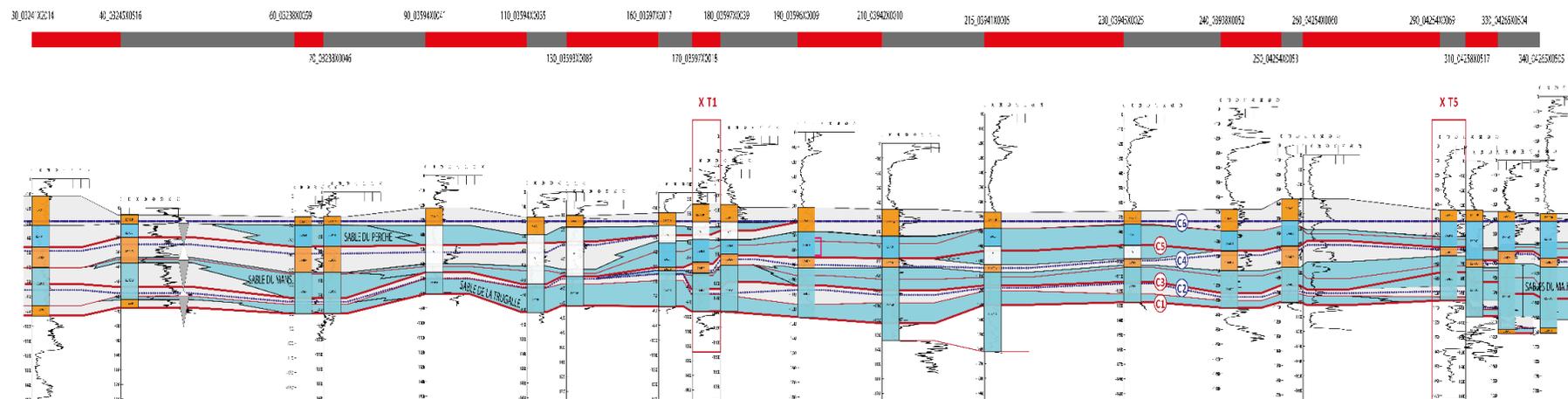


Figure 43 : Exemple de comparaison entre les géométries des dépôts du Cénomaniens (bleu : sables aquifères et gris clair : argiles et marnes aquitards) et les entités BDLISA replacées sur les forages (orange : aquitard ; bleu : aquifère ; blanc : non attribué)

3.4. PILE STRATIGRAPHIQUE, CARTE HARMONISEE ET SCHEMA STRUCTURAL

3.4.1. CHOIX DE LA PILE STRATIGRAPHIQUE

Le bilan des données de forages disponibles a montré que malgré la récupération effectuée, les données étaient insuffisantes pour modéliser précisément le Jurassique. En effet dans la méthodologie de construction du modèle GDM Multilayer©, les surfaces (Toits/Murs ou les épaisseurs sont calculées avec les données dites exactes. La méthode de modélisation sera explicitée et détaillée plus en détails dans un chapitre suivant.

Une pile stratigraphique dédiée aux formations du Jurassique a été réalisée. L'objectif de cette pile est d'identifier les éventuels problèmes de codage des sondages et de faire facilement le décompte des données qui seraient utilisées pour la modélisation.

On dispose d'un seul sondage qui atteint la base exacte du Jurassique (02878X0008) et de deux qui atteignent le toit exact du socle (02878X0008 et 02885X0501). En général, les données existantes sur le Jurassique sont insuffisantes à distance des affleurements de jurassiques qui figurent sur la bordure.

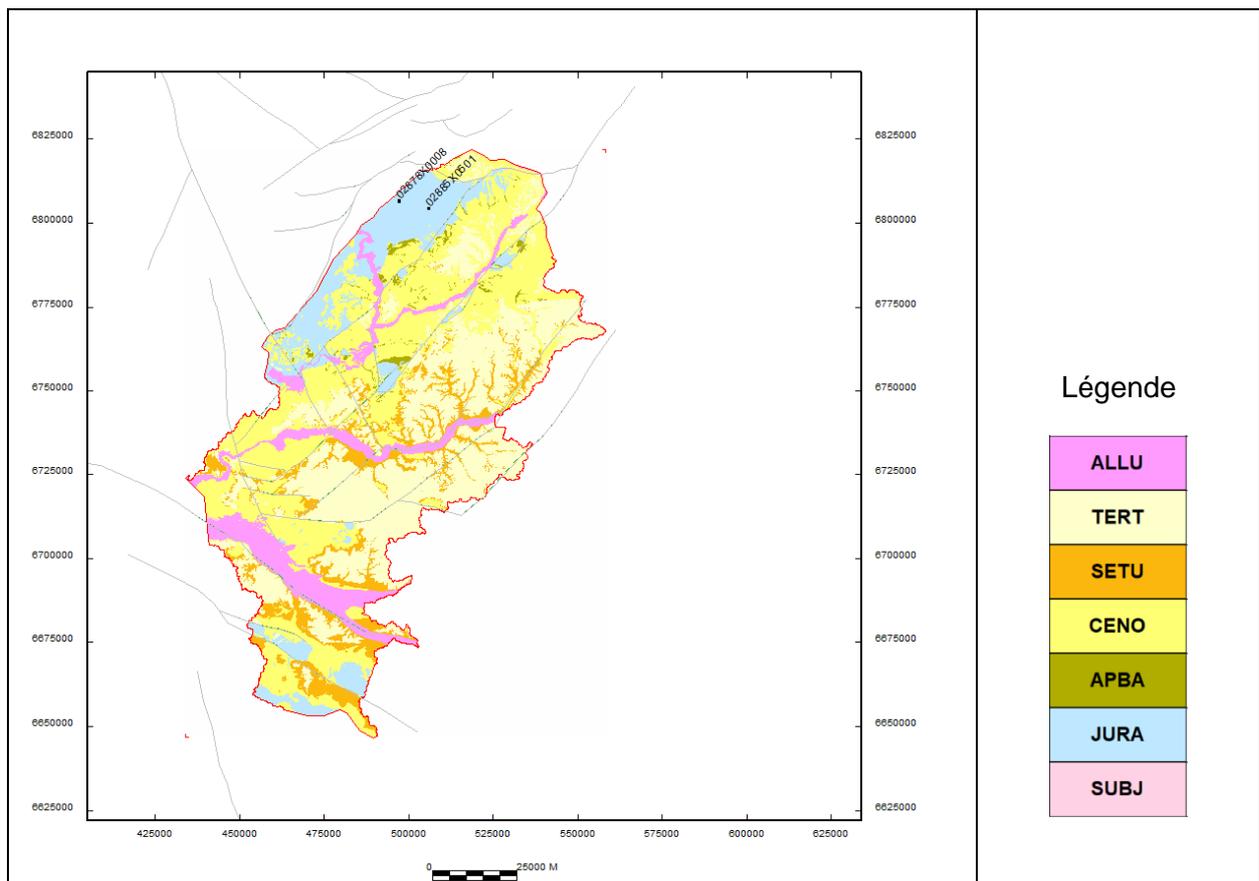


Figure 44 : Puits atteignant la base du Jurassique.

De même, l'un des aquifères principaux du Jurassique est l'aquifère du Bajo Bathonien. Celui-ci n'est atteint que par un nombre limité de puits à distance de la bordure (Figure 45 : Puits atteignant la base de l'intervalle Bajo-Bathonien.). En conséquence, le nombre de données disponibles est insuffisant pour modéliser les dépôts jurassiques de façon satisfaisante.

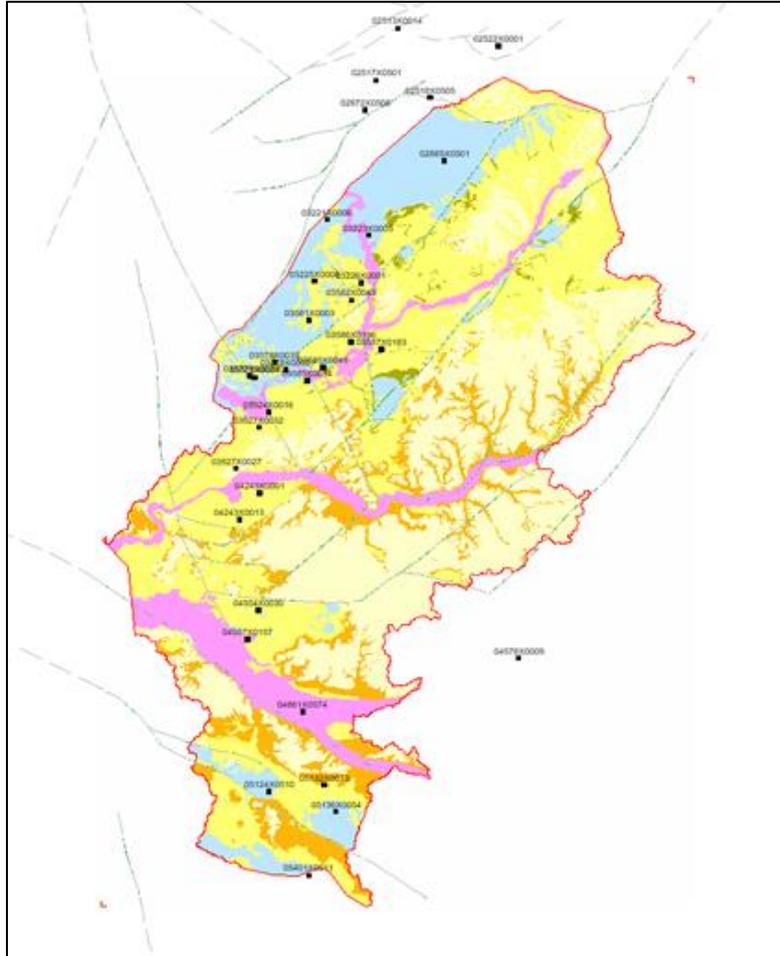


Figure 45 : Puits atteignant la base de l'intervalle Bajo-Bathonien.

Aussi, le choix a été fait de concentrer l'essentiel des efforts de modélisation sur les ensembles sableux du Cénomaniens.

Quatre ensembles sableux séparés par autant d'intercalations argileuses sont individualisés dans le Cénomaniens par la synthèse géologique :

- Les Sables de la Trugalle et de Lamnay, (code13) ;
- Les Sables du Mans (code 12) ;
- Les Sables du Perche (code 10) ;
- Les sables à *Catopygus Obtusus* (code 8).

Dans le but de restituer les géométries du/des aquifères cénomaniens, ces 4 ensembles sont modélisés. Les formations argileuses qui les séparent formant des aquitards plus ou moins importants sont également modélisées. Il s'agit :

- L'ensemble CEN14 situé sous les Sables de la Trugalle, correspond aux Marnes de Ballon, à la Craie glauconieuse déposée dans la partie est de la zone d'étude, ainsi qu'aux formations Barrémien à Albien principalement aquitard.
- des marnes de Nogent inférieures (125) entre Trugalle et Mans ;
- Des Marnes de Bouffry (11) et de la Craie de Théligny entre Mans et Perche ;
- Des Marnes à Ostracées (9) entre Perche et Obtusus ;
- La Craie Turonienne a recouvert l'ensemble de la zone mais a été largement dissoute et érodée au cours du Tertiaire.

Les Marnes de Ballon représentent la première grande transgression au cours du Cénomanién inférieur. Du fait de l'ampleur de leur transgression, ces marnes reposent soit en concordance sur les Argiles du Gault (Albien supérieur) soit en discordance sur les dépôts crétacé inférieur (Barrémien et Aptien), soit plus à l'Ouest directement sur les dépôts jurassiques et antérieurs. Cette formation se biseaute sous les sables cénomaniens. Dans la modélisation, elle est regroupée avec les dépôts argileux aptiens et albiens, et forme un aquitard à la base des sables cénomaniens les isolants localement (principalement à l'Est) des dépôts jurassiques.

Les dépôts deltaïques du Cénomanién passent latéralement à des dépôts crayeux sédimentés dans les domaines profonds qui se situaient dans la partie Est de la zone d'étude. En particulier, les Marnes de Nogent inférieures et les Marnes de Bouffry passent latéralement à la Craie de Théligny. Dans la modélisation effectuée, la Craie de Théligny est regroupée avec ces marnes. L'information est préservée dans le codage des logs validés, et donc utilisable si à l'avenir la distinction de cet ensemble crayeux s'avère nécessaire.

La transgression du Nord-est au Sud-Ouest qui a lieu au Cénomanién dans la zone d'étude a pour conséquence un biseau des formations argileuses vers le Sud-Ouest (Figure 33). Il en résulte une mise en communication des différents ensembles sableux du Cénomanién qui s'y trouvent amalgamés. Ils sont fréquemment dénommés Sables du Maine, et cartographiés comme tel (§ 3.4.3). Ils forment alors un seul aquifère. L'un des attendus de la modélisation a donc été de restituer les biseaux des différents ensembles argileux vers le Sud-Ouest.

La formation des Marnes à Ostracées forme quant à elle un ensemble relativement continu et à dominance argileuse qui recouvre les trois principaux ensembles sableux du Cénomanién et les séparent des Sables à Catopygus. Ces marnes forment donc une séparation importante de l'aquifère cénomanién. Cependant, il s'agit principalement d'argile silteuses et sableuses dans lesquels des bancs carbonatés (bioconstructions à huitres) s'intercalent. En outre, cet ensemble se pince dans la région de Vendôme, au-dessus des Sables du Perche. Les Sables à Catopygus forment quant à eux un ensemble aquifère local d'extension relativement limitée. L'ensemble des entités cénomaniennes citées ci-dessus ont été modélisées.

Une correspondance a été définie entre les formations de la pile stratigraphique retenue et celles de la BDLISA (Figure 47 : Correspondance entre les entités de la pile stratigraphique retenues et celle de la BDLISA). Une correspondance exacte est trouvée pour les sables à Catopygus les marnes à Ostracées, les Sables du Perche et les Marnes de Bouffry. Les Sables du Mans et les Sables de la Trugalle ne sont pas individualisés dans la BDLISA. Inclure les présents résultats nécessitera de réaliser une nouvelle version de la BDLISA, en outre une réactualisation permettra de corriger les problèmes d'attribution en forage signalés plus haut (§3.3.5).

PILE STRATIGRAPHIQUE MODELISEE Modèle intra cénomanien		
Formation	Type Surf.	Description
ALLU	EROD	Alluvions
PstC		Post CENO (except Alluv)
CATO	EROD	Sable_Catopygus_Cen8
OSTR	EROD	Marnes_Ostracées_Cen9
PERC		Sable_Perche_Cen10
BOUF		Marne_Bouffry_Nogsup_Cen11
MANS		Sable_Mans_Cen12
NINF		Marnes Nogent Inf Cen125
TRUG		Sables Trugalle_Cen13
BALL		Marnes_Ballon_Cen14
SubC		Sub CENO

Figure 46 : Pile stratigraphique retenue pour la modélisation géologique

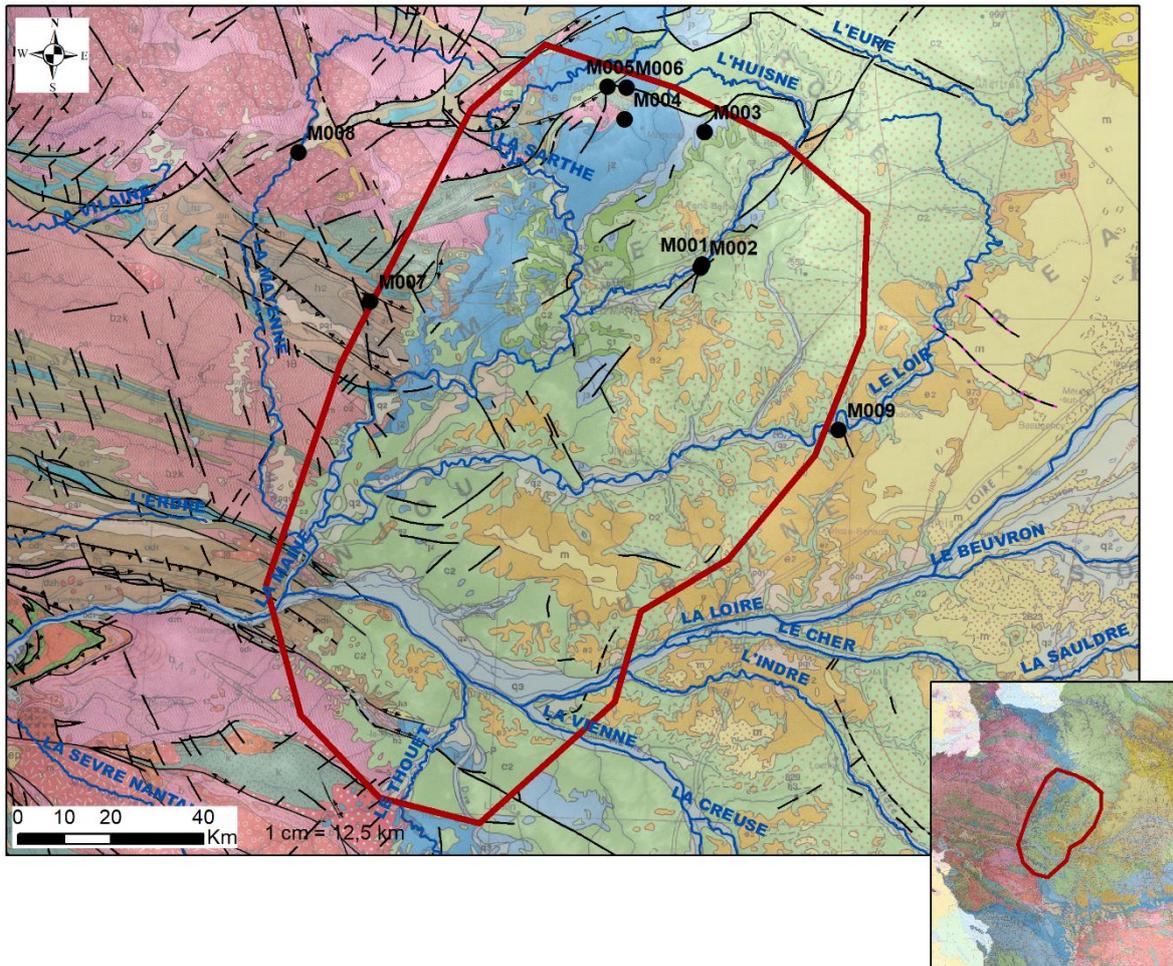
NomForm :	Code modele	GEF19	NomForm07	Correspondance BDLISA
Alluvions	F19	ALLU	Alluvions	F07
Post Ceno Séno-Turonien		TERT	Tertiaire indifférencié	
		SETU	Séno-Turonien	
Sable_Catopygus	8	CATO	Cénomanién	123AH01
Marnes_Ostracées	9	OSTR	Cénomanién	123AA10
Sable_Perche	10	PERC	Cénomanién	123AB01, 123AC01, 123AE01
Marnes_Bouffry_Nogsup, Craie de Théligny	11	BOUF	Cénomanién	123AB03, 123 AC03
Sable_Mans	12	MANS	Cénomanién	
Marnes Nogent Inf Craie de Théligny	125	NINF	Cénomanién	123AB05, 123 AC05, 123 AE05, 123 AG05
Sable Trugalle	13	TRUG	Cénomanién	
Marnes_Ballon, Craie Glaucouneuse	14	BALL	Cénomanién	123 BA01, 123BW01,
Gault_Aptien_Barrémien	14	GAUL	Aptien Barrémien	125 AA01, 127 AC99

Figure 47 : Correspondance entre les entités de la pile stratigraphique retenues et celle de la BDLISA

3.4.2. ANALYSES ET SCHEMA STRUCTURAL

Etude structurale des sites analysés

Lors de la mission de terrain de 4 jours, il a été possible de réaliser des observations structurales sur 9 affleurements, essentiellement sur le pourtour Nord de la zone d'étude (Figure 48). Les accidents structuraux principaux de la carte géologique au million ont été ciblés en priorité, bien que ceux-ci soient peu nombreux dans la zone d'étude. Il s'agit essentiellement de petits segments de quelques kilomètres dont aucune indication cinématique n'est fournie sur la carte. Néanmoins, les affleurements de qualité suffisante pour pouvoir observer de la microtectonique sont rares. Dans cette partie, seront présentés les résultats obtenus sur les 9 sites d'observations.



Légende

- XY_Aff_MODGEAU_Frac (9)
- ▭ EMPRISE_ETUDE (1)
- discontinuité géophysique - discontinuité géophysique - T (2)
- faille - indifférencié (observé) - T (458)
- faille - indifférencié (masqué ou supposé) - T (13)
- ▲ faille - inverse ou chevauchement - T (24)
- faille - normale ou détachement - T (2)
- ↔ faille - décrochement - T (35)

Figure 48: Localisations des 9 affleurements sur lesquels il a été possible de procéder à des observations structurales. Les structures faillées présentes sur la carte BRGM au million sont figurées en noir.

• **M001_Vouvray sur Huynes**

Le site M001 se situe sur un axe structural important NE-SW. L'analyse structurale a été menée dans l'ancienne carrière Orbello, reconvertie actuellement en un site de préservation des chauve-souris. Ce site atteste d'une déformation décrochante omniprésente, aussi bien à l'échelle de l'affleurement que l'échelle microtectonique (Figure 49). Les représentations des mesures structurales révèlent des distributions avec des maxima d'orientation pour les plans de failles décrochantes : NW-SE, N-S et N20° et pour les plans de failles inverses : globalement NE-SW avec un pendage autour de 40° (Figure 50). Les inversions de paléocontraintes attestent d'un système cinématiquement cohérent avec un état de contrainte décrochant avec un axe σ_1 N-S (Figure 51). Les déformations observées sont donc synchrones, à savoir, les décrochements dextres NW-SE, senestres N20° et les chevauchements NE-SW.



Figure 49 : Fracturation de type décrochante observée sur le site M001, à l'échelle de l'affleurement (en haut) et à l'échelle microtectonique (en bas).

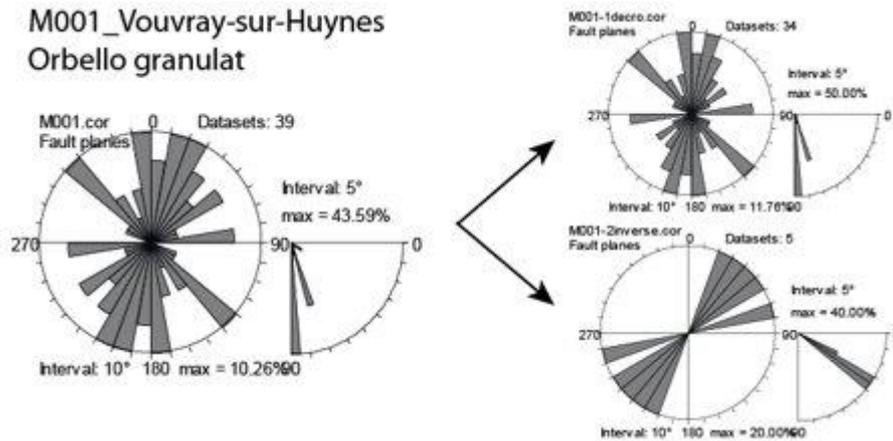


Figure 50 : Mesures de failles effectuées sur le site M001 (azimuth à gauche de 0 à 360° et pendage à droite de 0 à 90°) avec séparation de 2 sous-familles : une famille décrochante (en haut à droite) et une famille inverse (en bas à droite).

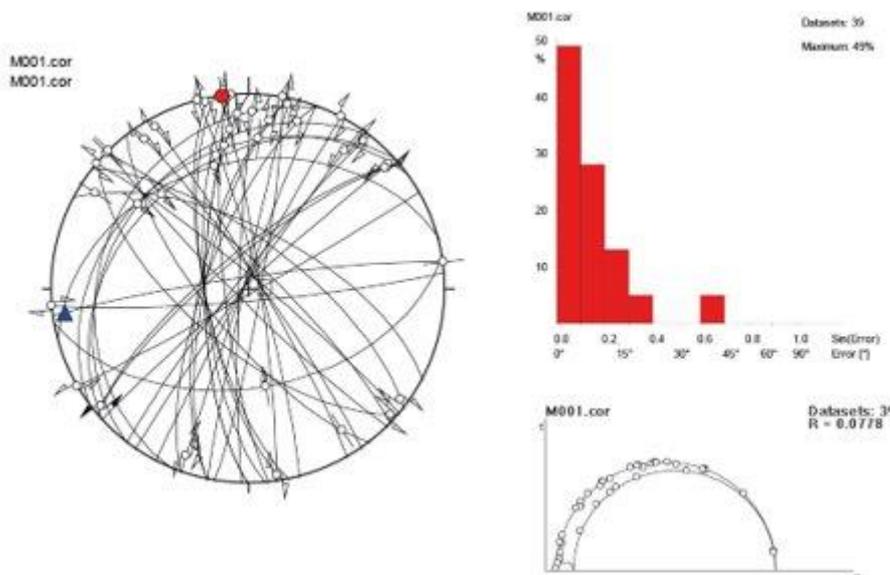


Figure 51 : Représentation stéréographique des couples failles/stries associée au tenseur de paléocontraintes calculé (gauche). Histogramme des erreurs entre la strie optimale calculée et la strie mesurée sur chaque plan de faille (en haut à droite) et cercle de mohr avec les mesures (en bas à droite).

- **M002_Vouvray sur Huynes**

Le site M002 se situe également sur l'axe structural NE-SW, très proche du site M001, avec une déformation similaire au site M001. Les déformations décrochantes sont prédominantes, elles sont orientées N160° à N20° (Figure 52). Le tenseur de paléocontraintes calculé permet d'établir une contrainte principale maximale σ_1 N-S. Un signal mineur correspond à des failles normales N160° caractérisées par un tenseur de paléocontraintes où σ_3 est orienté N260°. Ces 2 systèmes de failles sont synchrones car cinématiquement cohérents avec une permutation locale des axes $\sigma_1 \Leftrightarrow \sigma_2$ (Figure 53).

M002_Vouvray-sur-Huynes
Carrière_Telecom

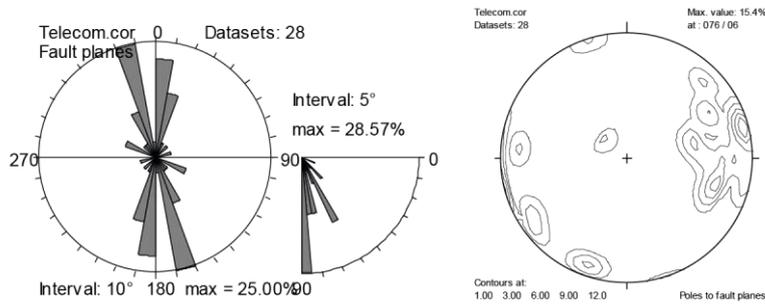


Figure 52 : Représentation des mesures structurales sur un digramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique des densité de répartition des pôles de plans de failles (à droite).

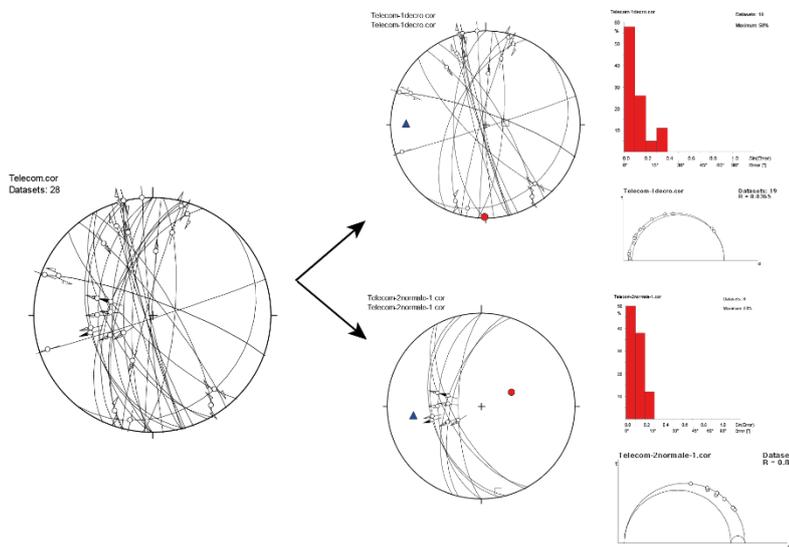


Figure 53 : Représentation stéréographique des couples failles/stries associée au tenseur de paléocontraintes calculé (gauche). Histogramme des erreurs entre la strie optimale calculée et la strie mesurée sur chaque plan de faille (en haut à droite) et cercle de mohr avec les mesures (en bas à droite).

- **M003_Appenai-sous-Bellême**

Dans l'ancienne carrière, la fracturation y est peu dense. On peut y observer de grands plans N-S ne portant pas de strie et quelques plans N150°, subverticaux. La stratification est horizontale.

- **M004_Tessé**

Dans la carrière de SOSAT, les déformations observées correspondent essentiellement à de grands plans N170°, subverticaux avec rarement quelques tectoglyphes indiquant des mouvements décrochants (Figure 54).

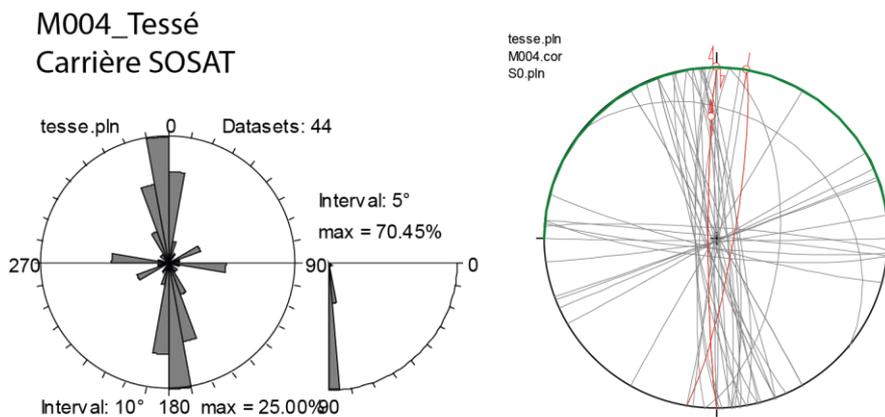


Figure 54 : Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite). Stratification moyenne subhorizontale (en vert).

- **M005_Val d'enfer**

Dans la carrière d'Ordovicien, on retrouve des déformations décrochantes NE-SW et des failles extensives NW-SE (Figure 55).

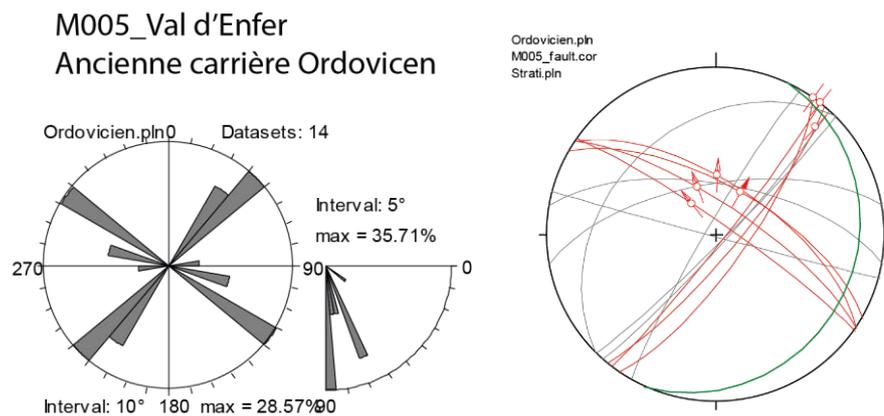


Figure 55: Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).

- **M006_Louze**

Sur le site d'escalade de Louze, la stratification est verticalisée et reprise par des mouvements décrochants dextres sur des directions NW-SE (Figure 56).

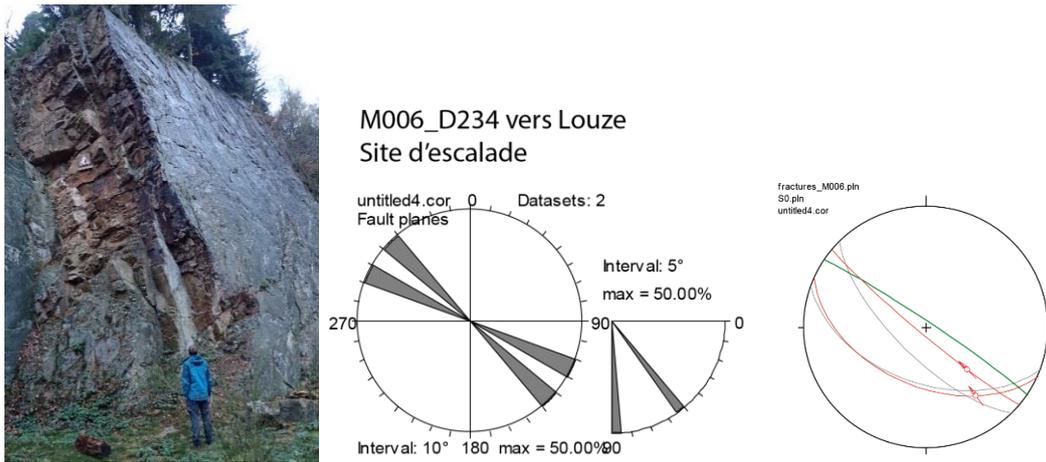


Figure 56 : Illustration des grands plans de fractures NW-SE (gauche). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (centre) et sur une projection stéréographique (droite).

• **M007_Saulges**

Le site d'escalade de Saulges, dans les calcaires carbonifères présente des déformations plus distribuées avec une dominance des plans N50°, NW-SE et N-S, majoritairement subverticaux (Figure 57).

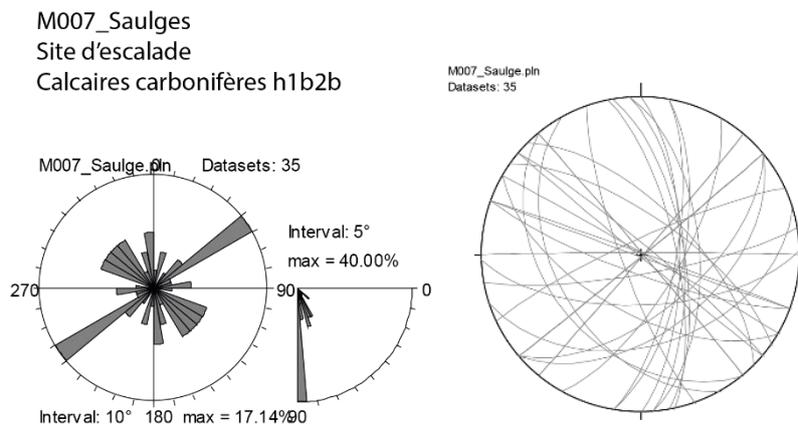


Figure 57 : Illustration des grands plans de fractures NE-SW (haut). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).

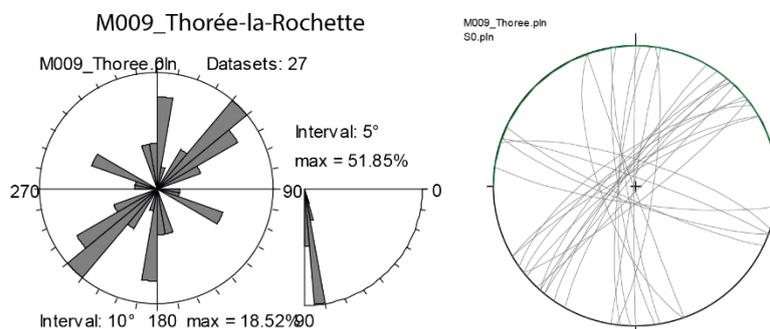
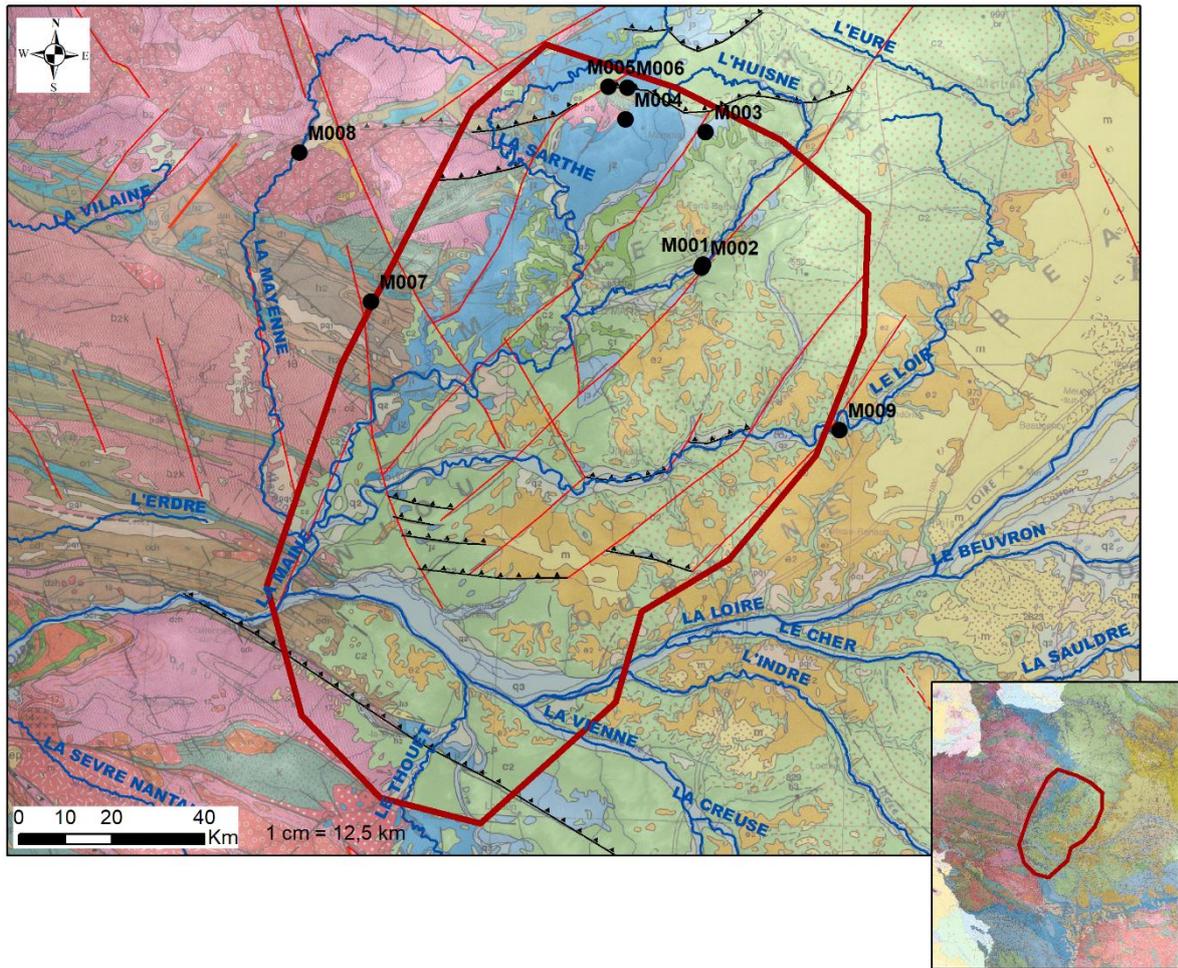


Figure 59: Illustration des grands plans de fracture verticaux NE-SW (haut). Représentation des mesures structurales sur un diagramme en rose (gauche) et sur une projection stéréographique (à droite).

Schéma structural de la zone d'étude et corrélation avec les structures profondes

Les différentes observations réalisées sur le terrain ainsi que la littérature (Suzzoni, 1984) nous ont conduit à tracer le schéma structural sur la Figure 60. Celui-ci est caractérisé par des accidents décrochants conjugués synchrones : NW-SE dextres et NE-SW senestres (en rouge sur Figure 60). Ces accidents s'expriment sur le terrain davantage par des couloirs constitués de relais de petits segments de failles que par un plan unique. Des accidents chevauchants sont présents principalement au Nord et au Sud de la zone. Ils sont orientés globalement E-W et se branchent sur les décrochements conjugués. Basé sur les inversions de paléocontraintes, ces déformations sont très probablement synchrones, dans un contexte général décrochant/transpressifs avec σ_1 orienté N-S. Localement des relais transtensifs se traduisent par des permutations locales des axes $\sigma_1 \Leftrightarrow \sigma_2$ (σ_3 restant E-W).

Ces accidents sont globalement subverticaux et affectent donc toute la pile sédimentaire jusqu'au socle. Certaines écaïlles, notamment de formations jurassiques, sont mises à l'affleurement par le jeu transgressif de ces failles. Ainsi, elles présentent très probablement une perméabilité de fracture très importante.



Légende

- XY_Aff_MODGEAU_Frac (9)
- ▭ EMPRISE_ETUDE (1)
- 0 (1)
- 1, Faille majeure observée, visible, de nature non distinguée (1)
- - - 2, Faille supposée, masquée, hypothétique, de nature non distinguée (1)
- ▲▲ 3, Chevauchement ou faille inverse visible (12)
- - - 4, Axe anticlinal ou antiforme, cartographique (1)
- 11, Faille mineure observée, visible, de nature non distinguée (25)
- ▲▲ 13, Chevauchement ou faille inverse supposée (2)

Figure 60: Schéma structural simplifié de la zone d'étude.

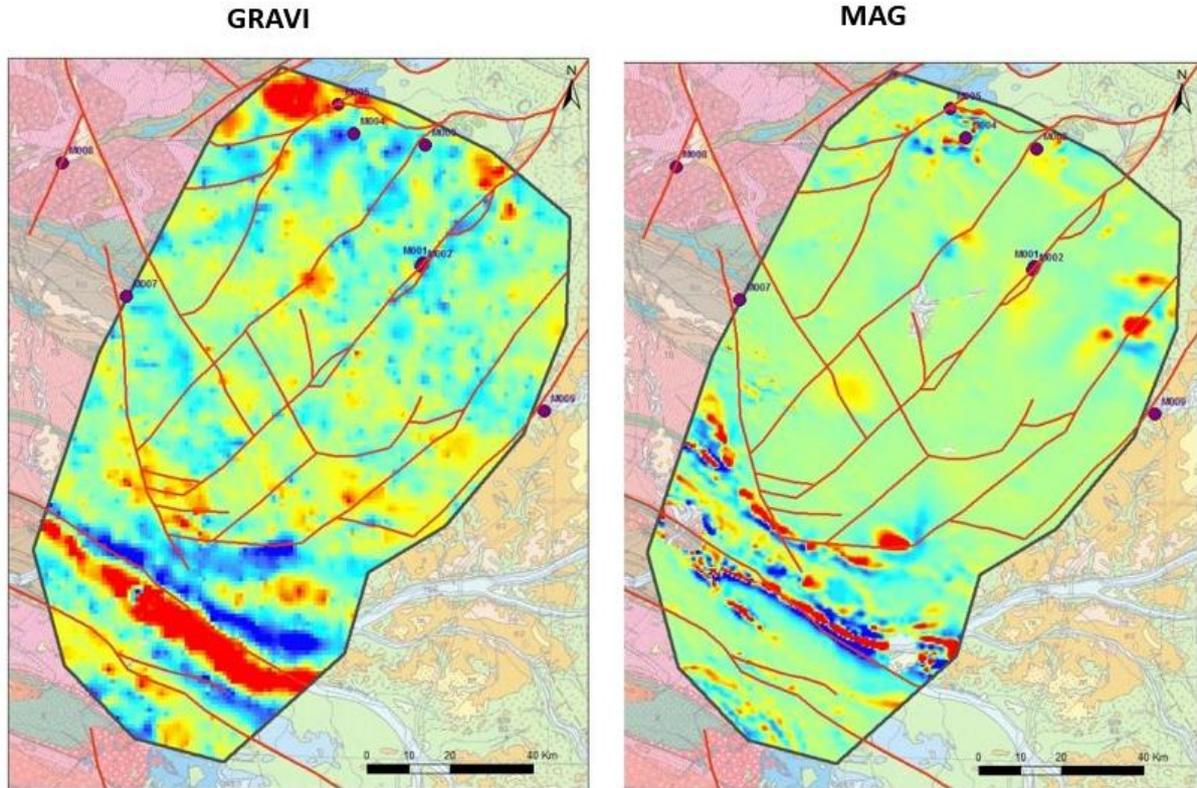


Figure 61: Corrélation entre le schéma structural et les cartes gravimétriques (gauche) et magnétiques (droite).

Le tracé des structures issues des mesures de terrain a été superposé aux cartes des données aéromagnétiques et gravimétriques afin d'établir un éventuel lien entre les structures de surface et des structures profondes. Les données aéromagnétiques utilisées dans le cadre de cette étude sont issues d'une compilation des levés Bretagne-Cotentin et Pays de la Loire (Baptiste, 2016). Les données gravimétriques utilisées sont extraites de l'ensemble des campagnes de mesures conduites en France depuis le milieu du 20^e siècle et compilées par le BRGM au titre du Code Minier dans la Banque Gravimétrique de la France (BGF) (Martelet *et al.*, 2009). Au sein de la zone d'étude, les intensités des données géophysiques sont très peu contrastées (Figure 61). Cela résulte de l'homogénéité des lithologies constituant le substratum de la pile sédimentaire. Néanmoins, il est possible d'observer une bonne corrélation entre le tracé des failles de direction NE-SW et les réponses géophysiques aéromagnétiques et gravimétriques. Ceci implique très certainement un ancrage profond de ces structures. Les failles de directions NW-SE sont quant à elles visibles sur les données aéromagnétiques ce qui témoigne de leur position plus superficielle au sein du substratum. Enfin, une minorité de failles E-W est visible notamment dans la partie Nord de la zone d'étude. Ces structures semblent être beaucoup plus superficielles et n'affecteraient probablement, ici, que la couverture sédimentaire.

3.4.3. CARTE HARMONISEE DE LA ZONE D'ETUDE

Afin de modéliser en trois dimensions les entités choisies jusqu'aux affleurements, la cartographie des différentes entités retenues dans la pile stratigraphique (§3.4.1) a été harmonisée à l'échelle des différents départements situés dans l'emprise du modèle (Figure 62). L'effort d'harmonisation a essentiellement porté sur les dépôts cénozoïques et les formations du Jurassique. Les ensembles inférieurs (Socle) et supérieurs (Craie, Tertiaire, Quaternaire) n'ont pas été différenciés à l'exception des alluvions. Pour les dépôts cénozoïques, les attributions des

différentes formations ont été harmonisées à partir du diagramme de Wheeler des formations cénomaniennes. Les problèmes de raccord entre polygone des différents départements ont été peu nombreux. Les différentes entités de la pile sédimentaire cénomaniennes (§3.4.1) sont donc également individualisées sur les cartes harmonisées. Dans la partie Ouest, le pincement progressif des niveaux marneux fait qu'ils ne sont pas toujours individualisés. C'est le cas pour les niveaux marneux qui constituent les Marnes de Nogent le Bernard inférieur, et les Marnes de Bouffry (ou marnes de Nogent supérieures). Dans ces cas, les ensembles modélisés ne sont plus entièrement différenciés. Lorsque les Marnes de Bouffry se pincent progressivement vers le Sud-Ouest, les Sables du Mans et les Sables du Perche ne sont plus différenciés et sont cartographiés dans la plupart des cas sous le terme englobant de Sables du Maine. Dans la carte harmonisée, ils reçoivent le code 102 (Figure 62). Lorsque les Marnes de Nogent inférieur, se pincent, un seul ensemble comprenant les Sables de la Trugalle, les sables du Mans et les Sables du Perche est dénommé 1023.

Pour exemple, au cours de la modélisation géologique, la base de 102 (Sables du Mans et Sables du Perche) a été assimilée à la base des Sables du Mans, et son toit à celui des Sables du Perche. L'horizon 11 des Marnes de Nogent le Bernard est modélisé sur la base des forages jusqu'à sa disparition complète.

Dans ces zones, une intercalation marneuse peut exister mais représente dans ce cas une épaisseur trop faible (quelques mètres) pour avoir été cartographiée. Par contre cette gamme d'épaisseur a fréquemment été identifiée en forage. Il peut en résulter des informations contradictoires entre carte géologique (n'individualisant pas cet intervalle argileux, mais le signalant dans les notices de cartes géologiques) et les données de forage qui le différencient. Cette différence de codage est à prendre en compte dans la modélisation puisqu'elle crée des incohérences dans les zones proches des affleurements.

Une tentative de regroupement avec les cartes de la BDLISA, a montré des choix de regroupements différents qui rendent difficiles la mise en synonymie directe des deux cartographies. La recommandation à l'issue de ce présent travail serait de reprendre la cartographie de la BDLISA sur la base des informations acquises dans le présent projet.

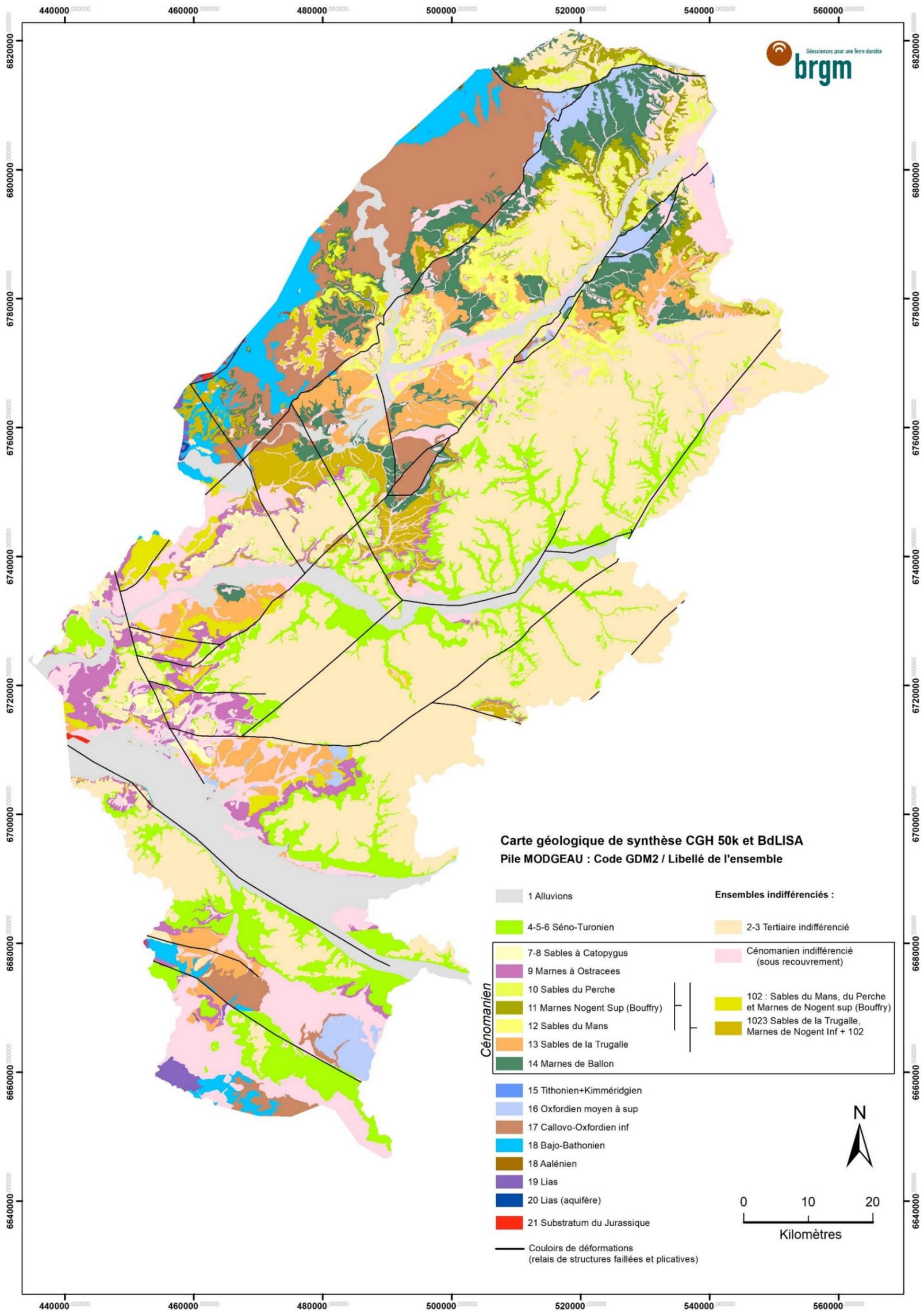


Figure 62: Carte harmonisée à l'échelle de la zone du modèle

3.4.4. BANCARISATION DES RESULTATS ET LOG VALIDES

La Figure 62 présente un exemple de corrélation et d'export des surfaces séquentielles (exports au format "txt") dans le cas d'étude du Jurassique.

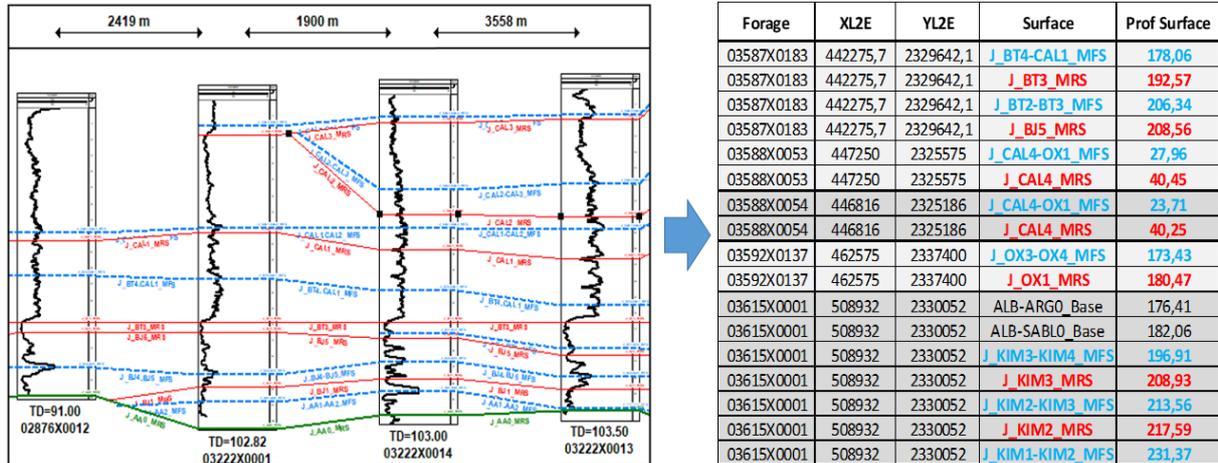


Figure 63 : Exemple de pointé des surfaces séquentielles (MFS en bleu ; MRS en rouge) réalisées dans le module "Cross-Section" du logiciel GEOGRAPHIX (image de gauche) et export des surfaces au format "txt" (image de droite) pour le Jurassique.

Pour le Cénomaniens, ce sont 12 surfaces et 7 faciès qui ont été bancarisés. La Figure 64 présente un exemple de pointé et d'export des faciès sédimentaires. Chaque faciès est représenté par une couleur distincte (exemple en jaune : sables propres de front de delta).

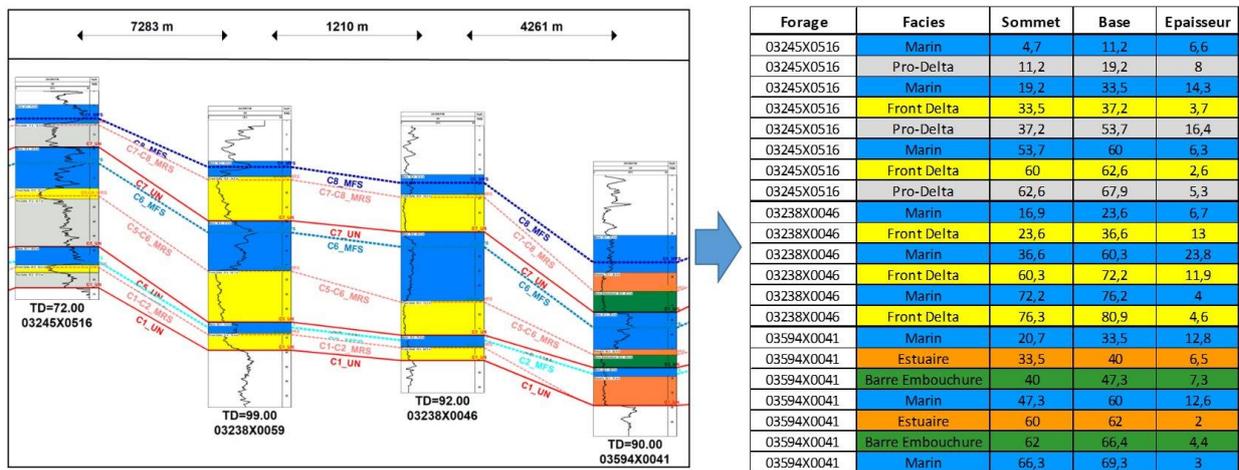


Figure 64 : Exemple de pointé des surfaces séquentielles et des faciès réalisés dans le module Cross-Section du logiciel GEOGRAPHIX (image de gauche) et export des faciès au format "txt" (image de droite) pour le Cénomaniens.

Ces fichiers numériques ont été bancarisés et pourront servir dans le futur à effectuer des modélisations basées sur les concepts de stratigraphie séquentielle et d'habillage en faciès sédimentaire.

Forages numériques utilisés pour la modélisation (LGV) :

La Figure 65 ci-dessous présente un exemple de correction effectuée sur les noms des formations géologiques d'un LGV. Les alternances d'argile et de sable, initialement codés en "Sables et Grès du Maine", ont été distingués grâce aux corrélations et ont été recodées en plusieurs formations géologiques (Marnes à Ostracées à Marnes de Ballon).

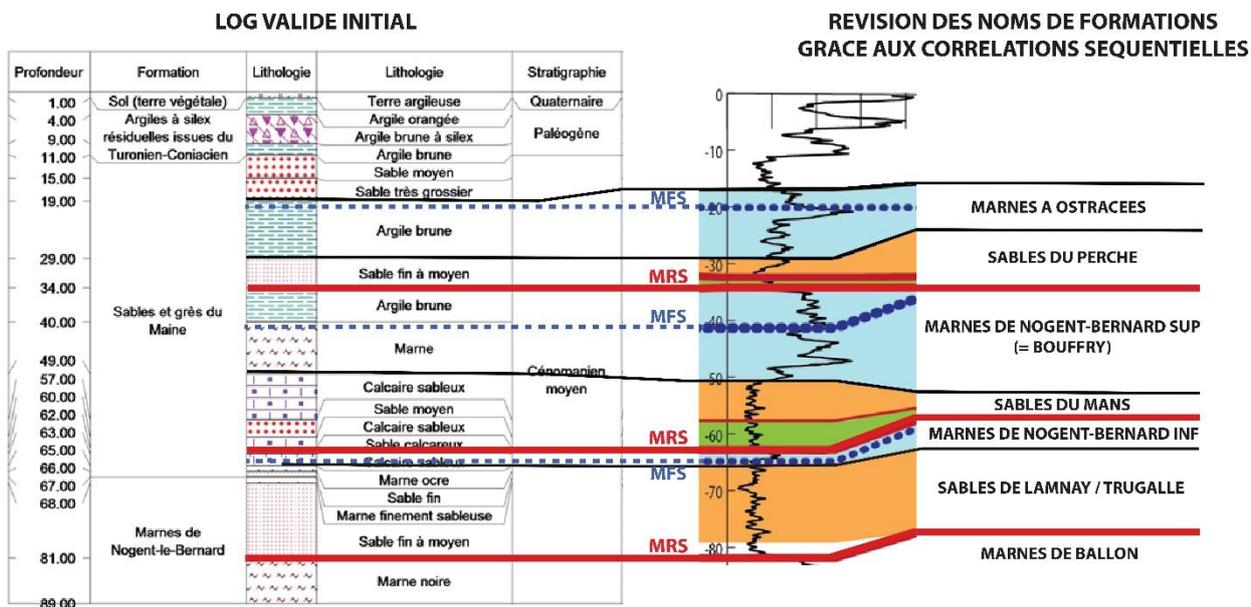


Figure 65 : Exemple des modifications qui ont pu être effectuées sur les Logs Validés de la BSS grâce aux corrélations séquentielles.

Au total, ce sont environ 200 LGV qui ont été révisés dans la zone d'étude (Figure 66).

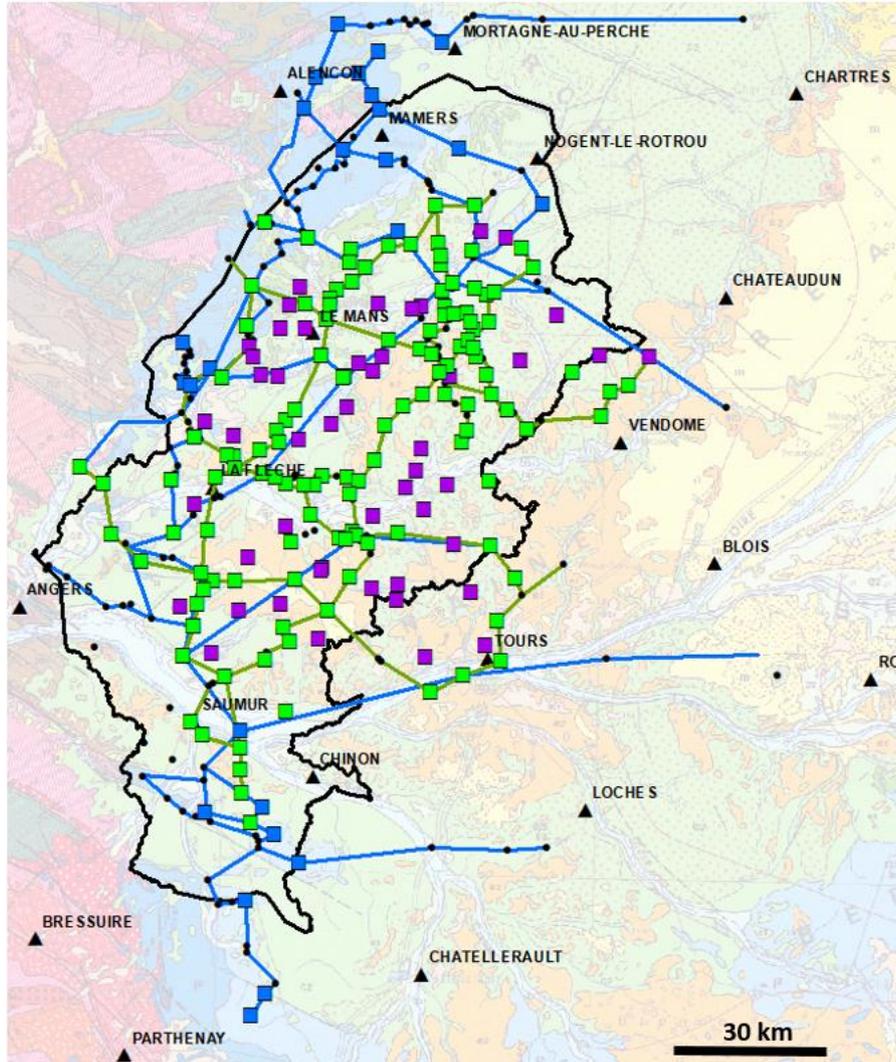


Figure 66: Localisation des Logs Validés révisés dans le cadre du projet MODGEAU. Carrés verts : LGV révisés précisément pour le Cénomaniens (limites de formation et lithologies) ; Carrés bleus : LGV révisés précisément pour le Jurassique (limites de formation et lithologies) ; Carrés violets : LGV dont seules les limites des formations ont été vérifiées (hors transects). Points noirs : forages corrélés en stratigraphie séquentielle (LGV non révisés).

4. Modélisation géologique 3D

4.1. METHODE DE MODELISATION :

Comme introduit dans le chapitre 3.4.3, un modèle en 3D des unités intra cénomaniennes a été réalisé à partir du logiciel GDM-Multilayer. Ce modèle a été construit à partir des données interprétées dans le cadre de ce projet.

4.1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ET DU PRINCIPE DE MODELISATION

GDM Multilayer© qui est un logiciel de modélisation et de gestion des données géologiques développé par le BRGM (<http://gdm.brgm.fr>).

Le logiciel GDM est particulièrement adapté à l'interpolation géostatistique d'un jeu de données conséquent et à la gestion de données géoscientifiques. MultiLayer qui en est une extension permet la construction semi-automatique de modèles multicouches. Celui-ci possède en effet de nombreux outils permettant la vérification et le contrôle de cohérence des données, ainsi que la prise en compte d'une pile stratigraphique avec gestion des relations entre formations géologiques (dépôt ou érosion / ONLAP ou EROD).

L'ordre chronologique constitue une information majeure dans le processus de construction du modèle. Outre cette succession, l'algorithme tient compte de l'existence de surface d'érosion entre les formations.

Par exemple, lorsqu'une érosion se produit entre le dépôt d'une formation B (plus récente) sur une formation A (plus ancienne), la base de la formation B est considérée comme surface d'érosion (EROD). Dans ce cas, l'interface entre A et B est interprétée comme le mur / la base de B. Par contre s'il n'y a pas eu d'érosion avant le dépôt de B sur A (ONLAP), l'interface entre A et B est considérée comme le toit de A (voir figure suivante).

Ainsi, dans le processus de modélisation, lorsqu'il s'agit d'une relation de dépôt ONLAP, ce sont les toits des formations géologiques qui sont modélisés. Dans le cas contraire, en relation EROD, les toits des unités géologiques définies dans la pile sont modélisés lorsqu'il s'agit de relation de dépôt (ONLAP).

La figure ci-dessous illustre les règles d'intersection des interfaces telles que gérées par les algorithmes de GDM MultiLayer.

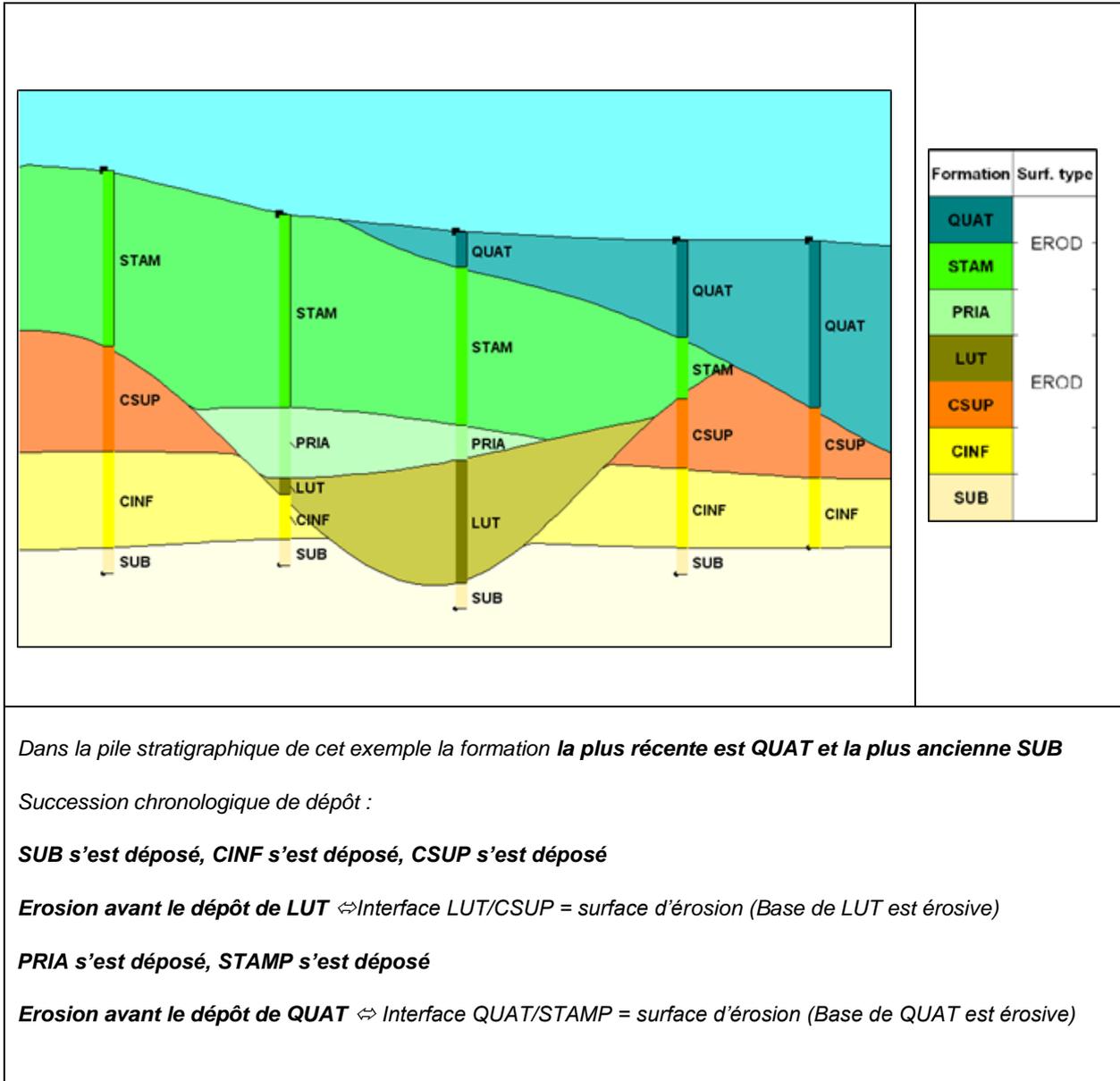


Figure 67 : Exemple de coupe verticale avec une pile stratigraphique

Outre la construction d'un modèle surface par surface, il est également possible d'imposer une ou plusieurs interfaces calculées préalablement comme surface de référence.

Dans le cas de la présente étude, la définition de la pile stratigraphique a reposé sur l'interprétation géologique reposant sur les concepts de la stratigraphie séquentielle tels que définis au chapitre 3.1.1. La pile est construite avec un appui fort important de géologues sensibles à la modélisation géologique.

Au regard du nombre de forages utilisés pour le modèle (215 au total) pour la zone d'étude de plus de 35 000 km², il faut noter que ce modèle géologique 3D tel que construit reste malgré tout peu contraint par de la donnée en profondeur.

Dans les chapitres suivants, le détail sur les données ayant servi au modèle sera effectué.

4.1.2. OBJECTIFS

L'objectif de cette étape de modélisation est de restituer la géométrie des surfaces des unités intra-cénomaniennes. Il permettra d'identifier le comportement spatial des couches aquitards et de déduire la répartition des aquifères sableux du Cénomaniens.

4.1.3. MNT ET MAILLAGE

Le MNT utilisé est à la résolution de 250m * 250m. Les dimensions de cette maille correspondent à celle utilisée pour le modèle géologique. Elles ont été définies en étroite liaison avec les hydrogéologues et géologues de l'équipe du projet.

4.1.4. DEFINITION DE LA PILE STRATIGRAPHIQUE

Les formations identifiées dans la zone d'étude et qui ont été modélisées sont

ALLU : Alluvions -> EROD

PstC : Post Cénomaniens (hors alluvions) -> EROD

CATO : Sables à Catopygus

OSTR : Marnes à Ostracée -> EROD

PERC : Sables du Perche

BOUF : Marnes de Nogent Bouffry et Craie de Théligny

MANS : Sables du Mans

NINF : Marnes de Nogent Inférieur et Craie de Théligny

TRUG : Sables de la Trugalle et de Lamnay

BALL : Marnes de Ballon, Craie Glauconieuse, Dépôts Barrémien à Albiens aquitards

SubC : Substratum du Cénomaniens (Jurassique + Substratum paléozoïque)

La pile stratigraphique n'intègre pas les ensembles sableux Sables du Perche - Sables du Mans indifférenciés constituant l'entité 102. Cela est aussi le cas pour l'ensemble Sables du Perche – Sables du Mans – Sables de la Trugalle regroupés sous le code 1023.

Les zones d'existence de ces amalgames de sables pourront toutefois être marquées dans le modèle géologique à l'aide des limites d'extension définies pour les intervalles argileux ou marneux s'intercalant entre les trois unités de sables citées ci-dessus.

PILE STRATIGRAPHIQUE MODELISEE Modèle intra cénozanien		
Formation	Type Surf.	Description
ALLU	EROD	Alluvions
PstC		Post CENO (except Alluv)
CATO	EROD	Sable_Catopygus_Cen8
OSTR	EROD	Marnes_Ostracées_Cen9
PERC		Sable_Perche_Cen10
BOUF		Marne_Bouffry_Nogsup_Cen11
MANS		Sable_Mans_Cen12
NINF		Marnes Nogent Inf Cen125
TRUG		Sables Trugalle_Cen13
BALL		Marnes_Ballon_Cen14
SubC		Sub CENO

Figure 68 : Pile stratigraphique

4.1.5. LES DONNEES D'ENTREE DU MODELE

Les Forages

Les forages utilisés pour le modèle géologique ont été interprétés sur la base des principes de la stratigraphie séquentielle. La base de données compte 215 forages. Les forages sont tous verticaux et atteignent une profondeur maximale de 973.44 mètres (03963X0003).

La phase de vérification puis de consolidation des données de sondages a nécessité un travail de mise en cohérence en coupe et en 3D des géométries observées dans les forages. Cette étape a été menée conjointement par le modélisateur et le géologue modélisateur. Elle nécessite beaucoup de temps et plusieurs allers-retours au niveau des outils de gestion de données.

La figure ci-dessous présente la localisation des sondages dans l'emprise du modèle.

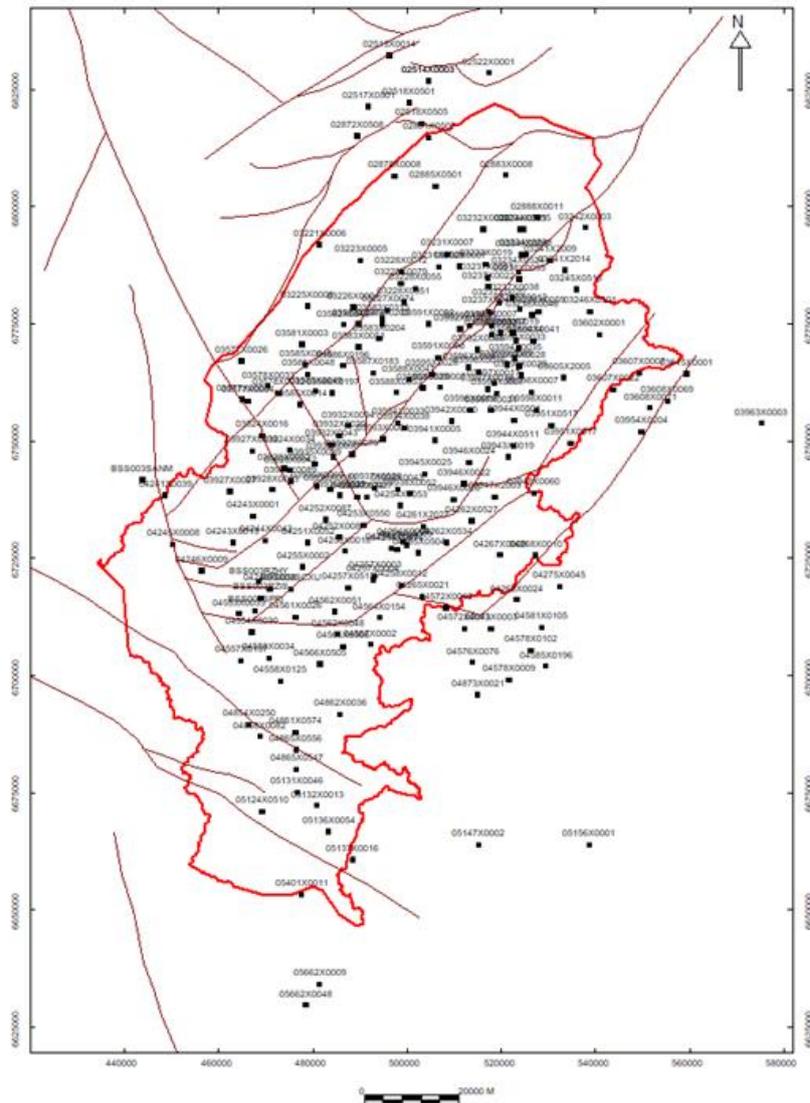


Figure 69: Carte de positionnement des forages

Afin de faciliter la prise en compte des variations latérales entre les zones dans lesquelles les niveaux sableux sont correctement distingués et les zones dans lesquelles ils sont indifférenciés, nous avons arbitrairement changé le codage des forages. En effet, par exemple lorsqu'un forage présente une passe / niveau de 9 mètres codé en 1023, nous avons remplacé le code 1023 par trois tranches d'équi-épaisseur de 3 mètres chacune de CEN10 (Sables du Perche), CEN12 (Sables du Mans) et CEN13 (Sables de la Trugalle).

Au vu du nombre de données de forages et de l'étendue de la zone, il est important de mentionner que les incertitudes sur les géométries en profondeur peuvent comporter des erreurs à la suite de l'interpolation. A la suite de plusieurs séries de contrôle, le géologue modélisateur, a fait usage de points de contrainte. Cette phase est particulièrement chronophage et délicate dans la phase de consolidation du modèle géologique 3D.

Cependant, la qualité du codage initial des données a été un avantage considérable pour la modélisation des surfaces.

La Carte Géologique

Le traitement de la carte géologique dans GDM MultiLayer permet d'intégrer les contours de la carte géologique harmonisée en tant que polygone et contact. Cependant la résolution de la carte géologique induit des différences entre les formations décrites dans les forages et celles cartées sur carte géologique.

La carte géologique a été recodée en fonction de la pile stratigraphique intra-cénomanienne. A chaque polygone de cette carte a été attribuée une formation de la pile stratigraphique, à l'exception des formations non affleurantes au droit de la zone d'étude (les Marnes de Nogent inférieur).

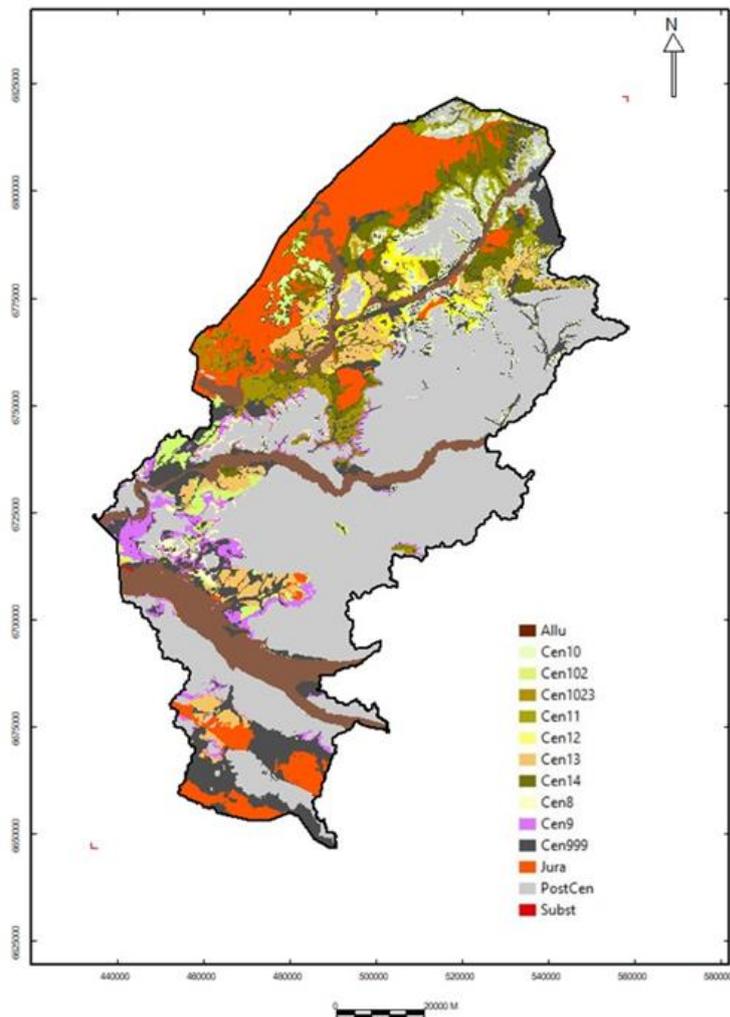


Figure 70 : Carte géologique GDM - avec Légende

Les contours des cartes géologiques sont discrétisés et utilisés pour contraindre les surfaces modélisées grâce aux points de contacts qui sont générés avec la topographie. Ces informations permettent de créer des points de passage pour :

- contraindre en Z les interfaces géologiques identifiées, en plus de l'information disponible ponctuellement au niveau des forages ;

- limiter dans l'espace l'extension des interfaces interpolées, en se basant sur les forages voisins et en garantissant la cohérence stratigraphique.

L'information cartographique représente ici plus de 7 500 points de contacts sur la carte géologique recodée.

Les polygones géologiques permettront de générer les contacts géologiques qui seront utilisés dans le modèle au même titre que les données de forage.

Les Failles

Le réseau de faille a été simplifié dans le cadre de la modélisation. Les failles constituent des écrans verticaux lors de l'interpolation des interfaces entre formations. Leur rôle primaire est de permettre d'isoler géographiquement les données du voisinage pour les mailles qui ne se trouveraient pas du même côté de faille.

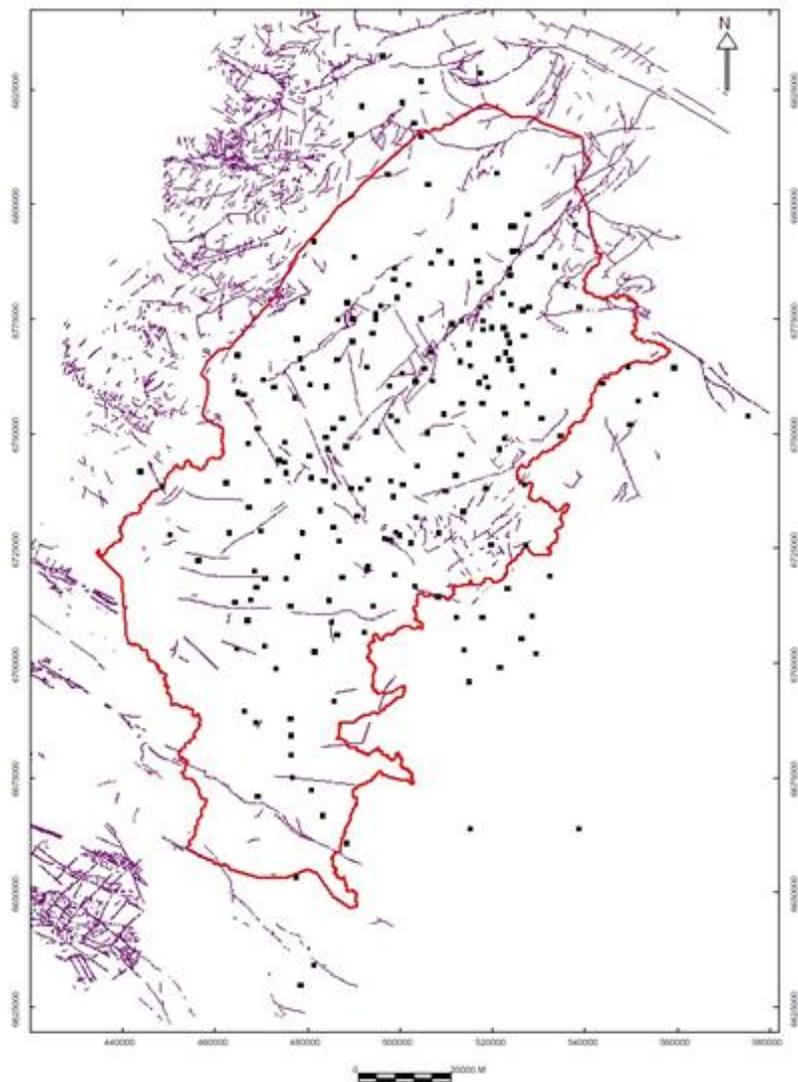


Figure 71 : Carte de positionnement des forages avec réseau failles Carte Géol 50K

Le schéma simplifié réalisé dans l'étude a été utilisé, néanmoins localement les données de forage sont insuffisantes pour contraindre les rejets de l'ensemble de failles du schéma synthétique. Il a été décidé de ne garder que les failles principales entourées de forage (Figure 72).

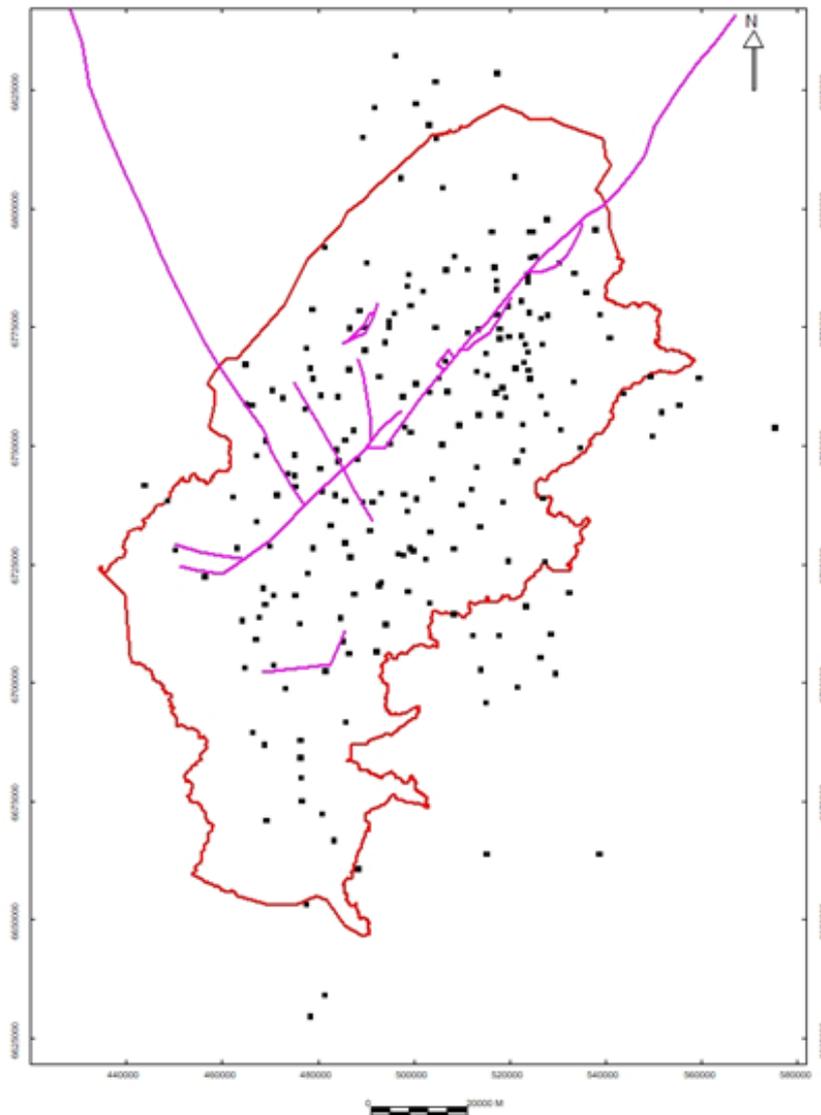


Figure 72 : Carte de positionnement des forages avec réseau failles simplifié utilisé pour le modèle

4.1.6. PRINCIPE DE MODELISATION

La construction du modèle a été effectuée en calculant une par une les interfaces des unités géologiques de façon indépendante puis ces surfaces ont été imposées comme surface de référence.

GDM Multilayer utilise un programme permettant d'interpréter les forages selon les relations définies dans la pile stratigraphique. Il s'agit du codage des données. Le programme détermine

si au droit d'un point ou d'un forage on connaît le toit ou le mur "vrais /exact" des formations, voire leur épaisseur "vraie/exacte".

Il détermine aussi les cotes altimétriques minimales et maximales des unités géologiques selon que les forages ont démarré dans une formation donnée ou se sont arrêtés avant d'en avoir intersecté le mur.

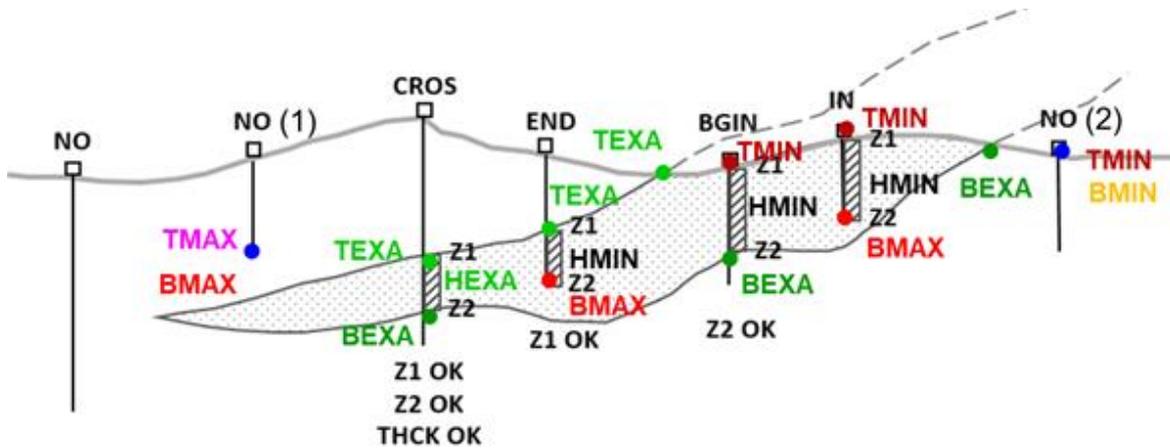


Figure 73 : Schéma conceptuel expliquant le codage des données de sondages dans GDM Multilayer

L'interpolation n'est réalisée qu'à partir des données exactes des interfaces.

L'interpolation se fait par krigeage ordinaire dans GDM. Le krigeage ordinaire est un interpolateur de la géostatistique qui assure une estimation respectant les données, tenant compte de la distance entre les données et les points de calcul (nœuds de grille, points, etc.) tout en minimisant la variance ou erreur d'estimation. Il s'agit d'un interpolateur linéaire. Toutes les surfaces ont été interpolées par krigeage ordinaire.

En amont de l'interpolation le variogramme expérimental de toutes les surfaces a été calculé. Le variogramme est un outil expérimental qui permet de savoir si une variable, qui dans le cas présent est la cote altimétrique des interfaces des unités, est corrélée spatialement.

L'illustration ci-dessous présente le variogramme expérimental du toit des marnes de Ballon ainsi que le variogramme modèle (en rouge) qui a été utilisé pour le krigeage.

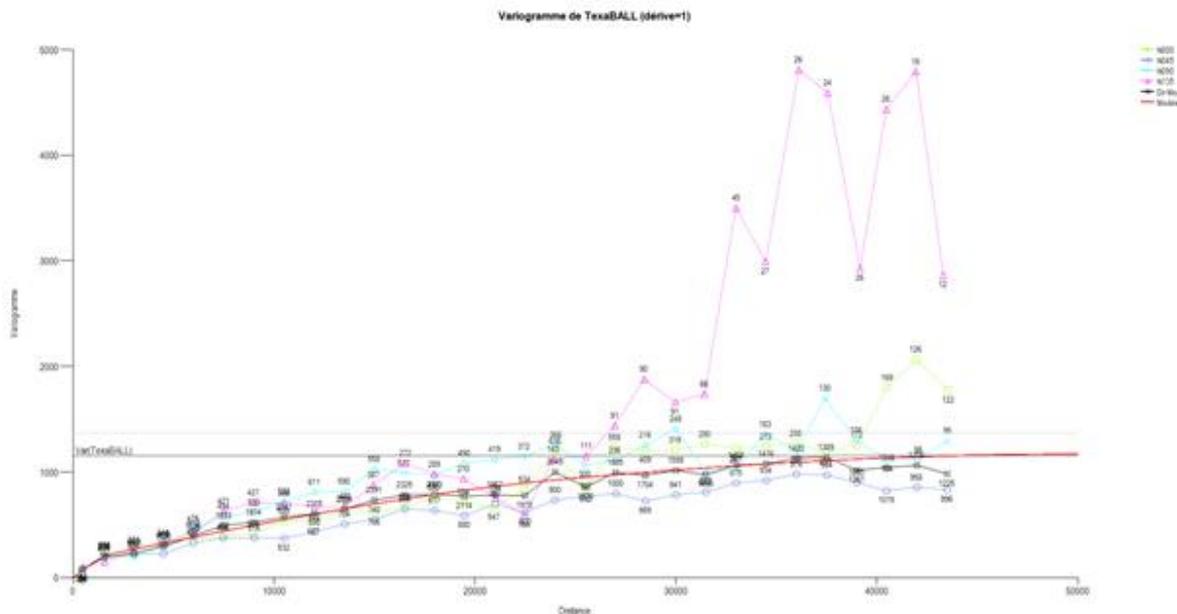


Figure 74 : Variogramme expérimental et modèle du toit des Marnes de BALLON

Une fois les interfaces krigées, les surfaces sont combinées selon les règles de dépôt et d'érosion. L'illustration ci-dessous illustre conceptuellement la combinaison des surfaces. Dans cet exemple, les surfaces **Topo**, **B_C** et **B_B1** sont des surfaces d'érosion et les autres des surfaces de dépôt.

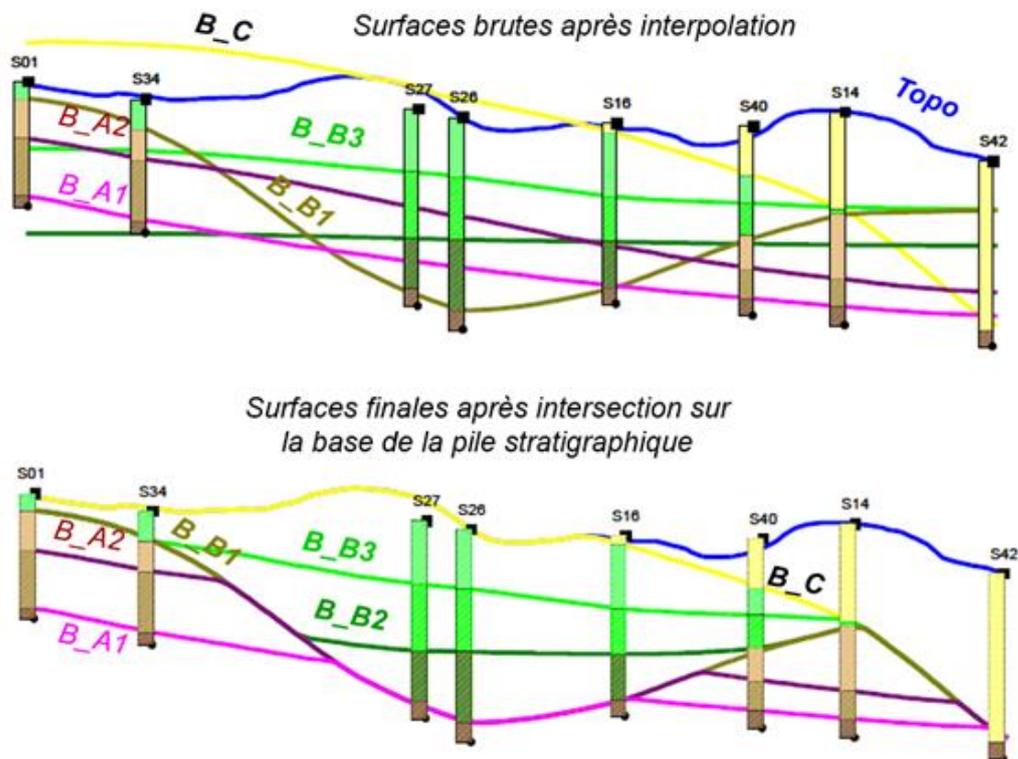


Figure 75 : Schéma de combinaison de surfaces modélisées indépendamment

4.2. RESULTATS : COUPES ET CARTE ISOPROFONDEUR DES DIFFERENTS HORIZONS MODELISES.

L'ensemble des surfaces de la pile stratigraphique ont été modélisées, les résultats sont présentés ici sous forme de coupes et de cartes d'épaisseur, des grilles ascii (format txt), correspondant à la profondeur des différentes interfaces et aux épaisseurs des différents horizons sont envoyés avec le rapport.

4.2.1. COUPES TIREES DU MODELE.

Plusieurs coupes sont présentées dans l'axe des deltas (SW –NE) ainsi que selon une direction NW –SE sécante aux deltas et par rapport à la faille d'Ecommoy :

Coupe 1 (Figure 76) :

La coupe 1 d'orientation SW-NE montre les principales géométries sédimentaires. Un bloc jouant en horst, affecte la partie SW sur lequel les dépôts cénomaniens se pincent (vers le Sud). Ce bloc modélisé ici via une seule faille au Sud a joué au cours du tertiaire en remontant le *horst* pour faire apparaître les dépôts jurassiques à l'affleurement. Du Nord au Sud, on observe les géométries suivantes :

- L'ensemble CEN14 (Marnes de Ballon et Craie glauconieuse et albien, très développées au Nord, se pincent progressivement vers le Sud-Ouest, correspondant à l'*onlap* de l'Albien et du Cénomaniens inférieur.
- Les Sables et Grès de la Trugalle et de Lamnay (CEN 13) sont développés sur une grande zone et se pincent progressivement vers le Sud-Ouest, en s'amalgamant avec les sables du Mans et les Sables du Perche. L'épaisseur de CEN 13 et CEN 14 est peu contrainte par les données de forages dans cette zone, car peu atteinte par ceux-ci, plusieurs points de contraintes ont été rajoutés pour éviter des pincements non maîtrisés.
- Les Marnes de Nogent inférieures sont très peu épaisses sur l'ensemble de la zone, mais présentes sur presque l'entièreté de la coupe ; au Nord-Est, la proximité des affleurements pour lesquels les Marnes de Nogent inférieures ne sont pas différenciées crée des pincements locaux qui ont partiellement été corrigés par l'ajout de points de contraintes. Dans l'extrémité NW, les sables du Mans n'existant plus, Marnes de Nogent inférieures (CEN 125) et Marnes de Bouffry sont indifférenciées (CEN 11), et correspondent dans cette zone à un ensemble indifférencié comprenant lesdites formations marneuses, ainsi que la Craie de Théligny.
- Les Sables du Mans (CEN 12), sont présents sur une grande partie de la zone, et disparaissent dans l'extrémité Nord Est en passant latéralement aux marnes (Bouffry et Nogent inférieurs).
- Les Marnes de Bouffry (CEN11), bien développées dans la partie Nord Est se pincent vers le Sud-Ouest. Il est important de rappeler que là où les Marnes de Bouffry n'existent plus, Sables du Mans et Sables du Perche, sont indifférenciés en forage comme à l'affleurement. Pour simplifier la modélisation des épaisseurs moyennes ont été définies, cependant seule la base et le sommet de l'ensemble sableux constitué par ces deux formations amalgamées doivent être considérées comme des informations exactes.
- Les Sables du Perche sont présents sur l'ensemble de la couche, et s'épaississent vers le NE.
- Les Marnes à Ostracées (CEN 9) sont elles aussi présentes sur l'ensemble de la coupe, elles se pincent progressivement vers le NE, et sont érodées localement dans les vallées.

Coupe 6 (Figure 77) :

Cette coupe est parallèle à la précédente, mais est située légèrement plus au Nord. Cette coupe n'est pas dans l'axe des deltas. En conséquence, le long de cette coupe, les épaisseurs de sables sont plus faibles, en particulier dans les Sables de la Trugalle :

- On observe le long de cette coupe un pincement du Nord au Sud de l'ensemble CEN 14 (Marnes de Ballon et Craie glauconieuse Albien argileux), et à l'inverse une réduction des épaisseurs des Sables de la Trugalle. Ceci montre le passage latéral entre les deux ensembles. Au Sud-Ouest les Sables de la Trugalle présentent une épaisseur importante, en partie liée à des vallées incisées identifiées dans les corrélations diagraphiques (§3.3).
- Les Marnes de Nogent inférieures sont particulièrement développées dans la partie Sud-Ouest, principalement dans un faciès de lagune.
- Comme sur la coupe 6, les Sables du Mans se pincent vers le Nord Est pour passer à l'ensemble Marnes de Nogent inférieur, Marnes de Bouffry qui sont constituées en partie de la craie de Théligny.
- L'ensemble CEN 11 qui contient les Marnes de Bouffry et la Craie de Théligny se pince progressivement vers le Sud-Ouest.
- Les Sables du Perche sont présents sur toute la zone et se développent au Nord Est. L'ensemble Sables du Mans et Sables du Perche amalgamés se pincent en direction du Sud-Ouest.
- Les Marnes à Ostracées sont présentes dans toute la zone, uniquement érodées localement dans des vallées, elles sont particulièrement épaisses au Sud-Ouest au dépend des sables sous-jacents.
- Les Sables à Catopygus sont présents uniquement au Sud-Ouest.
- L'ensemble Post Ceno (Craie et Tertiaire) reposent sur l'ensemble des dépôts dans la zone.

Coupe 7 (Figure 78) :

La coupe 7 orientée NE-SW est positionnée plus au nord et traverse la faille d'Ecommoy. Elle montre l'abaissement du compartiment NW de la faille,

Les Sables de La Trugalle et les Sables du Perche sont bien développés dans la partie Nord Est, dans la partie SW, l'érosion affecte largement la pile cénomaniennne, dans laquelle les Sables de la Trugalle, sont peu épais, les Marnes de Bouffry assez développées et les Sables du Perche principalement présents dans des buttes locales.

Coupe 4 (Figure 79) :

La coupe 4 située au Nord Est selon une direction NW-SE, montrant les variations d'épaisseur dans les différents deltas identifiés. La partie Nord du fait du rejeu du faisceau d'Ecommoy, et du soulèvement de cette partie septentrionale montrent de très faibles épaisseurs de dépôts cénomaniens préservés.

- Au sud du faisceau d'Ecommoy les épaisseurs majeures des Sables de la Trugalle sont identifiées dans la partie centrale et diminuent vers le Sud-Ouest.
- Les Marnes de Nogent inférieurs transgressives s'intercalent localement et sont plus développées dans la partie Sud-Ouest attestant de profondeurs plus importantes dans cette zone.

- L'ensemble Sables du Mans-Marnes de Bouffry-Sables du Perche est relativement constant dans cette zone avec localement des intercalations de faibles épaisseurs de Marnes de Bouffry.
- Les Marnes à Ostracées sont d'épaisseur relativement constantes sur la coupe.

Coupe 5 (Figure 80) :

La coupe 5 d'orientation NW-SE située dans la partie Sud-Ouest de la zone montre les géométries suivantes :

La coupe passe par des pointements de Jurassique, limités par des failles qui ont rejoué au cours du Tertiaire et perturbent la géométrie cénomaniennne.

- Dans l'essentiel de cette coupe les ensembles sableux des Sables de la Trugalle, Sables du Mans et Sables du Perche sont entièrement amalgamés, rappelons que dans ce cas, l'individualisation des corps sableux est relativement artificielle et que seule l'information de la base et du sommet de l'intervalle sableux (1023 en carte) doit être considérée.
- Dans la partie Nord-Ouest, les ensembles sableux tous amalgamés sont peu épais, recouverts par les Marnes à Ostracées qui sont largement développés sur toute cette coupe.
- Les Sables à *Catopygus* sont présents dans la moitié Nord-Ouest de la coupe et se pincent vers le Sud-Est.

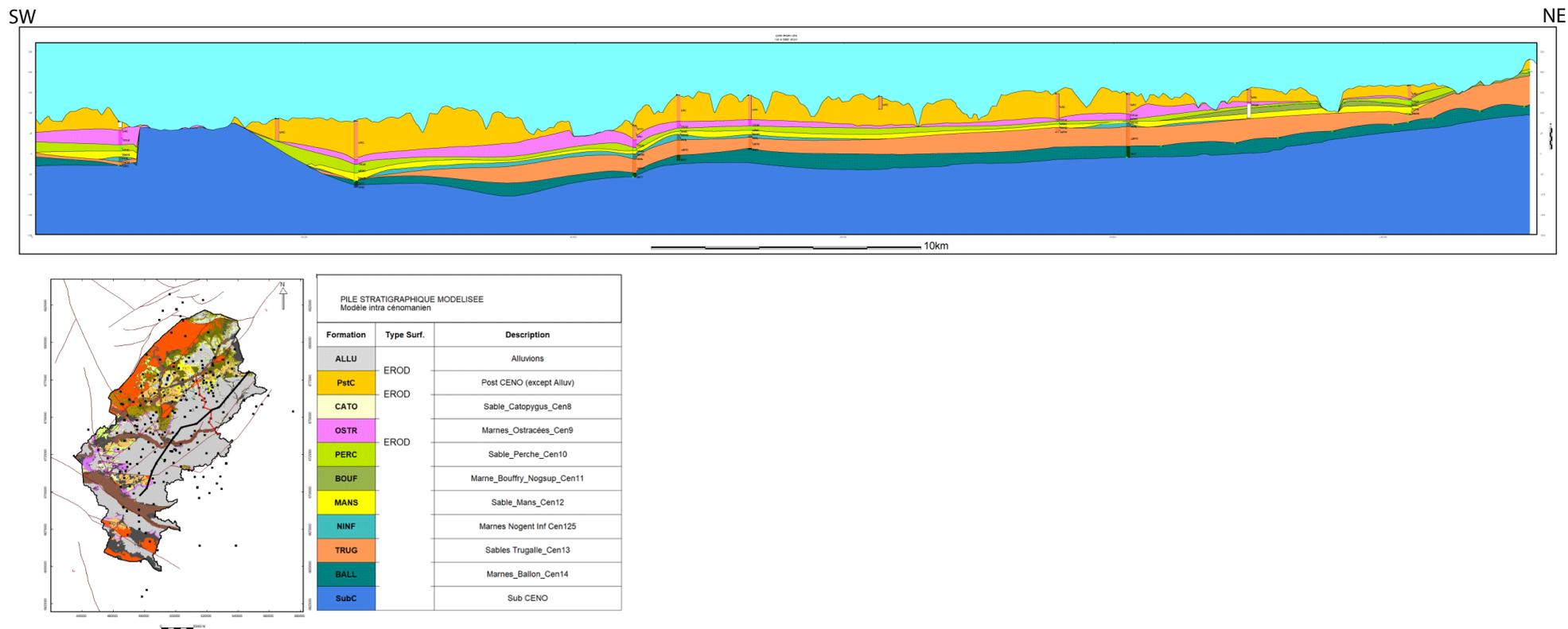


Figure 76 : Coupe 1

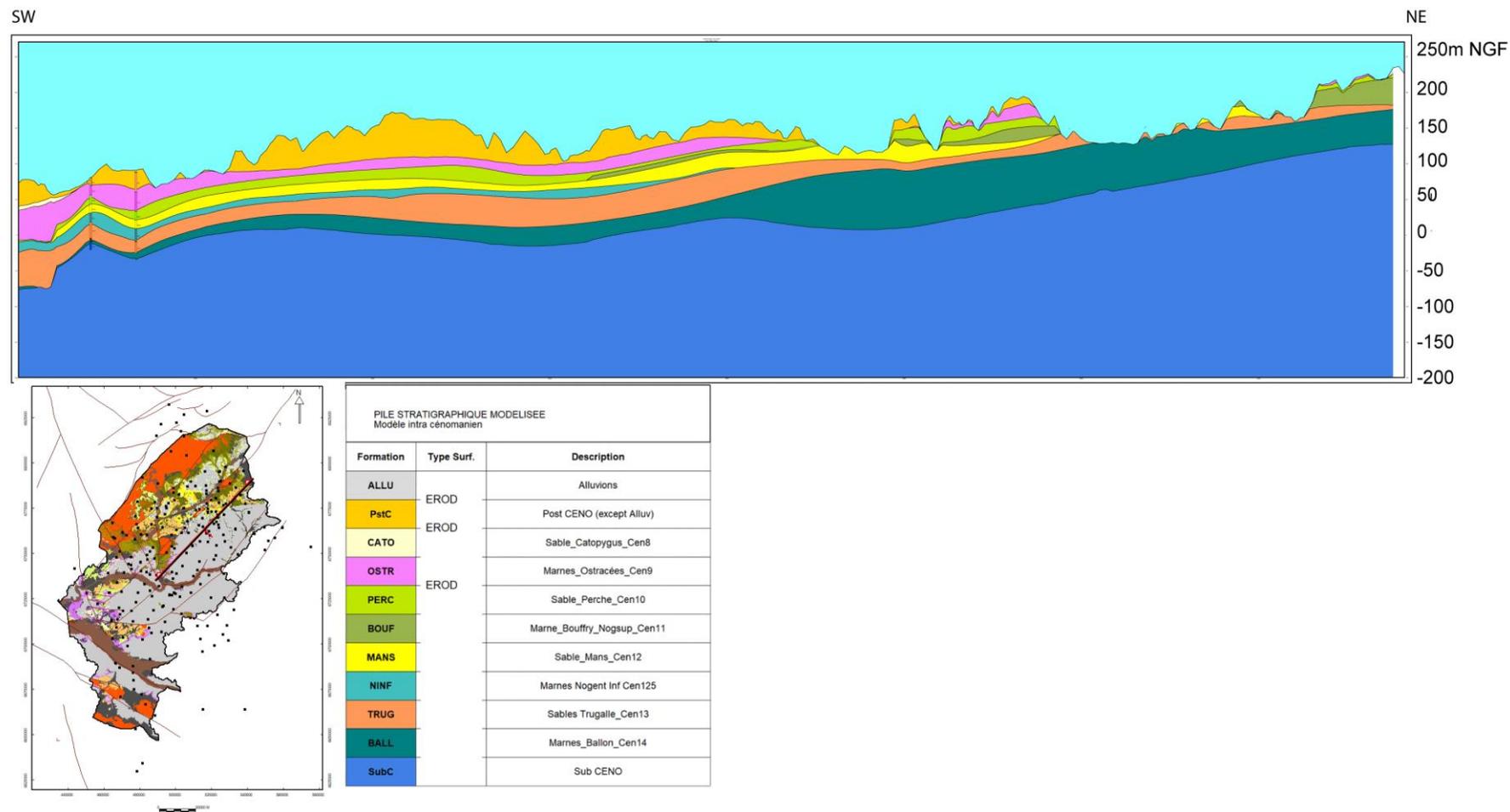


Figure 77 : Coupe 6

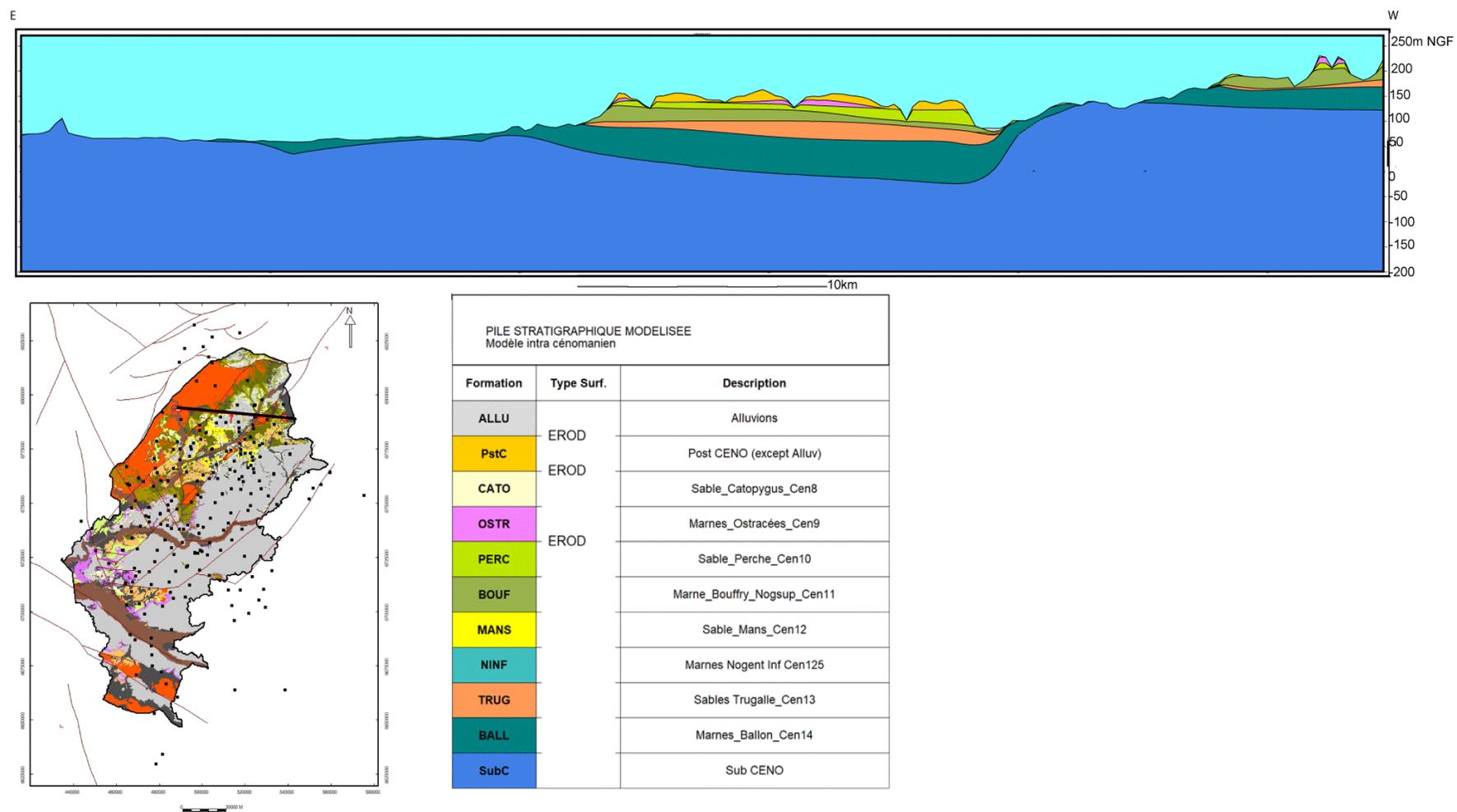


Figure 78 : Coupe 7

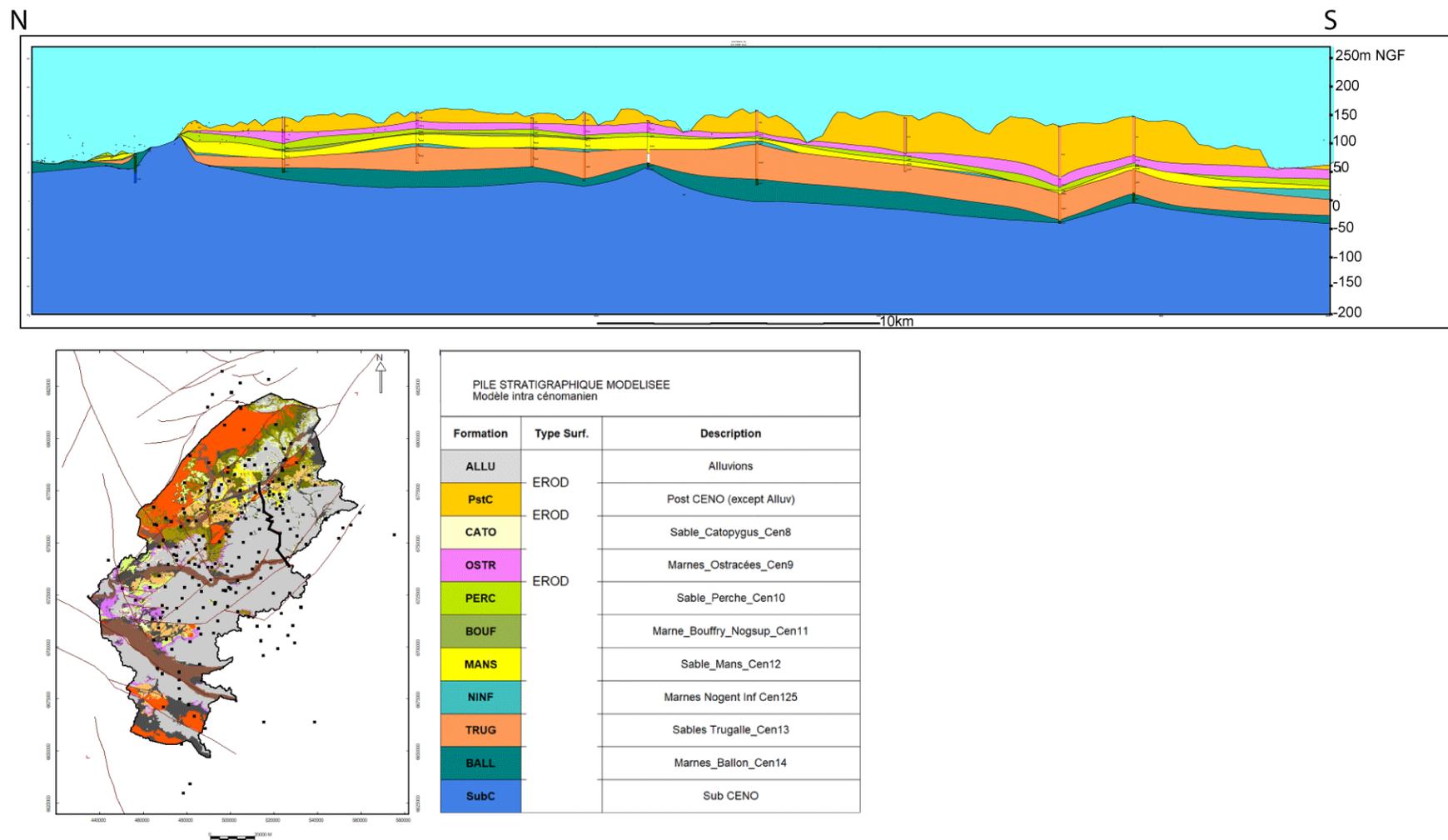


Figure 79 : Coupe 4

4.2.2. CARTES ISOPAQUES TIREES DU MODELE.

La modélisation a permis d'effectuer des cartes d'iso-profondeurs et iso-épaisseurs qui sont envoyées avec le présent rapport. Nous présentons ici les cartes d'iso-épaisseurs (isopaques) des différents horizons cénomaniens du haut vers le bas de la pile stratigraphique.

Isopaques des Sables à Catopygus (Figure 81) .

Les Sables à Catopygus forment le dernier épisode sableux avant le dépôt de la Craie. Ils sont restreints à l'ouest de la zone d'étude et présentent des épaisseurs faibles.

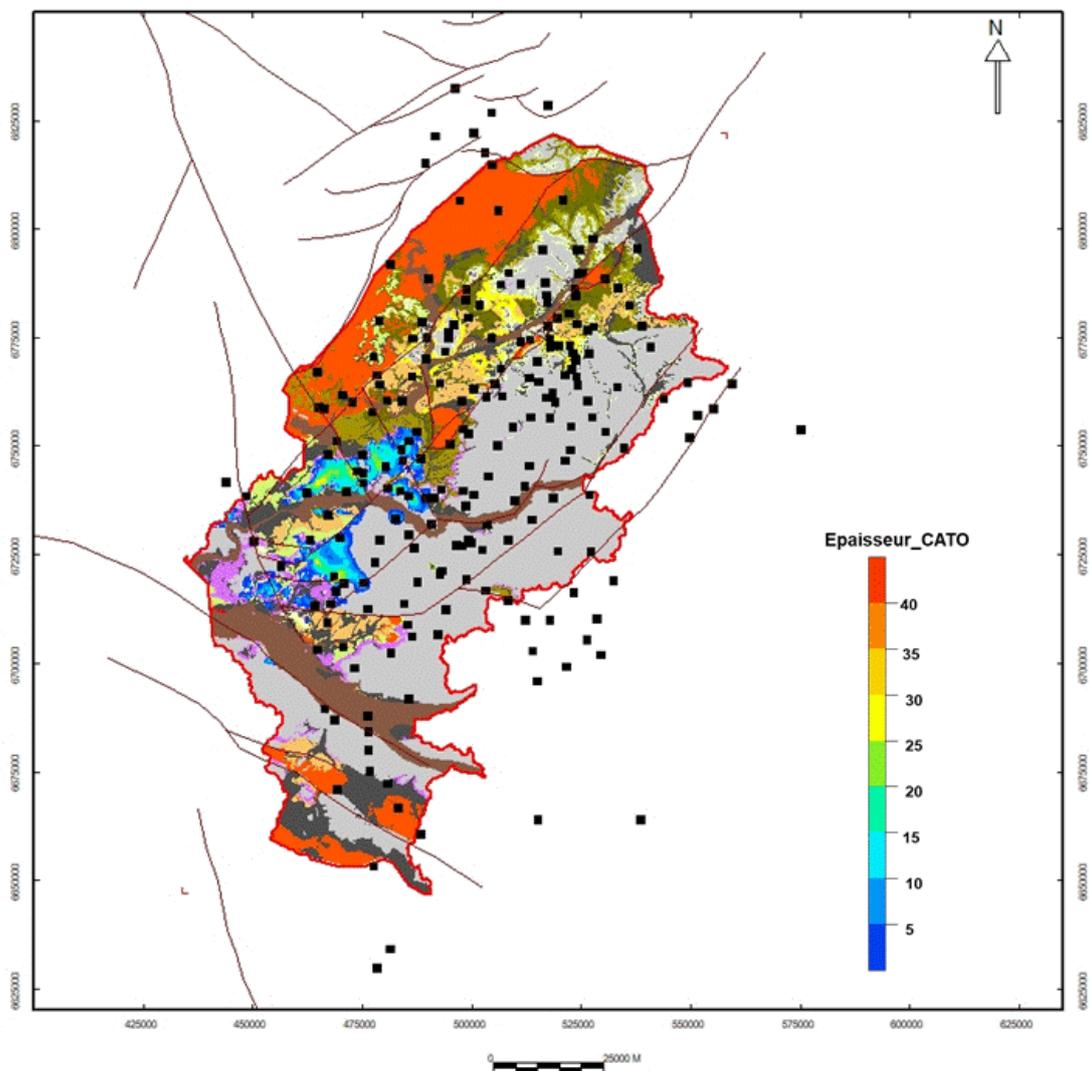


Figure 81 : Carte isopaques des Sables à Catopygus (CEN8), figuré sur le fond de carte géologique, en jaune l'extension des Sables à Catopygus.

Cartes isopaques des Marnes à Ostracées (CEN9) (Figure 82).

Les Marnes à Ostracées présentent des épaisseurs relativement constantes sur l'ensemble de la zone. Elles sont érodées localement en particulier au niveau des failles ayant joué au cours du Tertiaire. Un épaissement vers le sud est observé dans la partie médiane de la zone modélisée.

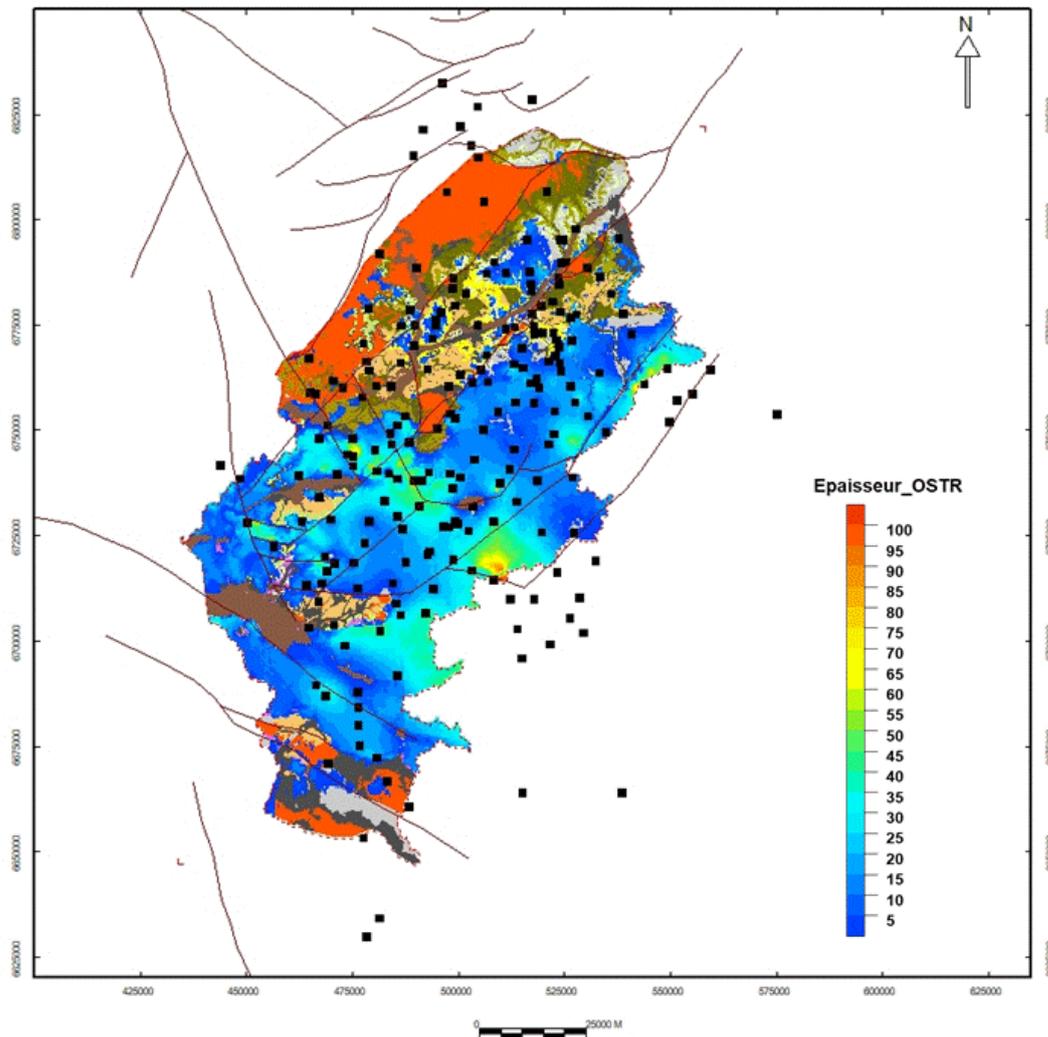


Figure 82 : Carte d'isopaques des Marnes à Ostracées (CEN9), projetées sur la carte géologique.

Carte d'isopaques des Sables du Perche, CEN10, (Figure 83).

Les Sables du Perche sont largement érodés dans les vallées au Nord-Est de la zone mais peuvent y présenter des épaisseurs importantes, les épaisseurs sont assez importantes dans la partie Ouest où ils sont transgressifs et amalgamés avec les Sables du Mans.

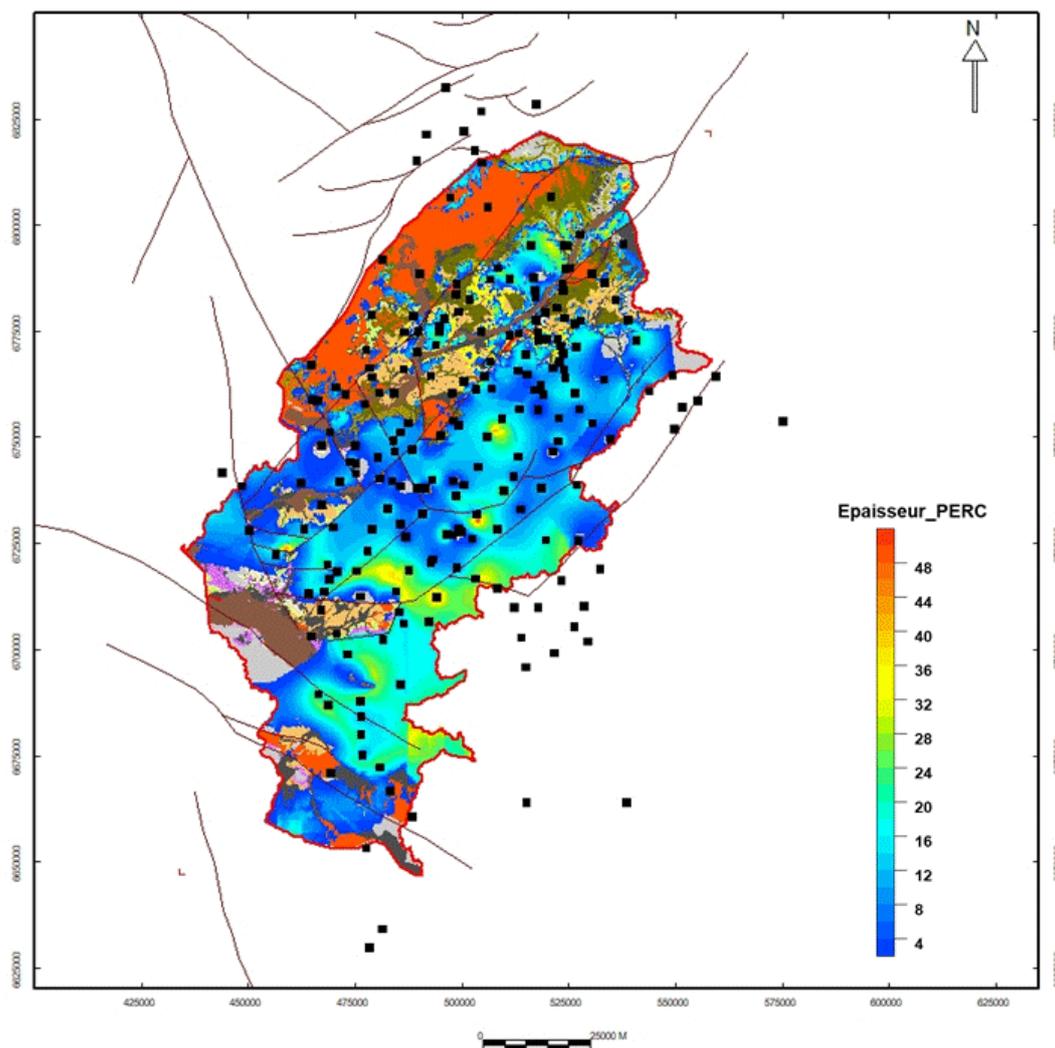


Figure 83 : Carte d'isopaques des Sables du Perche (CEN10), projeté sur la carte géologique harmonisée.

Carte d'isopaques des Marnes de Bouffry (Figure 84 : Carte d'isopaques des Marnes de Bouffry (CEN11) projetée sur la carte géologique.)

Les Marnes de Bouffry, intercalées entre les Sables du Mans et les Sables du Perche ne sont développées que dans la partie Est et Nord Est de la zone, elles se pincent progressivement vers le Sud-Ouest. Dans la partie Nord Est, les fortes épaisseurs séparent les différents aquifères sableux.

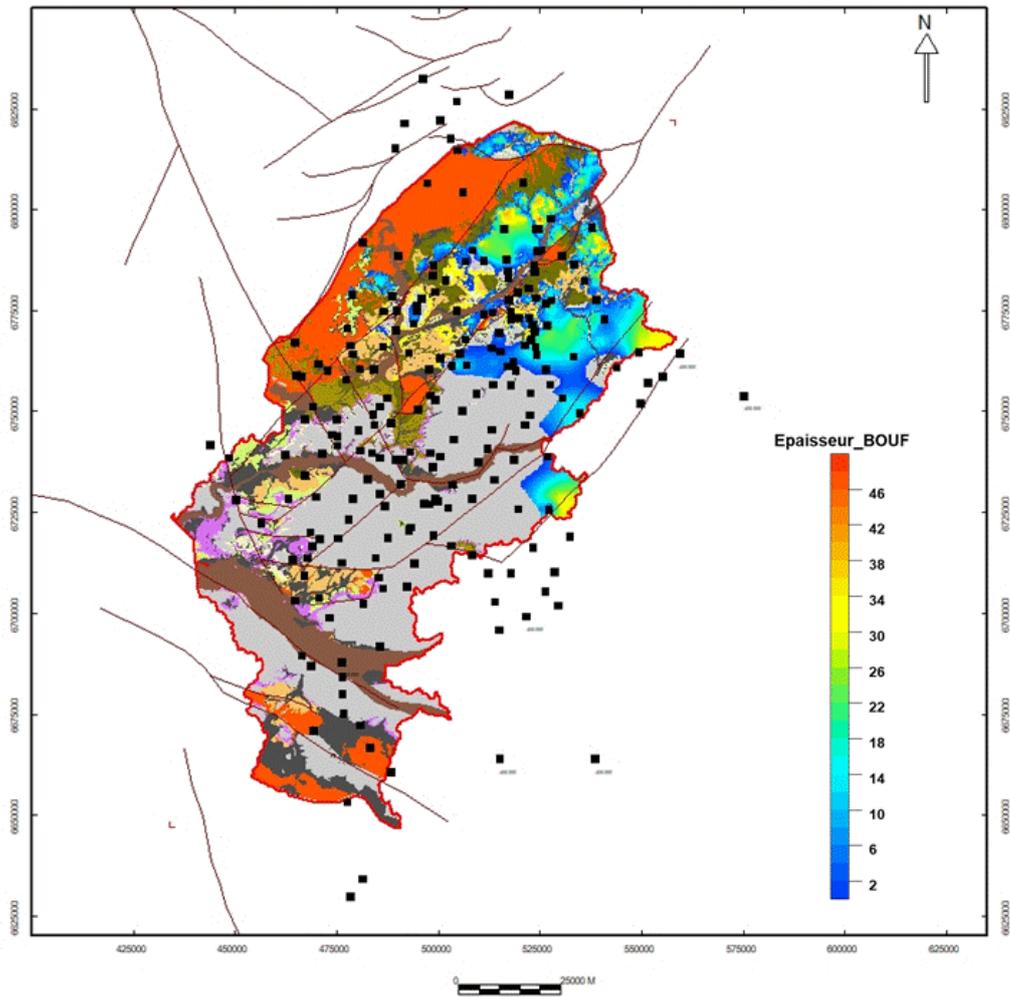


Figure 84 : Carte d'isopaques des Marnes de Bouffry (CEN11) projetée sur la carte géologique.

Cartes Isopaques des Sables du Mans, CEN12, Figure 85 : Carte d'isopaques des Sables du Mans (CEN12) projetée sur la carte géologique. .

Les Sables du Mans sont présents et développés principalement dans la partie Ouest. Nous rappelons que là où les Marnes de Bouffry sont absentes Sables du Mans et Sables du Perche sont confondus, et ne forme qu'un seul ensemble sableux. Pour estimer les épaisseurs de l'aquifère sableux, il est alors nécessaire de prendre en compte les deux cartes d'épaisseur.

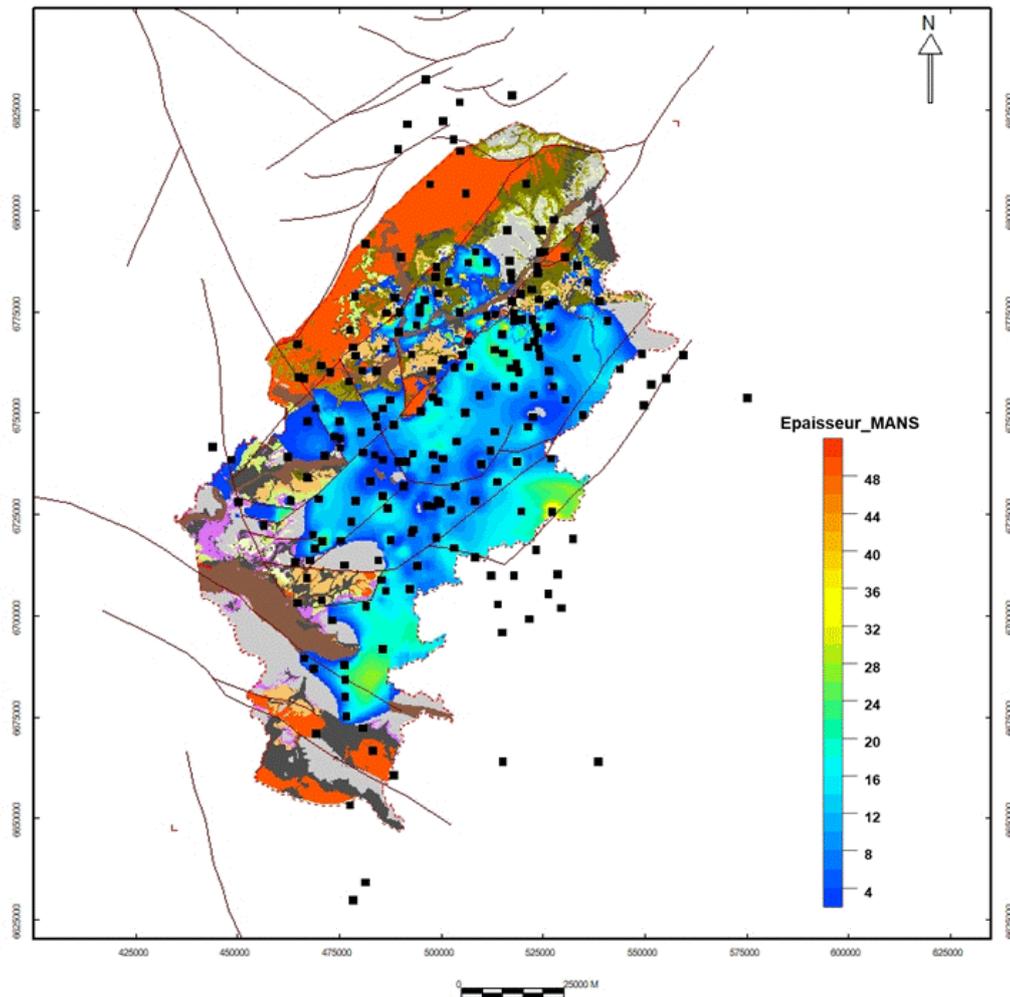


Figure 85 : Carte d'isopaques des Sables du Mans (CEN12) projetée sur la carte géologique.

Cartes d'isopaques des Marnes de Nogent inférieures CEN125 (Figure 86).

Les Marnes de Nogent inférieures sont principalement développées dans la partie centrale du modèle où elles séparent les Sables de la Trugalle des Sables du Mans. Elles se pincent progressivement vers le Sud-Ouest. Dans la partie Nord Est, en l'absence de Sables du Mans les séparant des Marnes de Bouffry, elles sont dans le modèle regroupées avec ces dernières formant un seul ensemble marneux qui a ici été codé en Marnes de Bouffry.

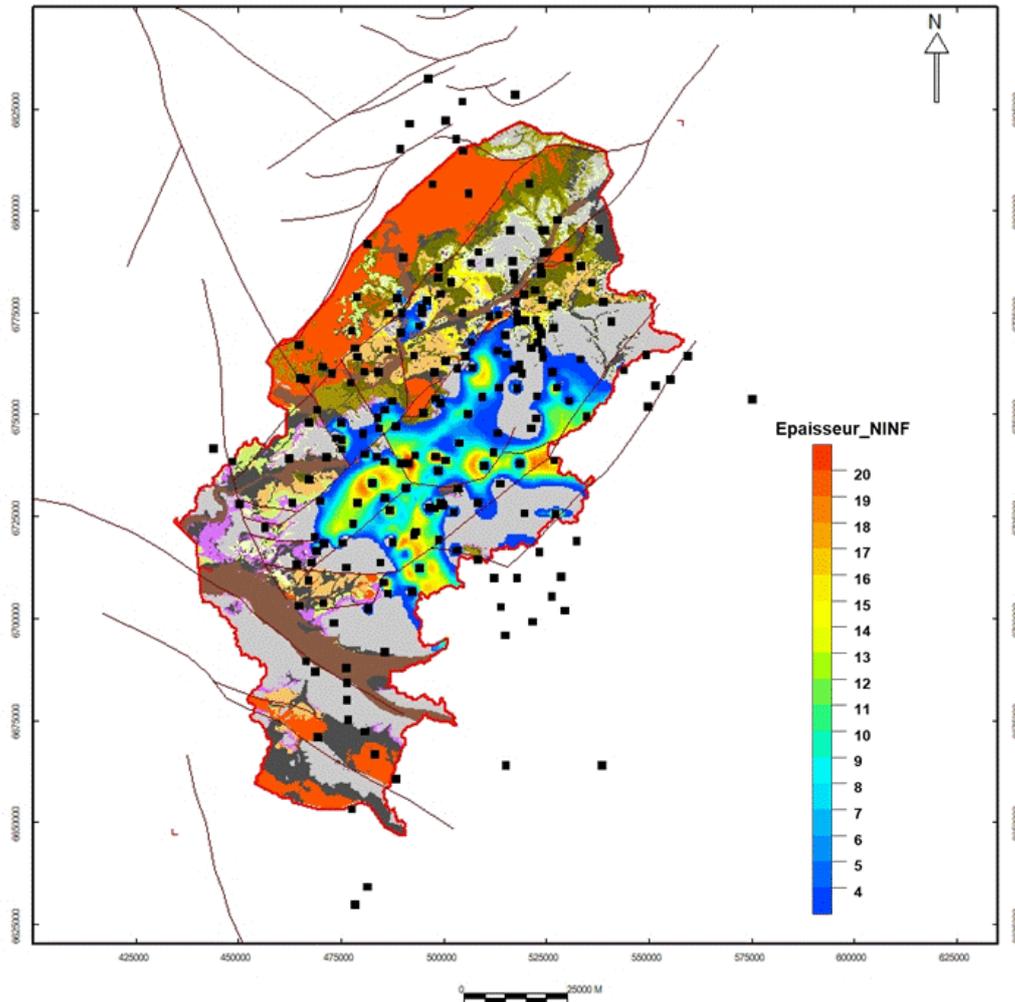


Figure 86 : Carte d'isopaques des Marnes de Nogent inférieures (CEN 125), projetée sur la carte géologique.

Carte d'isopaques des Sables de la Trugalle, CEN13 (Figure 87).

Les sables de La Trugalle plus profonds sont moins affectés par l'érosion récente que les aquifères sableux supérieurs. La carte d'isopaques montre nettement un épaissement vers la partie Est, les épaisseurs étant plus faibles à l'Ouest et au Sud-Ouest. Un contrôle structural sur les épaisseurs est également bien visible, particulièrement à l'Ouest, les Sables de la Trugalle faisant partie des premiers dépôts venant au-dessus des niveaux déformés pendant le Crétacé inférieur.

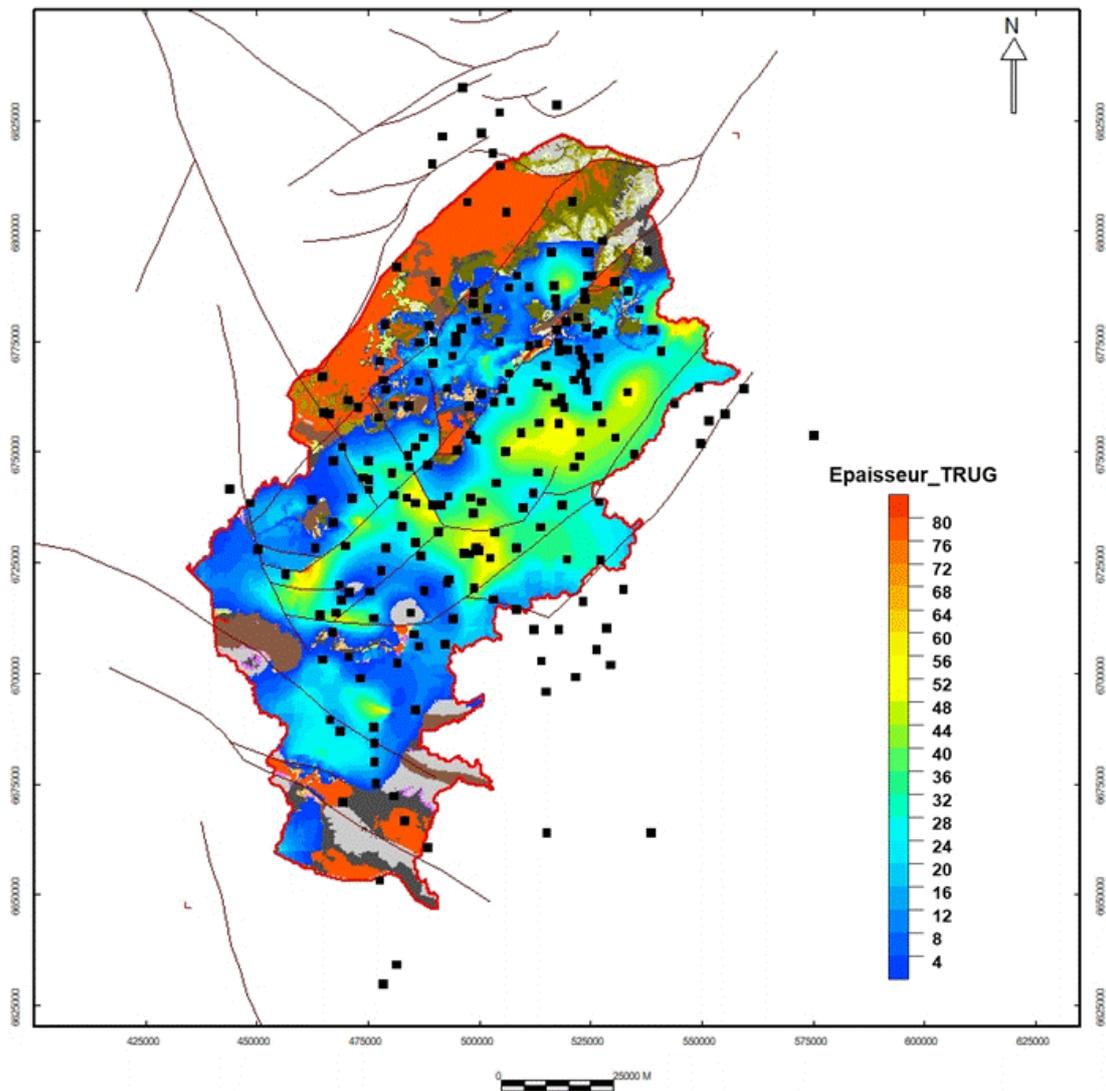


Figure 87 : Carte d'isopaques des Sables de la Tugalle et de Lamnay (CEN13), projetée sur la carte géologique.

Carte d'isopaques de l'intervalle CEN14, dépôt barrémo- albiens, Marnes de Ballon, Craie glauconieuse.

Cette carte montre les premiers dépôts au-dessus de la déformation du Crétacé inférieur. La transgression de l'Aptien au Cénomaniens se faisant d'Est en Ouest, les dépôts sont épais dans la partie Ouest et s'amincissent progressivement vers le Sud-Ouest, où ils se pincent.

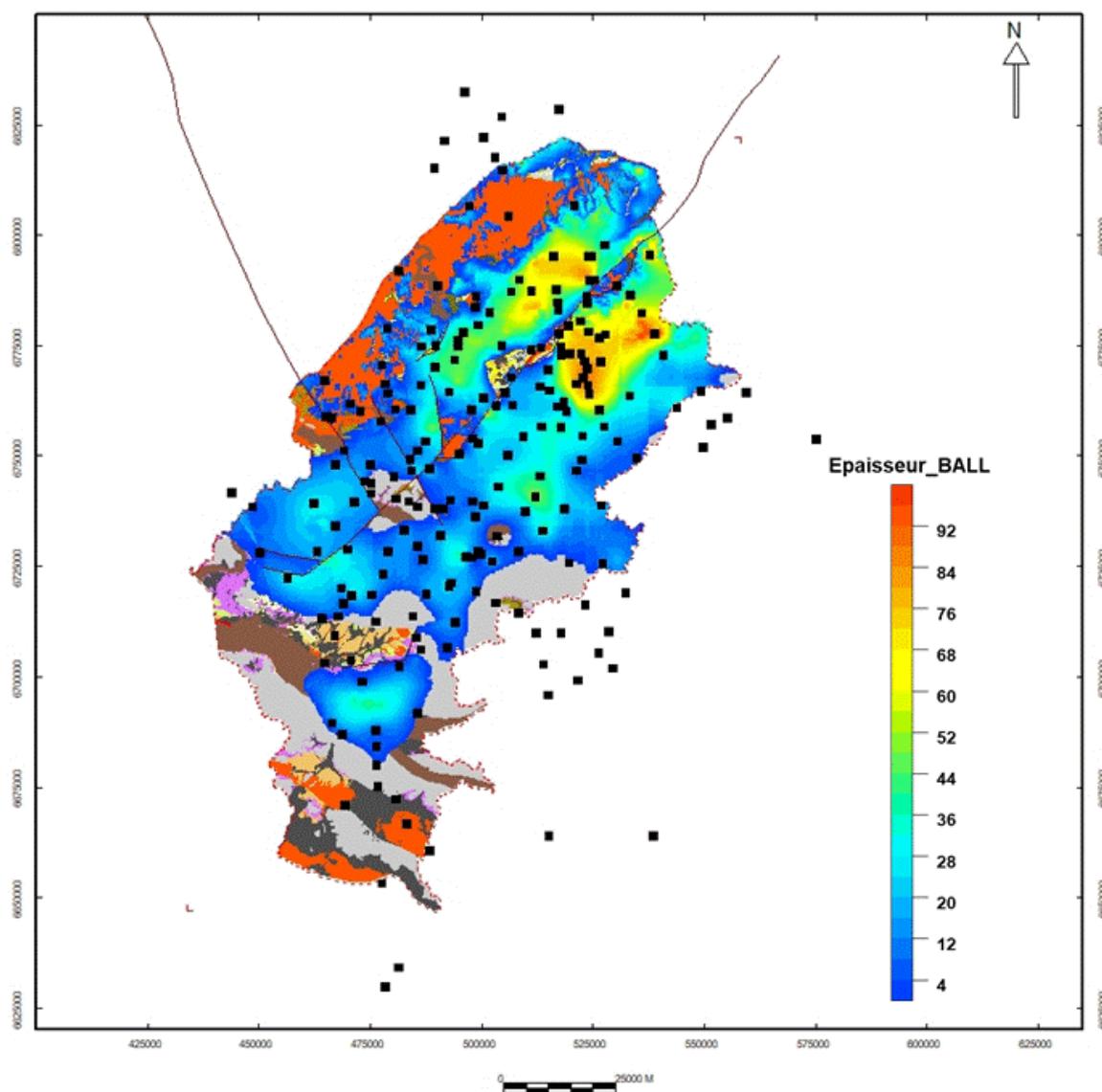


Figure 88 : Carte d'isopaques des Marnes de Ballon, Craie glauconieuse et dépôt barrémo albien (CEN14), projetée sur la carte géologique.

4.3. LIMITATIONS DU MODELE.

Les données utilisées pour le modèle et les choix de modélisation sont conformes à la proposition initiale et permettent une nette amélioration de la connaissance du sous-sol de la zone d'étude. Néanmoins plusieurs limites d'utilisation doivent être prises en compte dans l'utilisation de ce modèle.

4.3.1. CONTRADICTIONS ENTRE CARTE GEOLOGIQUE ET INFORMATION DE FORAGES.

Comme explicité précédemment, (§3.4.3), les ensembles argileux ne sont pas reconnus avec la même précision à partir des données de forage et de la carte géologique. De façon logique, les ensembles argileux présentant des épaisseurs inférieures à 10 m ne sont pas distingués cartographiquement alors qu'ils le sont en forage. C'est le cas principalement pour les Marnes de Nogent le Bernard inférieures et les Marnes de Bouffry, qui s'intercalent respectivement entre Sables de la Trugalle et Sables du Mans et entre Sables du Mans et Sables du Perche. Ceci induit des contradictions entre carte géologique et forages au niveau des vallées lorsque les marnes sont identifiées en forage mais non distinguées cartographiquement. Dans ces cas, le modèle fait artificiellement biseauter les couches de Marnes entre le forage et la vallée. De nombreux points de contrainte ont été ajoutés pour empêcher ces biseaux, cependant plusieurs géométries de ce type peuvent persister.

4.3.2. GEOMETRIES IMPRECISES PAR MANQUE DE CALAGE.

Malgré la forte densité de données de bonne qualité collectées, le choix d'utiliser principalement les puits diagraphiés fait que certaines zones présentent des densités de données quelque peu insuffisantes pour bien contraindre les géométries du modèle. Ceci est particulièrement le cas pour des objets les plus profonds tels que les Marnes de Ballon et la base des Sables de la Trugalle dans certaines zones (partie Ouest, Sud-Ouest du modèle en particulier). Lorsque les données manquent dans une région, l'interpolation peut se comporter de façon inattendue. Dans ce cas, les paramètres (portée et palier) du variogramme modèle ainsi que les composantes utilisées ont une influence importante sur le résultat de l'interpolation. Pour les progadations deltaïques et la base des niveaux de marnes qui s'intercalent entre elles, la connaissance géologique permet de leur attribuer une géométrie relativement plane. Les lentilles principales ont été lissées par des points de contraintes additionnels de sorte que les variations d'épaisseur soient progressives et non lenticulaires. Ce choix a pour conséquence de lisser les géométries. Concernant le toit du Jurassique qui est une géométrie résultant d'une érosion importante au Crétacé inférieur, affectée par des rejeux de failles avant le dépôt du Cénomaniens et incisée par des vallées, la géométrie est plus complexe. C'est en particulier le cas des vallées incisées probablement de faible largeur (de l'ordre du km et moins), les données de forage ne permettent pas à elles seules de contraindre leur tracé, si ces vallées constituaient un objectif des données géophysiques supplémentaires (résistivité, sismique) seraient nécessaires. Fautes de données suffisamment denses en profondeur, la géométrie du toit du Jurassique doit être considérée comme peu denses à distances des affleurements et particulièrement à proximité des failles majeures lorsque peu de forages existent pour contraindre le jeu de celles-ci.

4.3.3. FAILLES ET REJETS.

La modélisation des rejets des failles ne fournit pas toujours des géométries réalistes du fait des limites de données spatiales existantes et des possibilités de modélisations des géométries de failles dans GDM Multilayer. La cartographie des failles dans les cartes géologiques est peu homogène ; elle est très détaillée sur certaines cartes et est non hiérarchisée. Ceci a nécessité un travail spécifique à l'issue duquel un schéma des principales failles a été élaboré. Sur ce schéma synthétique qui ne prétend pas à restituer l'ensemble des failles mineures, certains jeux de faille sont peu contraints par les données de terrain et de forages. Dans ces cas, les failles n'ont pas été modélisées, il est probable que dans certaines zones sous documentées les rejets de faille soient sous contraints.

La complexité de certains réseaux de faille peut rendre leur restitution imprécise. Le faisceau de la faille d'Ecommoy correspond à un faisceau de failles décrochantes avec de nombreux compartiments en relai, créant des zones effondrées dans les zones extensives, et des zones surélevées dans les portions en compression. L'outil de modélisation et les données disponibles ne permettent pas de restituer toute la complexité de ces zones. Si ces zones présentent un intérêt en particulier pour exploiter les calcaires jurassiques qui sont probablement fracturés dans cette zone, la géométrie du faisceau de faille devra être abordée en complétant les connaissances actuelles par des données géophysiques, en particulier gravimétriques.

4.3.4. UTILISATION DU MODELE ET RECOMMANDATIONS

Conformément à la demande initiale, à partir du modèle réalisé, un log géo-hydrogéologique régional sera généré à chaque maille du modèle (500 x 500 mètres) mettant en relation les formations géologiques du modèle géologique avec les entités BDLISA associées" et incorporé dans le modèle du SIGES Centre, l'harmonisation effectuée entre les entités modélisées et les codes BDLISA, devrait rendre cette interface utilisable. Par contre, les nombreuses erreurs d'interprétation des forages relevées lors de la comparaison entre notre interprétation et les codages antérieurs nécessite une reprise des codages BDLISA de ces forages.

En outre des grilles au format (.ascii) en termes d'iso profondeur et d'épaisseur des horizons modélisés, sont fournies avec le présent rapport.

Le modèle actuel se base sur 215 forages corrélés et cohérents dans la zone d'étude, pour améliorer la résolution du modèle, les recommandations suivantes peuvent être faites :

Intégrer l'ensemble des forages disponibles en utilisant le corpus actuel comme référence :

Les données diagraphiques corrélées permettent de fournir un corpus de données fiables pour la modélisation, cependant le maillage de ces données précises est peu dense, de sorte que l'interpolation entre forages est localement peu fiable. Pour densifier ce maillage, l'intégration de logs validés non basés sur l'interprétation de diagraphies permettrait d'augmenter ce maillage. Ces données sont cependant peu fiables, et nécessitent d'être testées. Les interprétations de ces logs validés pourraient être testées en les comparant avec les puits du corpus utilisés dans notre étude. Des tests de cohérence 3D sont également permis par le modèle réalisé. En effet par tests géostatistiques, il est possible de tester la cohérence des logs validés existants avec le modèle réalisé pour les différentes entités géologiques du Cénomaniens.

Améliorer la géométrie des corps sédimentaires et de leurs propriétés.

Les interprétations en termes de faciès montrent des faciès différents à l'intérieur des différents corps sableux qui présentent des caractéristiques lithologiques et de porosité différentes et donc des propriétés réservoirs différentes. Une modélisation de faciès par exemple sous le logiciel Petrel© basée sur ces données permettrait de restituer ces variations et de mieux contraindre les variations des propriétés réservoirs des aquifères cénomaniens en les comparant aux données de pompage d'essai collectées dans le cadre du projet.

Réseau de failles

Comme signalé plus haut les restitutions des réseaux de failles pourraient être largement améliorées, si le besoin existe, en acquérant des données géophysiques supplémentaires en particulier géométrique et en réalisant des modélisations sous des logiciels permettant une restitution plus précise des failles de type Geomodeller©. Une caractérisation plus précise de la fracturation dans les calcaires jurassiques pourrait permettre de mieux contraindre les propriétés de ces aquifères.

5. Conclusions et Implications hydrogéologiques

Les travaux présentés ici permettent de réviser la connaissance des dépôts du Jurassique et du Cénomaniens et apportent de connaissances nouvelles sur leur géométrie en subsurface.

- Pour le Jurassique, l'étude confirme l'existence d'un aquifère bajo bathonien, recouvert par une rampe argileuse du Callovo Oxfordien puis par un aquifère oxfordien. Un grand nombre de séquences ont été corrélées et permettent de recomposer précisément l'évolution paléogéographique de la zone. Les travaux montrent en particulier l'existence de faciès profonds, aquitards et peu épais dans la région de Saumur, qui séparent les dépôts de plate-forme carbonatée, aquifère, présent au Nord et au Sud. Cette précision a pu être faite à proximité de la bordure du Massif Armoricain. Cependant, la rareté des forages atteignant le Jurassique dans la moitié Est du modèle, fait que ces horizons n'ont pu être modélisés. Des données supplémentaires seraient nécessaires si un modèle possédant cette extension spatiale devait être réalisé. Un travail sur la fracturation de ces niveaux carbonatés qui joue un rôle important sur les qualités réservoirs permettrait de mieux contraindre les variations des propriétés réservoirs de ces aquifères.
- Pour le Cénomaniens, l'étude géologique montre l'individualisation de 4 aquifères sableux séparés par des horizons argileux plus ou moins développés. Les géométries de l'ensemble de ces aquifères et en particulier celle des 3 aquifères principaux qui forment les Sables de la Trugalle, Sables du Mans et Sables du Perche ont été identifiées et modélisées. Elles forment un aquifère multicouche dans lequel les différents ensembles sableux sont amalgamés dans la partie Ouest, tandis que des intervalles argileux relativement épais sont intercalés plus à l'Est. Les géométries de ces ensembles ont été restituées au mieux à partir des données disponibles et permettent d'ores et déjà de disposer d'un outil prédictif sur la répartition des masses d'eau. Une densification de ce maillage en utilisant des logs supplémentaires incorporés de façon pertinente en utilisant des tests géostatistiques à partir du corpus de référence construit dans ce projet permettrait d'améliorer la restitution géométrique de ce modèle et de l'utiliser pour réaliser une modélisation hydrogéologique.

5.1. LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE MAILLEE

Sous-tendus par les équations de la physique des écoulements souterrains, les modèles maillés représentent l'approche de modélisation la plus complète pour rendre compte d'une réalité complexe. Lorsque les équations sont traitées de façon déterministe (sans intégration de variable aléatoire), les modèles correspondants sont aussi dits "déterministes". Pour tenter de rendre compte de la variabilité du milieu souterrain et des incertitudes associées, il existe aussi des approches stochastiques où les propriétés hydrogéologiques des différentes formations sont attribuées par tirage aléatoire (Seguin et Thiery, 2008).

Parmi les différents types de modèles hydrogéologiques, les modèles spatialisés (maillés) offrent la plus large gamme d'utilisation. Ils sont notamment incontournables pour la représentation des systèmes aquifères multicouches, systèmes complexes pouvant contenir plusieurs nappes libres

et captives, où chaque couche aquifère peut échanger de l'eau par drainance verticale avec les couches sus-jacentes et sous-jacentes (Barthélémy et Seguin, 2013). C'est typiquement le cas des aquifères sédimentaires de la Sarthe et du Maine-et-Loire, notamment parce que l'on suspecte de tels échanges dans certains secteurs entre le tuffeau crayeux séno-turonien et les sables cénomaniens inférieurs (Chrétien, 2014).

Une fois calé, le modèle hydrodynamique Sarthe/Maine-et-Loire pourra être utilisé pour simuler différents scénarios prévisionnels. Ceux-ci seront définis en fonction des objectifs assignés au départ à l'étude : prévision d'un état piézométrique résultant de nouvelles sollicitations de l'hydrosystème, recherche d'une configuration de pompage permettant de respecter un jeu de contraintes, détermination de « volumes exploitables », conséquences de scénarios dans un contexte de changement climatique, etc.

5.2. INTERET DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D POUR L'ELABORATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE MAILLE

Les approches géologique et hydrogéologique ne procèdent pas de la même logique, la première privilégiant la stratigraphie et les corrélations entre forages via des niveaux repères bien identifiables, la seconde cherchant à définir une alternance de séquences de perméabilités contrastées.

Les modèles destinés à simuler les écoulements souterrains dans les systèmes aquifères complexes, notamment multicouches comme c'est le cas pour la marge occidentale du bassin de Paris, se heurtent en général à une première difficulté, celle de disposer d'une structure géométrique cohérente, représentative de l'empilement des formations géologiques, plus ou moins perméables et d'extension variable, affectées d'accidents structuraux pouvant induire d'importants rejets verticaux, sources de possibles discontinuités hydrauliques.

En pratique, l'interpolation des interfaces entre les formations successives d'un bassin sédimentaire est d'autant plus approximative que la couche est profonde, parce que i) l'éloignement des zones d'affleurement réduit la pertinence des nombreuses informations altimétriques qui leur sont associées, ii) le nombre de forages recoupant une interface décroît en général avec sa profondeur. Il en résulte que le transfert dans un modèle 3D de surfaces de mur (base) interpolées pour des formations successives à partir de données d'affleurement et de forage, fait en général apparaître des incohérences géométriques qui se manifestent par d'inopportuns épaissements et biseautages de couche. Ces erreurs géométriques s'avèrent difficiles à corriger parce que les modifications apportées à une couche ont souvent pour effet de propager les incohérences vers les couches sus- ou sous-jacentes.

L'élaboration d'un modèle géologique 3D, dont la structure géométrique sert ensuite d'ossature au modèle d'écoulement souterrain, présente en outre l'avantage de bien séparer la phase de collecte, analyse et traitement des données géologiques structurales de la phase de modélisation hydrogéologique sensu stricto.

Pour éviter ces difficultés, la meilleure façon de procéder consiste à conduire une phase de modélisation géologique 3D bien identifiée, préalable à la modélisation hydrogéologique sensu stricto, de façon à construire la structure géométrique du futur modèle d'écoulement à l'aide d'un modeleur géologique. Ce type d'outil est spécifiquement conçu pour tirer le meilleur parti de toutes les données susceptibles de nourrir une structure géologique en trois dimensions, qu'elles soient topographiques, géologiques ou géophysiques.

Les structures géologiques ainsi construites sont beaucoup plus cohérentes et conformes aux données de terrain que celles qui résultent d'interpolations individuelles des couches successives, mises ensuite en cohérence pour gommer les désordres les plus criants. Parce qu'elles intègrent de façon rationnelle et argumentée l'ensemble des connaissances disponibles, elles sont ensuite plus faciles à actualiser lorsque de nouvelles données géologiques et géophysiques sont disponibles.

6. Bibliographie

Andrieu, S., 2016. Lien entre diagenèse des discontinuités, faciès sédimentaire et stratigraphie séquentielle : exemple de la plateforme carbonatée de l'Ouest de la France (Aalénien-Oxfordien). Thèse de doctorat, Université Paris Saclay, 445 pp.

Angelier, Jacques. « Inversion of Field Data in Fault Tectonics to Obtain the Regional Stress— III. A New Rapid Direct Inversion Method by Analytical Means ». *Geophysical Journal International* 103, n° 2 (1990): 363-76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x>.

Angelier, J. (1994). Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction. *in*: P.L.. Hancock (ed.), Continental Deformation, Pergamon Press, Oxford, pp. 53- 100.

Barthélemy Y. et Seguin J.J. (2016) - Modélisation maillée des écoulements souterraines – Principes, démarches et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR, 140 p., 50 ill., 2 tab., 3 ann.

Baptiste, J., Martelet, G., Faure, M., Beccaletto, L., Reninger, P. A., Perrin, J., & Chen, Y. (2016). Mapping of a buried basement combining aeromagnetic, gravity and petrophysical data: The substratum of southwest Paris Basin, France. *Tectonophysics*, 683, 333-348.

Cariou, É., Joubert, J.M., 1989. Notice explicative de la carte géologique de Mirebeau-en-Poitou (1/50000). Éditions du BRGM, 36 p.

Chrétien P. et collab. (2014) - Synthèse hydrogéologique des Pays-de-la-Loire. Rapport final. BRGM/RP-64044-FR, 123 p.

Dugué, O., 1989. Géodynamique d'une bordure de massifs anciens. La bordure occidentale du Bassin anglo-parisien au Callovo-Oxfordien. Pulsations épirogéniques et cycles eustatiques. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 593 p.

Gonnin Ch., Cariou, E., et Branger P. 1993. Stratigraphie séquentielle des séries du Bajocien inférieur au Bathonien moyen du seuil du Poitou et de son versant aquitain (France). *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. 316, no II, p. 209-215.

Hardenbol, J., Thierry, J., Farley, M. B., Jacquin, T., De Graciansky, P.- C., Vail, P. R., 1998. Jurassic sequence chronostratigraphy – chart 6. In: De Graciansky P.- C., Hardenbol J., Jacquin T., Vail P. R eds. Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. SEPM Special Publication 60, 3-15.

Homewood, P., Guillocheau, F., Eschard, R., & Cross, T. A. (1992). Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique: une démarche intégrée. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 16(2), 357-381.

Juignet P., 1974. LA transgression créacée sur la bordure orientale du Massif armoricain. Aptien, Albien Cénomaniens de Normandie et du Maine. Le stratotype du Cénomaniens. Thèse Univ. Caen, 810p.

Juignet, P., Kennedy, W. J., & Lebert, A. (1978). Le Cénomaniens du Maine: formations sédimentaires et faunes d'ammonites du stratotype. *Géologie méditerranéenne*, 5(1), 87-99.

- Kuntz, G., Ménillet, F., Le Gall, J., Rioult, M., 1989. Notice explicative de la carte géologique d'Argentan (1/50000). Éditions du BRGM, 99 p.
- Lasseur, É. 2007. La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campaniens, Crétacé supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. 2007. Thèse de doctorat, Université Rennes 1.
- Lenoir, F. Faciès, géométries et déformations du Jurassique du Sud-Ouest du bassin de Paris: un domaine faiblement subsident, transition avec le bassin d'Aquitaine. 2012. Thèse de doctorat, Université Rennes 1.
- Louail, J. 1981 La Transgression crétacée au Sud du Massif armoricain: Cénomaniens de l'Anjou et du Poitou, Crétacé supérieur de Vendée. Thèse Université Rennes 1
- Martelet G, Pajot, G., Debeglia N., 2009. Nouvelle carte gravimétrique de la France; RCGF09 – Réseau et Carte Gravimétrique de la France, 2009. Rapport BRGM/RP-57908-FR 77 p.
- Ménillet, F., Bourdillon, C., Fauconnier, D., Houari, A., Langevin, C., Hérard, B., Béguin, P., 1999. Notice explicative de la carte géologique de Livarot (1/50000). Éditions du BRGM, 98 p.
- Moguedet, G., Charnet, F., Gresselin, F., Lemoine, B., 1998. Notice explicative de la carte géologique de Mortagne-au-Perche (1/50000). Éditions du BRGM, 87 p.
- Mourier, J.P., Gabilly, J., Platel, J.P., 1986. Notice explicative de la carte géologique de Poitiers (1/50000). Éditions du BRGM, 47 p.
- Ogg, J. G., Ogg, G., and Gradstein, F. M., 2016, A Concise Geologic Time Scale: 2016: Amsterdam, Elsevier, 240 p.
- Plint, A. G. (1996). Marine and nonmarine systems tracts in fourth-order sequences in the Early-Middle Cenomanian, Dunvegan Alloformation, northeastern British Columbia, Canada. *Geological Society, London, Special Publications*, 104(1), 159-191.
- Ritz, J. F., et A. Taboada. « Revolution Stress Ellipsoids in Brittle Tectonics Resulting from an Uncritical Use of Inverse Methods ». *Bulletin de La Société Géologique de France* 164, n° 4 (1 juillet 1993): 519-531.
- Seguin J.J. et Thiéry D. (2008) - Modélisation des hydrosystèmes : une aide à la gestion des ressources en eau. Rapport final. BRGM/RP-56974-FR, 33 p., 14 ill.
- Suzzoni, J. M. « Tectonique Cassante Cénozoïque Polyphasée sur la marge Armoricaire Du Bassin de Paris (France) ». *Bulletin de La Société Géologique de France* IV, n° 6 (1 novembre 1988): 995-1002. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.IV.6.995>.
- Suzzoni, J. M., et J.P. Gélard. « Lecture microtectonique de la faille de Montreuil-Bellay (Anjou) et de la fracturation environnante: cinématique et identification des champs de paléocontraintes ». *CR. Acad. Sei., Paris II*, 299, n° 14 (1984): 989-94.
- Suzzoni, Jean-Marc. « Microfracturation et tectonique linéaire de la marge orientale du Massif armoricain », 1985, PhD, 169p.

Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M. J., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S., & Hardenbol, J. (1988). An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions.

Annexe 1

Données de forages utilisées pour le modèle

Données_codées	X	Y	Z	BexaPstC	TexaOSTR	BexaOSTR	TexaBOUF	TexaMANS	TexaNINF	TexaTRUG	TexaBALL	TexaSubC
02513X0014	496322	6832207	181	178								
02517X0501	491826	6821243	154	142.42								
02518X0501	500538	6822066	142									
02518X0505	503168	6817551	170	164								
02522X0001	517458	6828411	270									
02872X0508	489532	6814967	152									
02878X0008	497447	6806408	109									
02881X0507	504762	6814598	170									
02883X0008	521040	6806633	129	123.5								
02885X0501	506147	6804233	85									
02888X0011	527777	6797619	101.58								85.58	
03221X0006	481532	6791746	95									
03223X0005	490243	6788457	78									
03225X0008	478947	6778707	130								118	103.5
03226X0001	488710	6778425	95									28
03227X0074	495992	6777825	111	94		85	73	71	56.5	51	33	
03228X0051	499412	6779534	63								45.5	
03228X0055	501910	6782427	93								77.7	
03231X0007	508581	6789744	109.06							77.06	44.66	9.96
03231X0009	506762	6787019	141	124.2		119.3	110.4	100.5	77.5	74	53	
03232X0007	511265	6787192	153.5	109.5		102.5	91.2	86	69.7			
03232X0019	516843	6787526	172	126		122	118			90		
03232X0020	516310	6795134	164	149		144	132			110.5	79.5	17
03234X0506	524483	6789608	96							76.7	41	-25.7
03234X0521	524180	6795087	100	95							84	25
03234X0524	523723	6785956	107									81
03234X0538	525391	6789847	83							64	50	0
03234X0555	524919	6795111	168.5	161.5		155	127.5			111	85	
03237X0020	519662	6779326	107.5							89.5	77.5	21.5
03237X0022	517335	6782895	114	105.5							75	
03237X0038	522420	6780428	84									46
03237X0044	517499	6777541	85									77
03237X0061	517252	6784668	114	109							70	26
03238X0012	524099	6778036	130								109	47
03238X0046	526636	6776721	188	171.5		164	149.7	128		116	107.5	
03238X0053	523872	6784478	114									34
03238X0059	528027	6777473	190	176		170.5	155.2	138		120.5	110.5	
03241X2009	530451	6788484	115	113								104
03241X2014	533567	6786354	212	200.2		181	165.5			140.8	118	96
03245X0516	536067	6782267	200	195		189	181	166	162.8	146.5	132	
03246X0501	538977	6777544	165.11					155.11		150.11	139.11	
03577X0003	465179	6758747	50					43.1		36.2		29.3
03577X0004	466375	6758397	58									
03577X0026	464998	6767013	83					81.33		79.66		78
03578X0032	472853	6760008	40									
03578X0033	470540	6761648	85									
03581X0003	477777	6770485	130								124	115
03582X0043	486607	6774729	90									60
03583X0051	489780	6770006	43								7	-22.5
03583X0203	494917	6774835	118	84		69.5	54.5	51	39.5	35.5		
03583X0204	494107	6771682	107	83		73	70	65	53	44	25.5	
03583X0315	494823	6776040	113	90.5		79	76.5	73	63	55	33	
03583X0374	489816	6774912	46	-49		-70.5	-71.5	-79.5	-93	-95	-135	-168
03585X0014	477416	6757670	72									53
03585X0046	478448	6766163	85									75.5
03585X0048	479085	6764089	67								66	60
03585X0049	480692	6760482	44									
03586X0196	486584	6765925	50								36	21
03586X0197	484218	6760202	48									30
03587X0183	492882	6764375	48.5								29.5	17.5
03588X0047	500539	6762926	73								72	47
03588X0053	497819	6760271	66	65								52
03591X0080	506736	6767691	81	-47		-55	-59	-68	-99	-108	-122.5	
03591X0092	504606	6774870	90				81	72	46	44	25	
03592X0055	515084	6769456	146	120.5		99	90	86		73	57	
03592X0085	513436	6774427	81									49
03592X0120	511379	6773827	130	114		106.5	103.5	91	86	82	53.5	
03593X0007	518014	6774519	94	92						82.5	61.5	11
03593X0019	522588	6773032	115.5					104		92.5	82	
03593X0052	517987	6772560	85								70	3
03593X0057	519904	6772974	152	140			119	98		88	77.5	
03593X0089	521327	6766197	167	155		148.5	138.5	126.5		115.5	95	
03594X0033	523800	6769744	132	129						116.5	104.7	
03594X0034	523293	6771302	146				127.5	116.7			97	86
03594X0035	522962	6767482	176	157		147	142	127		113	95	
03594X0041	526943	6771237	171	150.5		137.5	123.5	111		104.5	91.5	
03595X0007	507085	6761330	101	82.5		76.5	74.5	64	31	29	13	
03595X0028	505336	6764161	117	89		86	82	79	66	62.7	21	
03595X0029	503404	6761264	131	88		84		69	56	53	1	
03596X0006	513167	6765993	136	124		112	100.8	99.3	72	70		
03596X0009	513544	6764667	147.5	96.5		82.5		72	61.5	55		
03596X0016	515354	6764717	155	141		126.5	119	116.5	99.5	95.5		
03597X0007	519203	6760069	140	137		119		112				59.3
03597X0017	518546	6762198	145	135		125	116	113	93	91.5		
03597X0018	517142	6761015	155	132		114	110	107	90	85		
03597X0021	517961	6756424	158	122		113.5		109	104.5	100	37.5	
03598X0007	526600	6760307	162.5	116.5		101	87	81	74	68	47	
03598X0011	527598	6756551	144	95		80.6		77.8	75	64.5	16.5	
03598X0028	523968	6765895	174	163.5		153.3	140	122.5	112.5	110	93.5	
03598X0029	524332	6764023	170	156		146.5	127	110	99.5	98	87	
03602X0001	540924	6772603	165	133		129.5	116.8	113				
03605X2005	533346	6763409	155	125								
03607X0007	549468	6764484	211									
03607X0022	543891	6760837	177			107.5		102.75	98	89	70	
03608X0069	553364	6758434	156	101.5		87	77	39		23		
03608X0071	551674	6756975	151	89		77.5	76	51		33	18	
03615X0001	559492	6764293	189.4									
03924X0016	469262	6751029	30									8
03924X0034	475153	6747922	70			59.2		51.35	43.5	37	24	1
03927X0027	462439	6739123	85	70	58.5	25		21		17	14	-9.5
03927X0032	467241	6747812	43					40.33		37.66	35	14
03928X0042	475257	6743643	97.16	57.16	49.16	16.16		10.66	5.16	0.66		-15.84
03928X0052	473932	6744065	88	12	2.3	-22.5		-26.5	-30.5	-33.4		-78.7
03928X0053	471486	6739498	80	59	43	21.5		12.75	4	-2.5	-10	-22

Données_codées	X	Y	Z	BexaPstC	TexaOSTR	BexaOSTR	TexaBOUF	TexaMANS	TexaNINF	TexaTRUG	TexaBALL	TexaSubC
03932X0020	485741	6751066	86.12	71.12	67.12	45.12		34.12	23.12	15.12		
03932X0043	484067	6749077	90	65.5	54	36		27.5	19	11.5		
03932X0079	488441	6747079	95	70	67	56		42.33		28.66	15	-13
03932X0094	487563	6753176	63					50.75	39.5	36.5	8	
03933X0001	485049	6750376	65									
03934X0033	498176	6753887	125			117		110.25	103.5	98.5	68	46
03934X0038	499406	6752718	150	119		103		95.25	87.5	76	39.5	
03935X0039	480506	6745090	82	76	63	34.5		26.75	19	16		
03935X0069	480970	6740274	106	98.5	84.2	50		44.25	38.5	32.2		5
03935X0089	475388	6741335	86	82.5	60	38		34	30	26		-10.5
03936X0029	485766	6738331	49	36.5	26.5	7.5		6	4.5	-4.5		-51
03936X0030	484405	6746566	83	73	64.5	36		25.25	14.5	9	-18	
03936X0081	483776	6739577	38.5	21.5	14	1		-0.5	-2	-6.8		-61.5
03937X0026	493224	6739878	88	60		32.5		20.5	8.5	-10		
03937X0027	491494	6738014	80	69		55.5		43	30.5	18	-5	-10
03938X0043	498108	6739618	95			78.5		72.25	66	53	4.5	-3.9
03938X0052	500641	6738710	142	77.5		60.5		53	45.5	31.5	-5.5	
03941X0005	506029	6750085	165	97.7		86.5		75	63.5	58	3.3	
03942X0010	509521	6754213	135	91		71		63.5	56	51	1	
03943X0019	521539	6746579	148	80		60.75		60.75		55.5	13	
03944X0001	522808	6754393	145	82.5		78		70.25		62.5		
03944X0011	522688	6748927	130	37.5		22.5		17	11.5		-35.5	
03945X0025	503889	6742901	141	82		66		55.5	45	38	11.5	
03946X0020	510021	6737361	69	19.8		9.8		-6.2	-22.2	-32.6	-60.8	
03946X0022	512197	6740750	126	52.8		43		32.35	21.7	18.8	5.5	
03946X0024	513245	6745398	139									
03947X2003	518710	6737968	112	22		13.5	12	9.2	-15	-20		
03948X0080	527028	6738748	128.31	39.31		34.31	19.31	16.31	7.31	-10.69	-32.69	
03951X0017	534843	6749376	121	79		76	72.5	57	45.5	37	4	
03951X0017	530748	6753228	99	64		61	57	44.5	36	30.8	-12.5	
03954X0024	549882	6751992	107.08	19.58		1.58	0.08	-27.42	-37.92	-49.92	-64.92	
03963X0003	575334	6753693	145									
04241X0039	448751	6738291	48	36.7		31.3		26.8		22.3		4.8
04243X0001	467392	6733906	41									19
04243X0013	463161	6728262	44					37.25		33	30	11.5
04244X0043	470035	6728691	68	48.5	46	29		18.75	8.5	2		
04245X0008	450414	6727904	35	17.5		8.8		2.65				-3.5
04246X0009	456534	6722243	68	42		33		24		15	9	-23.5
04248X0058	470937	6718354	90	50.5	44.5	38.5		21.5			4.5	
04251X0052	479053	6728283	60									
04252X0084	485747	6729417	73	34		11		-1.75		-14.5	-55.5	-65.5
04252X0087	482780	6733139	46	5.5	2.5	-24		-33	-42	-57	-69.5	
04253X0050	490886	6731922	91	7.5		-27		-30.5	-34	-39.5	-84.7	-94.7
04253X0074	489520	6737979	70.54	22.54	14.54	-9.46		-12.46	-15.46	-35.46		-57.96
04254X0049	496744	6727003	85	-12		-22.5		-31	-39.5	-46	-112	
04254X0053	498693	6736105	68	32		13		5.5	-2	-15.5	-49	
04254X0068	499292	6728358	112	74		50		48.75	47.5	37	-28	-38
04254X0069	500029	6727705	117	73		55		51.5	48	43	-26	-36
04254X0074	497952	6726856	50	39.6		26		16.5	7	3	-9.2	-19.2
04255X0002	478005	6723086	79									
04256X0018	486866	6726380	57	49.5		22.5		12.75	-1.5	-17	-33	-45
04257X0004	492892	6720365	60									
04257X0015	487662	6718639	78.1	-16.4		-28.4		-48.65			-68.9	-78.9
04258X0012	498852	6719167	101	20		-0.5		-5.75	-11	-24	-70	
04261X2027	503528	6731668	49.5					34		26.5		-12.5
04262X0027	513891	6732882	131	59		43		35.5		28	-5.2	
04262X0034	508486	6728210	108	46		5		-0.5	-6	-12.5	-40	
04265X0021	503354	6716651	87	81		20		10	7			-6.5
04265X0054	502502	6726021	112	76		54.5		52.25	50	41.5	-3	
04267X0009	519791	6725643	110									
04268X0010	527375	6725535	172.94	152.94		148.94	128.94	123.94	98.44	88.94	65.44	42.94
04268X0024	523439	6716054	120	14		-10		-29		-48	-90	
04275X0045	532451	6718858	145	67.5		57	30	16	-10	-16	-31	
04553X0033	464352	6713080	39	32		20.7		12.15		3.6		-20.5
04554X0030	467134	6709118	41									37.5
04557X0157	464860	6703044	25	23								8
04558X0034	470809	6703579	37									32
04558X0125	473249	6698706	58	35		16.5		3.75				-9
04561X0026	476370	6712300	70	16		14						
04562X0048	485351	6708735	96	86		75.5	65	45	35.5	22	2	
04562X0051	484742	6713567	84									
04564X0154	494233	6712252	88	-26.5		-35	-55	-69.5	-79.5	-91	-96	
04566X0505	481641	6702341	76	55		19.5		5	-9.5	-22		-30.5
04566X0506	486578	6706027	74	60		33		19.75	6.5	-1.5		-6.5
04567X0002	492358	6706489	78			-26.42		-44.37		-62.32		-80.27
04572X0040	508401	6714345	117.5									
04572X0043	512306	6709846	103									
04573X0003	517907	6709835	99	-10.8		-34.7		-57.59	-80.49	-89.25		-111.54
04576X0076	514010	6702697	89	-5								
04578X0009	521739	6699006	47.6	-68.9		-92.9		-105.9	-118.9	-123.9		
04578X0102	526392	6705213	100.32	-21.08								
04581X0105	528681	6710175	91	-37		-86		-98.5	-111	-124		-147
04585X0196	529524	6701849	48.5	-37.5		-50.9		-67.45	-84	-90.7		-108.5
04854X0250	466525	6689405	28	1.5		-17		-27.4		-45	-57	-64.1
04858X0082	468853	6686888	64.56	-5.74		-22.84		-38.14		-53.64	-63.74	-66.64
04861X0074	476433	6687756	26					-1.83		-23.66		-45.48
04862X0036	485834	6691569	48	34.5		16.5		0.75		-15	-27.5	-28.5
04865X0047	476599	6679829	80	20		1.5		-13.35		-28.2	-39.5	-43
04865X0056	476464	6684127	34	18		4		-7		-28	-41	-48
04873X0021	515063	6695738	93	-82		-109		-127.5	-146	-152	-159.5	-164.5
05124X0010	469360	6670895	38									
05131X0046	476778	6674956	113	56.5		38.5		27		15.5		4.5
05132X0013	480982	6672188	63									
05136X0054	483376	6666600	65									
05137X0016	488510	6660565	95									
05147X0002	515296	6663781	47.5									
05156X0001	538753	6663796	91.35									
05401X0011	477706	6653090	77									
05662X0009	481536	6634033	97									
05662X0048	478581	6629591	123									
B55003R ZHY	468615	6719885	80	10.5	6	-4.5		-12.25	-20	-25	-39	-46.5
B55003R ZIS	469058	6716421	60	43.5		32.5		22.75	13	5	-15.5	-16.5
B550035 ANM	443902	6741603	39	31.9		6.5		-9		-25.5		-29.5
B550035 CXU	475402	6718370	85	20.5	13	1		-18		-37		-42
B550035 FRI	467854	6713606	63	41		26.6		12.8		-1	-13	-24

Codages des puits utilisés pour la modélisation :

Figurent ici les cotes « exactes » en altitude NGF, c'est-à-dire les cotes pour lesquelles l'interface de sommet ou de base de la couche a été identifiée en forage (la formation a été entièrement traversée et les formations sous-jacentes atteintes. Bexa PostC = Base de la Craie, Texa OSTR= Base des Sables à Catopygus, Bexa OSTR= Base des Marnes à Ostracées/ sommet Sables du Perche, Texa Bouffry= sommet Bouffry Base des Sables du Perche, Texa Mans= sommet Sables du Mans, Texa NINF Sommet Marnes de Nogent inférieures/ Base Mans, Texa TRUG= Sommet Sables de la Trugalle, Texa BALL= Base Sables de la Trugalle/Sommet des Marnes de Ballon, Texa SubC (Base de la Série Crétacé)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : +33 (0)2 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Pays de la Loire

1, rue des Saumonières
BP 92342

44323 Nantes Cedex 3 – France

Tél. : +33 (0)2 51 86 01 51