

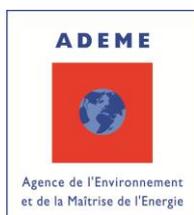
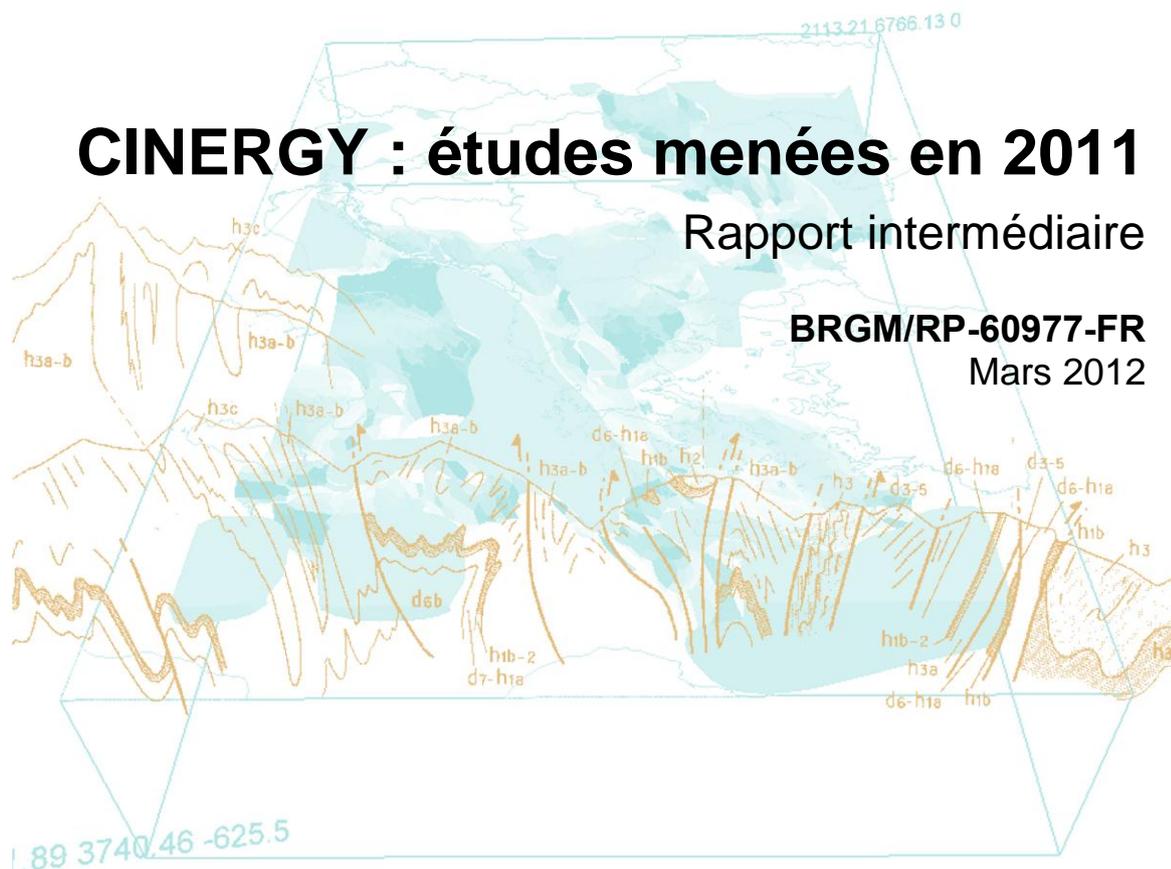


CINERGY : études menées en 2011

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-60977-FR

Mars 2012



CINERGY : études menées en 2011

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-60977-FR

Mars 2012

**H. Bauer, P. Saint-Marc, J.M. Schroetter, B. Mougin,
E. Petelet-Giraud, B. Dewandel**
Avec la collaboration de
P. Calcagno et R. WYNS

Vérificateur :

Nom : D. Thiéblemont

Date : 30/03/2012

Signature :

Approbateur :

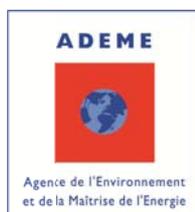
Nom : P. Nehlig

Date : 30.03.2012

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots-clés : CINERGY, Forage, Carottage, Bretagne, Rennes, Chartres-de-Bretagne, Tertiaire, Palynologie, Éocène, Oligocène, Modélisation, Geomodeller, Essai de pompage, Hydrogéologie, Géochimie.

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

Bauer H., Saint-Marc P., Schroetter J.M., Mougin B., Petelet-Giraud E. et Dewandel B. (2012) - CINERGY : études menées en 2011. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-60977-FR, 131 p., 67 fig., 12 tabl., 5 ann. (h.t.), 1 CD.

Synthèse

Le projet « **C**onnaissance de la géologie **p**rofo**n**de du bassin **t**ertiaire de **R**ennes, à visée **G**éothermique et **h**ydrogéologique » (CINERGY) résulte de la rencontre d'interrogations scientifiques et techniques quant à l'existence de ressources naturelles dans le bassin de Rennes. Si la géologie superficielle du bassin était connue depuis plus d'un siècle, celle du sous-sol profond, au-delà de 140 m, restait largement inconnue. Pourtant, la géophysique des années 50 (gravimétrie) avait mis en évidence une profondeur du bassin de l'ordre de 500 m, faisant de ce petit bassin le plus profond de sa catégorie en Bretagne. La question scientifique de la nature et l'âge des terrains sédimentaires remplissant ce bassin a rejoint des préoccupations liées à la ressource en eau et géothermale.

Après un premier rapport d'activité sur le forage lui-même et les premiers résultats géologiques qui en découlaient, celui-ci présente les résultats des actions menées en 2011, s'agissant de l'étude géologique, de l'étude hydrogéologique, géochimique et de la biomasse profonde.

Étude géologique

L'étude géologique a porté tout particulièrement sur la partie tertiaire du forage, soit le 0-400 m correspondant au **remplissage sédimentaire du bassin**, la **modélisation du bassin sous Geomodeller®** et, dans une moindre mesure, l'étude du **socle briovérien**.

Le **remplissage sédimentaire tertiaire** a fait l'objet d'un stage de Master2 avec l'université de Rennes 1. Les résultats majeurs obtenus sont la datation de **l'initiation du bassin au Bartonien inférieur** (« Biarritzien », ~40 Ma), l'obtention d'un calage biostratigraphique (palynologique) très précis (**limite Éocène/Oligocène à 195,26 m ± 0,20 m**) et des premiers éléments d'enregistrement palynologique (augmentation des pinacées) et minéralogique (apparition de la smectite) du **refroidissement global fini-éocène**. Une dynamique sédimentaire lacustre particulière a été mise en évidence à l'aide de la palynologie, montrant des alternances de phases lacustres ouvertes et fermées, lors desquelles le lac est obstrué par le développement de tapis végétaux flottants. La comparaison avec les autres bassins ouest-européens indique que le bassin de Rennes a une dynamique intermédiaire entre bassin de type intracratonique et de type graben.

L'étude du **socle briovérien** s'est principalement focalisée sur son **profil d'altération**, remarquablement illustré par les diagraphies et la minéralogie des argiles. Le profil, tronqué à son sommet par le conglomérat basal du bassin, comprend les différents horizons classiquement décrits dans les paléoprofils d'altération, bien que les transitions entre horizons soient beaucoup plus progressives que dans le cas de profils développés sur granite. Pour la première fois cependant, la roche saine est atteinte en forage et la monotonie de la lithologie permet une lecture exceptionnelle de l'évolution des différents paramètres.

La modélisation 3D du bassin de Rennes sous le logiciel Geomodeller® s'appuie sur les données de forage de la BSS, des données géophysiques et de la carte géologique. **Quatre unités sont modélisées**, séparées par trois interfaces : une unité oligo-néogène principalement carbonatée, une unité « éocène » argileuse, le socle altéré et le socle sain.

Le modèle géologique rend compte d'un bassin complexe à l'intérieur duquel les formations éocène et oligo-néogène ont finalement le même dépôt-centre. Ceci pourrait être la conséquence d'un régime de contraintes tectoniques homogènes au moins pour l'Éocène et l'Oligocène.

Étude hydrogéologique et hydrochimique

Le rapport rassemble l'interprétation des actions menées en 2010 et celles réalisées en 2011. Les aquifères de surface étant hors du sujet de CINERGY, et le reste du remplissage sédimentaire totalement argileux, seul le socle fissuré a pu être testé pour ses propriétés aquifères.

En 2010, directement à la suite du forage, des pompages d'essai ont été réalisés et les fluides recueillis pour de premières analyses. Il est rapidement apparu que le socle testé n'était pas assez productif. Les eaux recueillies étaient pour leur part un mélange d'eau superficielle peu minéralisée et d'une eau plus minéralisée, dont la signature physico-chimique avait été observée à plus de 400 m de profondeur.

En 2011, de nouveaux pompages ont visé à (i) mieux caractériser l'aquifère et (ii) faire remonter la bulle salée jusqu'en surface pour la prélever et l'analyser. La très faible transmissivité ($1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) confirme que le socle est peu productif. Les analyses effectuées sur l'échantillon prélevé indiquent un mélange d'eau primaire salée d'origine marine, très ancienne, et d'une eau actuelle provenant, sans aucun doute, des aquifères de surface. Une connexion entre le forage et les aquifères de surface est très probable.

Étude de la biomasse profonde

Le volet « Biomasse » de CINERGY était initialement circonscrit au prélèvement et au conditionnement d'une dizaine d'échantillons. Nous avons de surcroît tenté d'estimer l'invasion éventuelle de la boue de forage au sein de la carotte, afin d'évaluer l'intégrité des échantillons pour toute analyse ultérieure.

Cinq approches indépendantes et complémentaires ont été mises en œuvre pour tenter de quantifier l'invasion de la boue de forage dans les échantillons. Force est de constater qu'aucune ne répond définitivement à la question sans qu'un doute subsiste. En l'état, et même si d'un point de vue du géologue les risques d'invasion par la boue des échantillons argileux est infime, aucune certitude ne peut être acquise à l'issue de ces tests. Si toutefois un échantillon devait être soumis à une analyse microbiologique, nous préconiserions de choisir une roche du socle, la perméabilité des schistes briovériens étant assurément plus faible que celle des argiles non lithifiées tertiaires.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL – PANORAMA 2011 DES ACTIONS MENÉES	11
1.2. CADRE GÉOLOGIQUE DE L'ÉTUDE	12
2. Études géologiques	15
2.1. ÉTUDE DU REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DU BASSIN DE RENNES.....	15
2.1.1. Introduction	15
2.1.2. État de l'art – cadre de l'étude	16
2.1.3. Matériel et méthodes	20
2.1.4. Résultats	24
2.1.5. Interprétation - Discussion	34
2.1.6. Conclusion	41
2.2. ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DU SOCLE BRIOVÉRIEN DU BASSIN DE RENNES	42
2.2.1. Synthèse faciologique et pétrographique du socle briovérien	42
2.2.2. Paléoprofil d'altération du socle briovérien	48
2.2.3. Conclusion	56
2.3. MODÉLISATION 3D DU BASSIN DE RENNES	56
2.3.1. Introduction	56
2.3.2. Contexte géologique du bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes.....	57
2.3.3. La modélisation 3D.....	64
2.3.4. Conclusions et Perspectives	73
3. Études hydrogéologique et hydrochimique	75
3.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	75
3.1.1. Les aquifères et leurs utilisations.....	75
3.1.2. Productivité du sous-sol	77
3.1.3. Aquifères recoupés par le forage CDB1	78
3.2. OPÉRATIONS MENÉES EN 2010	80
3.2.1. Rappel des opérations	80
3.2.2. Présentation des résultats de pompage	80
3.2.3. Présentation des résultats d'analyses d'eau.....	82

3.3. OPÉRATIONS MENÉES EN 2011	83
3.3.1. Travaux réalisés sur le forage CDB1	83
3.3.2. Travaux complémentaires	85
3.3.3. Résultats et interprétation des essais par pompages.....	86
3.3.4. Résultats et interprétation des analyses d'eau souterraine	90
3.4. CONCLUSION.....	100
4. Étude de la biomasse profonde.....	103
4.1. OBJECTIFS.....	103
4.2. SÉLECTION ET CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS.....	103
4.2.1. Stratégie d'échantillonnage	103
4.2.2. Organisation et protocole d'échantillonnage	104
4.3. ÉTUDE DE L'INTÉGRITÉ DES ECHANTILLONS	106
4.3.1. Détermination par Diffractométrie des RX	106
4.3.2. Détermination par observation microscopique optique	106
4.3.3. Détermination par observation au MEB	107
4.3.4. Détermination par mesure du pH « solide ».....	108
4.3.5. Détermination par les diagraphies de résistivité.....	108
4.4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE VALORISATION	108
5. Conclusions et perspectives	111
5.1. CONCLUSIONS	111
5.1.1. L'étude géologique	111
5.1.2. L'étude hydrogéologique et géochimique	112
5.1.3. L'étude de la biomasse.....	112
5.2. ACTIONS 2012 ET PERSPECTIVES	112
5.3. REMERCIEMENTS	113
6. Bibliographie	115

Liste des figures

Figure 1 :	Log synthétique général du forage CDB1.	13
Figure 2 :	Situation géographique et Carte géologique des formations cénozoïques du bassin de Rennes (d'après Thomas, 1999).	16
Figure 3 :	Distribution latitudinale des températures moyennes annuelles (TAM) à la surface du globe de nos jours (ACTUEL) et à l'Éocène moyen (40 Ma) et zonations climatiques correspondantes (Bignot et Pomerol, 2010).	18
Figure 4 :	Calcul des températures annuelles (A), des températures du mois le plus chaud de l'année (B), des précipitations annuelles (C) et des températures du mois le plus froid de l'année (D) pour les bassins Rhéna (violet), Weissester (bleu) et molassique du sud de l'Allemagne (bleu-vert) du Lutétien au Pliocène.	19
Figure 5 :	Localisation du profil sismique et de l'anomalie gravimétrique aux environs de Chartres-de-Bretagne.	20
Figure 6 :	Mise en évidence de l'altération des carottes suite au contact avec l'air.	22
Figure 7 :	Log synthétique du remplissage sédimentaire du bassin de Rennes.	26
Figure 8 :	Cortège sableux supérieur (380 m) à rides obliques en contact avec des argiles sableuses.	28
Figure 9 :	Calcaire à éléments fibroradiés surmonté par des argiles massives verdâtres (159 m).	28
Figure 10 :	Répartition des pollens et marqueurs stratigraphiques (bleu) du forage CDB1 entre 405 m et 71 m.	30
Figure 11 :	Gastéropode (<i>Ampullinopsis crassatina</i>) de la formation des marnes à Natica à 75,37 m.	30
Figure 12 :	Proportion (en %) des quatre types d'argiles reconnues dans le forage CDB1 par analyse de la diffraction des rayons X (DRX).	32
Figure 13 :	Diagraphies issues du forage CDB1 dans le bassin de Rennes au 1/1 150.	33
Figure 14 :	Environnements de dépôts et proposition de découpage séquentiel dans le bassin de Rennes.	36
Figure 15 :	Environnements de dépôts des faciès du bassin de Rennes.	37
Figure 16 :	Corrélations des formations éo-oligocènes des bassins de Rennes (à droite) et de Saffré (à gauche, Borne, 1978) et épaisseurs correspondantes.	38
Figure 17 :	Tableau synoptique des formations éo-oligocènes du bassin de Rennes et des bassins adjacents de Saffré (70 km au sud de Rennes), du Hampshire (Île de Wight, Angleterre), de Paris, de Belgique et du bassin Rhéna.	39
Figure 18 :	Tableau synoptique du paléoclimat éo-oligocène du bassin de Rennes et des bassins adjacents de Saffré (70 km au sud de Rennes), du Hampshire (Île de Wight, Angleterre), de Paris, de Belgique et du bassin Rhéna. (Ollivier-Pierre et Estéoule-Choux, 1980)	40
Figure 19 :	Faciès argileux à gréseux du socle briovérien, gross. x 15.	43
Figure 20 :	Faciès gréseux à conglomératiques du socle briovérien, gross. x 15.	44

Figure 21 : Structures et contacts sédimentaires.....	45
Figure 22 : Remplissages de fractures.....	46
Figure 23 : Remplissages de fractures.....	47
Figure 24 : Évolution visuelle du profil d'altération du socle.	49
Figure 25 : Évolution du signal GR le long du profil d'altération.	51
Figure 26 : Diagraphie sonore du profil d'altération éocène sur schistes briovériens.	53
Figure 27 : Diagraphie de résistivité du profil d'altération éocène sur schistes briovériens.....	54
Figure 28 : Évolution verticale de la minéralogie des argiles dans le profil d'altération du socle.	55
Figure 29 : Localisation du Bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes, carte géologique au 1/1 000 000 de la Bretagne, BRGM éditions.....	57
Figure 30 : À gauche : carte géologique du bassin de Bruz – Chartres-de-Bretagne. À droite : coupes géologiques sériées, d'après Brunel (1971).....	59
Figure 31 : Coupe géologique du forage CDB1 (modifié de Bauer et al., 2011).	60
Figure 32 : A : Carte géologique du bassin de Bruz – Chartres-de-Bretagne modifiée d'après Thomas (1999) ; B : Simplification de la géologie pour la construction du modèle.....	61
Figure 33 : Anomalie gravimétrique engendré par le bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes d'après Jaeger (1959).....	63
Figure 34 : Coupe géologique du bassin de Chartres-de-Bretagne avant le forage carotté CINERGY, modifié d'après Thomas (1999).....	63
Figure 35 : Géologie simplifiée pour la modélisation du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes.	65
Figure 36 : Relation entre les différentes formations géologiques du modèle.	66
Figure 37 : Modélisation des failles du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes, les failles sont définies comme étant finies.	67
Figure 38 : Projection dans le Geomodeller de l'ensemble des forages issus de la BSS pour la modélisation du bassin (exagération verticale x 3).....	68
Figure 39 : Carte topographique avec le positionnement du profil HR1 et du forage CDB1. ...	68
Figure 40 : Découpage du profil sismique HR1 afin de le caler dans le Geomodeller.	69
Figure 41 : Coupe géologique au niveau du filon de dolérite de la Mine de Pont-Péan avec la projection des travaux de la mine, Moussu et Prouhet (1957).....	70
Figure 42 : Bloc diagramme du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes à partir du geomodeller.....	71
Figure 43 : Géométrie de l'Éocène au niveau du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes.	71
Figure 44 : En haut : géométrie de la formation Oligo-Néogène ; en bas : géométrie des altérites autour du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes.....	72
Figure 45 : Schéma des aquifères présents dans le bassin de la Vilaine.....	75
Figure 46 : Coupe géologique du forage de la Marionnais.	76

Figure 47 : Coupe géologique du forage de la Pavais.	77
Figure 48 : Localisation des forages implantés dans les formations géologiques autour du bassin de Rennes.	78
Figure 49 : Coupe technique du forage CDB1.	79
Figure 50 : Suivi du pompage du 12 octobre 2010.	81
Figure 51 : Suivi du pompage du 13 octobre 2010.	81
Figure 52 : Suivi du pompage des 14-15 octobre 2010.	82
Figure 53 : Diagraphies température-conductivité réalisées en 2011.	84
Figure 54 : Aperçu du chantier de pompage et prélèvements du 12 juillet 2011.	85
Figure 55 : Suivi du pompage du 31 mai 2011.	86
Figure 56 : Suivi du pompage du 16 juin 2011.	87
Figure 57 : Interprétation des pompages du 31 mai 2011 et du 16 juin 2011.	88
Figure 58 : Interprétation groupée des pompages d'octobre 2010, mai 2011 et juin 2011.	89
Figure 59 : Gauche : Relation entre la conductivité et le TDS (Total Dissolved Solids). Droite : relation entre la NICB (Balance ionique) et le TDS, pour les échantillons de l'étude Cinergy.	92
Figure 60 : Diagramme de Piper des eaux du forage CDB1 (octobre 2010 et juillet 2011) et des aquifères sus-jacents.	94
Figure 61 : Relation Cl en fonction de Na et B (en mg.L ⁻¹).	95
Figure 62 : Relation Cl en fonction de Br (en mg.L ⁻¹).	96
Figure 63 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (gauche) et entre $\delta^{18}\text{O}$ et Cl (droite).	96
Figure 64 : Relation entre la composition isotopique en bore ($\delta^{11}\text{B}$) et la teneur en bore.	97
Figure 65 : $\delta^{18}\text{O}\text{-SO}_4$ en fonction $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4$ (d'après Clark and Fritz, 1997).	98
Figure 66 : Relation entre la composition isotopique en strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et la teneur en Sr.	99
Figure 67 : Calcrète vu au microscope optique, en lumière « naturelle » (gauche) et polarisée-analysée (droite).	107

Liste des tableaux

Tableau 1 : Chronogramme simplifié de CINERGY.	12
Tableau 2 : Tableau de description des lithofaciès associés à leurs structures et éléments sédimentaires.	27
Tableau 3 : Profondeurs des puits et de la base de l'Éocène sur cinq puits de la mine de Pont-Péan.	69

Tableau 4 : Liste des captages d'alimentation en eau potable.....	76
Tableau 5 : Information sur les forages réalisés dans les formations géologiques autour du bassin de Rennes.	78
Tableau 6 : Résultats des analyses d'eau en fin de pompage.	83
Tableau 7 : Caractéristiques des pompages réalisés en 2011.....	84
Tableau 8 : Résultats des analyses minéralogiques diffractométrie rayons X sur dépôts solides dans l'eau souterraine du forage CDB1.....	90
Tableau 9 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du forage CDB1 après le pompage du 12 juillet 2011.	91
Tableau 10 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du puits AEP La Pavais.....	91
Tableau 11 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du puits AEP La Marionnais.....	91
Tableau 12 : Liste des échantillons GMB et leur pendant ISO/MO/RX.....	105

Liste des annexes

Annexe 1 : BRGM/RP-60977-FRb. Log détaillé du remplissage sédimentaire du bassin de Rennes.....	123
Annexe 2 : BRGM/RP-60977-FRc. Rapports et synthèse biostratigraphiques du forage – ERADATA.....	125
Annexe 3 : BRGM/RP-60977-FRd. Résultats d'analyses par fluorescence X (Niton).....	127
Annexe 4 : BRGM/RP-60977-FRe. Résultats d'analyses minéralogiques par DRX.....	129
Annexe 5 : BRGM/RP-60977-FRf. Rapports d'études pour Géomicrobiologie.....	131

Le CD joint au rapport contient les annexes (rapport et données) ainsi que le présent rapport. Tous ces documents sont en format PDF.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL – PANORAMA 2011 DES ACTIONS MENÉES

Le projet CINERGY a pour premier objectif la connaissance géologique du bassin de Rennes¹. Des résultats géologiques ont été présentés dans un premier rapport (Bauer *et al.*, 2011), mais de nombreuses analyses et études complémentaires ont été menées depuis et nécessitent de rappeler certains éléments préalablement exposés. Ce rapport présente les études menées en 2011 sur le forage CDB1 et les carottes obtenues. Elles comprennent l'étude géologique du bassin (remplissage sédimentaire, socle briovérien et modélisation 3D sous Geomodeller®) et l'étude hydrogéologique, qui combine à la fois les pompages d'essai et les analyses de fluides recueillis.

L'année 2011 (Tableau 1) a ainsi permis une étude approfondie du remplissage sédimentaire du bassin (0-400 m du forage) par un étudiant de Master2 (P. Saint-Marc, université de Rennes1) et la mise en place d'un partenariat avec l'université de Rennes pour une série de micro-pompages, diagraphies et prélèvements de fluides. L'été a vu le développement du modèle géologique 3D, rendu en septembre et qui servira de base au modèle thermique préliminaire. En parallèle, des analyses de fluides et de roches ont été lancées, dont les résultats, à des stades plus ou moins avancés d'interprétation, sont présentés dans ce rapport.

Le présent rapport est structuré autour des thématiques suivantes :

- **étude géologique** : l'étude détaillée du remplissage sédimentaire a donné lieu à un mémoire de Master2. Le socle a fait l'objet d'une étude moins approfondie que la précédente. Enfin, un modèle géologique 3D du bassin de Rennes a été élaboré sous Geomodeller®, logiciel BRGM ;
- **études hydrogéologique et hydrochimique** : Dans ce rapport sont présentés les résultats et interprétations des différents pompages d'essai réalisés en 2010 par HydroAssistance Ingénierie et en 2011 par l'Université de Rennes 1. Les analyses géochimiques des fluides recueillis sont également discutées ;
- **étude de la Biomasse** : l'un des objectifs du projet CINERGY était de recueillir des échantillons et de les conditionner de façon assez durable pour qu'un second projet prenne le relais et exploite ses échantillons. Nous avons, au-delà du reconditionnement, tenté de répondre à la question de la qualité de l'échantillonnage et notamment la garantie de son intégrité vis-à-vis de toute pollution extérieure. Les conclusions de cette investigation sont présentées ici.

¹ Dans le rapport, les termes « bassin de Rennes », « Bassin rennais », « bassin de Chartres-de-Bretagne » et « bassin de Rennes-Chartres » sont toutes équivalentes, la préférence allant au premier.

Principales étapes	2010				2011				2012	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
MODULE 1 – Etude Géologique										
T1 – Suivi géologique du forage										
T2 – Etude biostratigraphique des carottes (sous-traitance ERADATA)										
T3 – Etude stratigraphique intégrée (stage M2 + encadrement)										
T4 – Modèle géologique simplifié sous GeoModeller										
MODULE 2 – Caractérisation des aquifères										
T5 – Diagraphies (sous-traitance Semm Logging)										
T6 – Essais de pompage (sous-traitance Hydro Assistance Investigation puis convention avec Géosciences Rennes)										
T7 – Analyses physico-chimiques de roches et fluides										
MODULE 3 – Etude Hydrogéologique										
T8 – Suivi hydrogéologique du forage										
T9 – Etude des fluides recueillis (partenariat Géosciences Rennes)										
MODULE 4 – Etude Géothermique										
T10 – Suivi géothermique du forage										
T11 – Modèle thermique simplifié du bassin										
MODULE 5 – Etude Hydrochimique										
T12 – Suivi géochimique du forage										
T13 – Analyses géochimiques										
MODULE 6 – Etude de la Biomasse										
T14 – Suivi Biomasse du forage										
T15 – Reconditionnement et sélection des échantillons										

Tableau 1 : Chronogramme simplifié de CINERGY.

1.2. CADRE GÉOLOGIQUE DE L'ÉTUDE

Pour une synthèse plus détaillée, le lecteur se reportera au rapport géologique de fin de sondage (Bauer et al., 2011).

Le bassin de Rennes est un micro-bassin sédimentaire tertiaire localisé au sud-ouest de Rennes et couvre une partie de cette métropole (Figure 2). La partie centrale, la plus profonde, du bassin recouvre les communes de Bruz et de Chartres-de-Bretagne. Les sédiments du proche sous-sol sont des sables graveleux, des faluns et des calcaires fracturés, qui sont autant d'aquifères exploités pour l'alimentation en eau potable (AEP) depuis les années 1970. On trouve également à l'affleurement, souvent sous une couche de sables pliocènes plus ou moins épaisse, des argiles oligocènes et des altérites de socle.

La structure et le remplissage du bassin sont connus par la géophysique (données, gravimétriques, électriques et sismiques), par les données cartographiques et par les forages. Le forage carotté CDB1 (Figure 1) réalisé dans le cadre du projet CINERGY est le premier à avoir atteint le socle du bassin en son endroit le plus profond (405 m) et le seul à avoir carotté le socle briovérien sur toute l'épaisseur de son profil d'altération (120 m ; Bauer et al., 2011).

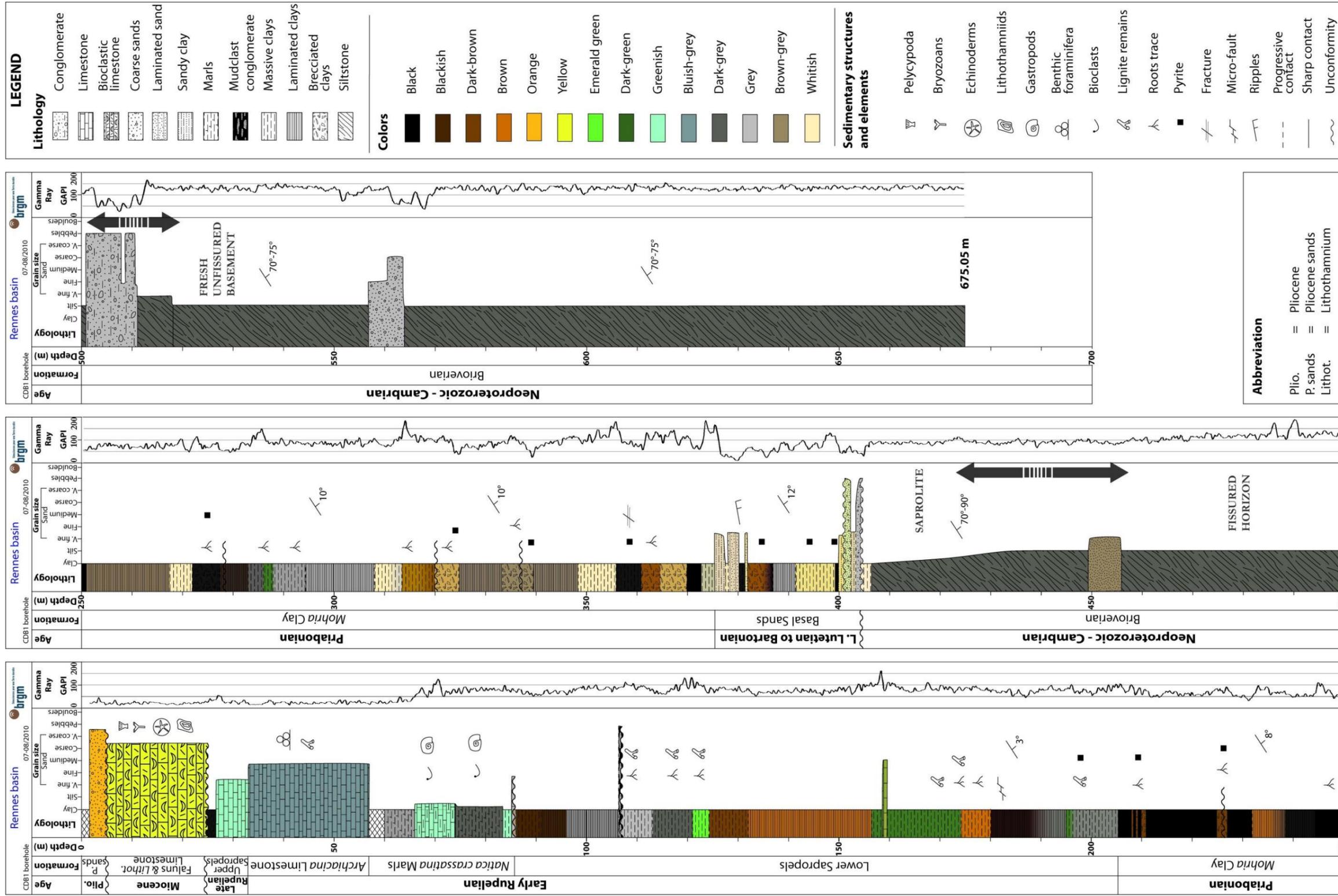


Figure 1 : Log synthétique général du forage CDB1.

2. Études géologiques

2.1. ÉTUDE DU REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DU BASSIN DE RENNES

Cette étude a été menée dans le cadre d'un sujet de recherche de Master2, par Pierre Saint-Marc (Univ. Rennes 1), co-encadré par Hugues Bauer et François Guillocheau. Le texte qui suit est celui du mémoire de Master de P. Saint-Marc (2011).

2.1.1. Introduction

Le Massif armoricain (MA) a longtemps été étudié en tant que témoin de l'orogénèse hercynienne. En effet les principaux terrains qui le composent sont des métasédiments néoprotozoïques et paléozoïques ainsi que des granites hérités des orogénèses cadomienne et hercynienne (e.g. Wyns, 1991). Les conditions paléoenvironnementales et paléoclimatiques du Mésozoïque sont inconnues pour ce qui est du domaine central du Massif armoricain du fait de l'absence de couverture sédimentaire mésozoïque. Cette lacune prêche à penser que le domaine central du Massif armoricain était alors émergé. Le Tertiaire est quant à lui représenté par de petits bassins correspondant à des fossés d'effondrement, principalement localisés à l'ouest de la faille de Quessoy-Nort-sur-Erdre. La couverture gravimétrique du Massif armoricain acquise dans les années 50 révèle l'association de ces petits bassins avec des anomalies gravimétriques légères (Jaeger et Corpel, 1968). Le bassin de Rennes montre l'anomalie légère la plus forte, avec -8.5 mgal au centre du bassin situé à une dizaine de kilomètres au sud-ouest de Rennes. L'épaisseur de ce bassin est alors supposée à 500 mètres à son maximum (Jaeger et Corpel, 1968). Les décennies suivantes ont apporté de nouvelles connaissances sur le bassin, sans toutefois éclaircir totalement ni la nature du remplissage sédimentaire ni son épaisseur réelle, l'investigation par sondage s'étant arrêtée à 140 m de profondeur environ (Ollivier-Pierre *et al.*, 1993). Un nouveau forage carotté a été entrepris en 2010 sous la maîtrise d'ouvrage de la commune de Chartres-de-Bretagne et suivi par le BRGM et l'Université de Rennes 1. Ce forage (CDB1) a mis en évidence que l'épaisseur du bassin, au centre de l'anomalie, est de 405 mètres, c'est le bassin tertiaire le plus profond du domaine émergé armoricain.

Le présent travail vise à reconstituer la stratigraphie et reconstituer l'évolution paléoenvironnementale du bassin de Rennes à partir des carottes et des diagraphies acquises lors du forage. La comparaison des résultats obtenus avec d'autres bassins contemporains de l'Europe de l'Ouest permettra d'élargir la discussion à une échelle régionale et aux variations eustatiques et climatiques globales.

2.1.2. État de l'art – cadre de l'étude

Contexte géologique et climatique à l'échelle du MA et du bassin de Rennes

Depuis le début du Paléocène (65 Ma) et jusqu'au Lutétien supérieur, le Massif armoricain subit une phase de surrection (Brault, 2002) issue de la convergence de l'Afrique vers l'Europe. L'ensemble du MA et du bassin de Londres (bassin de Paris du côté nord de la Manche) se plaçaient à 10° de latitude plus au sud (Ollivier-Pierre et Estéoule-Choux, 1980) ramenant la Bretagne à l'actuel sud de l'Espagne.

Les premiers dépôts localisés sur la bordure atlantique de la partie méridionale du Massif armoricain (Borne *et al.*, 1989) sont datés de l'Yprésien. Ces dépôts de marais lagunaires séparés de la mer par des seuils témoignent de l'aplanissement de cette région alors baignée dans un climat tropical humide. L'Éocène supérieur est préservé dans plusieurs fossés d'effondrement bretons (Thomas, 1999) : bassin de Rennes (fig. 1), Saffré et Campbon. Les dépôts témoignent d'environnements lacustres (Rennes) et d'une tendance générale au confinement des milieux en sédimentation marine entre le Lutétien et le Barthonien (Saffré, Campbon) : présence de saumures. La flore montre une évolution vers un climat plus aride mais tout aussi chaud.

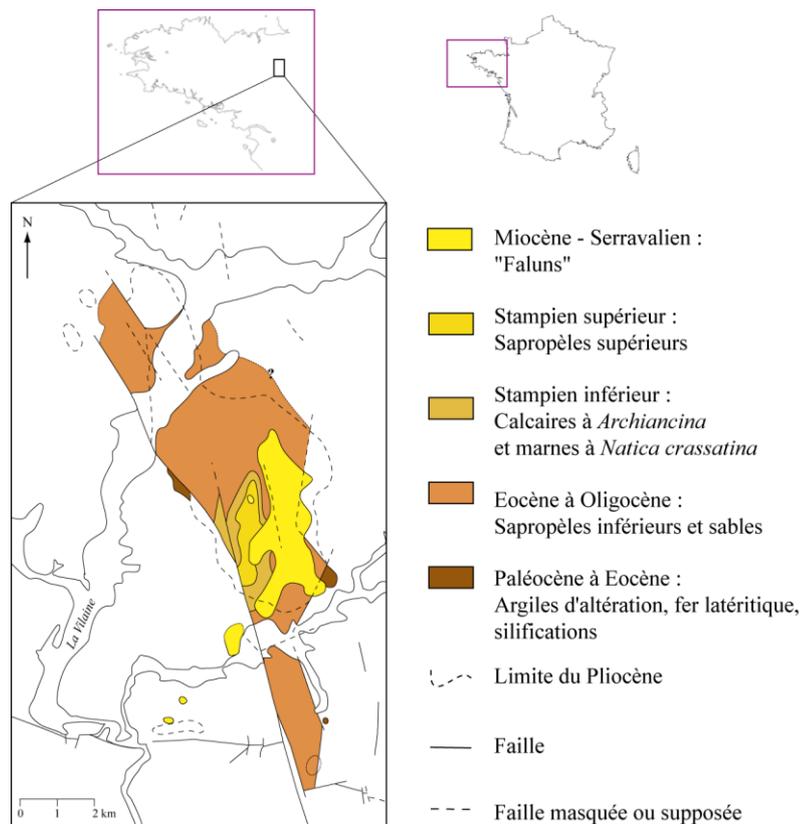


Figure 2 : Situation géographique et Carte géologique des formations cénozoïques du bassin de Rennes (d'après Thomas, 1999).

À la fin de l'Éocène, une grande phase extensive affecte l'Europe de l'Ouest. Elle met en place des systèmes de rifts tels que le Fossé rhénan ou encore les Limagnes. Cette phase d'extension est considérée comme étant contemporaine à celle que connaît la Bretagne pendant cette période (Esteoule-Choux *et al.*, 1988). En effet une phase de distension réactive d'anciens grands décrochements post-stéphaniens (Trautmann *et al.*, 1994), créant ainsi la majorité des bassins tertiaires du Massif armoricain. Il apparaît que les différents bassins oligocènes, situés de part et d'autre de la Manche, s'alignent le long d'accident orientés N-120 N-130 (Ollivier-Pierre *et al.*, 1993).

L'Oligocène marque un profond changement climatique dans l'ouest européen (Ollivier-Pierre *et al.*, 1987) où s'expriment globalement un abaissement de la température et une augmentation de l'aridité. Cependant l'installation de plateformes carbonatées rupéliennes au sud du bassin de Paris et en Bretagne dans lesquelles vivent de grands foraminifères tels que *Praerhapydionina delicata* et *Archiacina armorica* (fig. 2) indiquent que des eaux chaudes ($> 22/23$ °C) recouvrent ces régions (Bignot et Pomerol, 2010).

Une phase d'érosion et une reprise de l'altération affectent le domaine central armoricain à partir du Chattien et se maintient jusqu'à l'arrivée de calcaires bioclastiques et faluns côtiers d'âge Serravallien (Trautmann *et al.*, 1994). L'analyse ^{18}O sur phosphates de poissons indique une température moyenne de 20 ± 2 °C (Lecuyer, 1996), compatible avec un climat sub-tropical. Cette phase est liée à la déformation alpine principale. Une nouvelle phase de surrection a lieu au Miocène supérieur, la mer ne revenant qu'au Pliocène supérieur avec les dépôts des sables reuvériens ; l'ensemble du MA est émergé pendant le Quaternaire.

Le bassin de Rennes est un fossé d'effondrement formé au Tertiaire localisé à l'est du Massif armoricain. Il fait partie d'un ensemble de près de 40 bassins tertiaires qui parsèment le MA. Le bassin de Rennes, ainsi que la majorité de ses homologues, s'est formé lors d'une distension généralisée (Ollivier-Pierre *et al.*, 1993) affectant l'Europe de l'Ouest au cours du Tertiaire. Ce bassin s'est développé le long d'une faille orientée N 150, dite de Pont-Péan, longtemps exploitée pour ses ressources minières (Pb-Zn-Ag).

Une première campagne de forage a eu lieu en 1970 dans ce bassin au cœur même de l'anomalie légère de -8,5 mgal. Ce sondage faisait alors état de 140 m de forage carotté sans avoir atteint le socle. Les derniers terrains atteints appartiennent à la formation des sapropèles inférieurs du Rupélien. Cependant, comme il a été décrit précédemment, des dépôts éocènes subaffleurements sont rapportés dans ce bassin (Ollivier-Pierre *et al.*, 1993 ; Thomas, 1999).

Une campagne sismique réalisée en 2000 par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) s'est inscrite dans la reconnaissance de la structure du bassin de Rennes (fig. 1). Cette étude devait déterminer la profondeur et la géométrie du bassin par sismique réflexion haute résolution. Le profil sismique dévoile un bassin dissymétrique d'une profondeur de 0,8 à 1 s (temps double). Son interprétation par Wyns *et al.* (2002) suggère un remplissage triphasé du bassin d'une profondeur alors estimée entre 390 et 640 m.

Données sur le climat global

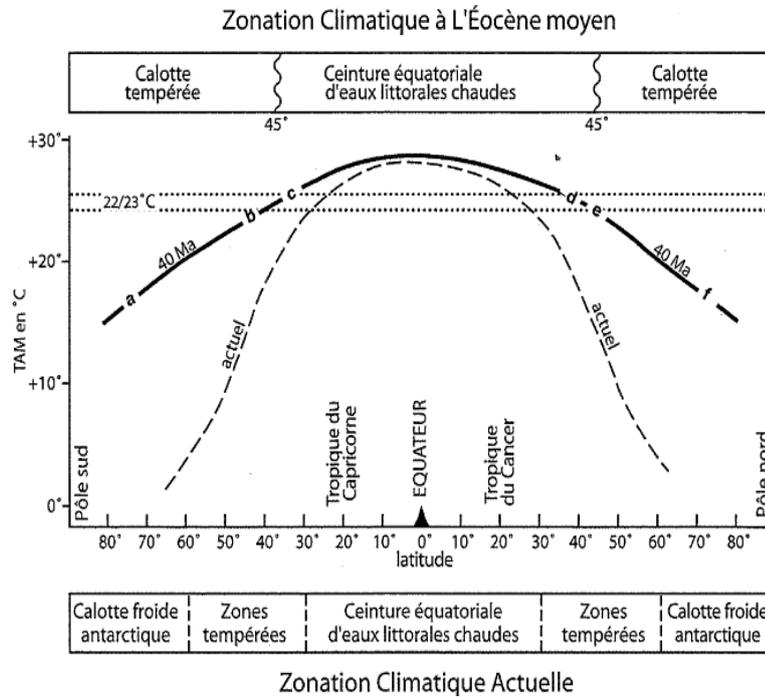


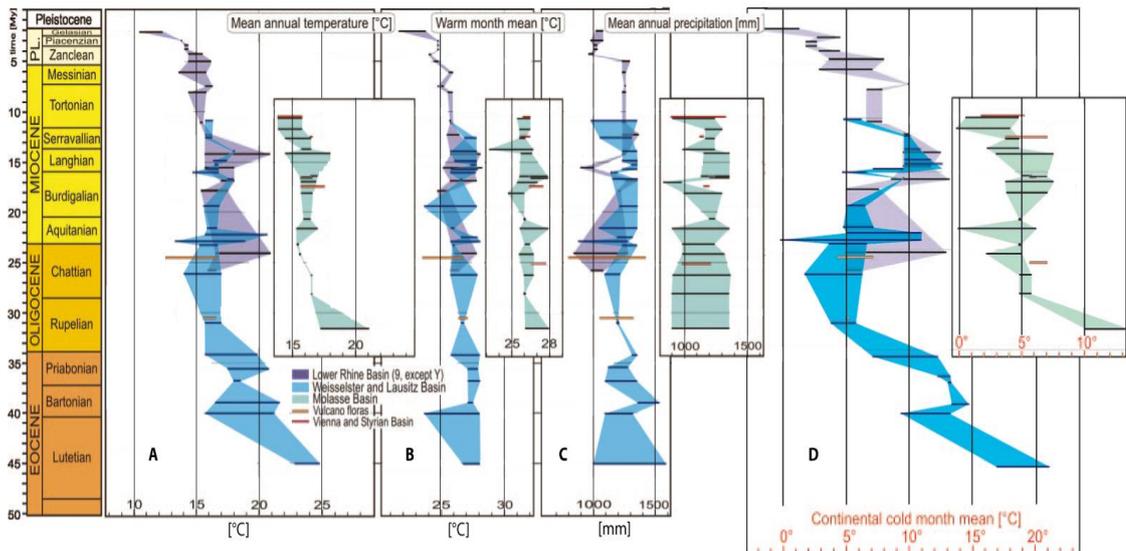
Figure 3 : Distribution latitudinale des températures moyennes annuelles (TAM) à la surface du globe de nos jours (ACTUEL) et à l'Éocène moyen (40 Ma) et zonations climatiques correspondantes (Bignot et Pomerol, 2010).

Le refroidissement global qui affecte l'ensemble de la planète au passage de l'Éocène à l'Oligocène se traduit par un rétrécissement de la ceinture équatoriale d'eaux superficielles chaudes ainsi que par un net refroidissement des températures aux niveaux des hautes latitudes. C'est ce qu'ont pu démontrer Bignot *et al.* (2010) au cours de l'Éocène à partir de l'étude de grands foraminifères. Cette faune ne supportant pas des températures en deçà de 22/23 °C, elle offre un bon indicateur thermique. En fonction de la paléogéographie de l'Éocène, il est possible de reconstituer les latitudes auxquelles vivait cette faune. Ainsi, il a été démontré que la limite de la ceinture équatoriale d'eaux littorales chaudes (isotherme 22/23 °C) était dilatée de 1 500 km à la fois en direction du nord et aussi du sud (fig. 2).

La limite Éocène/Oligocène symbolise un changement majeur dans la dynamique du climat. En effet cette période marque l'installation de l'« Antarctic Circumpolar Current » (ACC) (Eagles *et al.*, 2006 ; Lagabrielle *et al.*, 2009). Cette circulation océanique profonde autour de l'Antarctique fait suite à la séparation de l'Amérique du Sud avec l'Antarctique créant ainsi le passage de Drake. Ce phénomène a pour effet de contribuer à la formation d'une calotte au niveau du pôle sud (~34 Ma) et induit un refroidissement global à l'échelle de la Terre. Après un léger réchauffement au Miocène inférieur et moyen, le refroidissement global reprend son cours à partir du Serravallien et s'accélère avec la mise en place de la calotte arctique au Pliocène (Zachos *et al.*, 2001).

Données sur le climat ouest-européen

L'enregistrement sédimentaire continental de l'Europe fournit relativement peu d'information sur le climat. Les travaux effectués par Mosbrugger (2005) mettent en avant quelques chiffres qui quantifient les paléo-températures et les paléo-précipitations à partir des bassins Rhénan, Weissenster (Allemagne) et molassique du nord des Alpes (Allemagne) (fig.3).



Alors que les températures annuelles les plus chaudes et les précipitations annuelles évoluent peu au cours de l'Éocène et de l'Oligocène, les données indiquent de grandes variations des températures sur les mois les plus froids au cours d'une année. Le refroidissement global de l'Éocène/Oligocène est principalement caractérisé en Europe par une accentuation des variations saisonnières. En effet, le Lutétien du bassin de Weissenster (fig. 3) est marqué par des températures voisinant les 23-25 °C tout au long de l'année puis le climat évolue au Rupélien avec des températures du même ordre pour les saisons les plus chaudes mais avec des températures au minimum 10 °C moindre pour le mois le plus froid.

Au cours de l'Éocène, le bassin de Paris subit un climat chaud plus ou moins humide. De grands mammifères essentiellement herbivores témoignent d'un paysage de type savane au Lutétien (Blondeau *et al.*, 1980), alors que la microflore du Bartonien décrite par J.J. Châteauneuf (Cavelier *et al.*, 1980) indique un climat certes chaud mais humide. L'Éocène terminal s'accompagne d'un net refroidissement (Ollivier-Pierre *et al.*, 1987) dans le bassin de Paris avec la disparition de flores tropicales avant un

retour d'un climat chaud à l'Oligocène inférieur. Ollivier-Pierre (1987) conclut que l'Angleterre est pour sa part dominée par un climat chaud et humide durant la partie supérieure de l'Éocène, le sommet étant marqué par un fort refroidissement où ne subsiste qu'une espèce subtropicale (*Symplocos*).

2.1.3. Matériel et méthodes

Matériel

- Le forage CDB1

L'implantation du forage a été guidée par des critères scientifiques (proximité maximale du centre de l'anomalie gravimétrique, proximité du profil sismique et du sondage de 1970), foncier (terrain propriété de la commune) et pratique (accès route, fourniture énergie et eau). Le site finalement choisi se situe à proximité de l'intersection entre la D44 et la route de la Prévalaye (fig. 4). Il se positionne à 1 km au sud du profil sismique et correspond à la zone évaluée comme étant la plus profonde du bassin lorsqu'il est projeté parallèlement aux failles le bordant.

Le forage réalisé par la société COFOR aura duré deux mois avant d'atteindre la profondeur de 675,05 m. La nécessité de stabiliser l'ouvrage et de l'isoler des aquifères superficiels a impliqué une première phase de foration en rotary (forage destructif) sur les 66 premiers mètres. La suite du forage a été entièrement carottée en diamètre PQ (carotte de 85 mm), diamètre adapté aux besoins d'investigations géologiques.

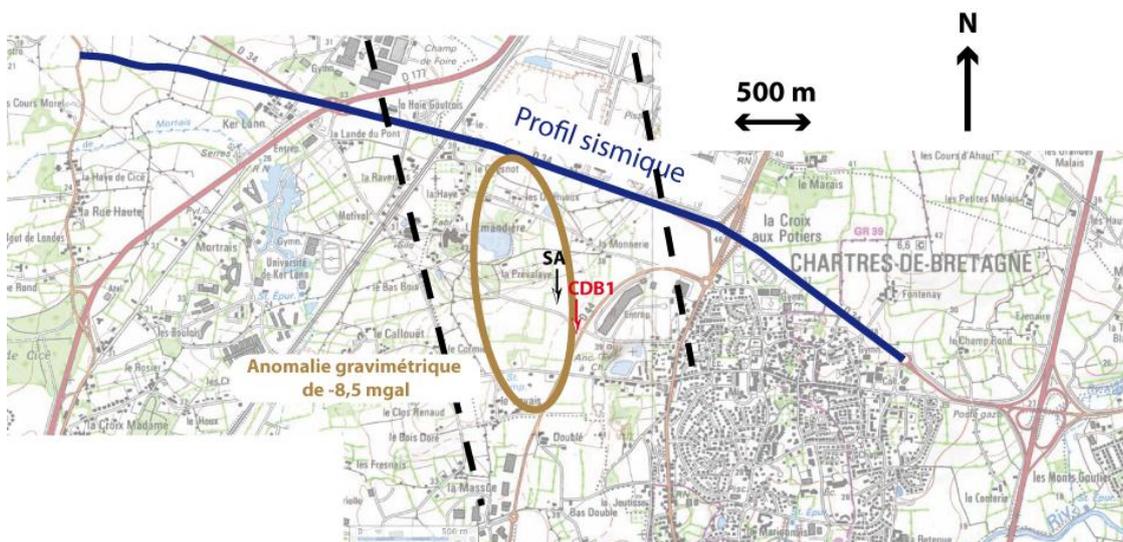


Figure 5 : Localisation du profil sismique et de l'anomalie gravimétrique aux environs de Chartres-de-Bretagne.

SA : sondage de 140 m décrit dans les travaux d'Ollivier-Pierre (1993) ; CDB1 : sondage de 675 m ; - - - Faille

- **Les scans de carottes**

La sauvegarde de l'aspect visuel des carottes, fraîchement récupérées, était primordiale. En effet, leur exposition à l'atmosphère ambiante a entraîné une altération rapide: oxydation, gonflement des argiles, changement de teintes. Pour pallier cet inconvénient, et après que les carottes ont été photographiées en caisse, les différents tronçons de carottes ont été placés sur un banc photo (lorsque leur état le permettait) qui permet d'enregistrer le déroulé des carottes (scan à 360°). Une fois les images orientées et calées, les photos de tronçon peuvent être raccordées les unes aux autres à l'aide d'un logiciel.

- **Les outils diagraphiques**

Trois opérations de diagraphies de forage ont eu lieu durant le chantier. Des mesures classiques ont été utilisées pour les relevés diagraphiques ainsi que d'autres moins conventionnelles :

- Gamma-Ray naturel total : mesure de la radioactivité naturelle ;
- densité γ - γ ;
- porosité neutron : mise en évidence de l'hydrogène dans le milieu en considérant qu'il est contenu dans l'eau (porosité). Cependant, ce signal peut être perturbé dans des formations telles que le gypse ou les argiles qui contiennent des minéraux riches en hydrogènes ;
- température et conductivité : mesures sur la boue de forage en fonction de la profondeur ;
- résistivité électrique : mesure de la résistivité apparente du terrain qui dépend de plusieurs paramètres : saturation, porosité, conductivité du fluide... ;
- conductivité électrique : mesure de la conductivité apparente des formations fonction de leur porosité, de leur saturation et de la conductivité des fluides interstitiels ;
- trajectométrie magnétométrique : mesure de la déviation du forage ;
- imagerie de paroi acoustique ;
- sonique : mesure des vitesses des ondes P et S dans les formations, fonction de la lithologie, de la porosité, de leur structure, de l'état de fracturation...

Méthodologie

- **Lever (log) des carottes & cuttings**

L'échantillonnage des cuttings des 66 premiers mètres a été défini avec un pas de un prélèvement tous les 3 mètres. Une partie des échantillons récupérés est ensuite tamisée par voie sèche à 2 mm ; 1,25 mm ; 0,8 mm ; 0,5 mm et 63 μ m. Chaque tamis est plongé dans un bac de bleu de méthylène avant son utilisation afin de marquer les grains pouvant être coincés dans les mailles. Chaque refus de tamis est ensuite récupéré et placé dans différents piluliers avant d'être analysé au microscope

binoculaire. Au total, ce sont 22 cuttings qui ont été tamisés et analysés selon cinq fractions granulométriques différentes : la fraction < 63 µm n'étant pas étudiée à la loupe binoculaire.

À partir de 66 mètres, la phase destructive fit place à celle carottée. À sa sortie, chaque carotte était mesurée afin de calculer le taux de récupération par rapport aux mesures fournies par les foreurs, puis nettoyée. Les carottes étaient ensuite décrites une première fois sur le chantier au 1/20^e puis, après avoir été photographiées et échantillonnées, mises en caisse. Ce n'est que 7 mois après, dans le cadre de ce stage, que les caisses ont été à nouveau ouvertes et les carottes décrites une deuxième fois à la même échelle. En effet, lors de la description effectuée sur le chantier, le rythme à tenir pouvait entraîner quelques lacunes dans la description en détail des carottes. De plus, le recul pris, une fois toutes les carottes sorties, amène à une meilleure appréciation des faciès. Toutefois, l'altération a eu un impact non négligeable sur les carottes après ces quelques mois. Les couleurs se sont globalement éclaircies (fig. 5) et l'épigénie de la pyrite en mélantérite (sulfate hydraté de fer) a conduit fréquemment à l'éclatement des carottes.



Figure 6 : Mise en évidence de l'altération des carottes suite au contact avec l'air.
Photos prises au moment de l'extraction (à gauche) et 7 mois après (à droite).

- **Description et lever standards BRGM**

Dans le cadre de ce stage, l'intérêt se porte essentiellement sur la partie tertiaire du forage. Le log est focalisé sur les 66 m de cuttings et les 339 m de carottes issues de la formation cénozoïque. En ce qui concerne les carottes, il fallait avoir une vue d'ensemble, la plus large possible, afin de les décrire de la façon la plus juste. Ainsi, le lever s'est fait par lots de 15 caisses (~ 40m de carottes) et une première description synthétique est effectuée et levée au 1/500. Par la suite, la carotte est minutieusement décrite et reportée sur le log au 1/20. Le log a été construit en fonction de la nature

lithologique et granulométrique/texturale des carottes. Cette description nécessite différents outils afin de tester et mesurer les propriétés des carottes :

- acide chlorhydrique : mise en évidence des carbonates ;
- loupe à grossissement x20 ;
- niveau électronique : mesure des pendages des lamines et des failles ;
- charte Munsell : cette charte est un référentiel international qui codifie et mesure les couleurs. Elle propose en effet un nuancier de couleur permettant de les classer en fonction de trois critères : la teinte de base (Hue), la clarté (value) et la saturation (chroma). L'utilisation de cette charte, habituellement réservée pour les sols, a été jugée pertinente pour ce forage étant donné que le bassin est principalement composé d'argiles très nuancées.

• Échantillonnage

La partie échantillonnage s'est faite en deux temps. Un premier lot a été prélevé directement sur le chantier de forage et un deuxième lors de ce travail dans les locaux du BRGM à Orléans, où les carottes sont entreposées. Les échantillons ont été conditionnés selon le même procédé dans les deux cas. De façon régulière et pertinente un échantillon a été prélevé au minimum tous les 70 cm et attribué à son analyse minéralogique des argiles (RX) ou palynologique et biostratigraphique ou encore à sa préparation en lame mince. Une fois l'échantillon ciblé, le tronçon de carotte concerné est scié en deux dans le sens de la longueur. Une de ces deux moitiés retourne dans la caisse en guise de témoin et l'autre est à nouveau sciée en deux. Les échantillons sont conditionnés dans des sacs plastiques individuels thermoscellés et sous atmosphère azotée afin d'éviter tout risque d'altération par oxydation. À l'issue de cette entreprise, ce ne sont pas moins de 1 173 échantillons qui ont été prélevés.

• Analyses

Les différentes fractions des cuttings ont été observées et décrites en fonction de la lithologie et de la minéralogie des grains, ainsi qu'en fonction de leur contenu fossilifère, à l'aide d'une loupe binoculaire. Les lames minces, issues de l'échantillonnage des carottes, sont analysées en microscopie optique. Si la nature et la composition chimique des microfaciès sont douteuses, l'analyse des lames minces est approfondie avec l'appui d'un microscope électronique à balayage (MEB). Ainsi, les microfaciès sont appréciés autrement et surtout cet instrument permet d'effectuer des analyses ponctuelles de la composition chimique des lames minces.

L'étude micropaléontologique et palynologique du forage est utilisée à des fins de datation par biostratigraphie ainsi que pour les interprétations paléoenvironnementales. Parmi celles-ci, la palynologie constitue une aide précieuse tant en interprétation paléoenvironnementale que stratigraphique compte tenu des environnements propices à la préservation des pollens.

La nature du cortège argileux a été analysée par diffraction des rayons X (DRX). Environ 90 échantillons ont été analysés, régulièrement espacés entre 67 et 400 m. L'étude de ces cortèges permet d'affiner la lecture des paléoenvironnements et des séquences sédimentaires. Des changements de sources ou des variations paléoclimatiques peuvent également être déduites des variations de ces cortèges. Il faut cependant garder à l'esprit qu'il s'agit de semi-quantifications, on considère généralement les mesures avec un degré d'incertitude de 5 %.

Un spectromètre de fluorescence X portatif a été utilisé dans le but de déterminer rapidement les éléments chimiques en présence. Cet appareil d'analyse non destructive, le Niton, est principalement destiné aux analyses directes sur le sol. Le Niton est cependant limité dans le sens où il ne reconnaît pas les éléments les plus légers du tableau périodique (C, O, N, Na...). Il a été utilisé sur des zones particulières, pour essayer d'en préciser la minéralogie ou la teneur en certains éléments traces.

- **Traitement des données**

Les principales données diagraphiques retenues dans l'étude du forage sont le gamma naturel total (GR), la résistivité électrique, le sonique (Δt), la porosité neutron (Nphi) et la densité. Les outils densité et porosité neutron sont souvent représentés par un « cross plot ». Cette représentation offre un bon indice sur la nature lithologique. L'échelle de calibration choisie pour cette représentation est le calcaire : 0 % Nphi correspond à 2,70 g/cm³ de densité.

Afin de traiter numériquement les données issues du log lithologique, elles ont été saisies dans un tableur Excel. Ainsi le log a été différencié en fonction d'une première lithologie d'aspect général, d'une lithologie, nommée secondaire, précisant le faciès, de sa granulométrie et texture, des structures sédimentaires (microfailles, slump...) et enfin en fonction des éléments sédimentaires (bioclastes, lignite...).

Une fois les données diagraphiques et lithologiques traitées, elles sont associées à l'aide du logiciel WellCAD. Ce logiciel a pour avantage de combiner toutes les données du forage en fonction de la profondeur ce qui permet d'avoir un visuel global à la fois sur le log et les diagraphies. De plus, les photos issues du banc photographique (cf. partie 3.1.2) ont pu être incorporées à cette vue d'ensemble grâce à ce logiciel. Une fois finalisé, le log détaillé du forage a été enregistré sous plusieurs échelles : 1/20, 1/100, 1/500 et 1/1 150.

2.1.4. Résultats

Le forage, effectué dans le bassin de Rennes est le plus profond jamais réalisé dans le MA (675 m). Ce bassin avait été auparavant foré par un premier forage ne descendant pas en dessous des 140 mètres. Les résultats à venir présentent la totalité du remplissage sédimentaire du bassin de Rennes, récemment encore inconnu, situé au cœur de l'anomalie gravimétrique légère.

Litho- et bio-stratigraphie du bassin de Rennes

• Litho-stratigraphie du bassin de Rennes

Cette partie expose essentiellement les résultats de la partie récente du bassin de Rennes située au-dessus du socle. Le sondage CDB1 a recoupé le contact du bassin de Rennes avec le socle briovérien à 404,92 mètres avant de traverser le socle sur près de 270 mètres. L'ensemble du remplissage sédimentaire peut être divisé en trois unités principales : 1) une unité carbonatée dans les 85 premiers mètres, 2) une deuxième unité, majoritaire, composée de 290 mètres d'argiles et enfin 3) une unité sablo-argileuse de 30 mètres comprenant un conglomérat à la base. L'ensemble du remplissage de ce bassin a été séparé en différentes formations en fonction de leur lithologie, de leur âge et en fonction de celles préexistantes, déjà décrites par Ollivier-Pierre *et al.* (1993) lors du premier forage du bassin de Rennes. Voici comment se découpent les différentes formations (fig. 6) :

- Formation basale sablo-argileuse (404,91 – 375,4 m),
- Argiles à *Mohria* (375,2 – 195,26 m),
- Sapropèles inférieurs (195,26 – 85,14 m),
- Marnes à *Natica crassatina* (85,14 – 57 m),
- Calcaires à *Archiacina armorica* (57 – 33 m),
- Calcaires azoïques (33 – 26,5 m),
- Sapropèles supérieurs (26,5 – 25 m),
- Faluns et calcaires à lithothamnium (25 – 5 m),
- Sables pliocènes (5 – 1,5 m).

La partie sommitale du socle (405 m) montre une altération totale de la roche où aucune structure n'est visible (allotérites). Le contact avec le socle à 404,92 mètres est net et érosif avec un pendage de 22°. Les dépôts tertiaires du bassin se distinguent par différents faciès décrits dans le Tableau 2.

La Formation basale argilo-sableuse de ce bassin est caractérisée par un conglomérat granodécroissant (Gcm) à base érosive qui s'étend sur 50 cm. Cette fine semelle grossière laisse rapidement place à un grès (Sg) contenant des éléments très évolués (quartz) et une matrice argilo-sableuse. Un deuxième conglomérat apparaît de 402,4 à 401,4 m au sommet érosif est marqué par une imprégnation pyriteuse. De nouveaux sables (Sf) surmontent ce conglomérat et leur granulométrie s'affine jusqu'à 400 m avant d'arriver dans un niveau argileux noir (Fs). Un cortège argileux succède à ce dernier faciès d'aspect charbonneux et très léger (Fs) dévoilant une alternance entre des argiles claires et massives (Fmc), laminées (Flc, Fl) et hétérogènes (Fb, Fs) jusqu'à 382 mètres. Les argiles laminées ont un pendage de 12° (390 m). Les sables reprennent jusqu'à la fin de cette formation dite sablo-argileuse (375,4 m) dévoilant des sables meubles (Sf, Sfl) (fig. 8) azoïques et fossilifères (bivalves, gastéropodes).

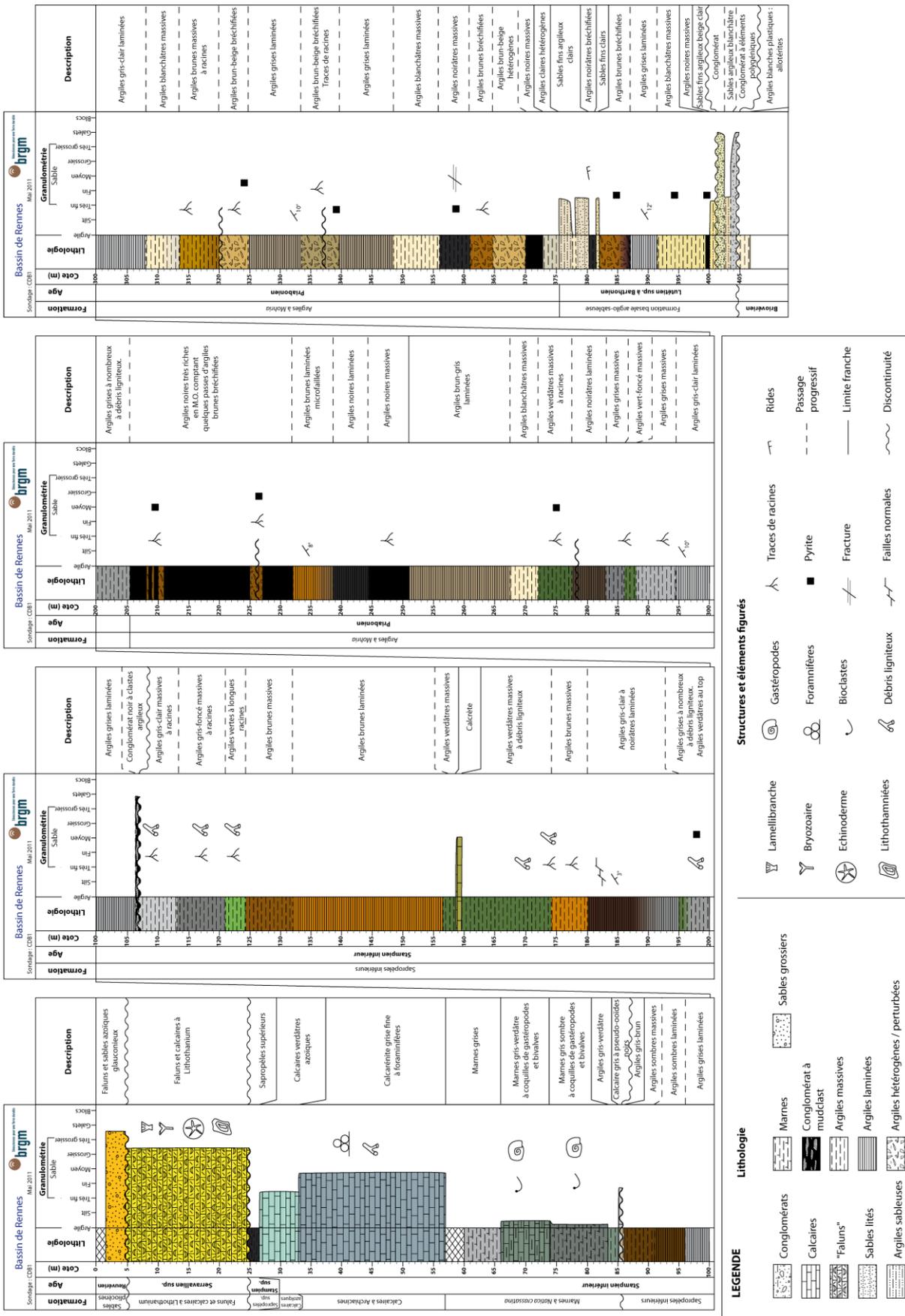


Figure 7 : Log synthétique du remplissage sédimentaire du bassin de Rennes.

Code	Lithofaciès	Structures et éléments sédimentaires	Interprétations
Calcaires & marnes			
Cb	Calcaires bioclastiques	Lamellibranches, bryozoaires, échinodermes lithothamnium	Marin infralittoral
Cf	Calcaires à foraminifères	Foraminifères (<i>Pénéroplis et Miliolites</i>)	Marin infralittoral
Cr	Calcaire fibro-radié		Calcrète
Cm	Calcaire marneux		Marin très côtier
Md	Marnes - mudstone		Marin très côtier
Mb	Marnes à bioclastes	Gastéropodes, lamellibranches	Lagune, milieu confiné
Fb	Argiles noires à bioclastes	Fantômes d'ostracodes et de gastéropodes	Fond de lac anoxique
Argiles			
Fic	Argiles à fines lamines contrastées	Laminations horizontales	Fond de lac
Fl	Argiles laminées peu contrastées	Laminations horizontales	Lacustre intermédiaire
Fib	Argiles laminées à bandeaux noirs	Laminations horizontales	Lacustre intermédiaire
Fs	Argiles sapropéliques, charbonneuses		Bordure de lac ou baie confinée
Fmc	Argiles massives gris-blanc		Plaine d'inondation
Fg	Argiles vertes de type pseudogley (sol hydromorphe)	Traces de racines, lignite	Bordure de lac, palustre
Fb	Argiles brun-noir	Bréchifications	Bordure de lac
Sables & Grès			
Sf	Sable fin	Massif, pas de structures visibles	Epannage sableux marin?
Sfl	Sable fins lités	Lamination horizontales. Rides à la base	Dépôts fluviaux
Sm	Sable moyen à grossier		Sables d'épannage continentaux (Guillocheau <i>et al.</i> 2003)
Sg	Grès		Epannage sableux
Conglomérats			
Ga	Conglomérat à galets mous		Bréchification in situ
Gcm	Conglomérat claste-porté Galets polygéniques		Lag conglomératique

Tableau 2 : Tableau de description des lithofaciès associés à leurs structures et éléments sédimentaires.



Figure 8 : Cortège sableux supérieur (380 m) à rides obliques en contact avec des argiles sableuses.



Figure 9 : Calcaire à éléments fibroradiés surmonté par des argiles massives verdâtres (159 m).

Cette formation fait place à des dépôts presque exclusivement argileux sur près de 300 m. La Formation des Argiles à *Mohria* montre dans sa partie inférieure une alternance entre des argiles souvent hétérogènes (Fb) et massives (Fmc). Les premiers faciès véritablement laminés de cette formation apparaissent à 348,1 m avec un pendage de 12°. Ces faciès alternent jusqu'à 317 m avec des argiles hétérogènes bréchifiées contenant quelques rares terriers. La suite de la Formation à *Mohria* montre

jusqu'à son sommet des alternances entre des argiles laminées (Flc, Fl, Flb), des argiles massives (Fmc, Fs, Fg, Fb) pouvant contenir des traces de racines et des argiles bréchifiées. Il faut noter que la partie supérieure de cette formation montre des argiles particulièrement riches en matière organique (MO) sur plus de 25 m, sortes de lignites à forte odeur d'huile au moment de leur extraction.

À partir de 205 m, la base supposée des sapropèles inférieurs montrent des argiles laminées (Flc, Fl, Flb) puis des argiles massives verdâtres (Fg) s'éclaircissant vers 161 m et faisant place à un calcaire à 159,5 m. Ce calcaire (Cr), de 60 cm d'épaisseur, montre des contacts irréguliers et diffus avec des argiles verdâtres encaissantes (fig. 9). Il s'agit d'un calcaire totalement cristallin, à structures en rosettes de calcite fibroradiées (2 mm) recoupés par un faisceau irrégulier de microfissures remplies d'oxydes sombres. La même succession d'argiles se répète au-dessus des argiles verdâtres et se termine par un conglomérat noir à *mudclasts* (Ga) à 106,8 m. En effet, ce conglomérat développe des éléments argileux arrondis et des traces de racines qui vont perforer de façon significative les argiles claires sous-jacentes. Après ce conglomérat, les argiles laminées (Fl) et massives (Fmc) reprennent et font place à 85 m à un calcaire à pseudo-ooïdes noirs à base érosive. La base de ce calcaire marque également la base de la formation des marnes à *Natica crassatina*. Cette formation marque le début des grands dépôts carbonatés du bassin de Rennes et montre des alternances entre des argiles noires plus ou moins fossilifères pouvant contenir des gastéropodes (Fb), des marnes (Mb) renfermant de nombreux lamellibranches et gros gastéropodes (*Ampullinopsis crassatina* anciennement dénommés *Natica crassatina*), des argiles verdâtres (Fg) et des calcaires (Cm). Ces alternances sont visibles jusqu'à 66 m où la phase de forage en mode carotté a débuté. La suite de la formation, déduite par les cuttings, est dominée par des marnes (Md) jusqu'à 57 m. Une calcarénite fine à foraminifère (*Pénéroplis*, Miliolés) (Cf) indique que la formation des calcaires à *Archiacina armorica* se trouve entre 57 et 33 m. Elle est surmontée par 6,5 m de calcaire gris-vert azoïque puis par 1,5 m d'argiles sapropéliques. De 25 à 5 m, se trouvent les calcaires et faluns à lithothamnium (Cb) où une grande diversité fossilifère est retrouvée (lithothamnium, bryozoaires, échinidés, lamellibranches). Enfin, le bassin de Rennes se termine par la formation des sables pliocènes (Sm) dits « Redoniens » composés essentiellement de quartz filoniens.

- **Calage bio-stratigraphique : apport de la palynologie et de la micro-paléontologie**

La grande épaisseur du cortège argileux du bassin de Rennes offre peu de place aux macrofossiles malgré quelques rares niveaux d'argiles noires à « cupules » blanches, vestiges de restes d'ostracodes et de gastéropodes (Fb). C'est donc à l'aide de l'étude palynologique effectuée par J.J Châteauneuf et ERADATA (2011) que la datation des formations a pu être établie (Figure 10).

Lorsque les marqueurs stratigraphiques sont absents, c'est l'association pollinique et ses indications paléoenvironnementales qui ont permis d'élaborer la stratigraphie. En effet, le passage au Priabonien supérieur est déduit d'une première augmentation du pourcentage de Pinacées. Il en est de même pour le passage Éocène-Oligocène où

une deuxième augmentation des coniférales est observée ainsi qu'une présence d'herbacées plus variées.

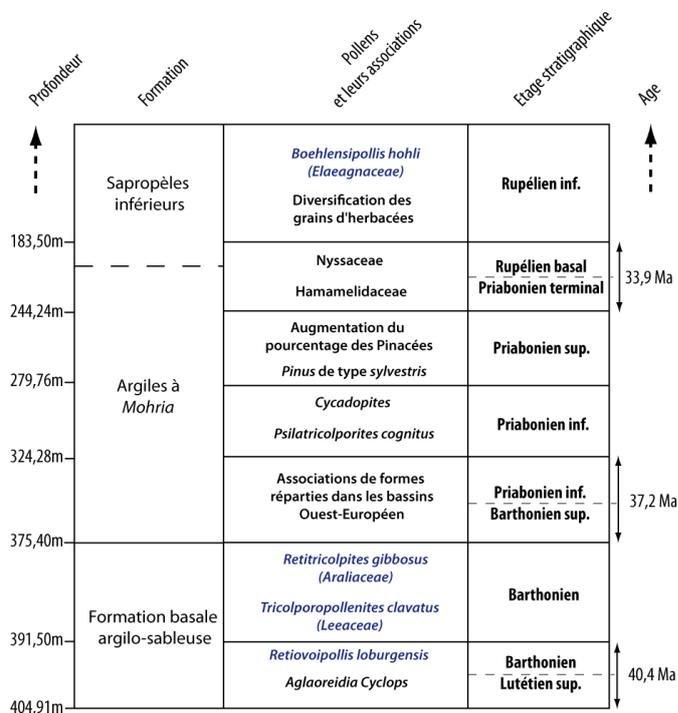


Figure 10 : Répartition des pollens et marqueurs stratigraphiques (bleu) du forage CDB1 entre 405 m et 71 m.



Figure 11 : Gastéropode (*Ampullinopsis crassatina*) de la formation des marnes à Natica à 75,37 m.

Les premiers macrofossiles se situent au-dessus du calcaire à pseudo-ooïdes noirs (85 m) dans la formation dite des marnes à *Natica crassatina*. Ces sédiments montrent principalement des gastéropodes, pouvant atteindre 3 cm (*Ampullinopsis crassatina*, fig. 11) principaux marqueurs de l'Oligocène inférieur, ainsi que des bivalves et des foraminifères benthiques. Ces associations sont très caractéristiques du Rupélien et perdurent jusqu'à 66 m (début du forage carotté). Le Rupélien est reconnu dans les cuttings des calcaires à *Archiacines* par les associations des foraminifères benthiques littoraux.

Minéralogie des cortèges argileux et diagaphies

Les analyses minéralogiques aux RX révèlent 4 types de minéraux constituant les cortèges argileux des formations étudiées : la kaolinite, largement majoritaire, l'illite-mica, les interstratifiés smectite-chlorite et du talc anecdotique (fig. 12). L'évolution verticale de ces cortèges fait apparaître au premier ordre deux types de cortèges : un premier assemblage associant la kaolinite et l'illite-mica dans une proportion moyenne 90-10, un second assemblage, apparaissant vers 193 m, associant la kaolinite, l'illite-mica et les interstratifiés smectite-chlorite, dans des proportions très variables, notamment entre la kaolinite, toujours majoritaire (60 % en moyenne) et les interstratifiés (30 % en moyenne).

Les analyses diagaphiques (fig. 13) permettent d'appréhender la lithologie du bassin par la lecture des signaux. Cependant, ces analyses ont révélé que l'ensemble de la partie tertiaire du forage était irrégulièrement cavée. Ceci affecte considérablement les enregistrements jusqu'à les rendre parfois inutilisables. Ainsi le « quick-look » entre la porosité neutron et la densité est inexploitable du fait d'un cavage trop important. Le Gamma-Ray (GR), la résistivité et le sonique s'accordent sur des pics communs à 69 m et 72 m signalisant les calcaires des marnes à *Natica*. Par ailleurs, il est possible de remarquer que la base de cette formation, marquée par un calcaire à ooïdes noirs à 85 m, ne donne aucun signal diagaphique significatif. Le pic le plus significatif dans ces diagaphies, et particulièrement porté par le sonique, est localisé à 159 m de profondeur dévoilant ainsi le banc de calcaire à structure fibroradié isolé dans la masse argileuse. À partir de 268 m, le GR devient plus variable malgré l'omniprésence argileuse et peut amener à la lecture de cyclicités.

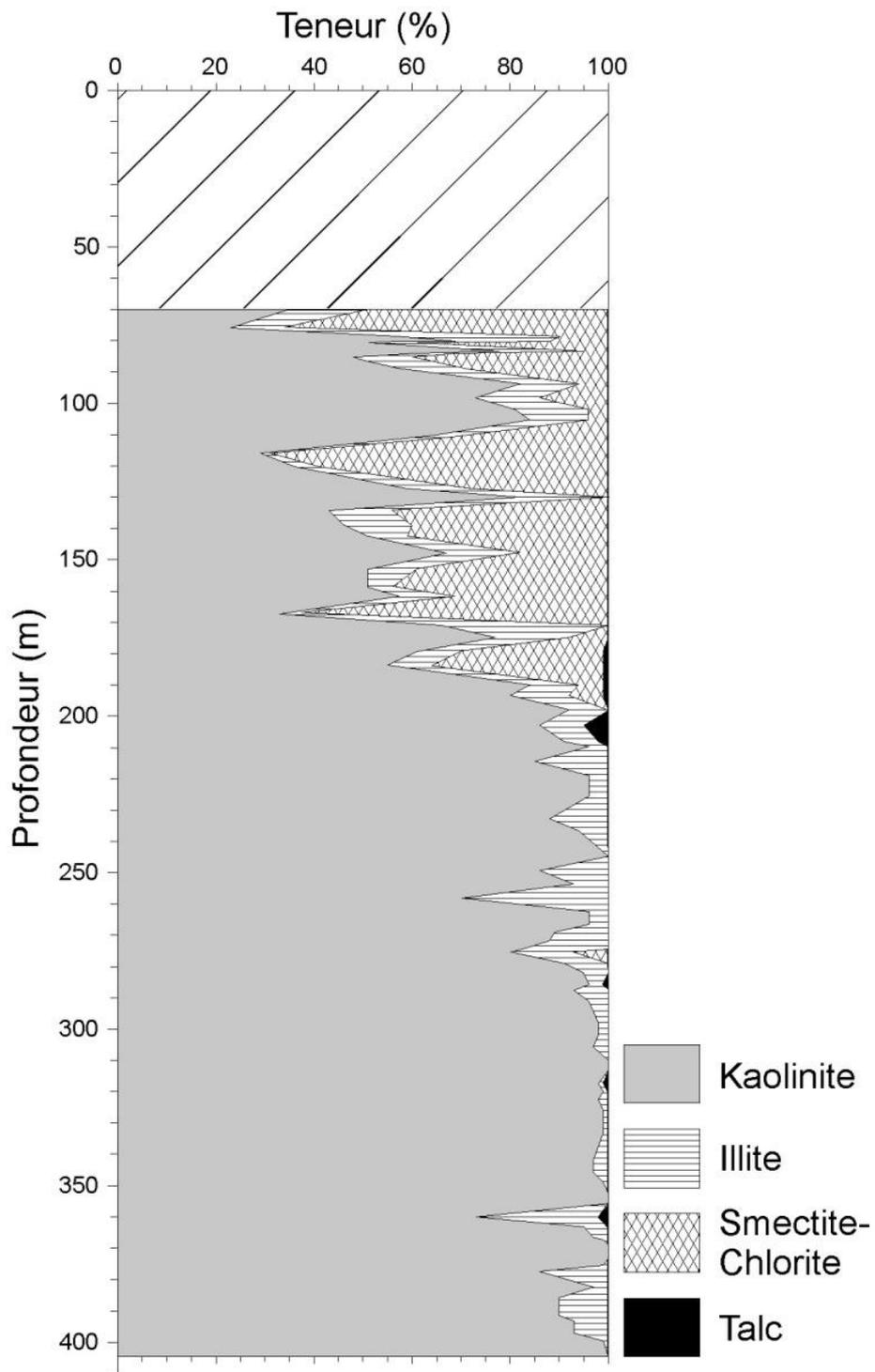


Figure 12 : Proportion (en %) des quatre types d'argiles reconnues dans le forage CDB1 par analyse de la diffraction des rayons X (DRX).

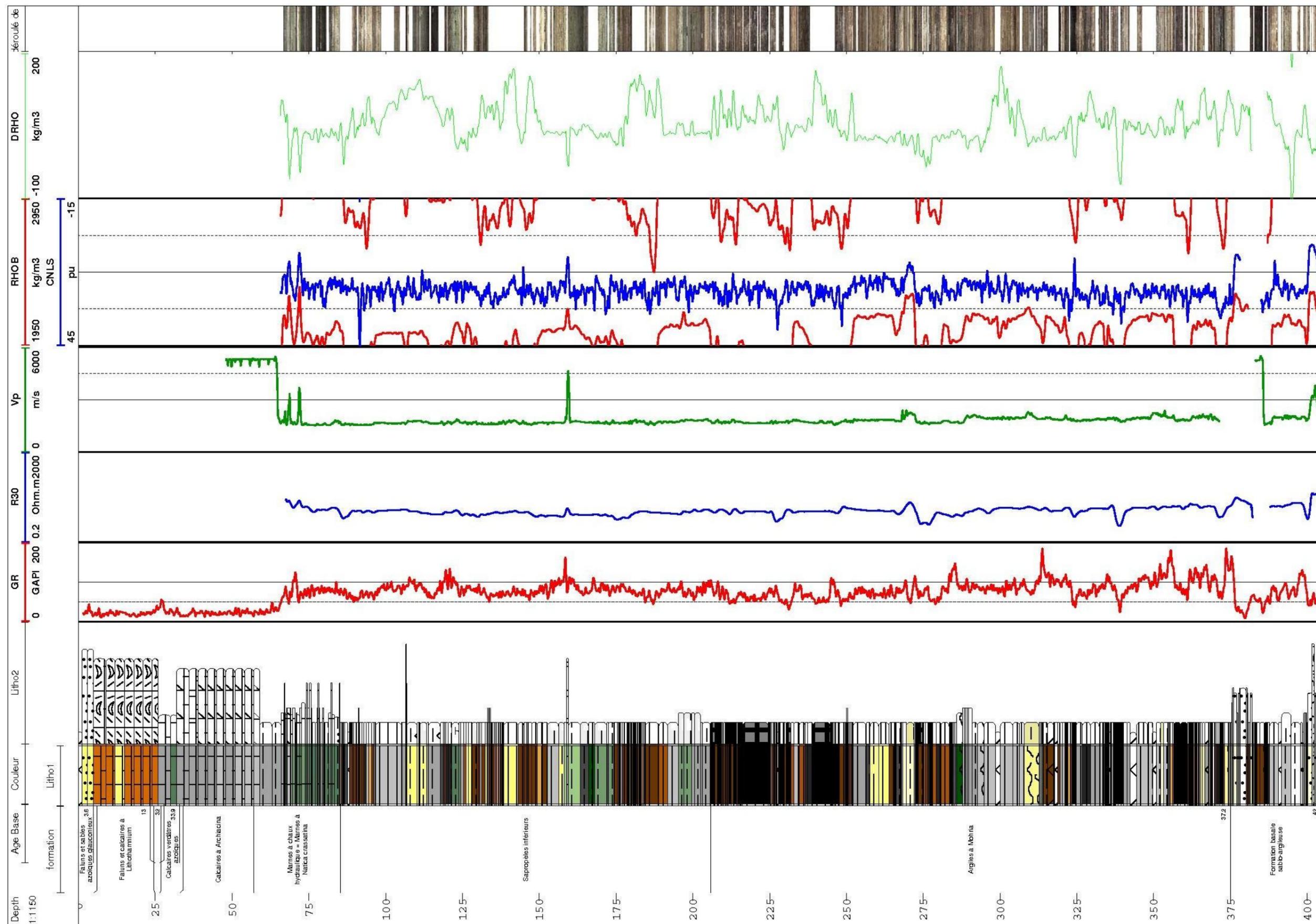


Figure 13 : Diagraphies issues du forage CDB1 dans le bassin de Rennes au 1/1 150. De gauche à droite : formations, lithologies, gamma ray, résistivité, sonique, densité (rouge), densité (bleu), neutron (bleu), contrôle de la qualité de RHOB), photos des déroulés de carottes.

2.1.5. Interprétation - Discussion

Paléoenvironnements sédimentaires et analyse séquentielle du bassin de Rennes

- **Paléoenvironnements sédimentaires**

Les différents faciès distingués dans la figure 7, dans la série priabonienne – rupélienne inférieure du bassin de Rennes, indiquent un milieu majoritairement lacustre. Les études palynologiques montrent que deux environnements de dépôts très contrastés alternent dans ce bassin. D'une part, dans les argiles décrites comme massives (Fmc, Fg), de nombreux débris végétaux montrent des formes de cellules planctoniques lacustres et de végétaux flottants tels que Nymphéacées (lotus d'Inde). Ces ensembles de végétation forment des radeaux flottant à la surface des lacs pouvant empêcher la lumière solaire de passer, créant ainsi un milieu réducteur et anoxique en profondeur. Ces spores et pollens sont presque unanimement associés à des argiles massives souvent riches en matières organiques.

Ce type d'association sporo-pollinique atteste d'un milieu où la végétation sédimentée s'est développée *in situ* indiquant un paléoenvironnement de lac très confiné sans aucun apport extérieur. Les argiles laminées (Flc, Fl, Flb) sont dominées par des associations polliniques dissemblables des argiles massives, caractérisées par la présence de feuillus. Ces formes de pollens montrent des apports de flore extra-palustre associées à des arrivées fluviales. Ces apports fluviaux ont pour conséquences de réduire le tapis de végétation flottant. Les eaux, plus claires, permettent le développement de l'algue *Botryococcus braunii* qui est toujours associée aux argiles laminées. Il faut noter que le développement plus ou moins important des tapis de végétation, à la surface du lac, peut être relié aux variations du niveau de base.

L'analyse effectuée sur les minéralogies des cortèges argileux par DRX (fig. 12) peuvent également donner des critères de paléoenvironnements. En effet, l'origine de la kaolinite, largement majoritaire quel que soit le cortège considéré (82 % en moyenne, voire 93 % sur le premier cortège), est issue de l'altération du socle briovérien, généralisée sur l'ensemble du Massif armoricain durant le Paléogène. L'illite-mica peut marquer une source argileuse beaucoup moins altérée du socle. Enfin, la smectite est classiquement associée soit à une altération relativement importante (bisiallisation), soit d'origine marine (néoformation). S'agissant principalement de dépôts lacustres, la seconde hypothèse ne semble pas adaptée. De la même façon, l'illitisation des smectites, qui marque la transition entre le domaine de la diagénèse et celui de l'anchimétamorphisme, n'est pas cohérente avec les profondeurs d'enfouissement de quelques centaines de mètres. L'apparition soudaine, vers 195 m, de ces interstratifiés smectite-chlorite est sans doute à mettre en relation avec la mise en place d'un autre type d'altération, moins poussée qu'auparavant (voir discussion en 5.2.2.).

- **Analyse séquentielle**

Les faciès des dépôts argileux, indiqués dans la figure 7, montrent une certaine cyclicité lithologique (fig. 14). Les faciès supposés en milieux lacustres les plus profonds sont les faciès comportant des argiles finement laminées (Flc). Ces faciès laissent la place, dans tous les cas, à des argiles laminées claires assez peu contrastées (Fl) auxquelles succèdent des argiles laminées incluant des bandeaux noirs pluricentimétriques (Flb). Ces faciès traduisent des dépôts lacustres intermédiaires. Ainsi, d'une façon générale, il est possible de faire correspondre les argiles laminées à des dépôts lacustres sédimentés sous une tranche d'eau probablement non négligeable (fig. 15).

Les faciès laminés font place à des argiles hétérogènes et bréchifiées (Fb) indiquant la présence de systèmes racinaires, ainsi qu'à des argiles noires souvent charbonneuses (Fs). Ces faciès sont identifiés comme étant affectés par un développement végétal correspondant à un domaine de bordure de lac. Des argiles vertes, pouvant contenir des traces de racines allant jusqu'à 60 cm de longueur, surmontent les précédents faciès perturbés, et sont interprétées comme des paléosols de type pseudogley (Fg).

La couleur de ces argiles est un bon indicateur pour témoigner des conditions réductrices. Elles se forment dans des sols hydromorphes réducteurs favorables à la préservation de ces teintes (fer réduit), traduisant un milieu palustre. Le cycle se termine par des argiles très claires, voire blanches. Ces argiles, issues de l'altération du socle, traduisent un domaine de plaine d'inondation. Cette cyclicité se retrouve tous les 40 m en moyenne dans l'ensemble des argiles à *Mohria* et des Saproèles inférieurs.

La Formation des Marnes à Natica témoigne d'une cyclicité bien plus condensée que dans les formations précédentes indiquant une diminution du taux de sédimentation. Un premier faciès argileux très noir pouvant contenir des fossiles très faiblement diversifiés (Fb) témoigne d'un milieu de baie très confiné. Les marnes à gastéropodes pluricentimétriques (Mb) succèdent à ces argiles noires. Les bioclastes retrouvés dans ces marnes sont des faunes opportunistes correspondant à un milieu de type vasière. Ces marnes s'appauvrissent en bioclastes vers le sommet jusqu'à rencontrer des argiles massives (Fg) délivrant quelques traces de racines. L'appauvrissement en bioclastes vers le sommet des marnes (Mb) peut être expliqué par leur dissolution induite par l'activité racinaire.

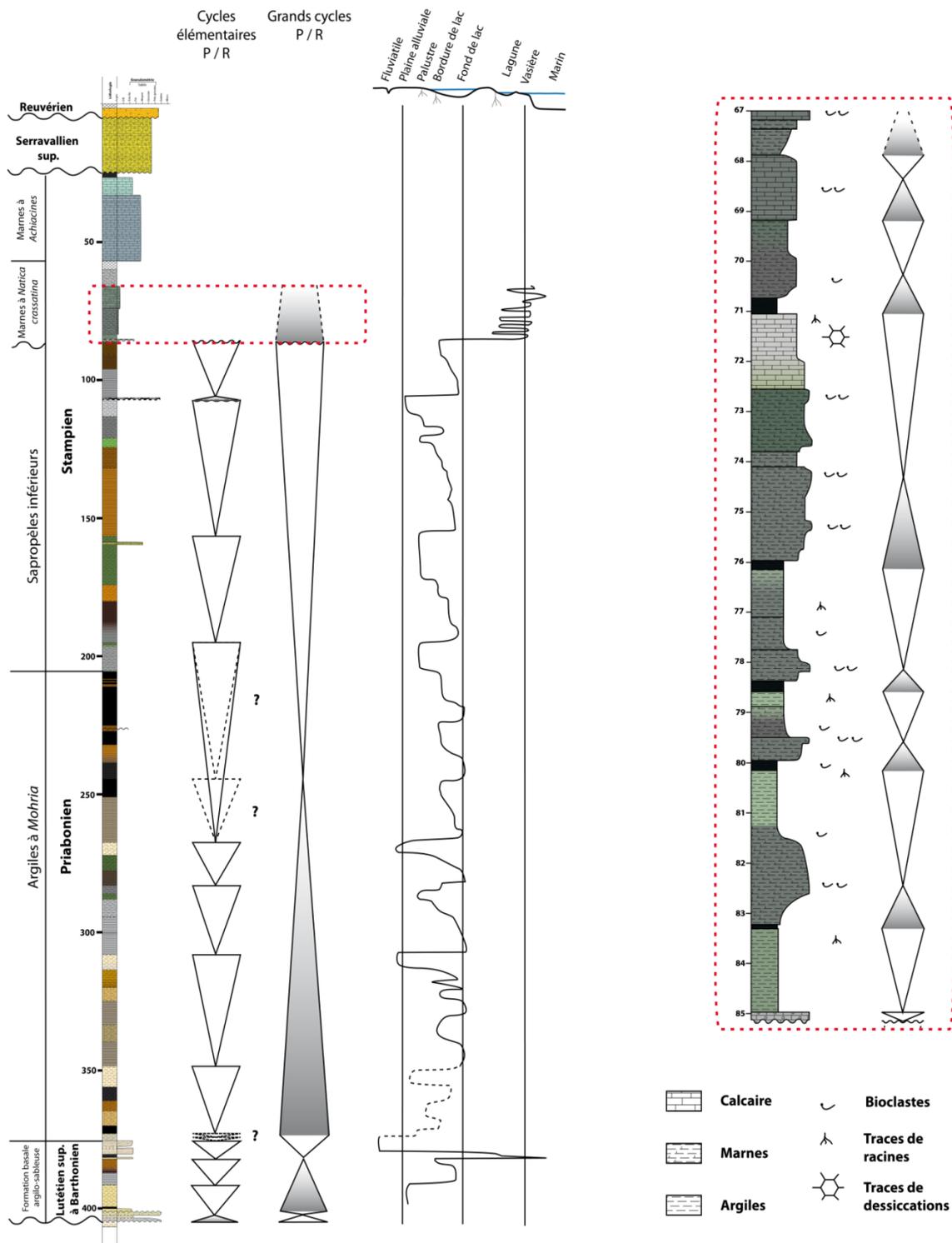


Figure 14 : Environnements de dépôts et proposition de découpage séquentiel dans le bassin de Rennes.

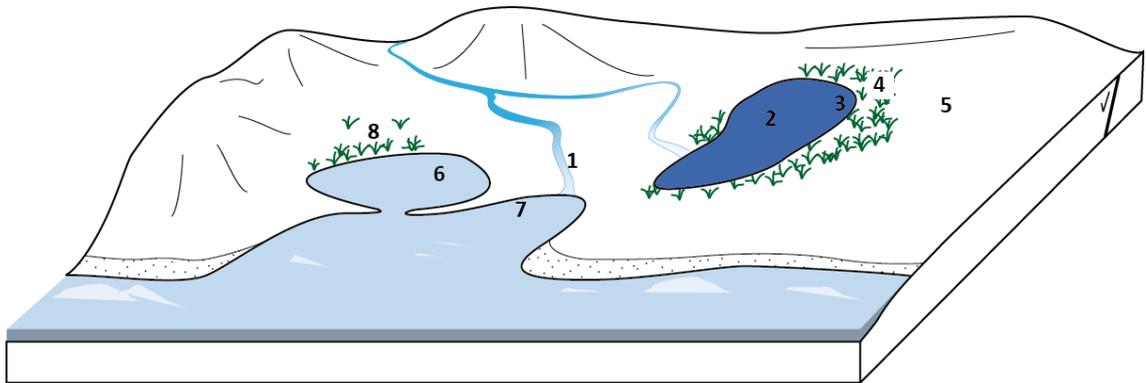


Figure 15 : Environnements de dépôts des faciès du bassin de Rennes.

1. Domaine fluvio-marin correspondant à la formation argilo-sableuse ; 2. Fond de lac ; 3. Bordure de lac ; 4. Marais ; 5. Plaine d'inondation ; 6. Baie confinée/ lagune ; 7. Vasière ; 8. Palustre /marais.

Géodynamique de bassin de Rennes et enregistrement paléoclimatique : comparaison aux bassins ouest européens

• Corrélation du bassin de Rennes avec l'Europe de l'ouest

Le calage stratigraphique des unités argileuses du bassin de Rennes, dressé à l'aide de l'étude palynologique, donne un âge Priabonien-Rupélien inférieur (Éocène sup. – Oligocène inf.). La subsidence du bassin est estimée à partir des âges absolus de ces étages stratigraphiques, reportés depuis la charte stratigraphique internationale, et des épaisseurs des formations (fig. 16). Ainsi, au Priabonien, l'épaisseur argileuse évaluée à 170 m, se serait mise en place en 3,3 Ma. Ceci ramène le taux subsidence du bassin de Rennes à 51 m/Ma pour la période priabonienne alors qu'il est estimé à 18 m/Ma dans le bassin de Saffré, deuxième bassin tertiaire le plus profond du MA.

Ceci prouve que le bassin de Rennes a connu une histoire géologique différente que celle d'autres bassins tertiaires du MA au cours du Priabonien. Le Rupélien est quant à lui ramené à une subsidence plus faible qui est de l'ordre de 33 m/Ma. Comparé au bassin éo-oligocène de Saffré, cette subsidence est approximativement la même au cours du Rupélien puisque qu'elle est de l'ordre de 37 m/Ma. Ces estimations ne reflètent cependant pas véritablement le taux de subsidence des bassins puisqu'il prend en compte les épaisseurs compactées des formations. Les terrains étant essentiellement argileux, les épaisseurs initiales étaient 2 à 3 fois plus importantes.

Les plus épaisses formations éo-oligocènes sont concentrées au sein du Fossé rhénan comme l'indique le tableau de corrélation (fig. 17) et atteignent jusqu'à 1 700 m d'épaisseur (Roussé, 2006). Le remplissage éo-oligocène de 380 m d'épaisseur, du bassin de Rennes, est le deuxième plus important des bassins considérés. De même, si cette épaisseur est comparée à la subsidence du bassin de l'Hampshire en Angleterre, à celui de Belgique et celui de Paris, le bassin de Rennes indique un taux de subsidence relativement important. En effet, ces bassins montre des taux de subsidence de l'ordre d'une quinzaine de mètres par Ma pendant les périodes priabonienne et rupélienne, ce qui est caractéristique des subsidences de bassins intracratoniques. Le fonctionnement géodynamique du bassin de Rennes s'apparente

donc plutôt à un contexte extensif de type fossé d'effondrement, sans toutefois atteindre l'amplitude des bassins majeurs de ce type.

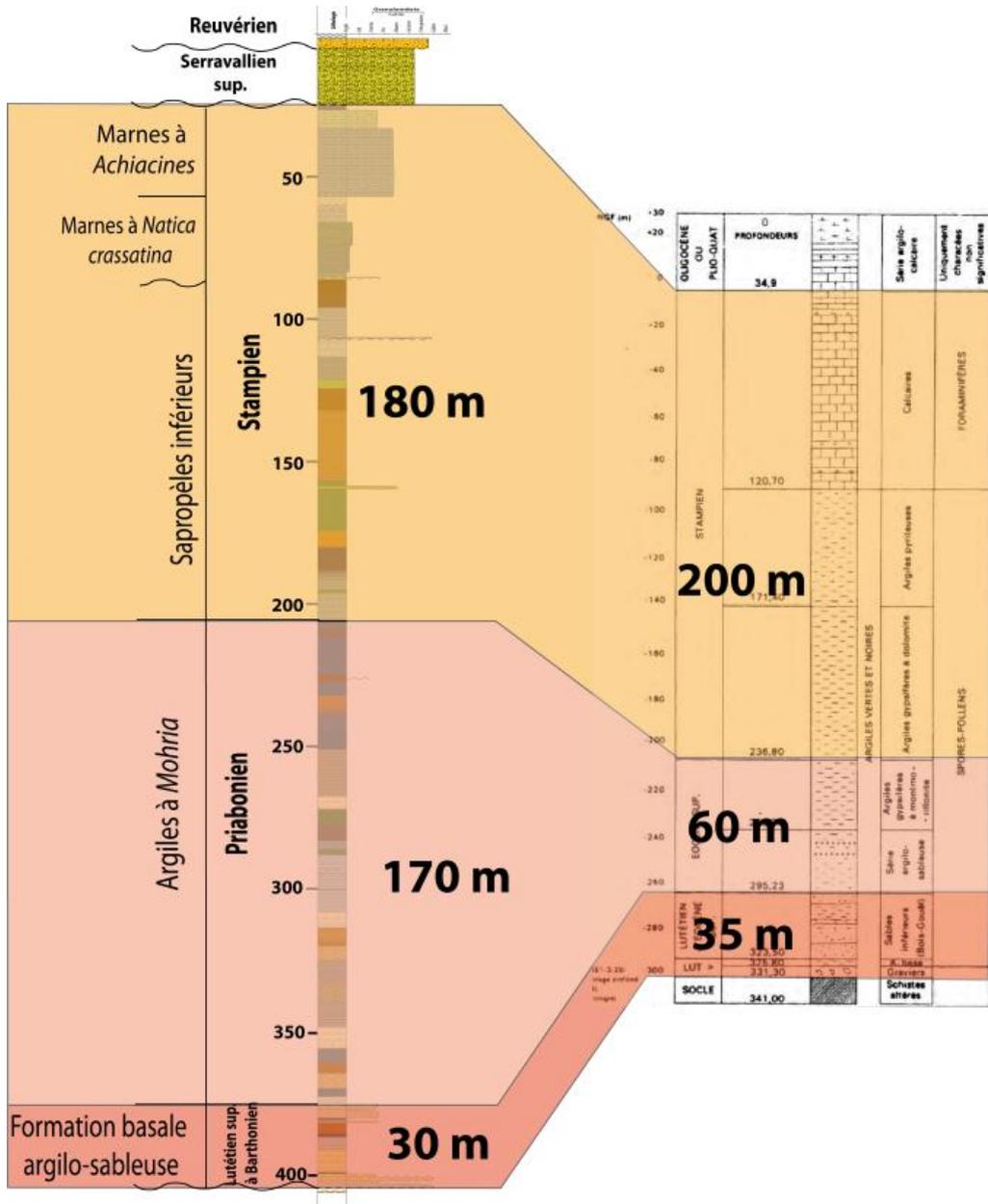


Figure 16 : Corrélations des formations éo-oligocènes des bassins de Rennes (à droite) et de Saffré (à gauche, Borne, 1978) et épaisseurs correspondantes.

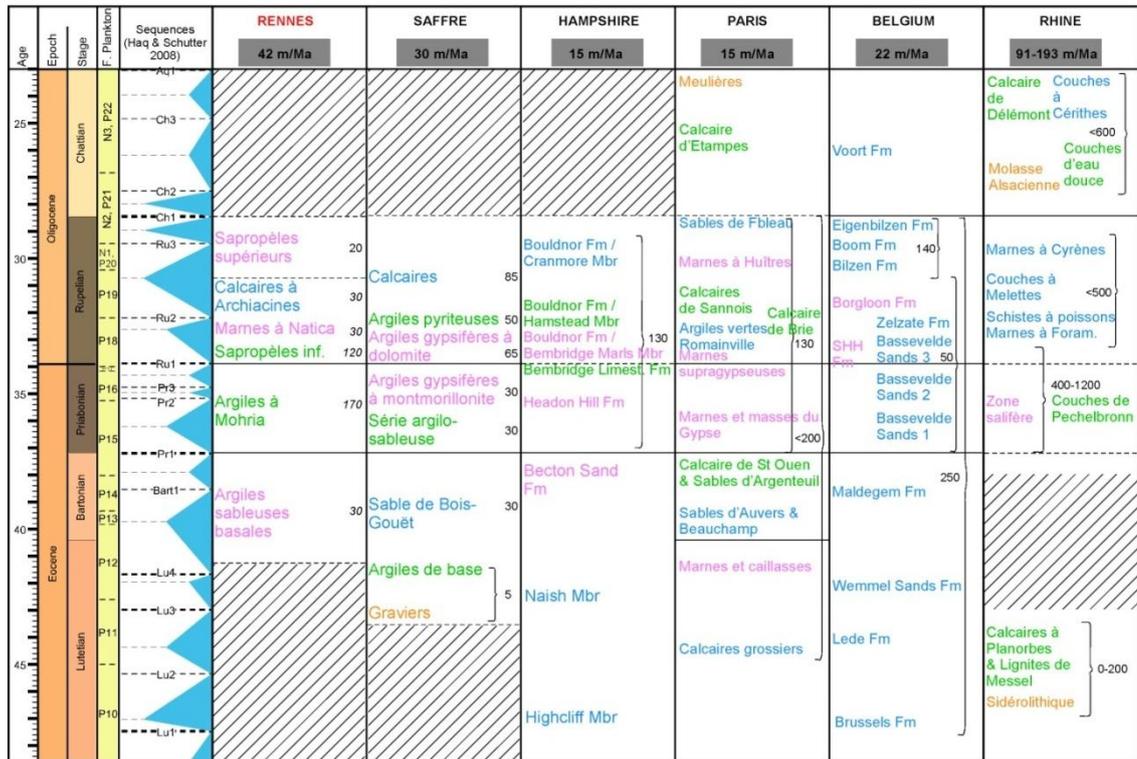


Figure 17 : Tableau synoptique des formations éo-oligocènes du bassin de Rennes et des bassins adjacents de Saffré (70 km au sud de Rennes), du Hampshire (Île de Wight, Angleterre), de Paris, de Belgique et du bassin Rhénan.

La couleur associée reflète le paléoenvironnement majoritaire : en vert le domaine lacustre, en jaune le domaine de transition (lagunaire, côtier restreint) et en bleu, le marin ouvert. Les numérotations représentent les épaisseurs des formations associées (en mètres), celles en italiques sont estimées depuis le sondage CDB1. Les valeurs de subsidence grisées sont estimées pour les périodes priabonienne et rupélienne.

Une corrélation entre les bassins ouest-européens tels que ceux de Rennes, Saffré, du Hampshire (Angleterre), et le bassin de Paris, est difficile à appréhender puisque les équivalences entre les formations sont approximatives. En effet, pour les périodes éocènes et oligocènes, les corrélations représentées dans la figure 17 sont assez imprécises en milieu continental ou de transition. Elles montrent que le Priabonien et le Rupélien inférieur sont majoritairement dominés par des domaines lacustres et transitionnels (Gale *et al.*, 2006 ; Roussé, 2006), à l'exception des bassins de Belgique et Rhénan où une sédimentation marine domine. D'une manière générale, ces différents bassins enregistrent le passage Éocène-Oligocène par un changement de faciès. Le bassin de Rennes conserve quant à lui une sédimentation stable en domaine lacustre lors du passage éocène-oligocène. Ceci fait du bassin de Rennes un lieu tout à fait exceptionnel pour l'étude de cette limite en domaine lacustre.

• Enregistrement des changements paléoclimatiques globaux

D'après les travaux effectués par Ollivier-Pierre (1980), l'Éocène est marqué par un refroidissement ressenti dans toute l'Europe de l'ouest depuis le Lutétien (fig. 18). Ce refroidissement est caractérisé par l'installation de saisons plus contrastées se faisant

ressentir à partir du Lutétien terminal dans les bassins de Paris et de Belgique et au début du Priabonien dans le Massif armoricain. Les saisons plus contrastées sont à mettre en relation avec l'installation d'une saison plus froide au cours de l'année (fig. 3). Un grand pulse de refroidissement est identifié à l'Éocène terminal à travers les différents bassins de l'Europe. Seul le Massif armoricain semblait connaître ce pulse au début de l'Oligocène. Toutefois, la palynologie atteste sur la fin de l'Éocène d'une augmentation significative du pourcentage de *Pinus* (pins) dans le bassin de Rennes. Cette forte augmentation est à mettre en relation avec un refroidissement climatique. Ce pulse est suivi, dans le bassin de Rennes, par l'installation d'herbacées diversifiées, au début de l'Oligocène, signalant la mise en place d'un climat plus aride et plus frais.



Figure 18 : Tableau synoptique du paléoclimat éo-oligocène du bassin de Rennes et des bassins adjacents de Saffré (70 km au sud de Rennes), du Hampshire (Île de Wight, Angleterre), de Paris, de Belgique et du bassin Rhénan. (Ollivier-Pierre et Estéoule-Choux, 1980).

Par ailleurs, la concomitance de l'apparition des cortèges argileux à smectite-chlorite avec la limite Éocène-Oligocène semble indiquer un signal paléoclimatique, avec un changement vers un climat plus aride, donc une altération moins forte permettant aux minéraux smectitiques d'être préservés et moins transformés en kaolinite. Sans occulter un changement de source possible, la simultanéité de ce changement de la nature argileuse avec le passage à l'Oligocène laisse supposer que son origine est climatique et non simplement un héritage de deux sources lithologiques distinctes.

Ces épisodes de refroidissement peuvent être mis en relation avec le refroidissement global que connaît la planète à la même époque avec l'installation de la calotte Antarctique (Zachos *et al.*, 2001) et l'événement Oi-1 (Miller, 1991) sans que toutefois une chute du niveau de base ne soit enregistrée dans le bassin de Rennes (fig. 17). Le pulse de refroidissement daté Éocène terminal dans le bassin de Rennes concorde finalement avec celui des autres bassins ouest-européens.

Toutefois, l'enregistrement du climat du Rupélien inférieur semble montrer des différences notables entre les bassins de Paris et de Belgique d'une part, et le MA d'autre part. Si notre étude ne peut pas y répondre, il est possible que ces divergences reflètent des variations à plus haute fréquence et donc non corrélables aisément d'un bassin à l'autre.

Le climat de l'ensemble de l'ouest européen, durant l'Éocène et l'Oligocène, est au refroidissement. Cependant, cette grande tendance à l'installation d'un climat plus froid est inégalement réparti à l'échelle régionale. En effet, les régions peuvent ne pas suivre la même tendance vers le refroidissement et montrer des variations locales des températures et précipitations opposées.

2.1.6. Conclusion

Le forage CDB1 réalisé dans le bassin de Rennes en 2010 avait comme objectif de parfaire la connaissance de son remplissage sédimentaire dont une esquisse avait été préétablie par l'exploitation des données géophysiques (anomalie gravimétrique, profil sismique). Le présent travail a permis de mettre en évidence la nature lithologique et stratigraphique du bassin de Rennes à l'aide de l'étude des carottes recueillies lors de ce forage et d'en tirer une interprétation paléo-environnementale. La reconnaissance des paléo-environnements apportée par la description et l'interprétation des différents faciès mais aussi par les études palynologiques et des argiles ont permis de proposer une interprétation paléo-climatique pour le bassin de Rennes. Les données analysées lors du forage ont mené aux résultats suivants :

- la majorité de la sédimentation du bassin de Rennes se fait dans un milieu lacustre alternant entre un milieu lacustre dit « ouvert » (apports fluviaux dans le lac) et un milieu lacustre « fermé » anoxique. Les formations basales et à Natica montrent des environnements plus laguno-marins ;
- deux modes d'enregistrement séquentiel élémentaire ont été définis selon l'environnement lacustre ou laguno-marin ;
- la comparaison du bassin de Rennes avec ceux de l'ouest-européen montre qu'il appartient bien aux bassins d'effondrement, le taux de sédimentation moyen (compacté) étant le double des bassins intracratoniques, bien qu'inférieur aux fossés d'effondrements majeurs (ex. Fossé rhénan) ;
- l'arrivée massive de Conifères au sommet de l'Éocène et d'argiles smectitiques à la base de l'Oligocène marquent l'arrivée d'un refroidissement puis l'installation d'un climat plus aride ;

- la stabilité de l'environnement de dépôt lacustre au passage Éocène/Oligocène fait du bassin de Rennes un témoin privilégié des changements globaux à cette période.

À ce jour, la nature des calcaires à ooïdes noirs (85 m) et fibroradiés (159 m) reste mal expliquée. En perspective, il serait intéressant et essentiel de compléter ces données avec les carottes issues du premier forage effectué dans le bassin de Rennes ainsi que de faire une corrélation plus approfondie avec le bassin de Saffré. L'étude du passage Éocène/Oligocène à haute résolution est également souhaitable.

2.2. ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DU SOCLE BRIOVÉRIEN DU BASSIN DE RENNES

Le substratum du bassin de Rennes a été reconnu comme du Briovérien (*sensu* Bretagne centrale), comme le laissait deviner l'encaissant du graben sur la carte géologique. Le socle montre un profil d'altération remarquable, et bien qu'incomplet, les paramètres physiques et minéralogiques indiquent qu'il a une puissance de 120 m.

Outre les macrofaciès et les résultats diagraphiques déjà présentés dans le rapport précédent, une étude pétrographique succincte et des analyses minéralogiques ont été réalisées en 2011 pour compléter la caractérisation du Briovérien et de son altération.

2.2.1. Synthèse faciologique et pétrographique du socle briovérien

D'après l'ensemble des faciès décrits (Bauer *et al.*, 2011), le Briovérien du graben de Rennes s'apparente au faciès cartographié comme Bs ou Bc, c'est-à-dire des lithologies allant d'argilites massives à des siltites et grès fins en alternances fines, marquées occasionnellement de figures sédimentaires (*ripple marks*, convolutes, granoclassement...). Des intercalations de faciès conglomératiques (type Gourin) sont également observées à deux reprises, entre 502 et 511 m et entre 557 et 564 m.

Les faciès du Briovérien n'ont pas fait l'objet d'une analyse faciologique plus poussée, mais plusieurs lames pétrographiques ont été réalisées, afin de caractériser la minéralogie des différents faciès et des remplissages de fractures.

Observations pétrographiques

La diversité des faciès est représentée sur les planches suivantes (Figure 19, Figure 20, Figure 21). On remarquera qu'au microscope polarisant, les faciès fins sont le plus souvent des pélites (siltites fines, argileuses) plutôt que de réelles argilites. Elles présentent une lamination parallèle, parfois en séquences granoclassées ou en stratifications obliques. Ces structures sont parfaitement compatibles avec des séquences turbiditiques distales. Dans les faciès plus grossiers (siltites, grès et conglomérats), on note l'angulosité des grains de quartz, témoignant d'un transport relativement rapide et d'une source peu éloignée. Le tri est généralement bon, sauf dans le cas des grès grossiers et des microconglomérats, dont l'hétérogranularité suggère une mise en place plus brutale, de type débris flow. Le matériel est très

évolué : composé à plus de 95 % de quartz, on distingue peu de muscovite (2 %), d'oxydes (1-2 %), et de très rares et altérés plagioclases (< 1 %), les feldspaths potassiques étant curieusement absents.

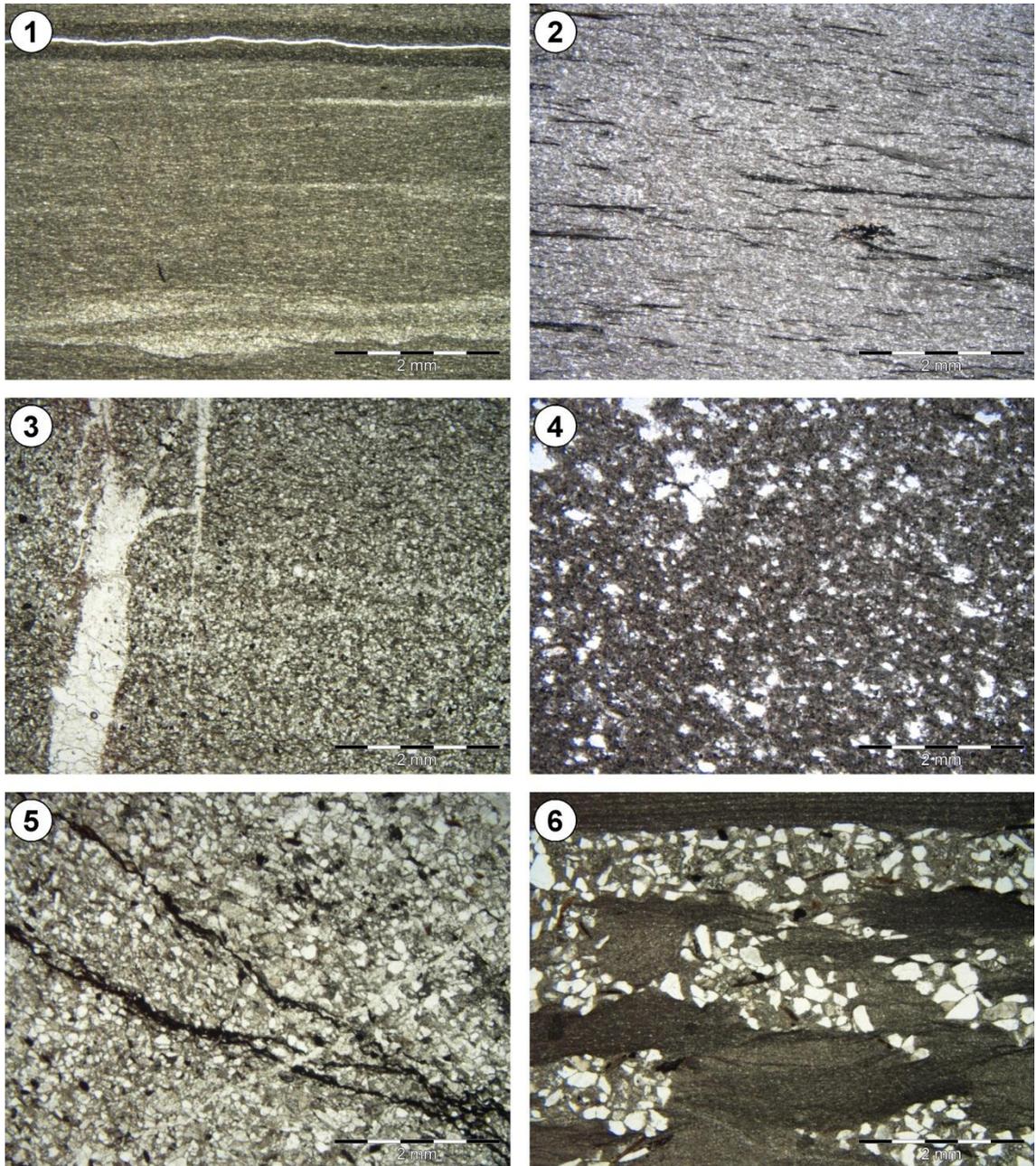


Figure 19 : Faciès argileux à gréseux du socle briovérien, gross. x 15.

1. Faciès argileux : argilite à lentilles pélitiques et niveaux plus riches en matière organique (CDB1-372, 483,47-483,54 m). 2. Pélite fine à lentilles charbonneuses (CDB1-324, 425,30-425,40 m). 3. Pélite laminée fracturée (CDB1-356, 468,90-468,97 m). 4. Siltite grossière (CDB1-344, 449,97-450,02 m). 5. Grès très fin à silteux, à intercalations organiques (CDB1-354, 463,70-463,80 m). 6. Argilite à lentilles gréseuses (bioturbations ?) (CDB1-388, 497,90-497,92 m).

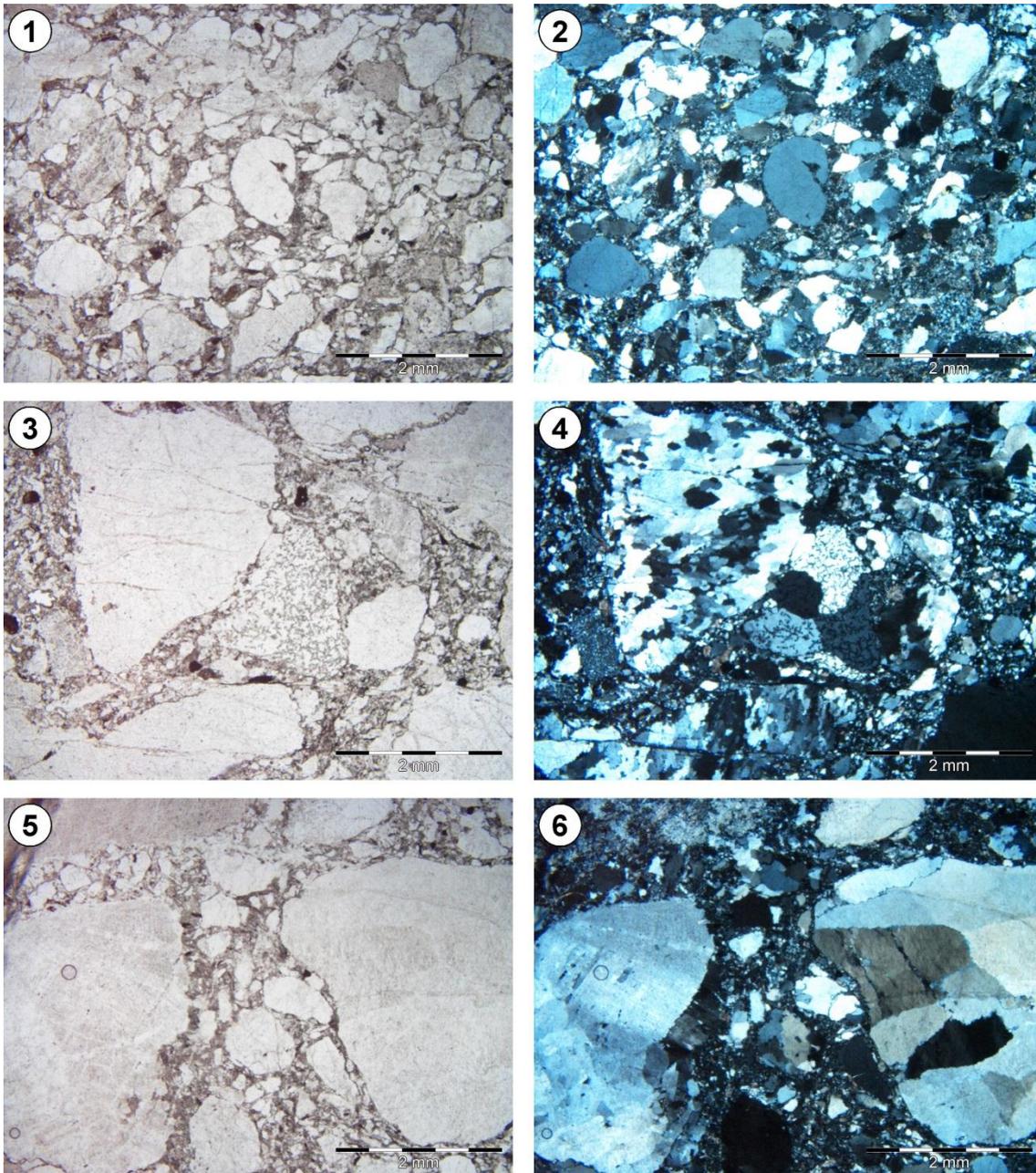


Figure 20 : Faciès gréseux à conglomératiques du socle briovérien, gross. x 15.

1 (LN) & 2 (LPA). Grès grossier à quartz anguleux à subarrondis, muscovite et rares plagioclases (CDB1-440, 558,74-558,78 m). 3 & 5 (LN). 4 & 6 (LPA). Microconglomérats subjointifs à clastes anguleux à subarrondis, hétérogranulaires de quartz, quartz chloriteux (centre), lithoclastes, matrice sableuse (CDB1-403, 506,44-506,50 m ; CDB1-560,90-560,94 m).

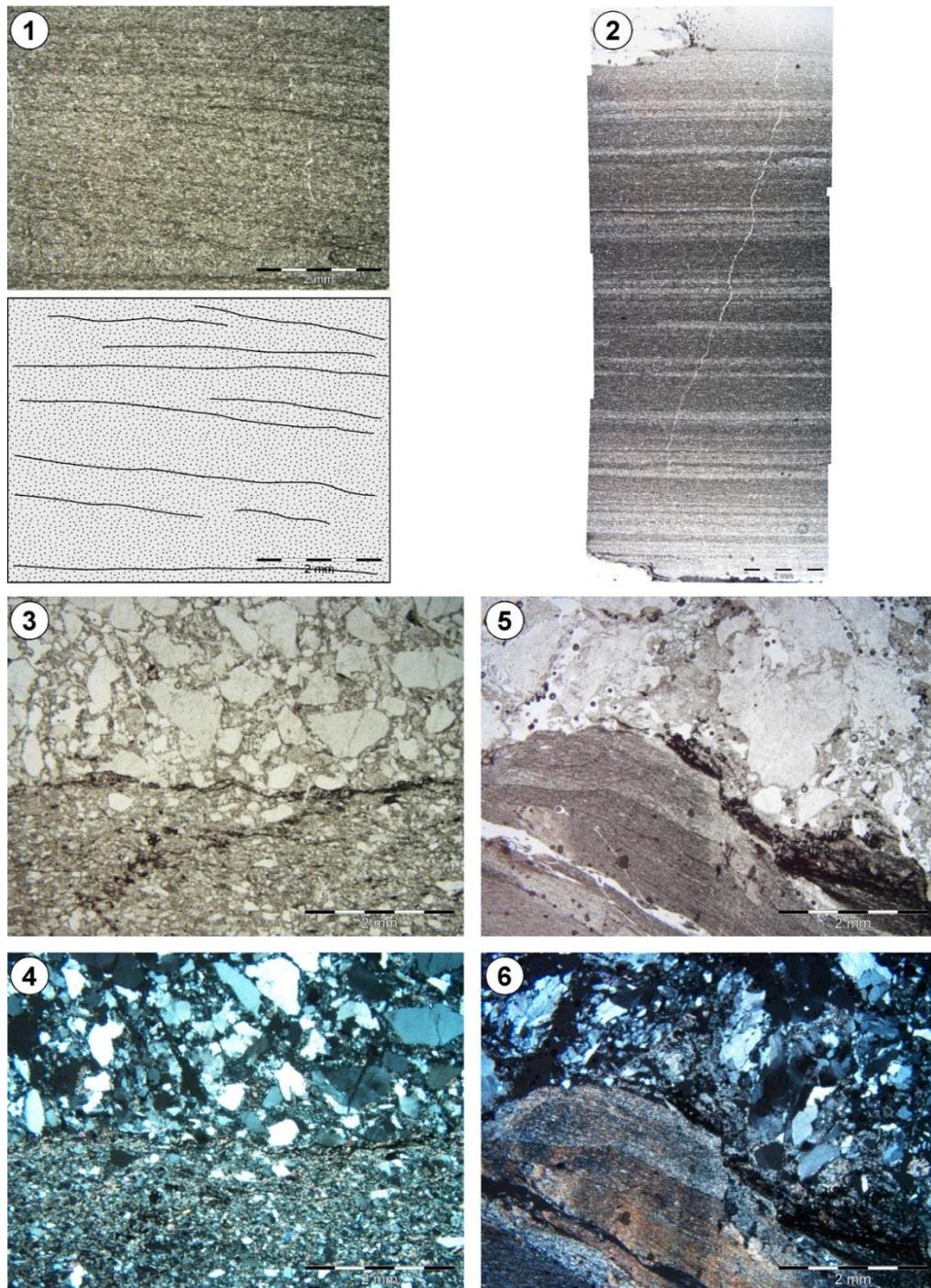


Figure 21 : Structures et contacts sédimentaires.

1. Stratification oblique dans une pélite (CDB1-370, 481,08-481,13 m). 2. Micro-séquences granoclassées (pélites-argillites) (CDB1-453, 583,82-583,90 m). 3 (LN) & 4 (LPA). Contact érosif d'un grès à quartz anguleux sur une siltite (CDB1-400, 503,17-503,22 m). 5 (LN) & 6 (LPA). Contact érosif d'un conglomérat quartzitique sur une argilite (CDB1-406, 508,76-508,82 m).

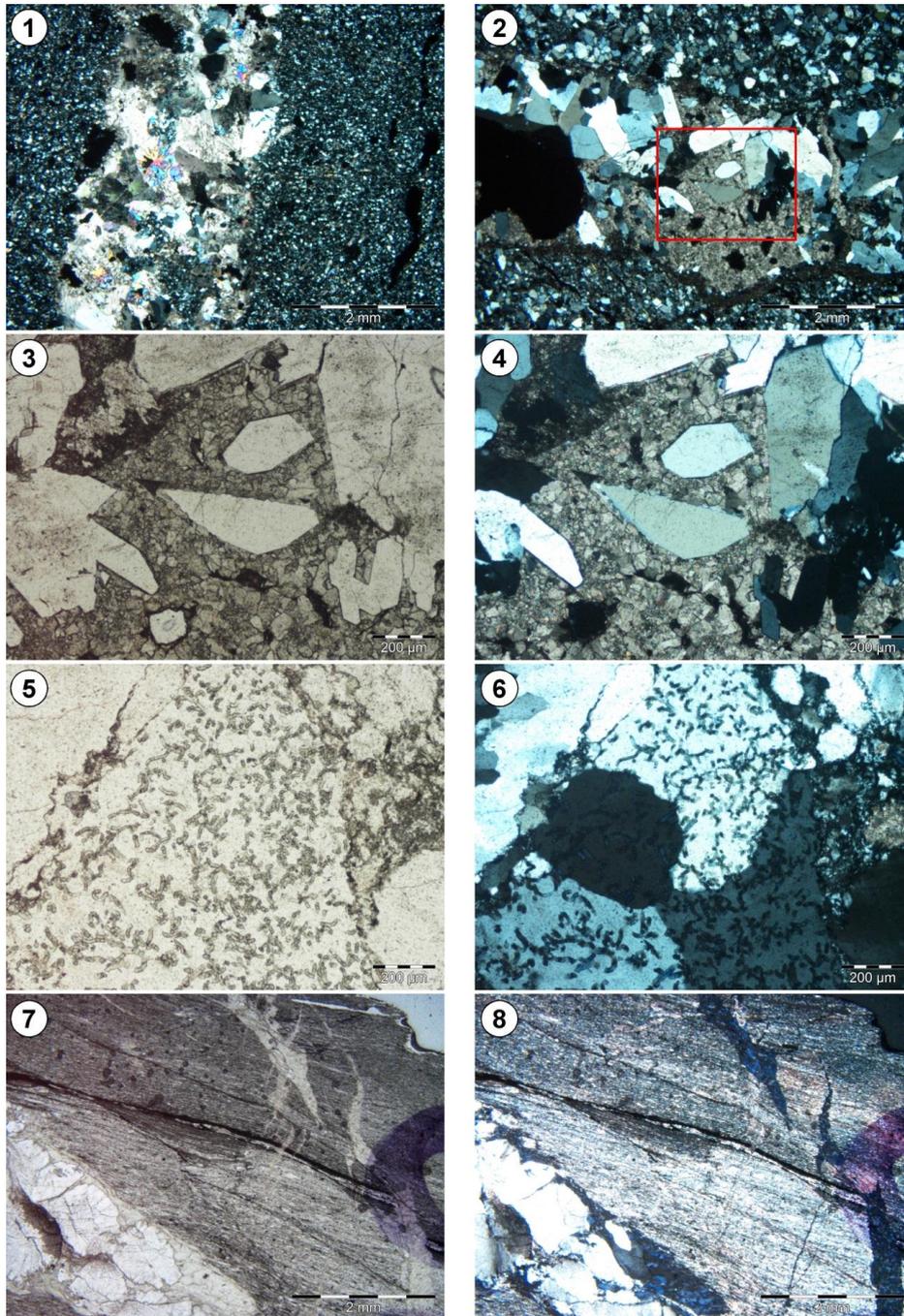


Figure 22 : Remplissages de fractures.

1. Fracture à remplissage calcitique dans une pélite (CDB1-356, 468,90-468,97 m). 2. Remplissage de fracture polyphasé : quartzique puis calcitique (CDB1-354, 463,70-463,80 m). 3 (LN) & 4 (LPA). Zoom de la photo précédente, avec traces de dissolution des quartz. 5 (LN) & 6 (LPA). Les quartz sont souvent chloriteux (CDB1-403, 506,44-506,50 m). 7 (LN) & 8 (LPA). Deux phases de fractures : une phase de fracture quartzique, puis une autre à remplissage chloriteux qui reprend parfois la première en altérant les quartz (CDB1-406, 508,76-508,82 m).

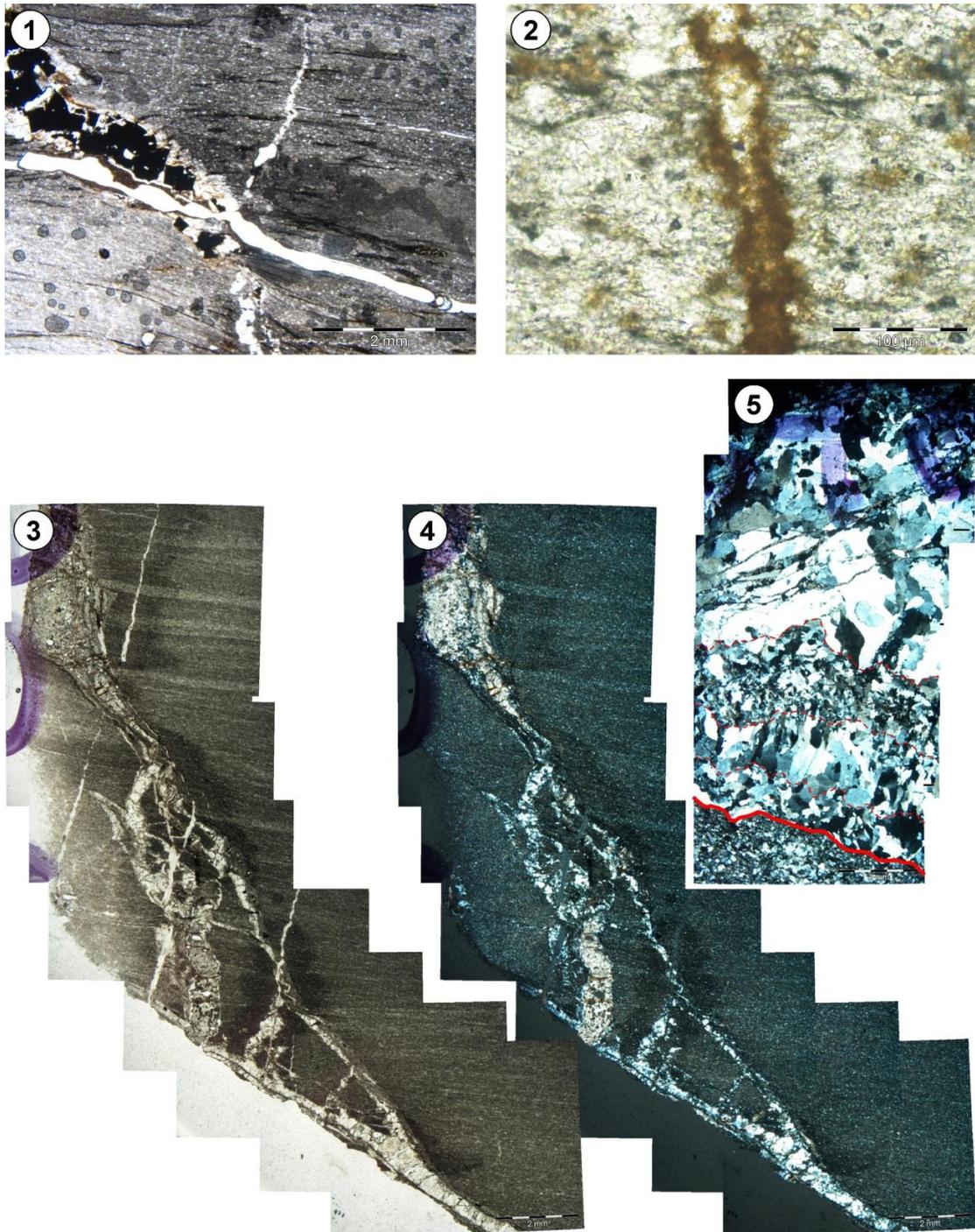


Figure 23 : Remplissages de fractures.

1. Remplissage pyriteux en voie d'altération (auréole goéthitique) (CDB1-324, 425,30-425,40 m). 2. Fracture goéthitisée dans la zone inférieure de l'horizon fissuré (CDB1-370, 481,08-481,13 m). 3 (LN) & 4 (LPA). Fracturation polyphasée, à remplissages quartzique, goéthitique et dolomitique (CDB1-372, 483,47-483,54 m). 5. Remplissage quartzique polyphasé (traits pointillés rouges) avec différents habitus de cristaux (CDB1-354, 463,70-463,80 m).

Les remplissages de fractures sont variés (Figure 22, Figure 23), bien que pour la plupart quartziques, avec la présence régulière de chlorite en très beaux cristaux. Nous avons pu distinguer des remplissages calcitiques, dolomitiques, pyriteux, goethitiques et chloriteux. Ces remplissages sont parfois polyphasés, la phase quartzique semblant être toujours la première. La réouverture et la circulation de fluides successifs laissent parfois des traces de corrosion. L'altération de la pyrite en goethite, logiquement présente à faible profondeur dans le profil d'altération, a été observée jusque très bas dans l'horizon fissuré.

Interprétation paléoenvironnementale

Les traces d'émersion (mud-cracks) décrites dans la notice de Janzé (Trautmann *et al.*, 1994) n'ont pas été observées dans la présente étude. L'ensemble des faciès décrits dans Bauer *et al.* (2011) et les observations pétrographiques complémentaires nous confortent dans l'interprétation de Trautmann *et al.* (2000) (carte de Rennes), qui proposent un environnement turbiditique distal. Étant donnée la nature du matériel ainsi que l'intercalation de poudingues, un système fluvio-deltaïque en amont est à considérer, nous amenant à proposer un environnement sédimentaire de type prodelta.

2.2.2. Paléoprofil d'altération du socle briovérien

Comme décrit dans Bauer *et al.* (2011), le socle briovérien est altéré sur une grande épaisseur, qu'il est possible d'évaluer notamment à l'aide des diagraphies.

Aspect visuel du profil d'altération

Par son aspect visuel, le profil d'altération peut être découpé en cinq intervalles (Figure 24) :

- intervalle argileux massif beige, à très forte odeur de H₂S : 404,92-405,90 (0,98 m) ;
- intervalle argileux structuré (pendage ~70°) beige, à rares filonnets de quartz laiteux fissurés : 405,90-406,55 (0,65 m) ;
- intervalle argilisé structuré (pendage de 45° à 90°) gris, à filons de quartz : 406,55-422,50 m environ (~16 m) ;
- intervalle fracturé et fissuré, structuré (pendage de 45° à 90°) gris, à filons de quartz : 422,50-469,60 environ (~47 m) ;
- intervalle relativement massif, structuré (pendage de 45° à 90°) gris, à filons de quartz : 469,60-675,05 environ (~205,50 m).

Le premier intervalle est interprété comme le reliquat des allotérites, en grande partie érodées lors de la mise en place du bassin. Les deux intervalles suivants correspondraient aux isaltérites : ce sont des altérites qui montrent encore la structure initiale de la roche mère. Nous avons distingué visuellement un passage d'une couleur beige à grise, mais celle-ci est sans doute liée à la circulation de fluides à l'interface avec le conglomérat basal sus-jacent, en témoignent les odeurs de H₂S persistantes. Ce front de circulation fait plus de 1,50 m. Le quatrième intervalle correspond à

l'horizon fissuré visuel : un ensemble concassé de roches, avec encore par endroits des passées argilisées (couloirs de fractures). Enfin, à partir de 470 m environ, la roche semble saine, beaucoup moins fracturée/fissurée.

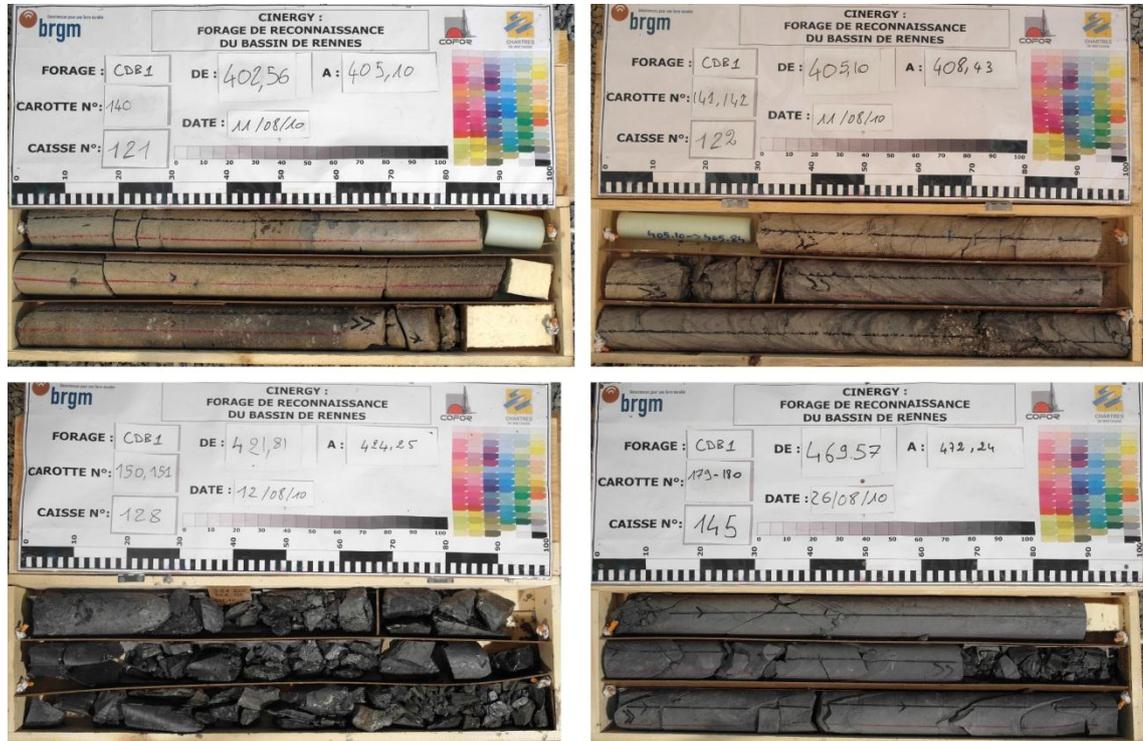


Figure 24 : Évolution visuelle du profil d'altération du socle.

Haut-Gauche : contact socle/couverture à 404,92 m avec allotérites. Haut-Droite : isaltérites et front de coloration dû aux circulations. Bas-Gauche : début de l'horizon fissuré. Bas-Droite : roche en apparence « saine ».

Il est intéressant de confronter ce découpage visuel à celui, plus objectif, issu des diagraphies de forage. Si la zonation fine des horizons supérieurs n'est pas décelable, les diagraphies apportent un éclairage concernant la transition horizon fissuré/roche saine.

Enregistrement par les diagraphies – propriétés physiques

Depuis 1996, plusieurs projets de recherche du BRGM ont été consacrés à l'étude des propriétés physiques des profils latéritiques, dans le but de développer des méthodes innovantes de cartographie quantitative 2D et 3D de ces propriétés, notamment dans les zones de socle, où la cartographie des altérites n'avait généralement pas été prise en compte lors du lever des cartes au 1/50.000. L'un des principaux résultats de ces projets a été de redéfinir les aquifères de socle (Lachassagne et Wyns, 2001, 2005, 2006 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2006).

• Radioactivité naturelle (GR)

En raison de problèmes de stabilité du trou nu, les diagraphies n'ont pu être passées entre 417 et 438 m, amputant d'autant notre connaissance de l'évolution des propriétés physiques à la jonction entre les altérites et l'horizon fissuré. Seul le Gamma-Ray, dont l'acquisition peut être réalisée au travers du tubage, montre un signal continu (Figure 25).

Le GR est, dans les séries sédimentaires, souvent un indice d'argilosité. S'agissant ici d'un profil d'altération, donc nécessairement plus argileux vers son sommet (d'autant plus sur des argilites), les variations du signal ne reflètent donc pas simplement l'argilosité, mais le type d'argile, radioactives (type illite/micas) ou non (kaolinite). C'est pour cela que dans le cas présent, le GR augmente en profondeur, et apparaît donc corrélé à la « fraîcheur » de la roche.

Considérant l'évolution verticale du signal, 4 intervalles diagraphiques se dégagent :

- 405-423 m : un signal homogène, constant autour de 85 API, donc très faible. C'est la signature des altérites, très kaoliniques (cf ci-après) ;
- 423-456 m : signal plus hétérogène mais constant, oscillant entre 75 et 105 API. Il signe l'horizon fissuré supérieur, où les variations lithologiques sont suffisamment préservées pour se refléter dans les variations de GR ;
- 456-513 m : signal relativement homogène (peu bruité, hormis des pics à 486 et 490 m d'origine incertaine) mais évoluant depuis des valeurs faibles (<100 API) vers une valeur moyenne de 130 API (abstraction faite des conglomérats entre 501,50 et 511 m). Cet intervalle est interprété comme la transition très progressive entre l'horizon fissuré et le socle sain ;
- > 513 m : le signal redevient homogène et constant autour de la valeur moyenne de 130 API, excepté les intercalations gréso-conglomératiques. Ce signal est celui du socle briovérien sain.

• Propriétés élastiques

Les diagraphies soniques des profils d'altération montrent en général une augmentation de la vitesse des ondes P vers le bas, qui traduisent la diminution de la porosité et de la densité de fissures. Dans le cas du forage CDB1, il semble que ce soit la propriété qui différencie le mieux l'horizon sain du profil d'altération, l'intercalation des conglomérats n'occasionnant visiblement pas de variation majeure du signal (Figure 26). On observe ainsi une augmentation progressive des vitesses jusqu'à 520 m ; celles-ci se stabilisent ensuite dans la roche saine autour de 5 000 m/s pour les ondes P et de 3 000 m/s pour les ondes S. Ces diagraphies permettent d'imager parfaitement la base de l'horizon fissuré, dont l'épaisseur dans ce forage est supérieure à 100 m. C'est le seul forage du Massif armoricain sur lequel nous disposons de diagraphies soniques traversant entièrement l'horizon fissuré.

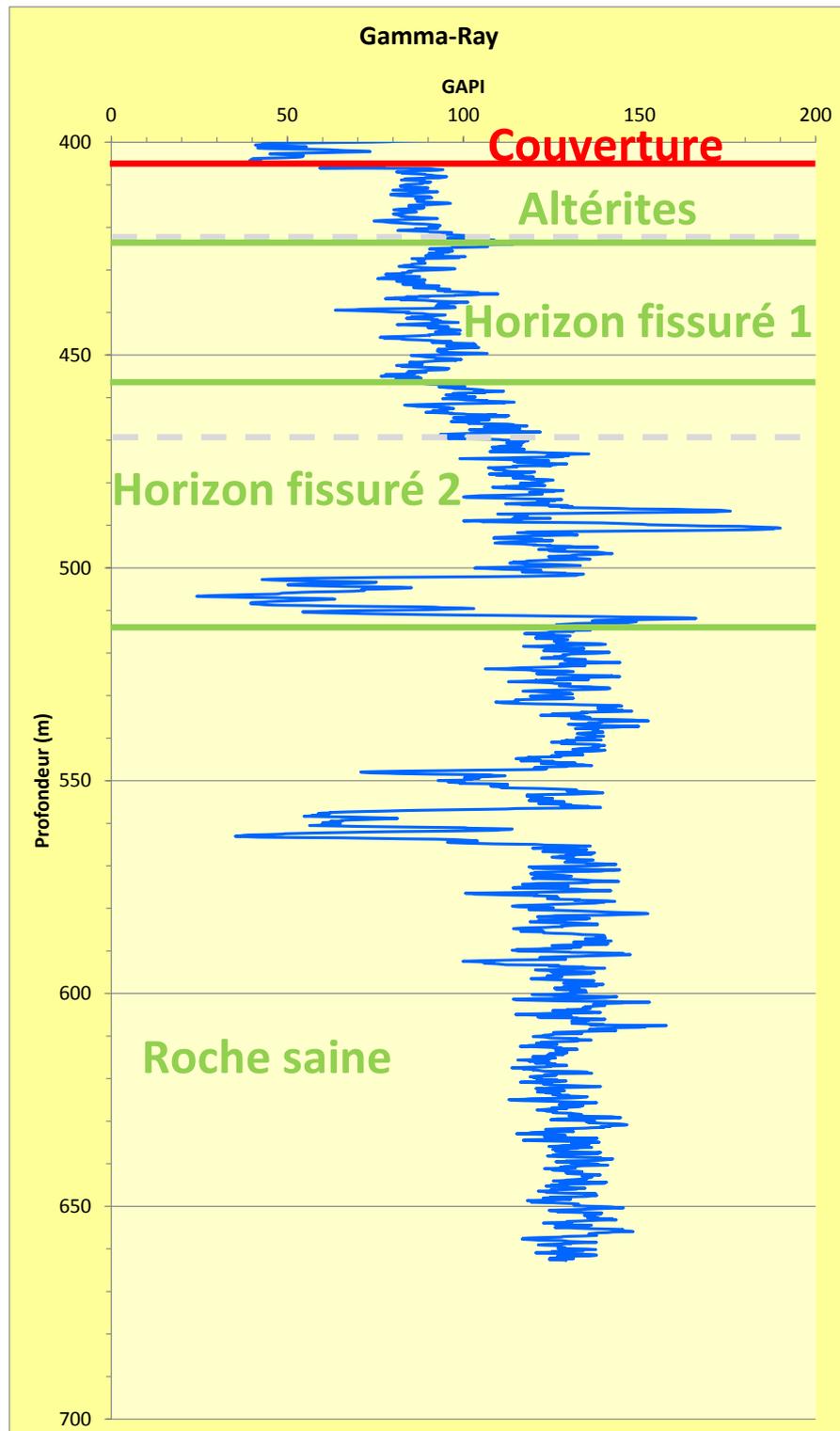


Figure 25 : Évolution du signal GR le long du profil d'altération.
 En tiretés gris, les intervalles « visuels » et en traits pleins verts, les intervalles diagraphiques.

Même si l'absence de données entre 410 et 440 m handicape l'interprétation du passage isaltérite/horizon fissuré, force est de constater qu'aucun changement significatif n'est observé vers 456 m à l'instar du GR.

- **Propriétés électriques**

CDB1 est le seul forage du Massif armoricain pour lequel nous disposons d'une diagraphie de résistivité de l'ensemble du profil d'altération (Figure 27). Comme pour la diagraphie sonique, nous manquons d'enregistrement entre 410 et 440 m, ce qui empêche l'interprétation du passage isaltérite/horizon fissuré. La base de l'horizon fissuré, d'après les diagraphies soniques, se trouve aux environs de 520 m (Figure 26). Les résistivités, très faibles jusqu'à -495 m (autour de 50 ohm.m), montrent en dessous de cette cote une augmentation rapide mais progressive (le pic de résistivité à -505 m correspondant au passage d'un banc de poudingue quartzitique). Dans la roche saine la résistivité moyenne s'établit autour de 480 ohm.m, avec de fortes variations, qui tranchent par rapports aux signaux précédents beaucoup plus constants sur le même intervalle. Les très faibles résistivités de l'horizon fissuré sont dues à la forte interconnexion des fissures, plus qu'à l'argilisation de la roche. En effet, les valeurs sommitales du profil (405-410 m), de l'ordre de 30 ohm.m, sont très comparables à celles de l'horizon fissuré.

Évolution minéralogique

L'analyse minéralogique des argiles de la couverture a montré la prédominance, à plus de 80 %, de la kaolinite. La seule source possible, compte-tenu des roches avoisinante, est le manteau d'altérites recouvrant le socle briovérien (Estéoule-Choux, 1967, 1970). Une analyse minéralogique sur roche totale et sur les argiles a été entreprise le long du profil d'altération du socle, pour notamment étudier l'évolution verticale de la teneur en kaolinite. Pour les analyses en roche totale, nous n'observons pas d'évolution verticale, sinon l'absence de plagioclases jusqu'à 420 m environ, c'est-à-dire dans la partie « altérites » du profil (Annexe 3).

Le profil minéralogique des argiles (Figure 28) est assez irrégulier mais une tendance à l'appauvrissement en kaolinite est tout de même perceptible. Son absence complète est même notée dans la plupart des échantillons (9/13) du socle sain. On peut expliquer l'aspect irrégulier de ces résultats par la faible résolution de l'échantillonnage et surtout par l'hétérogénéité des échantillons, broyés sans distinction d'éventuelles microfissures. L'évolution du paramètre $K/(I+C)$, qui reflète le degré d'altération de la roche (les illites et la chlorite étant réputées originelles, la kaolinite, néoformée), est en tout point similaire et montre également cette dichotomie entre le profil d'altération et le socle sain en deçà de 520 m.

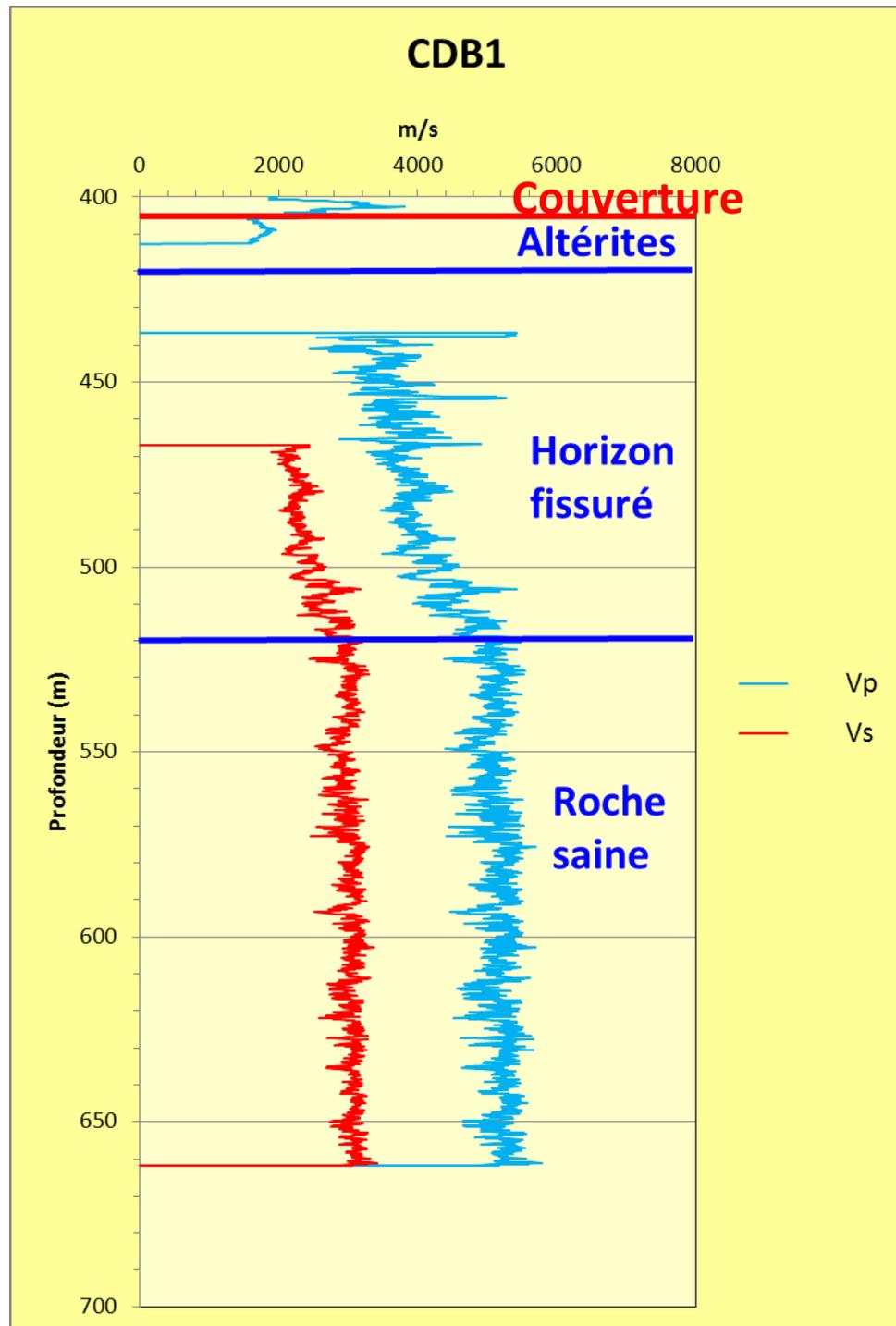


Figure 26 : Diagraphie sonore du profil d'altération éocène sur schistes briovériens.

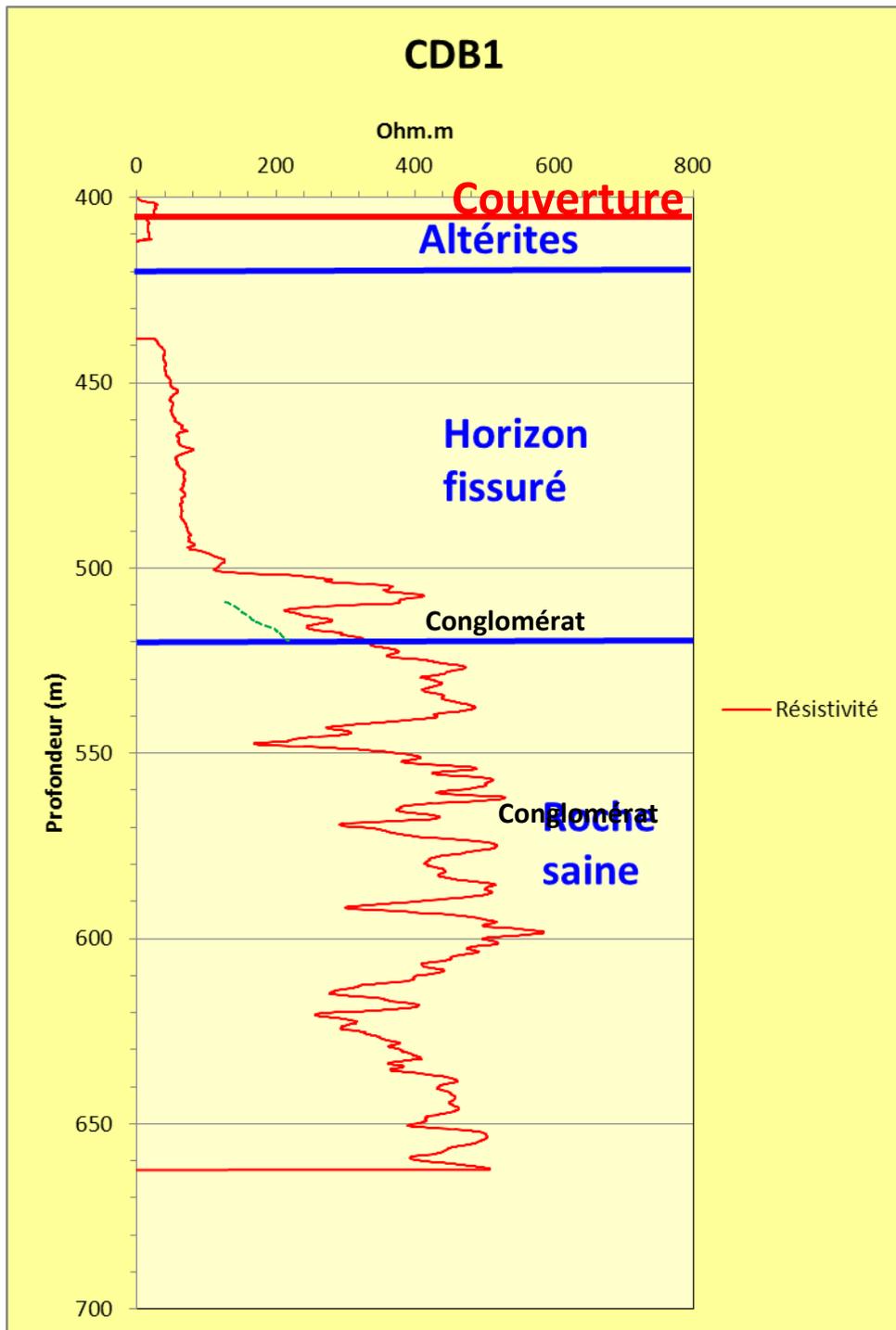


Figure 27 : Diagraphie de résistivité du profil d'altération éocène sur schistes briovériens. Le trait vert en tiretés simule le passage progressif, abstraction faite du banc conglomératique.

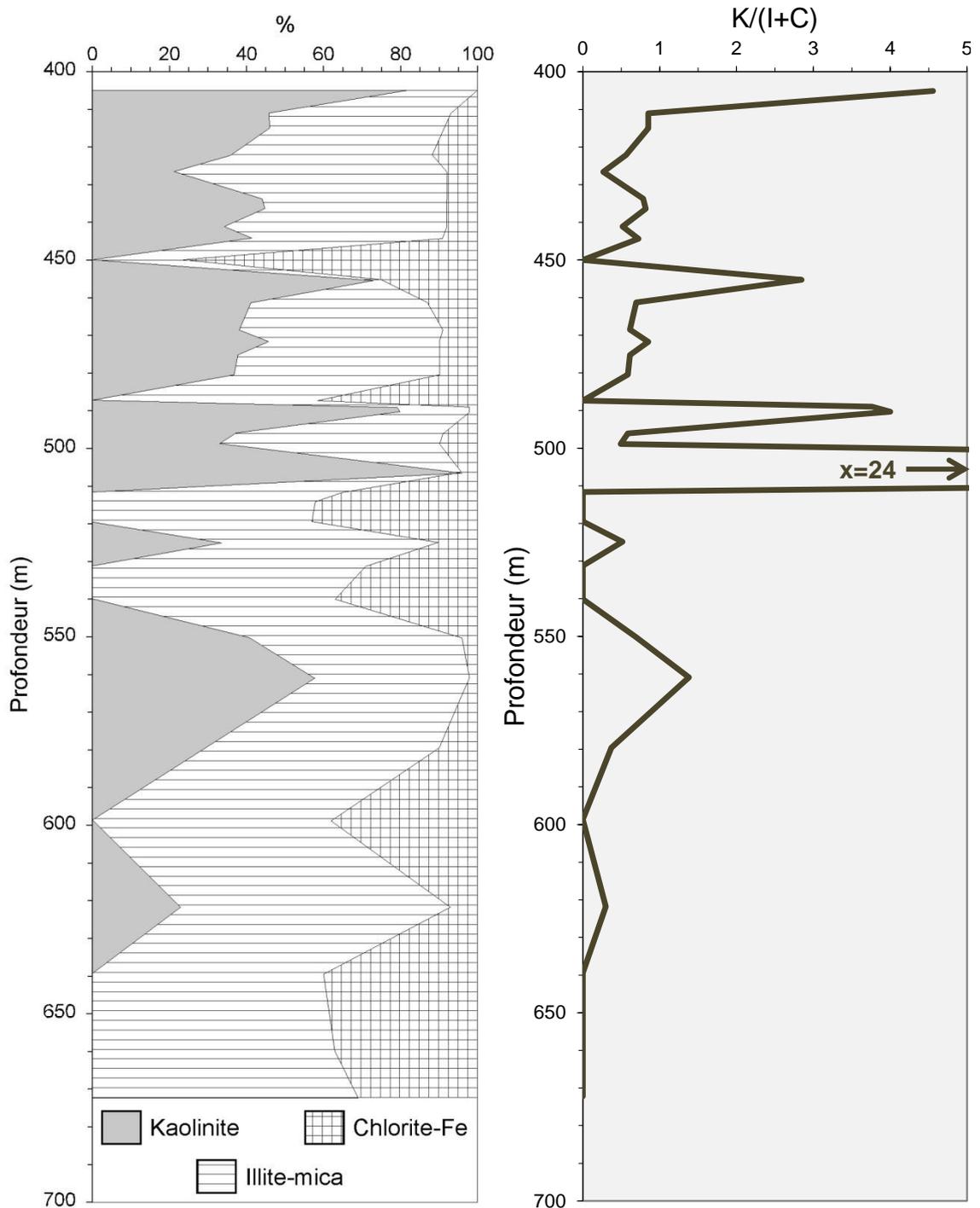


Figure 28 : Évolution verticale de la minéralogie des argiles dans le profil d'altération du socle.
 À gauche, graphe des proportions relatives en kaolinite, illite-mica et chlorite-Fe.
 À droite, évolution du paramètre d'altération $K/(I+C)$.

2.2.3. Conclusion

L'étude sédimentologique du Briovérien, hors des objectifs initiaux, n'a pu être aussi complète que celle de la couverture sédimentaire. Les observations en carotte et en lames minces confirment l'environnement marin de dépôt de ces argilites (Trautmann *et al.*, 2000) et suggèrent un environnement de type prodelta.

Le forage CDB1 aura permis, déjà à ce stade, d'avoir une vision complète et multi-paramètres d'un paléoprofil d'altération :

- un set complet de diagraphies, là où le plus souvent, seuls résistivité et sonic sont disponibles ;
- un profil comprenant la plupart des horizons théoriques, hormis la cuirasse et, pour sa plus grande part, les allotérites ;
- l'atteinte de la roche saine ;
- des analyses minéralogiques du cortège argileux et sur roche totale ;
- et surtout, un socle de lithologie très monotone, permettant une lecture des diagraphies aisée et plus facilement interprétable.

Les résultats acquis montrent à quel point le développement d'un tel profil d'altération sur un socle sédimentaire déformé peut différer de celui développé sur un socle granitique ou gneissique : les transitions entre les horizons sont beaucoup plus progressives et surtout, invisibles à l'œil nu pour ce qui est de la limite horizon fissuré/roche saine. Cet exemple de profil développé sur des méta-sédiments devrait faire l'objet d'une étude minéralogique et géochimique plus poussée pour comprendre de telles différences de lectures entre les diagraphies et les carottes.

2.3. MODÉLISATION 3D DU BASSIN DE RENNES

2.3.1. Introduction

Les principaux résultats du forage carotté CDB1 ont été :

- la caractérisation (sur 405 m) de la pile sédimentaire, entièrement tertiaire du bassin, pour sa grande partie encore inconnue ;
- la caractérisation du substratum du bassin composé de schistes du Briovérien, altérés sur une centaine de mètres et un calage chronologique (anté-Bartonien) de l'altération principale du Massif armoricain de 405 m à 675 m ;
- enfin, une connaissance améliorée de la géométrie de ce bassin tertiaire par un meilleur calage du profil sismique acquis lors du projet GéoFrance3D (Wyns *et al.*, 2002).

Afin de concrétiser la portée hydrogéologique et géothermique d'un tel ouvrage, il a été décidé de réaliser un modèle numérique simple de l'ensemble du bassin, grâce au

logiciel développé par le BRGM et commercialisé par la société australienne INTREPID GEOPHYSICS : l'éditeur géologique 3D ou le Geomodeller®.

Cette modélisation permettra (i) de visualiser la géométrie des formations géologiques pliocènes, miocènes et oligocènes, qui contiennent l'aquifère (sur)exploité supérieur du bassin et (ii) de proposer un modèle thermique préliminaire qui rendra compte du potentiel géothermique.

Dans les lignes qui suivent, nous présenterons le contexte géologique du bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes, les simplifications réalisées afin de permettre la construction d'un modèle en trois dimensions de la structure géométrique du bassin ainsi que l'ensemble des données utilisées.

2.3.2. Contexte géologique du bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes

Le bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes se situe au sud-ouest de la ville de Rennes. Il fait environ 18 km de long sur 2 à 3 km de large.

Cette entité géologique se situe « à cheval » sur les feuilles géologiques de Rennes pour sa moitié nord et de Janzé pour sa moitié sud. Elle est située, si l'on se réfère à la terminologie (non publiée) de Chantraine *et al.*, dans le « Domaine varisque de Bretagne centrale », composé de « l'Unité de Bretagne centrale » et de « l'Unité du Sud de Rennes » (Figure 29).

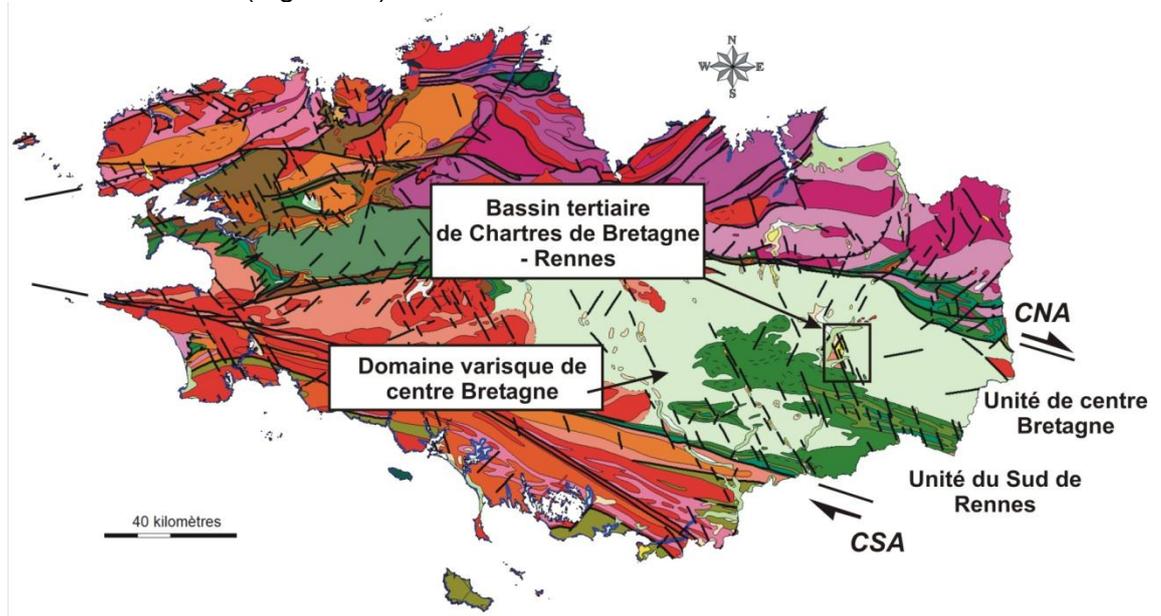


Figure 29 : Localisation du Bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes, carte géologique au 1/1 000 000 de la Bretagne, BRGM éditions.
(CNA : Cisaillement Nord Armoricaire ; CSA : Cisaillement Sud Armoricaire).

L'Unité du Sud de Rennes correspond à un synclinorium d'une centaine de kilomètres de long, de roches sédimentaires paléozoïques (schistes, grès, quartzites et carbonates), mises en place à l'Ordovicien, au Siluro-dévonien et au Carbonifère. L'Unité de centre Bretagne est pour l'essentiel composée des schistes du Briovérien. Ces schistes briovériens constituent une séquence de roches détritiques, composée de sédiments immatures tels que des wackes, des grès et des schistes, avec une organisation turbiditique (Le Corre, 1977 ; Chantraine *et al.*, 1982). L'âge trouvé sur zircons détritiques dans ces sédiments est de l'ordre de 540 Ma (Guerrot *et al.*, 1992). Ces roches sont peu ou pas métamorphisées, hormis au contact de granites intrusifs d'âge hercynien.

L'édifice orogénique polyphasé armoricain, après le long hiatus sédimentaire durant le Mésozoïque, a subi une période d'érosion et d'altération, en particulier entre la fin du Crétacé et le début de l'Éocène. Cette période est matérialisée par la présence d'altérites au sens large (isaltérites et allotérites), composées de sables et d'argiles argileux d'altération, de vestiges de cuirasses latéritiques et de paléosols soulignés par la présence de dalles silifiées (silcrètes).

Suite à cette période d'altération, une sédimentation marine à continentale, constituée d'argiles, de calcaires et de sables, s'installe dans le bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes. Contrôlé par une tectonique essentiellement extensive, l'enregistrement sédimentaire s'étend depuis l'Éocène supérieur (voir chapitre 1) jusqu'au Plio-Quaternaire.

Le bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes, avec celui de Saffré, constitue un secteur privilégié où l'enregistrement de l'histoire géologique cénozoïque du Massif armoricain est la plus complète.

Le bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes

Le dossier ouvert par Vasseur en 1881, dans un ouvrage fondamental sur le Tertiaire de Bretagne proposait les premières grandes lignes de la stratigraphie cénozoïque armoricaine (voir Durand, 1960, pour un historique).

Il faudra attendre cependant la seconde moitié du XX^e siècle pour que la stratigraphie et la géométrie du bassin soient mieux évaluées au travers des investigations de géophysique (gravimétrique par Jaeger et électrique par Cluzeau en 1957) puis stratigraphique (Durand, 1960 ; Estéoule-Choux, 1967 ; Ollivier-Pierre, 1980) et enfin géométrique (Brunel, 1971 ; Figure 30).

Les cartes géologiques englobant la totalité du bassin, elles, ne seront publiées qu'au début des années 90 pour la feuille Janzé (Trautmann *et al.*, 1994) et qu'au début des années 2000 pour la feuille Rennes (Trautmann *et al.*, 2000).

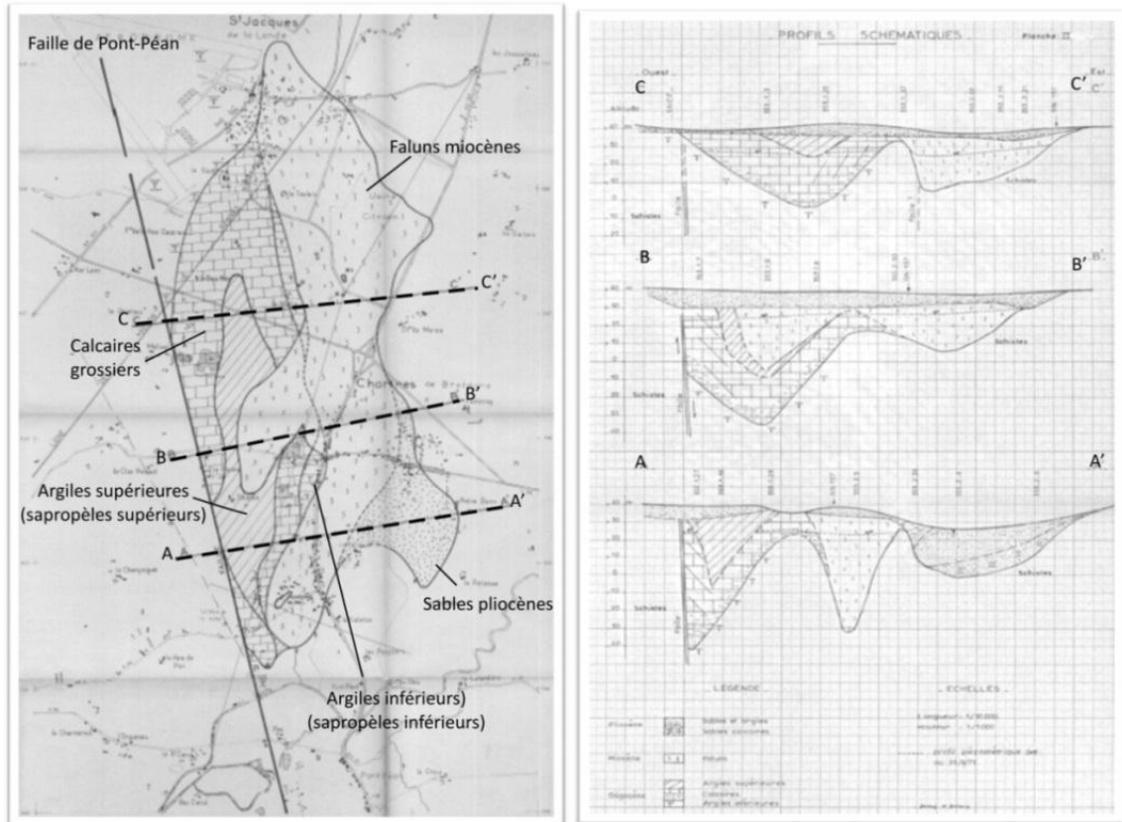


Figure 30 : À gauche : carte géologique du bassin de Bruz – Chartres-de-Bretagne.
À droite : coupes géologiques sériées, d'après Brunel (1971).

- **Rappels sur la succession stratigraphique (Figure 31).**

L'Éocène débute par une formation composée d'un niveau de conglomérat érodant le profil d'altération du socle briovérien, et de sables et argiles de 405 à 375 m de profondeur. De 375 m à 85 m, la séquence est relativement monotone, les formations des Argiles à *Mohria* et des Sapropèles inférieurs étant très semblables, contenant des argiles massives, verdâtres, brunâtres ou noirâtres avec des indices de pédogénèse, à forte teneur en pyrite, des argiles laminées, beiges, brunâtres à noirâtres avec des figures sédimentaires du type bases érosives, échappement de fluides, microfailles.

La limite entre l'Éocène et l'**Oligocène** n'est pas une limite franche. Seule l'analyse palynologique permet de positionner le passage d'un étage géologique à l'autre. Cette transition se situe vers 195 m de profondeur. Un niveau calcaire massif de 60 cm, vers 160 m, rompt cette monotonie relative (calcrète phréatique ?). La partie supérieure des sapropèles passe à des marnes fossilifères (marnes à *N. crassatina*) de 85 à 60 m composées d'argiles massives, de marnes et de calcaires et des niveaux coquilliers. De 60 m à 33 m, une calcarénite grise à Archiacines du Stampien inférieur, puis des marno-calcaires de 33 à 25 m du Stampien supérieur, viennent clôturer la série oligocène.

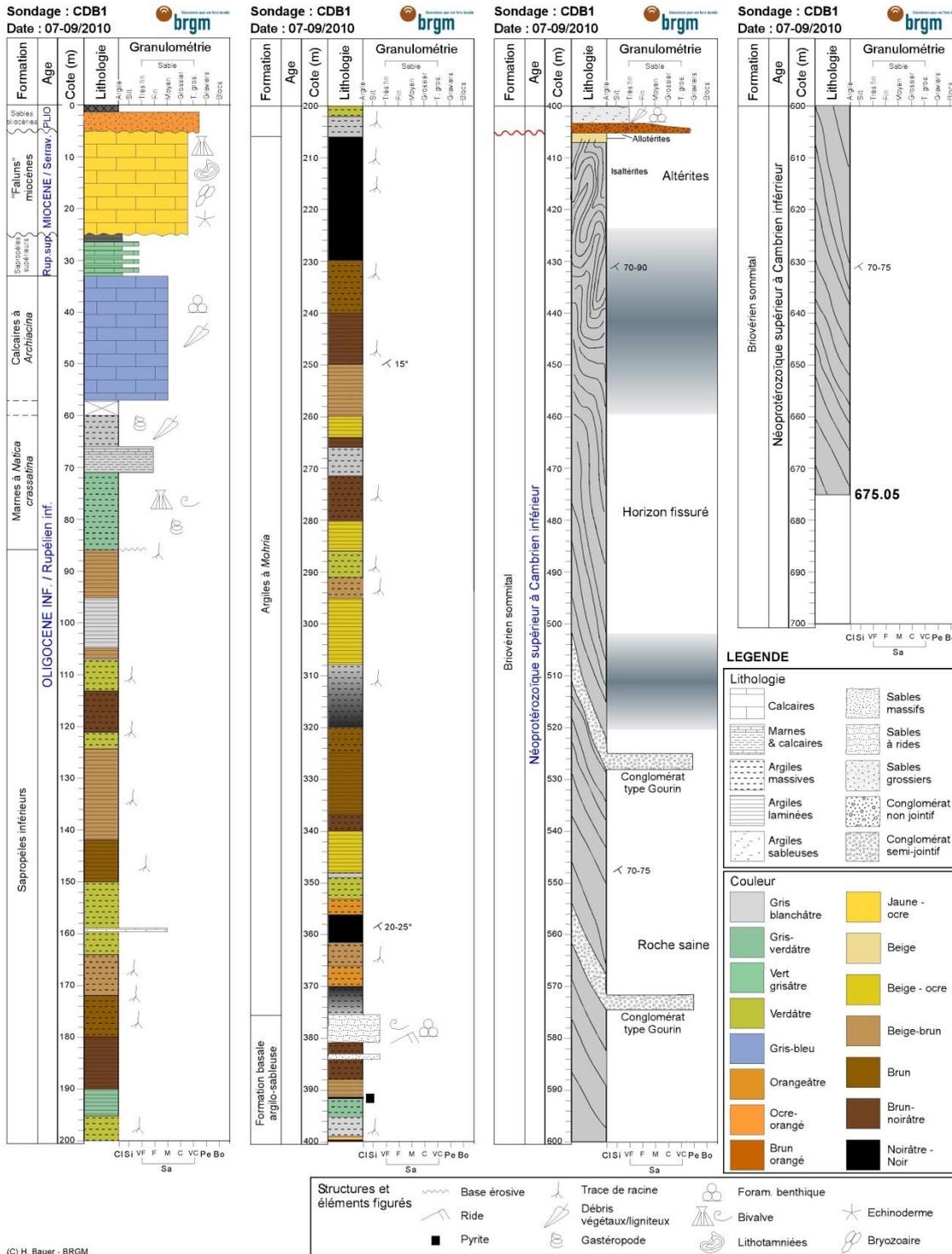


Figure 31 : Coupe géologique du forage CDB1 (modifié de Bauer et al., 2011).
Voir la Figure 7 pour un détail de la partie cénozoïque du forage.

Le **Miocène** du bassin de Rennes est représenté par les « faluns » et calcaires à Lithothamnium, une formation biodétritique marine qui ravine la formation sous-jacente. Les affleurements de faluns ne dépassent guère l'aire du bassin de Rennes (Figure 32). Ces « faluns » sont des sables carbonatés très coquilliers, dont le cortège de minéraux lourds (zircon et rutile) suggère une alimentation provenant de la Formation du Grès armoricain. L'épaisseur qu'il est possible d'attribuer à cette formation est de 30 m maximum. Ces sédiments appartiennent à une période allant du Burdigalien inférieur au Serravallien supérieur (Cavelier, 1989).

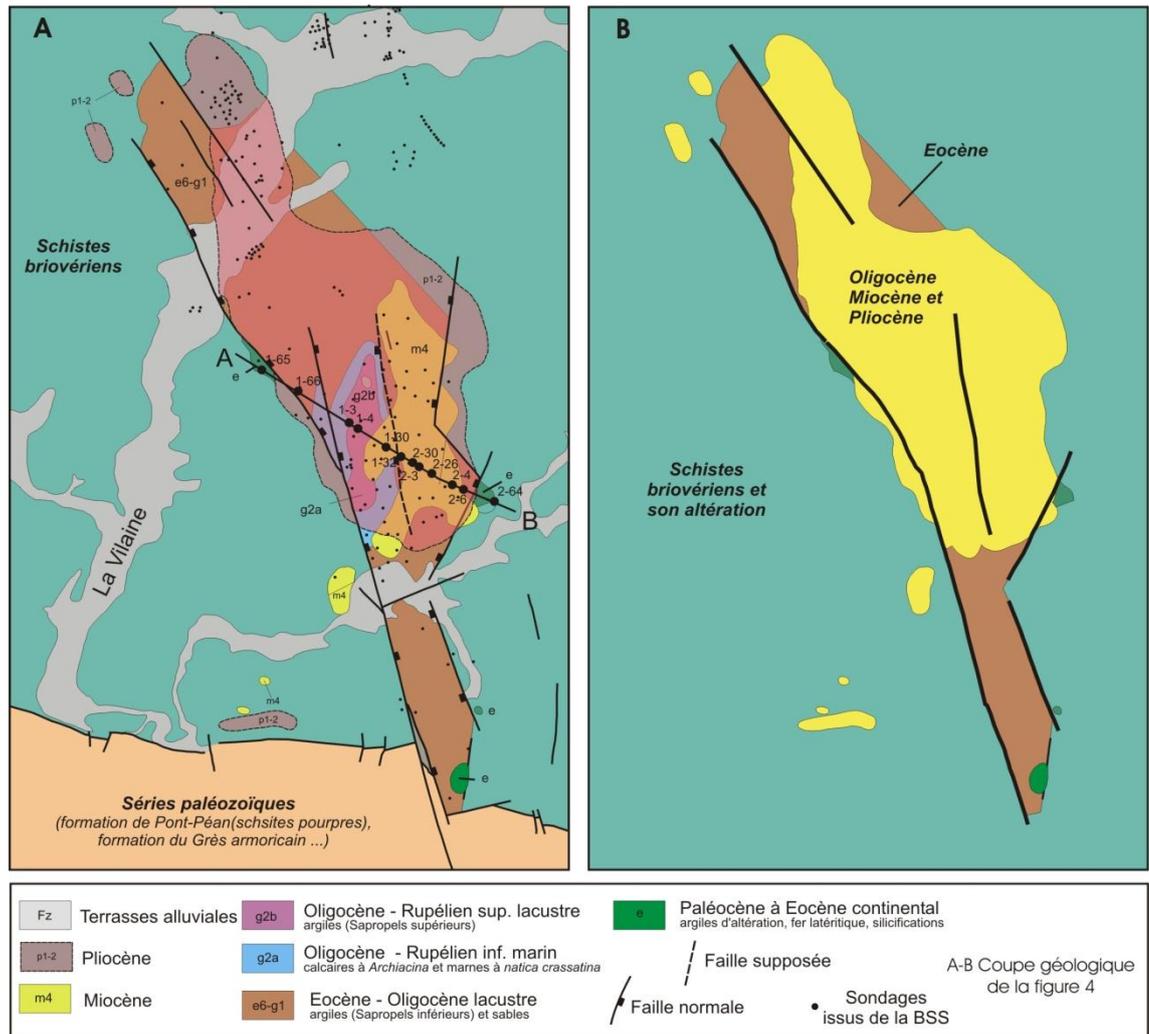


Figure 32 : A : Carte géologique du bassin de Bruz – Chartres-de-Bretagne modifiée d'après Thomas (1999) ; B : Simplification de la géologie pour la construction du modèle.

Le **Pliocène** est lui aussi en contact érosif avec les faluns miocènes. Cette formation est composée de sables fossilifères à azoïques rouges caractéristiques (Plio-Pléistocène). La formation plio-pléistocène dans le bassin de Rennes a une direction générale nord-ouest - sud-est, ce qui pourrait suggérer un contrôle tectonique par la faille majeure de Pont-Péan et ses satellites (Figure 32). On retrouve cependant un

bon nombre d'affleurements de cette formation à l'extérieur du bassin. Cette formation pliocène termine la séquence stratigraphique du bassin.

De nombreuses terrasses alluviales anciennes sont présentes dans ce secteur de l'Ille-et-Vilaine. Elles correspondent aux lits successifs soit de la Vilaine, soit du Meu ou encore de la Seiche au cours du **Quaternaire**. Elles sont les témoins des variations climatiques froides et chaudes de notre ère. Les plus anciennes se retrouvent aux altitudes les plus hautes alors que les récentes se situent entre 2 et 5 m au-dessus des lits des cours d'eau actuels. Sur ce secteur Sud-Ouest de Rennes, on retrouve ainsi un étagement allant du Quaternaire ancien (FR : limite Plio-Quaternaire) au cours d'eau actuel (Fz) : avec les terrasses notées FR entre 85 et 95 m, Fw entre 40 et 80 m, Fx entre 10 et 25 m et enfin Fy en-dessous de l'altitude 25 m NGF.

- **Géométrie**

En 1957, les levés gravimétriques BRGM de la Bretagne pour l'établissement de la carte gravimétrique de la France au 1/80 000e, avaient mis en évidence un type d'anomalie particulier qui tranchait avec l'allure générale de la carte gravimétrique régionale. Ces anomalies légères occupent des surfaces relativement petites, ont des formes allongées selon des directions N150 et sont caractérisées par la diminution rapide des valeurs de l'accélération de la pesanteur de 6 à 8 mgal sur 1 km. Quatre anomalies principales avaient été dénombrées : à Nort/Erdre, à Saffré, à Sainte-Anne-sur-Vilaine et au sud-ouest de Rennes (Bollo *et al.*, 1958).

Cette dernière correspond à l'emplacement du bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes et présente une dimension et amplitude supérieures aux précédentes, soit près de 15 à 18 km de long sur 2 à 3 km de large et un défaut de gravité par rapport aux valeurs moyennes limitrophes de 8,5 mgal (Figure 33).

Jaeger (1959) avait évalué la profondeur du bassin à 500 m de profondeur compte tenu des données géologiques et de l'étude géophysique électrique (Cluseau, 1958 dans Jaeger, 1959) concomitantes de l'étude gravimétrique. La géométrie du bassin proposée était celle d'un graben, et principalement régie par l'évolution tectonique post-hercynienne du Massif armoricain perceptible à partir du Cénozoïque. Deux familles conjuguées de décrochements NE-SW senestre et NW-SE dextre contrôlent la géométrie du bassin, au moins jusqu'au Pliocène (Trautman *et al.*, 1994).

La cinématique sur la faille majeure de Pont-Péan, n'est donnée que par des stries, assez importantes cependant pour avoir été notées par les géologues à l'époque de l'exploitation de la mine de Pont-Péan. Ces stries montraient un mouvement décrochant - extensif avec une direction du mouvement (pitch) de 15° vers le Sud (Moussu et Prouhet, 1957).

Les levés des feuilles Rennes et Janzé indiquent un rejet horizontal (décrochement dextre) apparent du contact Paléozoïque / Briovérien de 1 500 m environ. Considérant le pitch de 15°S, il est possible de calculer la composante verticale du rejet de la faille de la mine de Pont-Péan, qui serait de 400 m, finalement en accord avec les données géophysiques. L'histoire de la faille de Pont-Péan est complexe : initiée au Dévonien

avec la mise en place du filon de dolérite, elle est réactivée durant l'orogénèse hercynienne, minéralisée puis réactivée au Cénozoïque lors de la création du bassin de Rennes et des soubresauts oligo-pliocènes. Thomas (1999) proposa une coupe géologique de synthèse en travers du bassin d'effondrement, coupe qui fût réalisée à partir des forages contenus dans la Banque du Sous-Sol (BSS) (Figure 34), coupe qui laissait donc encore de grandes incertitudes sur la nature des sédiments en deçà de 140 m de profondeur.

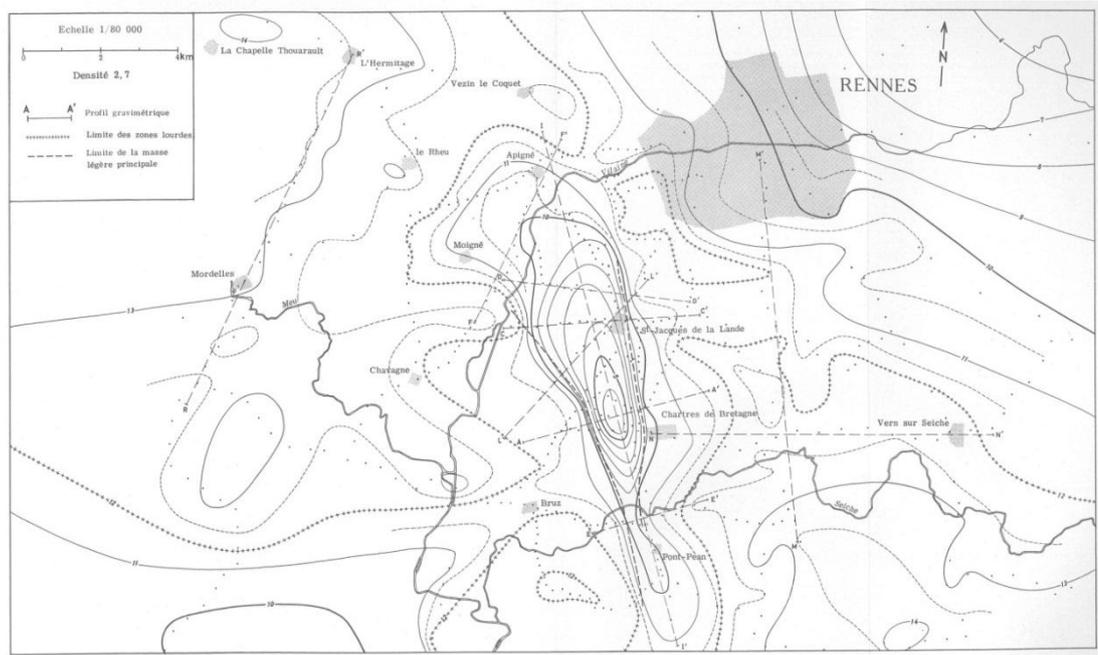


Figure 33 : Anomalie gravimétrique engendré par le bassin tertiaire de Chartres-de-Bretagne – Rennes d'après Jaeger (1959).

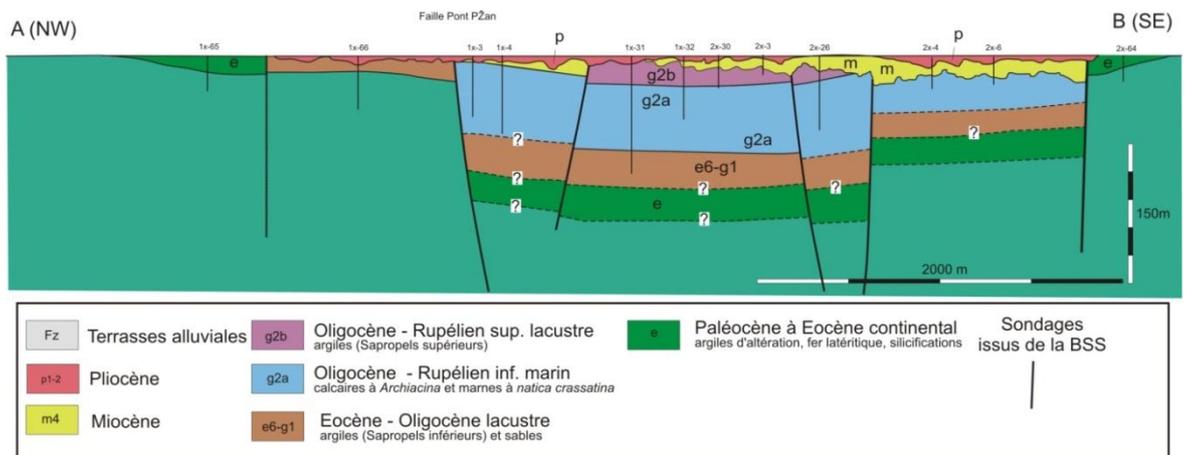


Figure 34 : Coupe géologique du bassin de Chartres-de-Bretagne avant le forage carotté CINERGY, modifié d'après Thomas (1999). Localisation sur la figure 32A (noter l'exagération verticale).

2.3.3. La modélisation 3D

L'éditeur géologique : le Geomodeller

La modélisation géométrique en trois dimensions des objets géologiques est une étape qui nécessite au géologue de faire des hypothèses de départ. Les phénomènes géologiques doivent être assez bien connus car il sera nécessaire de construire une stratégie afin de représenter au mieux l'objet modélisé.

Pour être pertinente, cette modélisation 3D doit s'appuyer sur l'ensemble des connaissances et des données disponibles (cartes, coupes, modèles numériques de terrain, sondages, etc.) sur le sujet d'étude mais aussi sur l'interprétation géologique. C'est pourquoi l'Éditeur Géologique a été conçu pour fusionner dans le même espace 3D les données provenant de différentes origines, ce qui permet de s'assurer de leur cohérence géométrique.

Pour ce faire, l'Éditeur géologique propose au géologue de travailler avec ses outils habituels tels que des cartes, des coupes ou des sondages. De plus, l'utilisateur dispose des outils nécessaires pour contraindre ses interprétations géologiques. L'une des originalités de l'Éditeur géologique est la prise en compte simultanée de données de position des limites et de données de pendage des formations géologiques. Une fois construit, le modèle géométrique peut être représenté sur la carte, dans les coupes ou en volume.

L'élaboration d'un modèle géométrique est la base essentielle pour des calculs postérieurs. En effet, un modèle parfaitement contraint et cohérent est indispensable pour calculer des volumes, réaliser des simulations hydrogéologiques, calculer des contributions géophysiques (gravimétrique ou magnétique) et bien d'autres applications.

Les données

La modélisation 3D réalisée dans la présente étude s'appuie sur :

- les contours géologiques des cartes au 1/50 000 de l'emprise du bassin : feuilles Rennes et Janzé (Figure 32) ;
- les forages déclarés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) disponibles sur le bassin et son encaissant, soit 73 forages au total incluant le forage carotté CINERGY (Figure 35) ;
- la connaissance sur les formations géologiques présentes dans le bassin et son substratum ;
- le profil sismique réalisé dans le cadre du programme GéoFrance 3D : profil HR1 (voir ci-dessous) (Figure 39, Figure 40) ;
- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la BDTOPPO de l'IGN au pas de 50 m ;

- et enfin une coupe géologique contenant la projection des travaux de la mine de Pont-Péan (Figure 41).

Compte tenu du manque de données sur certains secteurs et de la complexité géométrique des formations néogènes, des simplifications ont été faites afin de garder un modèle assez homogène. C'est pourquoi quatre couches géologiques seulement ont été modélisées et seules les failles principales de la carte géologique ont été retenues.

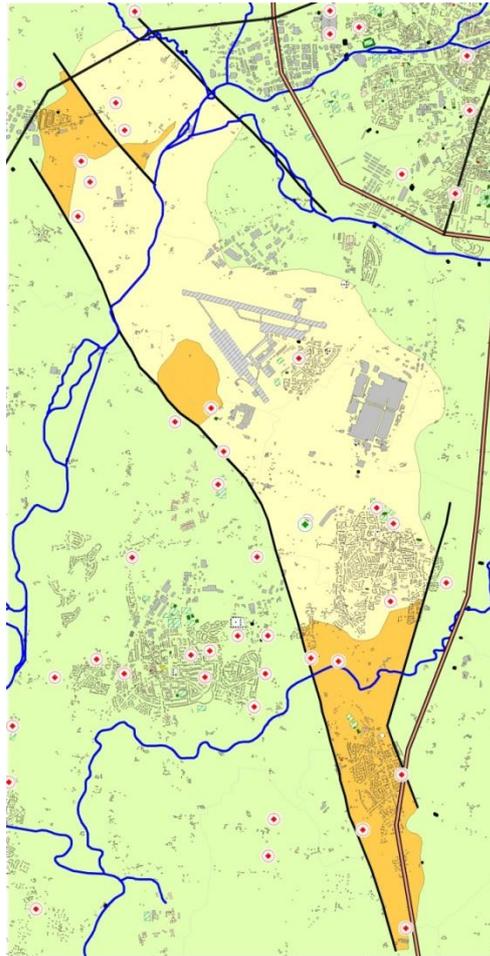


Figure 35 : Géologie simplifiée pour la modélisation du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes.

En vert le Briovérien au sens large, en orange : l'Éocène, en jaune : l'Oligo-Néogène.
Les points rouges correspondent aux 73 forages de la BSS ; les failles sont les traits en noir.

- **Les formations géologiques du modèle (lithologie et stratigraphie)**

Les roches du socle ont été divisées en deux lithologies : le **socle briovérien sain** et le **socle briovérien altéré**. Le système plicatif de Bretagne centrale observable dans les schistes briovériens et soulignés parfois par des niveaux de grès n'a pas été modélisé. Par ailleurs, le profil sismique fait plutôt ressortir les différents horizons d'altération du socle que son pendage. Ces deux lithologies se retrouvent à la base du

bassin et ont été clairement recoupées par le forage CDB1. Les données géologiques utilisées pour la modélisation du socle sont essentiellement issues des forages de la BSS.

Les unités lithologiques argilo-sableuses basales et argileuses sus-jacentes (Argiles à Mohria, Sapropèles inférieurs,) ont été regroupées, malgré des âges allant de l'Éocène à l'Oligocène, sous l'unité « **Éocène** ».

En contrepartie, les unités carbonatées supérieures (depuis les Marnes à Natica jusqu'au Sables pliocènes) sont regroupées dans une unité nommée « **Oligo-Néogène** ».

La modélisation par le Geomodeller nécessite d'attribuer à chaque formation géologique une relation avec les autres formations avoisinantes. Ces relations sont au nombre de deux ici : *Erod* si la formation géologique est en contact érosif sur celle inférieure ou *Onlap* si la formation géologique repose sur la précédente sans l'éroder.

<i>Lithologie-Stratigraphie du modèle</i>		<i>Relation entre les lithologies</i>
	Oligo-Néogène (Oligocène, Miocène et Pliocène)	Erod
	Eocène	Erod
	Schistes briovériens altérés	Onlap
	Schistes briovériens sains	

Figure 36 : Relation entre les différentes formations géologiques du modèle.

• **Les failles**

Seules quatre failles principales ont été prises en compte dans le modèle (Figure 35, Figure 37) :

- la faille de Pont-Péan à l'ouest (NS à N150 et de 70 à 90°E), la plus importante et modélisée comme étant une faille normale ;
- au sud, deux failles sub-parallèles (NS et N150) et sub-verticales (de 70 à 90°W), en regard de la faille de Pont-Péan. Elles limitent le bassin vers l'est, et ont également un jeu normal ;
- enfin, une faille au nord (N150 80°W), parallèle à la faille de Pont-Péan et également considérée comme normale.

Dans un premier temps, la modélisation s'est faite avec des failles considérées comme infinies (option proposée par le logiciel) mais le Geomodeller a montré des difficultés à proposer des solutions cohérentes. Finalement, toutes les failles ont été considérées comme finies, et le Geomodeller a proposé des solutions qui se rapprochent de la cartographie géologique (Figure 37).

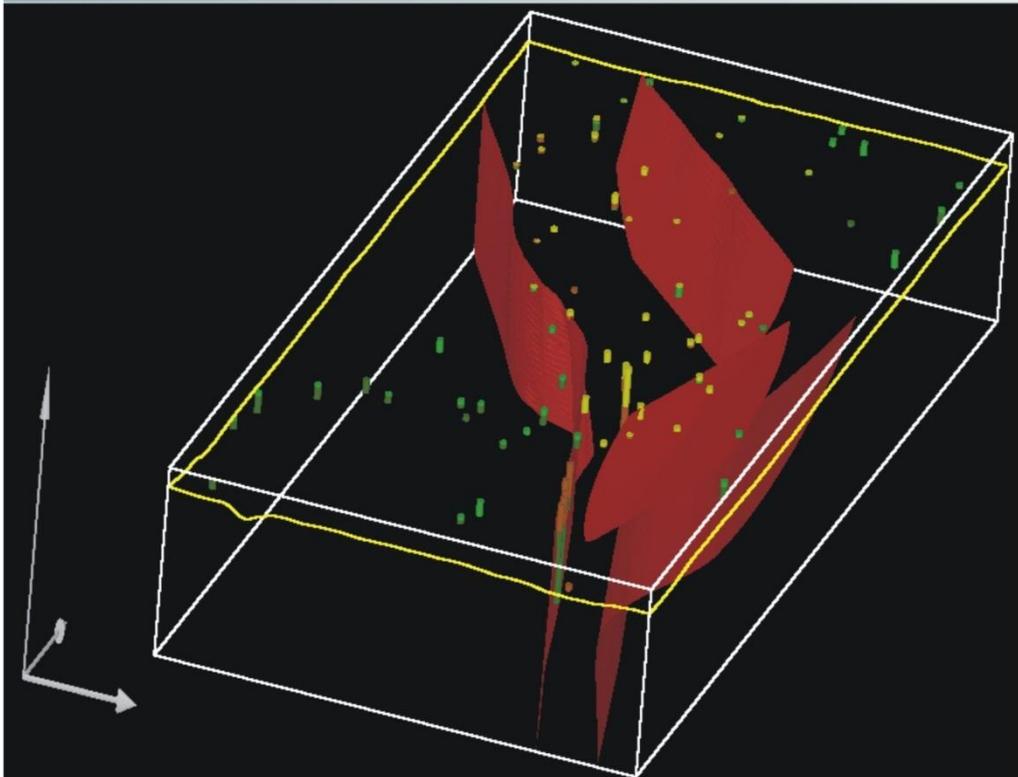


Figure 37 : Modélisation des failles du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes, les failles sont définies comme étant finies.

- **Les forages issus de la BSS**

Les logs validés de 73 ouvrages de plus de 20 m contenus dans la Banque de données du Sous-Sol ont été extraits, sur un total de 949 existants. Parmi ces ouvrages, certains avaient bénéficié d'une réinterprétation par le géologue régional qui les avait harmonisés avec les cartes géologiques au 1/50 000.

Ces logs validés de forage ont été complétés ponctuellement par d'autres forages fournissant une information géologique pertinente dans des secteurs géographiques lacunaires.

Cependant un travail d'homogénéisation a été nécessaire, afin que l'ensemble des ouvrages correspondent à la simplification géologique posée pour la modélisation (Figure 38).

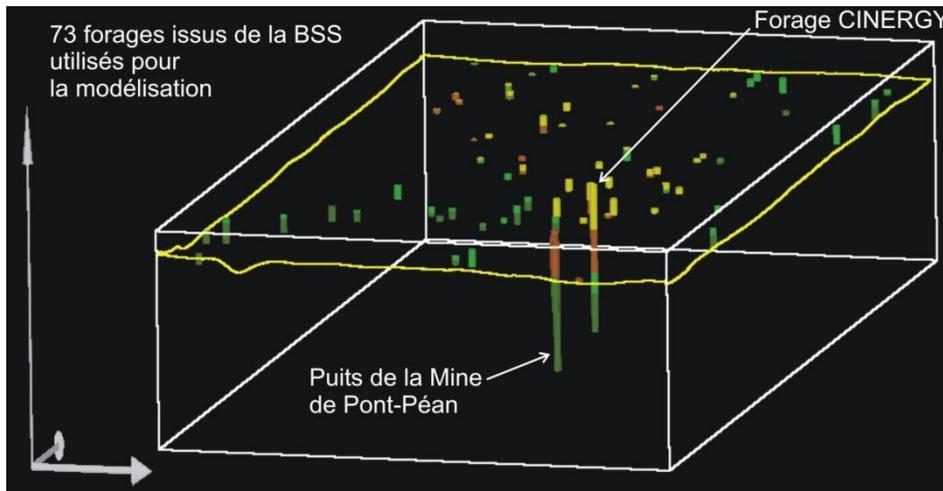


Figure 38 : Projection dans le Geomodeller de l'ensemble des forages issus de la BSS pour la modélisation du bassin (exagération verticale x 3).
(les couleurs des formations géologiques correspondent à celles de la Figure 36).

- Le profil sismique

Dans le cadre du projet ARMOR2 du programme national GéoFrance3D consacré à l'étude de la structure profonde du Massif armoricain, une investigation par sismique réflexion haute résolution dans le bassin de Rennes avait été réalisée.

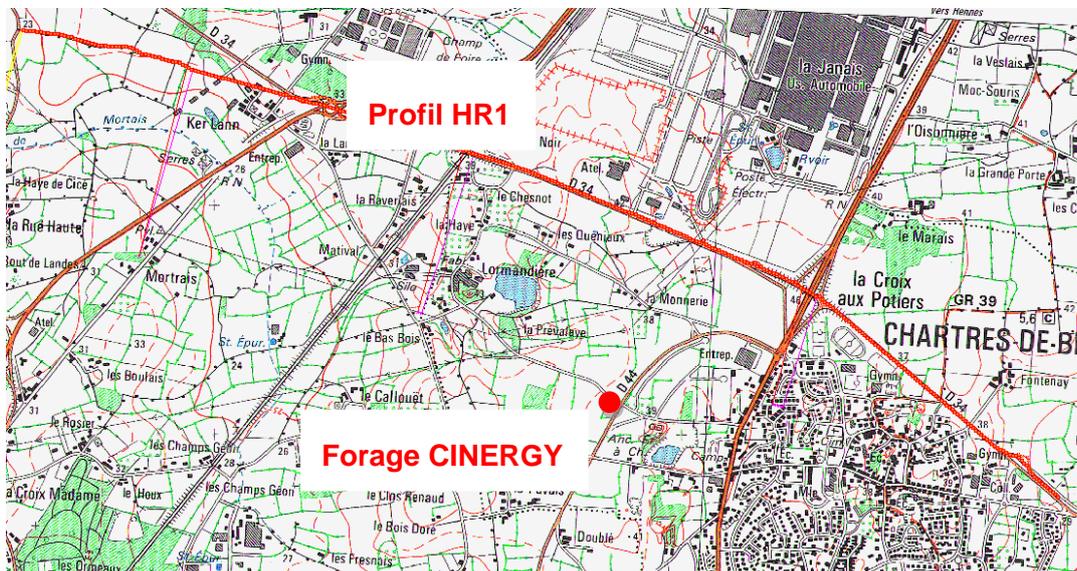


Figure 39 : Carte topographique avec le positionnement du profil HR1 et du forage CDB1.

L'objectif de ce profil sismique réflexion était de déterminer la profondeur et la géométrie du remplissage sédimentaire de ce bassin. Le tracé est orienté WNW-ESE et représente une longueur totale de 5 km (Figure 39). Les travaux ont été réalisés par

la mission C.G.G. n 100 32 13 et se sont échelonnés du 8 septembre 2000 (démarrage de l'échelon topographique) au 5 octobre 2000 (fin du ramassage des câbles).

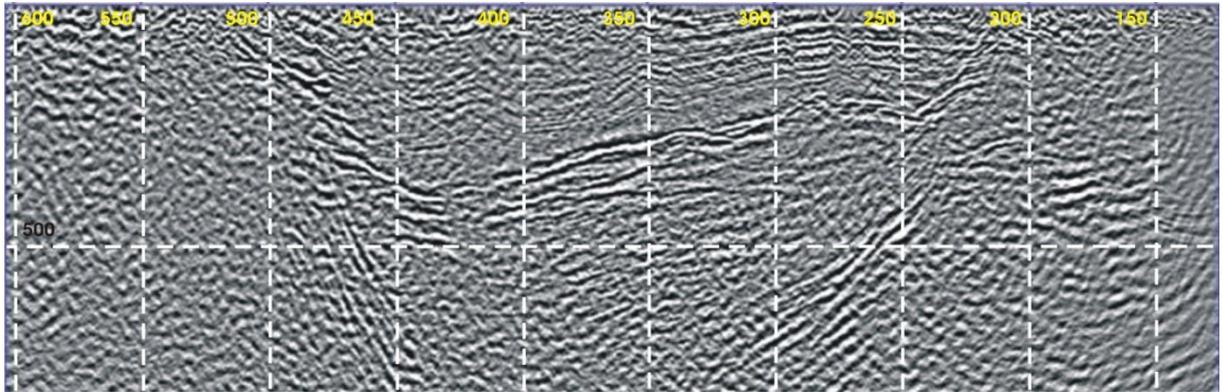


Figure 40 : Découpage du profil sismique HR1 afin de le caler dans le Geomodeller.

Le profil HR1 (Figure 40) a été calé dans le Geomodeller, en définissant une coupe de 800 m de profondeur sur 5 000 m de longueur, les 800 m étant la profondeur de la « boîte » du modèle.

Ce profil a été ensuite digitalisé à l'intérieur du Geomodeller où chaque réflecteur a été interprété en fonction des résultats du forage CDB1.

• Les données de la mine de Pont-Péan

Environ 17 puits verticaux d'exploitation ou d'exploration avaient été réalisés et elle possédait le record régional du puits le plus profond, avec le Puits Républicain qui descendait à 595 m (Figure 41).

Afin d'avoir des contraintes en profondeur sur le modèle numérique, les données sur la profondeur du mur de l'Éocène (base des argiles éocènes) ont été récupérées à partir des données obtenues sur 5 puits de la Mine de Pont-Péan (Figure 41, Tableau 3) : puits du Midi, puits de l'Orme, puits Républicain, puits des Députés et puits Saint-Joseph.

Puits	X L2E	Y L2E	Z NGF	Prof. (en m)	Prof. du mur de l'Éocène
du Midi	298160	2342267	28	300	137,5
de l'Orme	298117	2342481	26	162,5	150
Républicain	298061	2342464	25	595	150
des Députés	297999	2342972	22.5	275	150
Saint-Joseph	297894	2343422	19	250	175

Tableau 3 : Profondeurs des puits et de la base de l'Éocène sur cinq puits de la mine de Pont-Péan.

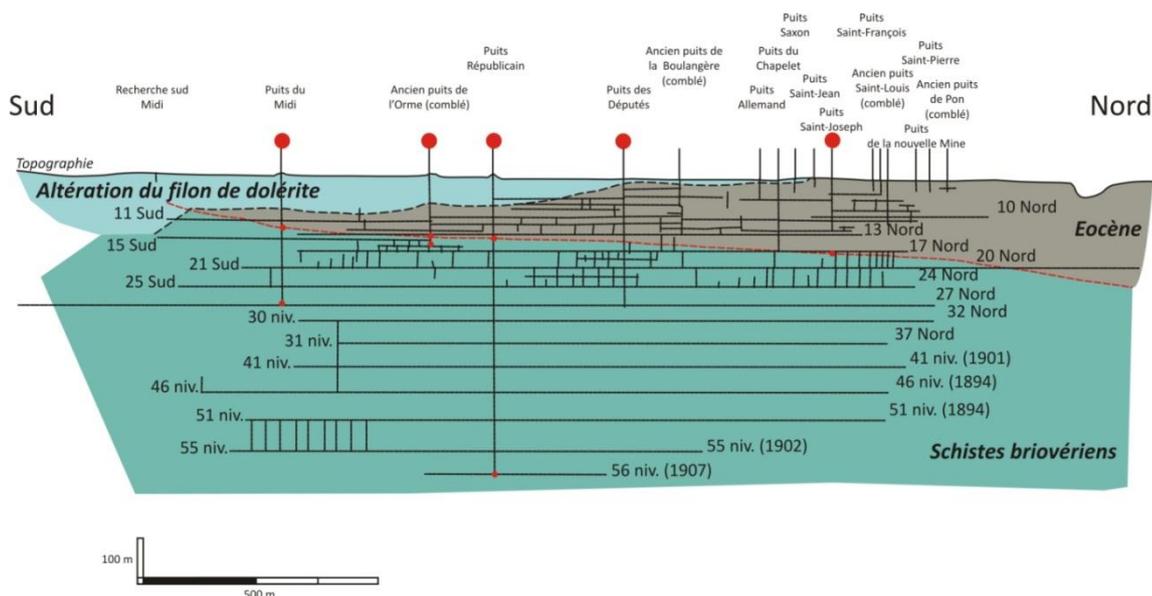


Figure 41 : Coupe géologique au niveau du filon de dolérite de la Mine de Pont-Péan avec la projection des travaux de la mine, Moussu et Prouhet (1957).
(les traits noirs horizontaux et verticaux correspondent aux puits et aux galeries ; les points rouges aux points d'appui utilisés pour la modélisation).

Résultats et géométrie obtenus

Le modèle obtenu est assez conforme à l'image géométrique en trois dimensions décrite par les différents géoscientifiques ayant travaillé sur ce secteur de l'Ille-et-Vilaine (Figure 42).

Sur certains secteurs, nous ne sommes pas intervenus et avons laissé le Geomodeller proposer une solution. L'une des premières constatations, comme l'avait montré le forage carotté du projet CINERGY, est qu'il y a une épaisseur importante de socle altéré. Mais les forages hors du bassin indiquent que l'épaisseur d'altérites est plus importante à l'est de la faille de Pont-Péan qu'à l'ouest du bassin (Figure 42 et Figure 44 bas). Cette modélisation est contrainte par les épaisseurs importantes d'altérites observées sur les forages de la BSS dans le coin nord-est du bloc diagramme ci-dessous et lors des travaux du barreau de Pont-Lago.

Concernant l'Éocène, le Geomodeller propose, malgré les contraintes imposées, que la formation géologique puisse ne pas avoir été restreinte à la géométrie du bassin. Cette suggestion est cohérente avec le fait que le remplissage est essentiellement argileux, en dépit de la tectonique synsédimentaire révélée par le profil sismique. Une explication possible serait que le bassin actuel ne soit qu'un reliquat, un témoin préservé d'un bassin plus large et dont le dépôt-centre serait ici.

Ceci est assez cohérent avec les données d'entrée du modèle puisque au nord comme au sud, le mur de l'Éocène remonte vers la surface topographique (Figure 43). Au nord, cette remontée est visible sur la carte géologique au 1/50 000 et au sud, sur les données des puits de la mine de Pont-Péan.

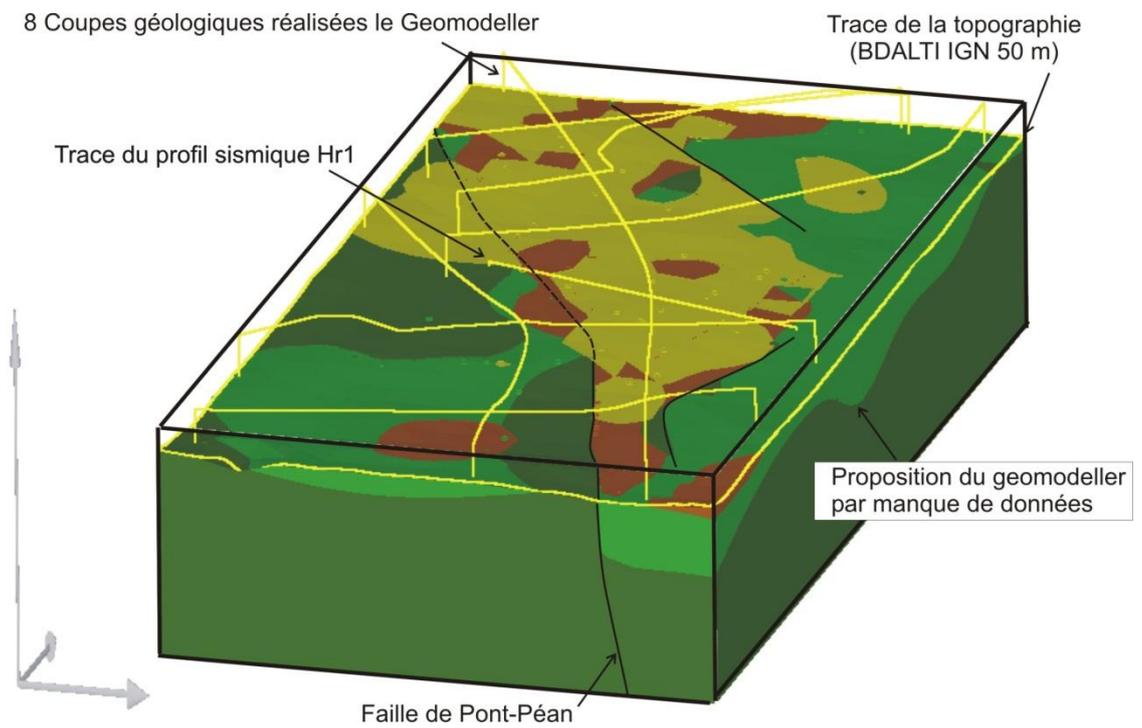


Figure 42 : Bloc diagramme du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes à partir du geomodeller.

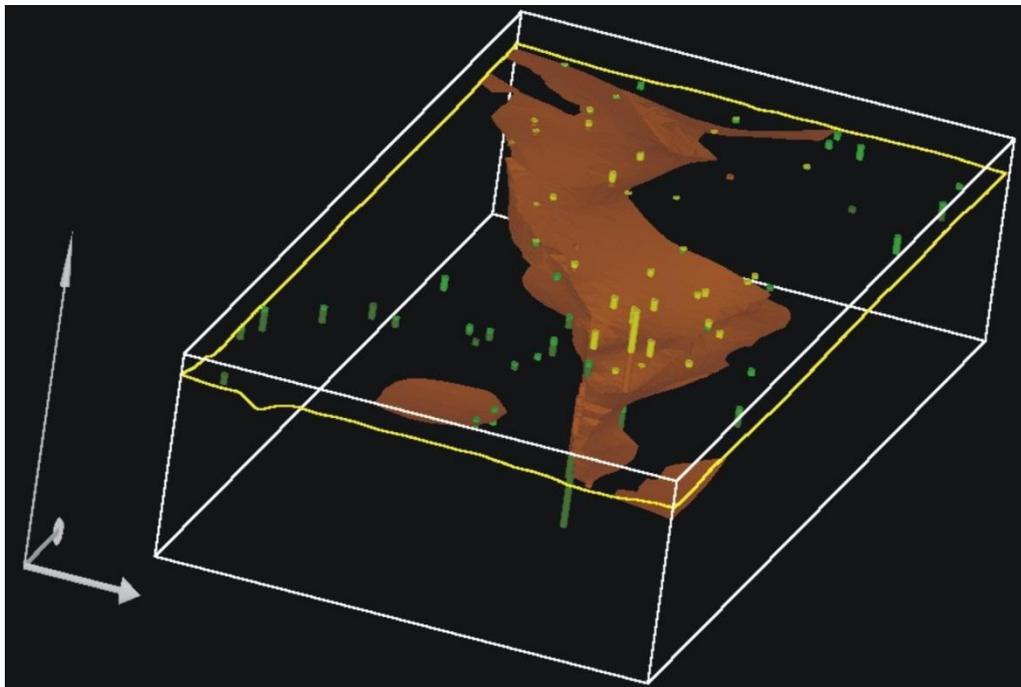


Figure 43 : Géométrie de l'Éocène au niveau du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes. L'Éocène est évasé au nord et au sud du bassin.

Le centre du bassin est donc bien situé au niveau de l'anomalie gravimétrique et du tracé du profil sismique HR1 (Figure 42 & Figure 43), dans le secteur où la faille majeure de Pont-Péan semble changer de direction voire se diviser (?).

La formation Oligo-Néogène à la même géométrie que celle de l'Éocène. Le Geomodeller propose une plus vaste étendue surtout sur la partie nord du bassin. Cet élargissement est la conséquence du fait que la formation Oligo-Néogène est une formation composite contenant à la fois le Miocène et le Pliocène. Cependant le site du forage CDB1 est localisé là où la formation a la plus grande puissance et par conséquent le dépôt-centre du bassin (Figure 44 haut).

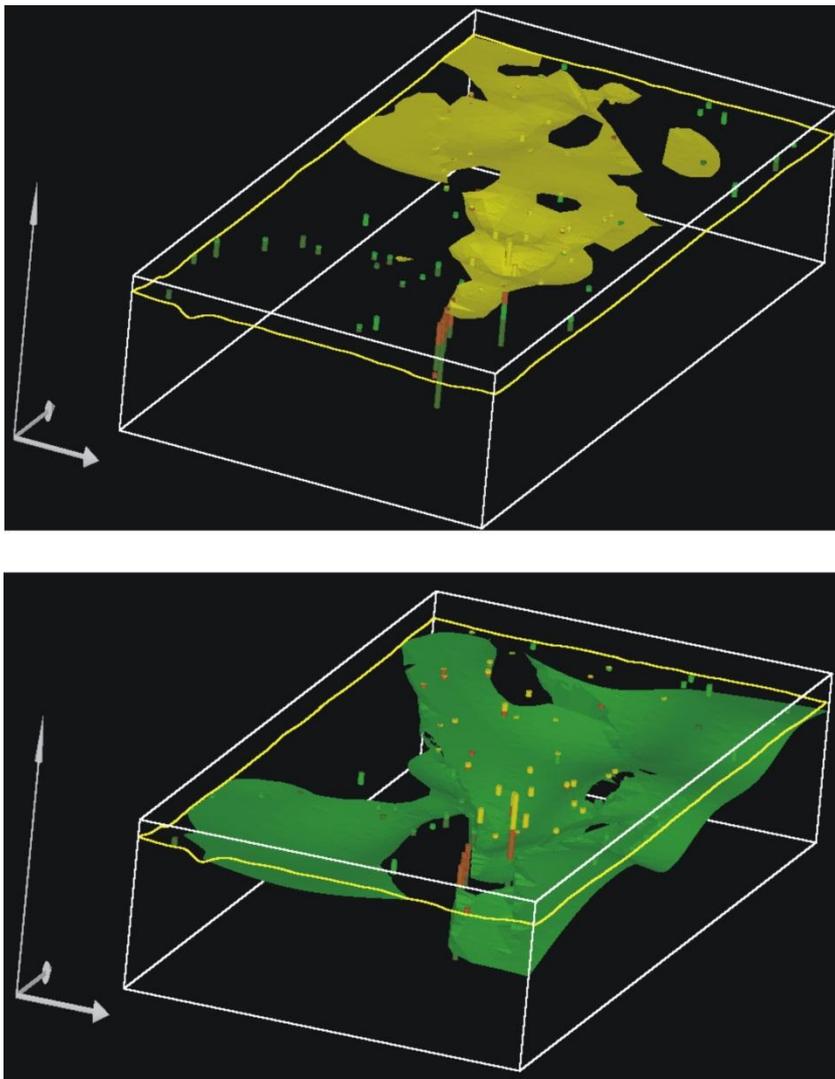


Figure 44 : En haut : géométrie de la formation Oligo-Néogène ; en bas : géométrie des altérites autour du bassin de Chartres-de-Bretagne – Rennes.

2.3.4. Conclusions et perspectives

La réalisation du forage profond du Projet CINERGY permet de mieux contraindre la géométrie du bassin de Chartres-de-Bretagne et de mieux l'illustrer. On remarque qu'il s'agit d'un bassin complexe à l'intérieur duquel les formations Éocène et Oligo-Néogène ont le même dépôt-centre. Ceci pourrait indiquer un régime de contraintes tectoniques homogènes au moins pour l'Éocène et l'Oligocène.

Cependant, la formation Oligo-Néogène est une formation composite, dont la géométrie modélisée est dans le cas présent surtout guidée par l'Oligocène carbonaté. Une modélisation plus fine des différentes unités litho-stratigraphiques de cet ensemble serait pertinente pour mieux comprendre l'évolution géodynamique du bassin. Ces formations géologiques de l'Oligocène (Calcaires et marnes), du Miocène (faluns) et du Pliocène (sables rouges) constituent par ailleurs les trois aquifères principaux du bassin. Elles ont été (ou le sont encore pour certaines) le siège d'exploitation de matériaux. Les pressions sociétales sont importantes autant pour la ressource hydrogéologique que pour les ressources minérales.

Depuis Brunel (1971), il n'y pas eu de réévaluation de la ressource en eau contenue dans ces aquifères. Leurs relations ne sont pas connues et ne sont pas clairement caractérisées. Il serait donc pertinent de réaliser le même travail mais cette fois-ci sur les aquifères supérieurs, afin d'en avoir une géométrie plus détaillée, d'en préciser leurs relations, d'évaluer les aires d'alimentation pour en optimiser l'exploitation et la gestion.

En attendant cette éventuelle remise à jour de la connaissance hydrogéologique du bassin, le modèle géologique servira de base au modèle thermique préliminaire prévu dans le cadre de CINERGY en 2012.

3. Études hydrogéologique et hydrochimique

3.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

3.1.1. Les aquifères et leurs utilisations

Dans le contexte géologique du bassin de la Vilaine, trois types d'aquifères peuvent être distingués (Talbo *et al.* 2001, et Figure 2), le troisième se subdivisant en trois sous-systèmes :

- les aquifères alluviaux ;
- les aquifères des bassins tertiaires ;
- les aquifères de socle parmi lesquels il faut distinguer trois sous-systèmes, étroitement connectés et interdépendants, mais aux caractéristiques hydrodynamiques différentes :
 - l'horizon supérieur (socle « pas profond »), constitué sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur de roche altérée, constituant un milieu poreux,
 - l'horizon inférieur (socle « semi-profond »), milieu fissuré constitué par la roche saine où les circulations dépendent de réseaux plus ou moins denses de fissures liées à l'altération, ouvertes et interconnectées,
 - le socle sain fracturé (socle « profond »), où les circulations dépendent de l'interconnexion des fractures (failles tectoniques). Les résultats obtenus sur certains forages en Bretagne montrent que des fractures conductrices d'eau potable peuvent être rencontrées jusqu'à plus de 200 ou 250 m de profondeur.

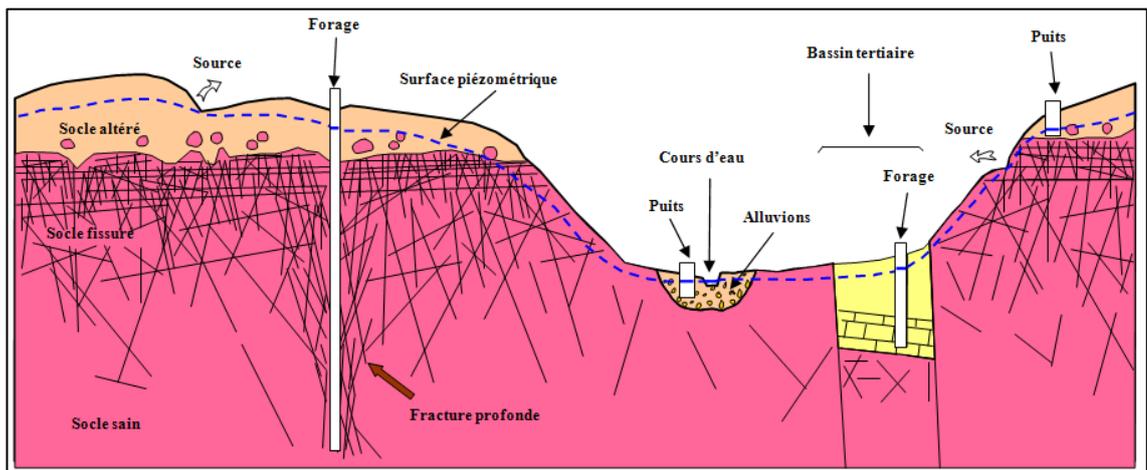


Figure 45 : Schéma des aquifères présents dans le bassin de la Vilaine.

En raison de la perméabilité des terrains du bassin tertiaire de Rennes, fortement supérieure à celle des formations de socle alentour (10^{-4} à 10^{-3} m/s, par rapport à 10^{-7}

à 10^{-5} m/s dans le socle en moyenne), l'eau souterraine peut y être extraite plus facilement avec des débits très importants. Cependant, cette ressource est limitée du fait des dimensions réduites du bassin (environ 15 km par 3 km).

L'eau souterraine du bassin de Rennes est prélevée pour beaucoup d'usages : alimentation en eau potable (Syndicat Intercommunal des Eaux du Sud de Rennes), industrie (Entreprise PSA Peugeot-Citroën, forages numérotés 03176X0016 à 0069 dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM), et usages privés (agriculture principalement, arrosage jardins...).

À proximité du forage CDB1 (n° BSS 03531X0208/F), il existe trois captages d'alimentation en eau potable (AEP, Tableau 1) qui exploitent les aquifères tertiaires : sables du Pliocène, faluns du Miocène et calcaires de l'Oligocène.

Commune	Lieu-dit	N° BSS (N° SISE-Eaux)	Nature de l'ouvrage	Profondeur (m)	Débit annuel en m ³ (2010)	Teneur en nitrates en mg/l (période concernée)
BRUZ	FENICAT	03531X0013/P (035000455)	Puits	10	292 000	36 (2010)
CHARTRES-DE-BRETAGNE	LA MARIONNAIS	03532X0005/F (035000456)	Forage	67,2	292 000	35 (2010)
CHARTRES-DE-BRETAGNE	LA PAVAIS	03531X0007/F (035000457)	Forage	49,6	292 000	28 (2010)

Tableau 4 : Liste des captages d'alimentation en eau potable.
Sources documentaires : ARS35, BRGM et AELB.

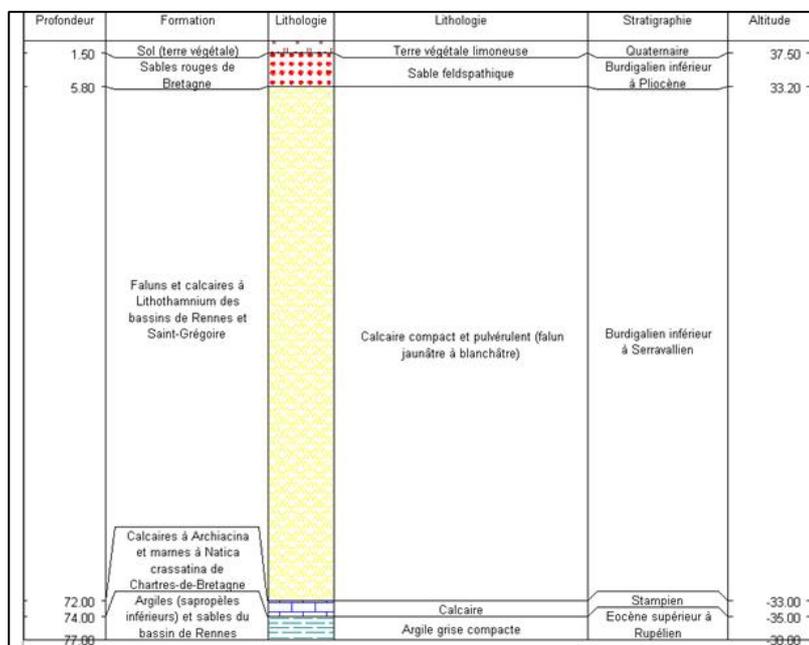


Figure 46 : Coupe géologique du forage de la Marionnaise.

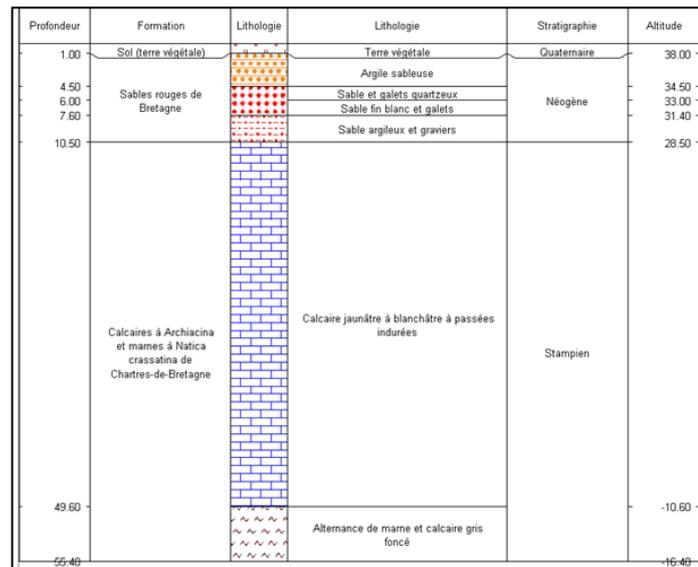


Figure 47 : Coupe géologique du forage de la Pavais.

Le puits de Fénicat a été réalisé en 1945 et il capte la nappe des calcaires oligocènes. Le forage de la Marionnaise a été réalisé en 1962 et il exploite principalement l'aquifère des faluns Miocène (Figure 46). Le forage de la Pavais a été effectué en 1962 et il utilise surtout les calcaires oligocènes mais également les sables Pliocène (Figure 47).

3.1.2. Productivité du sous-sol

On connaît la profondeur et le débit en fin de foration (débit instantané) pour 132 des 509 forages d'eau implantés dans un périmètre de 20 x 20 km autour du bassin de Rennes (Figure 48).

Les formations géologiques ont été renseignées par les moyennes des débits et profondeurs calculées de ces forages (Tableau 5), à partir d'études hydrogéologiques existantes (Brunel *et al.* 1971, 1979 ; Mougin *et al.*, 2008) complétées par les informations de la BSS.

Ce tableau confirme que les formations du Tertiaire (tous âges confondus) sont bien plus productives que celles du socle. En raison de la faible épaisseur des alluvions, les forages implantés dans ces formations sont moins profonds et ils donnent de faibles débits.

Parmi les formations du socle, ce sont les formations géologiques du Briovérien qui sont les plus productives avec un débit moyen de 8,1 m³/h, pour une profondeur moyenne de 63,4 m. Viennent ensuite les Grès armoricains : débit moyen d'environ 5 m³/h pour une profondeur moyenne de foration de 55 m. Les schistes pourpres de Pont-Réan sont les moins productifs : débit moyen de 3,3 m³/h pour une profondeur moyenne de foration plus élevée de 65,3 m.

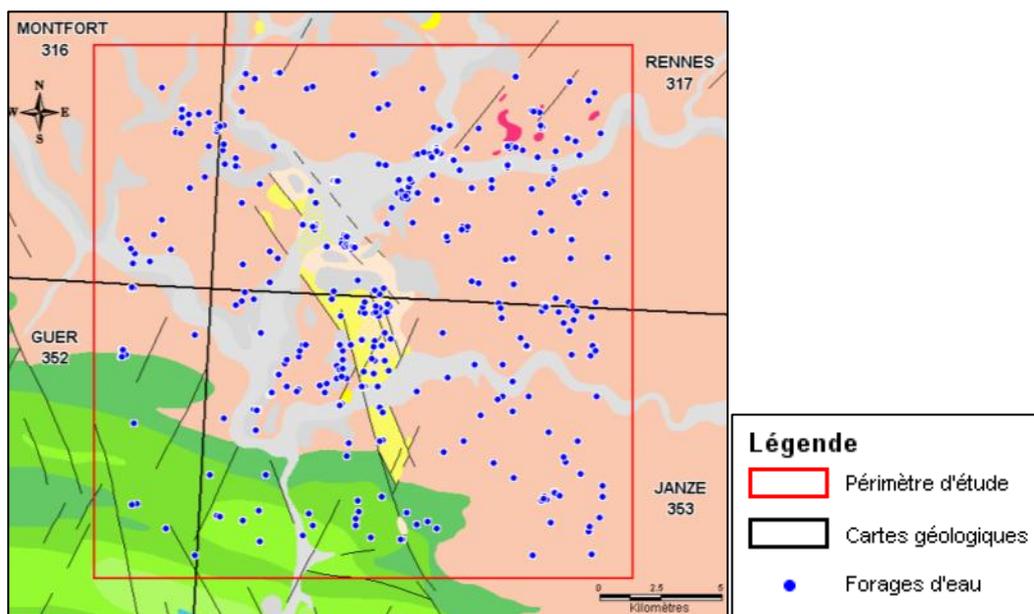


Figure 48 : Localisation des forages implantés dans les formations géologiques autour du bassin de Rennes.

Fond de carte géologique à 1/250 000 (Rabu *et al.* 2001) (en rose : formations du Briovérien ; en vert foncé : siltstones micacés pourpres ; en vert clair : Grès armoricains ; en gris : alluvions ; en jaune : bassin tertiaire).

Unité géologique	Nombre de forages	Débit moyen (m ³ /h)	Débit min (m ³ /h)	Débit max (m ³ /h)	Profondeur moyenne (m)	Profondeur min (m)	Profondeur max (m)
Formations géologiques du Briovérien à l'Est de la Faille de Quessoy Nort-sur-Erdre	61	8.1	0.5	72.0	63.4	25.0	205.0
Formations pourpres de Pont-Réan	20	3.3	0.3	18.0	65.3	35.0	118.0
Formations du Grès armoricain	26	5.1	0.3	18.0	55.0	12.0	124.0
Formations d'âge Tertiaire	14	50.9	2.5	180.0	36.7	10.0	80.0
Formations alluviales	11	1.3	0.2	3.5	14.1	5.0	30.0
Total et moyennes	132	13.8			46.9		

Tableau 5 : Information sur les forages réalisés dans les formations géologiques autour du bassin de Rennes.

3.1.3. Aquifères recoupés par le forage CDB1

La coupe géologique du forage CDB1 (Figure 1, Figure 7) montre que l'ouvrage traverse :

- les trois formations du Tertiaire captées pour l'AEP (5 m de sables Pliocène, 20 m de faluns Miocène, et 32 m de calcaires Oligocène) ;
- puis plusieurs formations argileuses oligocène-éocènes sur près de 350 m d'épaisseur ;
- les formations géologiques du socle briovérien :
 - 19 m de schistes altérés (côtes : -405 à -424 m de profondeur),

- 16 m de schistes en voie d'argilisation (zone de transition de -424 à -440 m),
- 50 m d'horizon fissuré de ces schistes (-440 à -490 m),
- 30 m de schistes sains très faiblement fracturés (-490 à -520 m).

Puis le forage recoupe le socle briovérien non altéré (-520 à -675 m).

La coupe technique du forage CDB1 est la suivante (Figure 49) : 0 à 438 m de profondeur tubage acier 5" cimenté (diamètre intérieur 108 mm) et de 438 à 675 m l'ouvrage est en trou nu. Des éboulements situés en-dessous de 438 m de profondeur bouchent partiellement le forage ; ils sont sans doute liés au pendage sub-vertical des schistes qui en se délitant ont obturé le trou.

Compte-tenu de la coupe technique du forage CDB1 (tubage et cimentation des aquifères Tertiaire ; Figure 49), les seuls aquifères théoriquement captés sont ceux du socle (2 m de zone de transition, puis l'horizon fissuré, et enfin la zone faiblement fracturée).

Le rapport d'avancement de 2010 (Bauer *et al.*, 2011) indique que le forage était très peu productif : moins de 100 L/h. Considérant les résultats de productivité obtenus pour le socle briovérien (chapitre 3.1.2.), ce très faible débit du forage n'était pas attendu. Les nombreux remplissages de fissures et fractures peuvent expliquer ce mauvais rendement ; l'origine de ces colmatages reste à discuter (poids des sédiments sus-jacents ? Circulations de fluides lors de la création du bassin ?...).

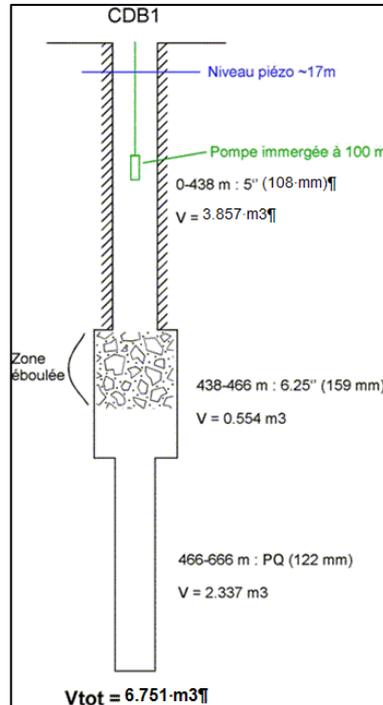


Figure 49 : Coupe technique du forage CDB1.

3.2. OPÉRATIONS MENÉES EN 2010

3.2.1. Rappel des opérations

Le forage CDB1 a fait l'objet d'une déclaration à la DREAL au titre du Code minier et auprès de la DDTM35 (Service en charge de la Police de l'Eau) au titre de la Loi sur l'Eau. Les critères d'implantation du forage ont conduit à le positionner à la limite entre les périmètres de protection éloigné et rapproché du captage AEP de La Pavais (rapport d'avancement de 2010, Bauer *et al.*, 2011). La DDTM35 a demandé au BRGM de réaliser des analyses d'eau souterraine avant rejet dans le milieu naturel.

Après réalisation et équipement du forage, la boue utilisée pour le carottage a été évacuée en injectant de l'eau de ville dans le trou (eau claire du réseau AEP). Puis une opération de soufflage pour nettoyer le trou par air-lift a été entreprise par la société COFOR (8 et 9 octobre 2010), suivie de l'opération de pompage d'essai menée par la société Hydro Assistance Ingénierie (du 12 au 15 octobre 2010). Après un soufflage à 14 et 20 bars mettant en évidence une productivité bien inférieure à 1 m³/h, un premier essai par pompage a été entrepris avec une pompe 3" placée à 102,4 m de profondeur. Le débit pompé étant trop important et le niveau de nappe descendant bien trop vite, une pompe 2" à régulateur de débit a été installée dans un deuxième temps à la même profondeur. Les opérations de pompage étaient limitées à 3 jours en raison du stand-by foreur.

3.2.2. Présentation des résultats de pompage

Deux phases de pompage d'essai ont été effectuées : une première phase les 12-13 octobre avec une pompe 3" placée à 102,4 m de profondeur. Après seulement 15 minutes de pompage (environ 4 m³/h) la pompe s'est dénoyée. 600 L ont été évacués dans cette première journée (Figure 50). Le lendemain, un nouvel essai était effectué avec la même pompe : 700 L furent évacués en 12 minutes (débit pompé environ 5 m³/h) avant dénoyage de la pompe (Figure 51).

La seconde phase débutait le 14 octobre vers 10 h, avec la mise en place d'une pompe 2" avec régulateur de débit (entre 0,1 et 0,9 m³/h) à 102,4 m de profondeur. Le nouvel essai a duré 6h, en pompant à très faible débit (15-500 L/h) ; le pompage a été arrêté quand le niveau de nappe se situait à 10 m au-dessus de la pompe ; 600 L ont été évacués dans la journée. Côté piézométrie, le niveau de la nappe est remonté à une vitesse de 14 m/h après 3 h de temps (Figure 52). Ce niveau fut suivi jusqu'au 15 octobre à 10 h.

Compte-tenu de la nature brève et transitoire des deux premiers épisodes de pompage (durée des prélèvements comprises entre 12 et 15 minutes) et des comportements hydrodynamiques observés au cours de ces périodes de mesures, l'analyse des paramètres et des caractéristiques classiques, tel que le débit spécifique notamment, n'ont pu être réalisées.

Dans les conditions hydrauliques des différents pompages réalisés en octobre 2010, il n'a pas été possible de déterminer une productivité cohérente de l'ouvrage ; les débits des tests ainsi que les durées de prélèvement n'ayant pas été significatifs pour les calculs et les interprétations hydrogéologiques classiques (débit critique, transmissivité et coefficient d'emmagasinement). Seule la vitesse de remontée du niveau piézométrique a pu être estimée à environ 2-3 m/h.

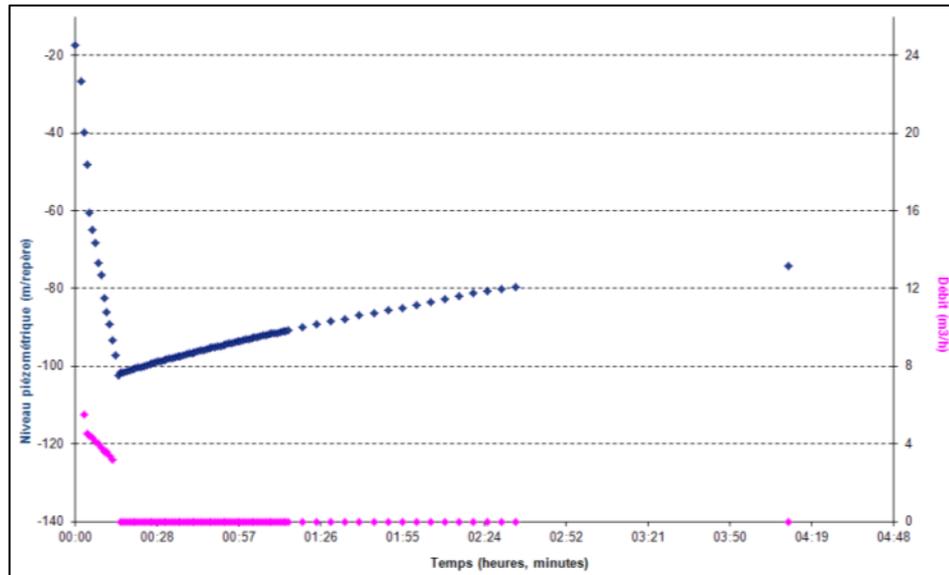


Figure 50 : Suivi du pompage du 12 octobre 2010.

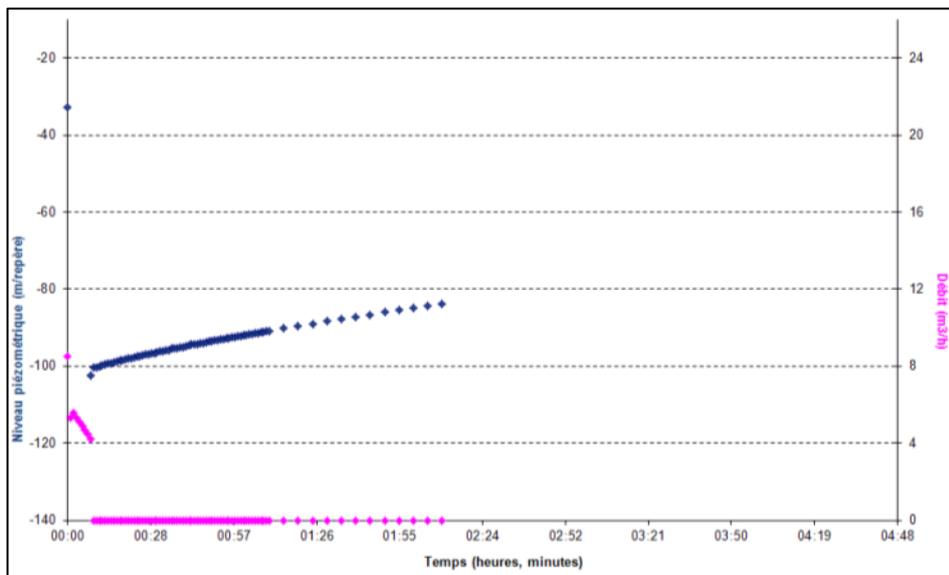


Figure 51 : Suivi du pompage du 13 octobre 2010.

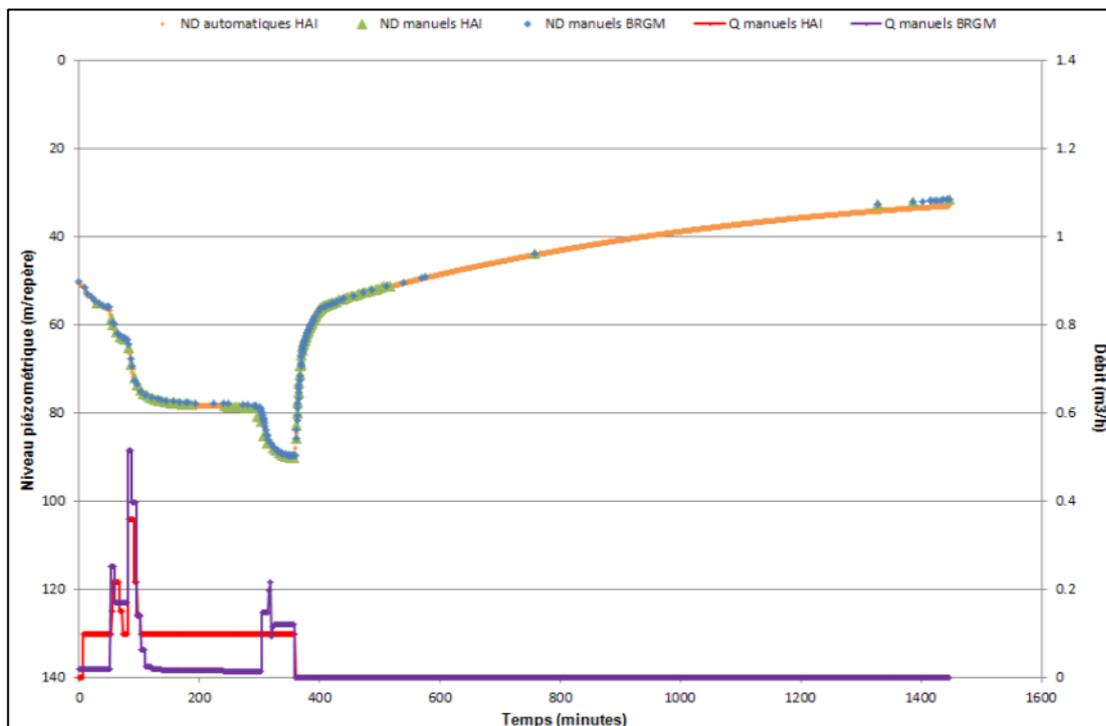


Figure 52 : Suivi du pompage des 14-15 octobre 2010.
(ND = niveaux dynamiques, HAI = Hydro Assistance Ingénierie, Q = débits)

3.2.3. Présentation des résultats d'analyses d'eau

Suite à la demande de la DDTM35 et aux besoins du projet CINERGY, trois échantillons ont été prélevés et analysés : deux correspondent au pompage de longue durée (au début après 15 minutes de pompage le 12 octobre, et à la fin des essais de pompage le 14 octobre ; Tableau 6), et un troisième au milieu du bassin de rétention (Bauer *et al.*, 2011).

Les analyses ont montré un taux important de MES (1 650 mg/l), qui reflète directement la qualité de l'eau du trou, encore largement chargée de boue de forage et d'argiles.

L'autre point relevé est la différence de teneur en certains éléments entre le début et la fin du pompage de 6 h. L'augmentation notable du Mn et surtout du Zn aurait pu signer l'eau primaire contenue dans le socle. Les analyses de 2011 infirmeront cette hypothèse. En revanche, la société de diagrapie SEMM a mesuré une conductivité de 4,5 mS/cm à 438 m de profondeur. Cette valeur suggère la présence, sous l'eau de ville utilisée pour nettoyer la boue du carottage, d'eau primaire du socle beaucoup plus conductrice (minéralisée) et plus dense.

Rapport d'essai 10-1-150-A	Ag (Argent)	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Be (Béryllium)	CO3 (Carbonates)	Ca (Calcium)
Limite de quantification et unité	0.01 $\mu\text{g/l}$	0.5 $\mu\text{g/l}$	0.05 $\mu\text{g/l}$	0.5 $\mu\text{g/l}$	0.05 $\mu\text{g/l}$	0.01 $\mu\text{g/l}$	5 mg/l	0.5 mg/l
CINERGY CDB1(14/10/10)15h40	< LQ	0.77	0.19	25.86	32.8	< LQ	< LQ	39.3
Rapport d'essai 10-1-150-A	Cl (Chlorures)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	F (Fluorures)	Fe (Fer)	HCO3 (Bicarbonates)	K (Potassium)
Limite de quantification et unité	0.5 mg/l	0.05 $\mu\text{g/l}$	0.1 $\mu\text{g/l}$	0.1 $\mu\text{g/l}$	0.1 mg/l	0.02 mg/l	5 mg/l	0.5 mg/l
CINERGY CDB1(14/10/10)15h40	78.9	0.54	< LQ	0.47	0.2	< LQ	119	7.4
Rapport d'essai 10-1-150-A	Li (Lithium)	Mg (Magnésium)	Mn (Manganèse)	NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	Ni (Nickel)
Limite de quantification et unité	0.1 $\mu\text{g/l}$	0.5 mg/l	0.1 $\mu\text{g/l}$	0.05 mg/l	0.01 mg/l	0.5 mg/l	0.5 mg/l	0.1 $\mu\text{g/l}$
CINERGY CDB1(14/10/10)15h40	4.71	5.6	181	0.13	0.04	7.7	36.2	5.07
Rapport d'essai 10-1-150-A	PO4 (OrthoPhosphates en PO4)	Pb (Plomb)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	Sr (Strontium)	Th (Thorium)	U (Uranium)	Zn (Zinc)
Limite de quantification et unité	0.1 mg/l	0.05 $\mu\text{g/l}$	0.5 mg/l	0.5 mg/l	0.1 $\mu\text{g/l}$	5 $\mu\text{g/l}$	0.01 $\mu\text{g/l}$	0.5 $\mu\text{g/l}$
CINERGY CDB1(14/10/10)15h40	< LQ	< LQ	29.9	2.8	203	< LQ	0.05	1360
Rapport d'essai 10-1-156-C	$\delta\text{D} \text{‰ vs SMOW} (\pm 0.8 \text{‰})$	$\delta^{18}\text{O} \text{‰ vs SMOW} (\pm 0.1 \text{‰})$	Tritium UT (après enr.)					
CINERGY CDB1(14/10/10)15h40	-29.6	-4.2	4 \pm 1					
Paramètres in-situ	Date	Heure	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)	O2 (%)	eH (mV)	
CINERGY CDB1	14/10/2010	15h20	7.65	0.498	16.0	85.0	148	

Tableau 6 : Résultats des analyses d'eau en fin de pompage.

Les données chimiques et isotopiques sont interprétées avec les analyses réalisées en 2011 (§ 3.3.4.).

3.3. OPÉRATIONS MENÉES EN 2011

3.3.1. Travaux réalisés sur le forage CDB1

Début 2011, le BRGM s'est associé à l'Université de Rennes 1 (OSUR - Géosciences Rennes) pour renouveler une opération de pompage afin d'obtenir la véritable qualité de l'eau souterraine du forage CDB1.

Du 24 mai au 12 juillet 2011, le forage a été pompé 7 fois à faible débit (entre 0,1 et 0,7 m³/h ; Tableau 7) en utilisant une pompe immergée 2" avec variateur de débit, placée à environ 70 m de profondeur. Les paramètres physico-chimiques et piézométriques ont été suivis. À chaque pompage, environ 0,5 m³ d'eau est pompé jusqu'au dénoyage de la pompe, puis un temps d'attente d'une semaine est respecté pour obtenir une remontée du niveau piézométrique au niveau initial. L'opération a été renouvelée 7 fois de façon à vider 3,2 m³ d'eau souterraine du forage et ainsi renouveler à peu près une fois le volume d'eau présent entre 0 et 438 m de profondeur (Figure 49).

	Pompage 1	Pompage 2	Pompage 3	Pompage 4	Pompage 5	Pompage 6	Pompage 7
Date	24-mai	31-mai	16-juin	23-juin	30-juin	06-juil	12-juil
niveau piézo avant pompage	16.01	15.11	14.97	15.50	15.77	16.07	17.53
niveau piézo après pompage	60.00	71.90	71.70	70.70	71.70	71.70	38.43
rabattement	43.99	56.79	56.73	55.2	55.93	55.63	20.9
volume pompé (m3)	0.403	0.520	0.520	0.506	0.512	0.510	0.191
volume pompé cumulé (m3)	0.403	0.923	1.443	1.949	2.461	2.971	3.162
durée du pompage	1h58	0h51	1h08	1h18	0h45	0h43	2h11
débit moyen (m3/h)	0.205	0.612	0.459	0.389	0.683	0.711	0.088
débit min (m3/h)	0.090	0.269	0.160	0.150	0.400	0.280	0.060
débit max (m3/h)	0.170	1.200	1.440	1.060	1.200	1.060	0.130

Tableau 7 : Caractéristiques des pompages réalisés en 2011.

Une convention tripartite mairie de Chartres-de-Bretagne – OSUR – BRGM a été signée le 15 mars 2011 de façon à préciser : les objectifs du pompage, les modalités d'intervention, le travail collaboratif de l'OSUR et du BRGM, l'autorisation de la mairie pour accéder au forage.

La remontée de l'eau primaire du forage a été contrôlée par diagraphie température-conductivité jusqu'à 200 m de profondeur. Les mesures ont été comparées à celles effectuées par la société SEMM le 12 avril 2011 jusqu'à 438 m de profondeur avant le début des opérations de pompage (Figure 53).

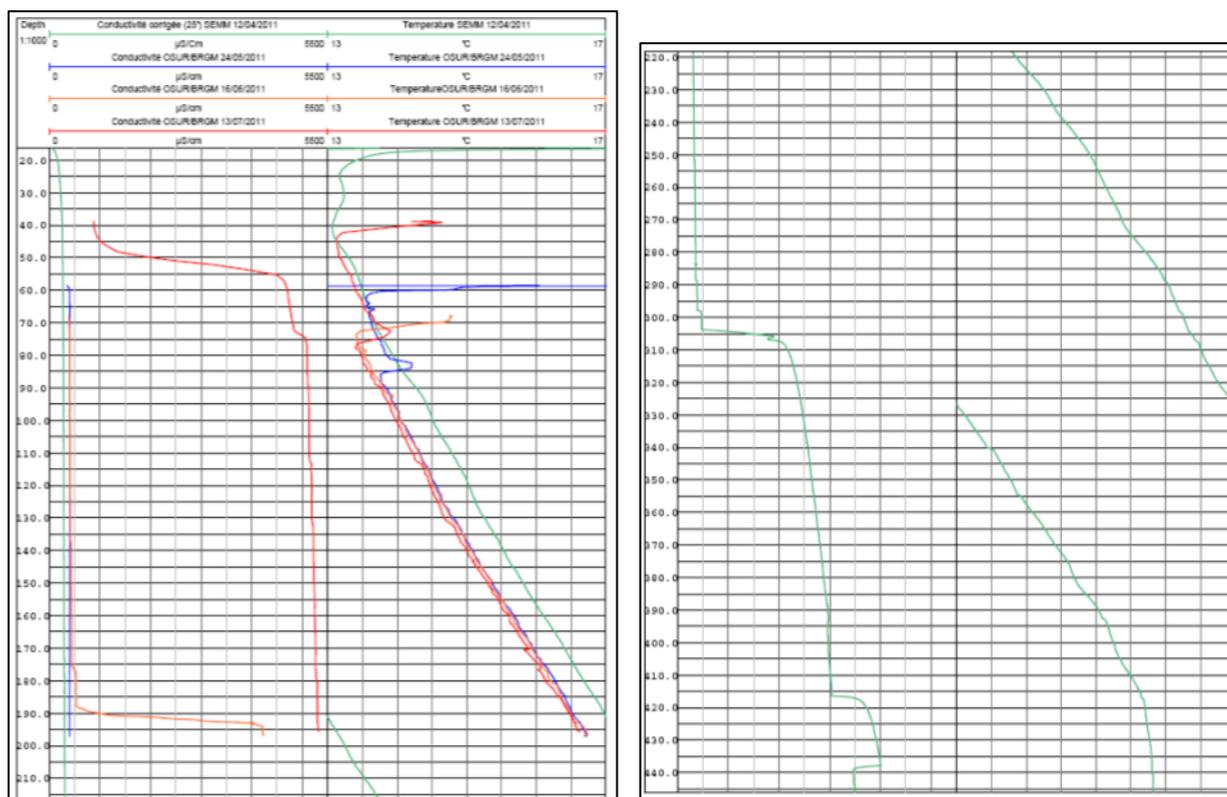


Figure 53 : Diagraphies température-conductivité réalisées en 2011.

À l'issue du dernier pompage (12 juillet 2011) et après avoir eu confirmation grâce aux mesures physico-chimiques que l'eau primaire du forage était atteinte (conductivité élevée entre 4 et 4,5 mS/cm), des prélèvements d'eau souterraine ont été effectués.

L'eau d'exhaure est de couleur noire, riche en matières organiques, avec odeur (H₂S ?) et dégazage (Figure 54).



Figure 54 : Aperçu du chantier de pompage et prélèvements du 12 juillet 2011.

Le programme analytique réalisé sur les fluides est le suivant :

- OSUR : cations, anions, traces, analyse des gaz dissous (gaz majeurs et traces et ultra traces CFCs, SF₆), analyses de la diversité microbienne ;
- BRGM : cations, anions, traces, isotopes (O, H, B, S-SO₄, O-SO₄, Sr, U), datation des eaux (Tritium, ¹⁴C).

Étant donné la couleur de l'eau et la présence d'un surnageant huileux à la surface de l'eau souterraine, le BRGM a complété ces analyses avec : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur eau et minéralogie diffractométrie rayons X sur solide filtré dans l'eau.

3.3.2. Travaux complémentaires

De façon à identifier une possible relation entre l'eau souterraine de la tranche 0-60 m utilisée pour l'AEP et l'eau souterraine des schistes captée dans le fond du forage

CDB1, le BRGM et l'OSUR ont également prélevé l'eau souterraine des deux captages AEP voisins du site :

- captage de la Pavais (capte l'aquifère Oligocène) ;
- captage de la Marionnais (capte l'aquifère Miocène).

L'accès à ces ouvrages s'est fait en compagnie de Mme Laville (Technicienne eau potable du Syndicat Intercommunal des Eaux de la Région Sud de Rennes) et M. Le Cadre (VEOLIA-EAU, fermier du Syndicat).

Les paramètres analysés sont les suivants :

- OSUR : cations, anions, traces, gaz dissous (gaz majeurs et traces et ultra traces CFCs, SF6) ;
- BRGM : cations, anions, traces, isotopes (O, H, Sr).

3.3.3. Résultats et interprétation des essais par pompages

Parmi les sept pompages effectués, deux ont fourni des données valorisables : celui du 31 mai et celui du 16 juin. En effet, en plus des suivis manuels effectués sur le terrain durant la journée du pompage (mesures piézométriques à la sonde manuelle et jaugeage du débit de pompage au seau), une sonde pression 0-10 bars positionnée à 75 m de profondeur a permis de mesurer en continu la remontée piézométrique durant une semaine (Figure 55 et Figure 56).

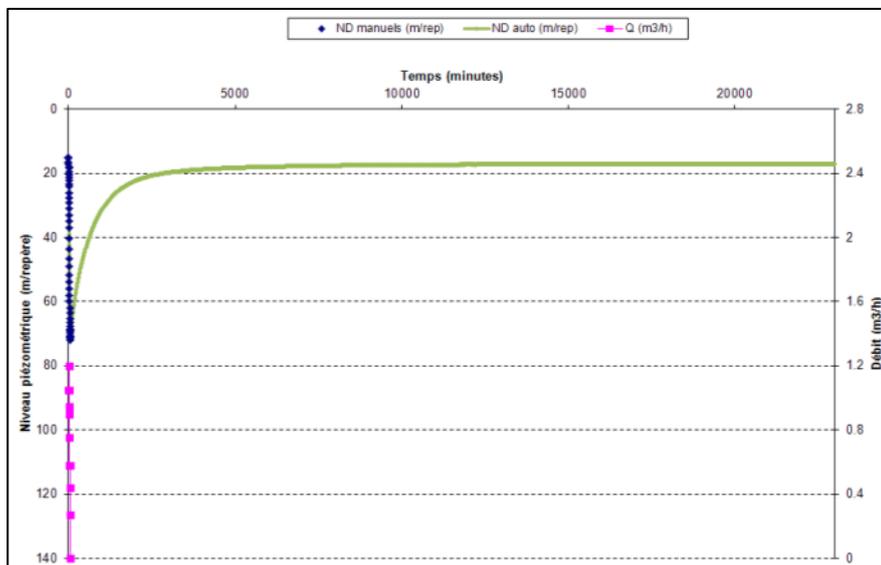


Figure 55 : Suivi du pompage du 31 mai 2011.

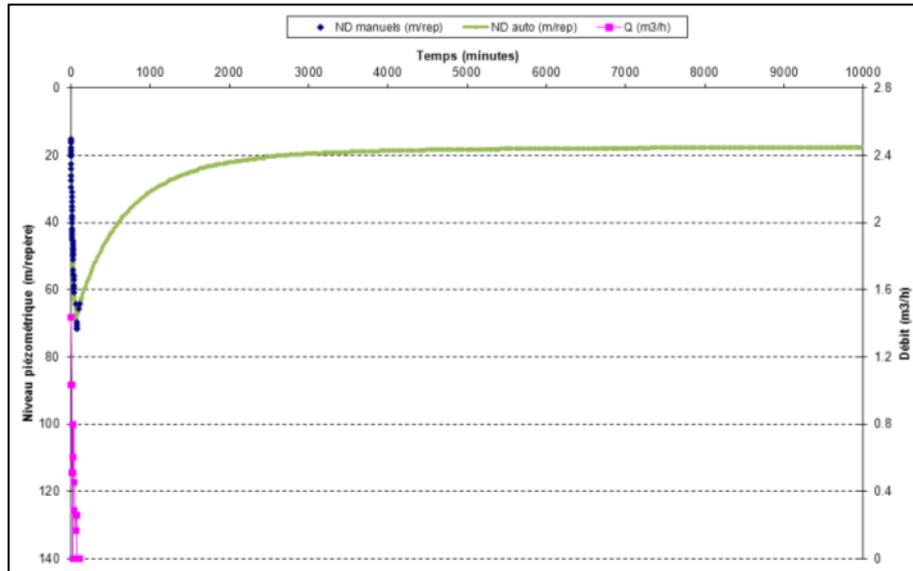


Figure 56 : Suivi du pompage du 16 juin 2011.

La démarche adoptée pour l'interprétation des données consiste à choisir la solution analytique la mieux adaptée possible au contexte naturel de l'aquifère (écoulement en milieu poreux ou fracturé, caractéristiques d'isotropie, d'homogénéité, extension, alimentation...). Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sont déterminés par calage manuel en ajustant, conformément au schéma retenu, la réponse théorique de l'aquifère aux rabattements² mesurés en fonction du temps (durant les phases de pompage et remontée). Cette démarche est mise en œuvre au moyen du logiciel BRGM WinISAPE. Cet outil permet de calculer l'évolution théorique des rabattements à partir des paramètres fixés par l'utilisateur et de les comparer aux valeurs mesurées.

De façon à compléter le diagnostic en observant les variations de rabattement, l'interprétation a également été faite en utilisant la courbe de dérivée du rabattement (Figure 14 ; Bourdet *et al.*, 1983 ; Deruyck *et al.*, 1992 ; Renard *et al.*, 2009).

Les résultats obtenus sont présentés sur les graphiques ci-après (Figure 57).

² Le rabattement est la différence entre le niveau piézométrique avant pompage et le niveau dynamique en cours de pompage.

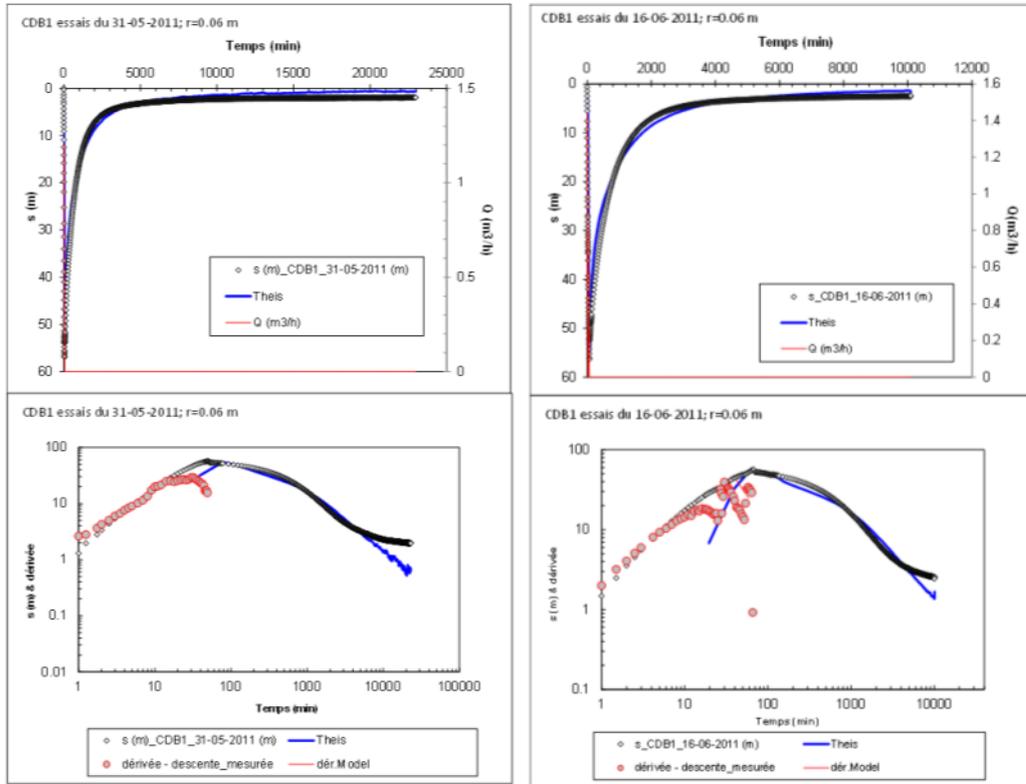


Figure 57 : Interprétation des pompages du 31 mai 2011 et du 16 juin 2011.

L'évolution des hauteurs piézométriques est caractérisée par une descente rapide et une remontée lente. La durée des pompages (environ 1 h) vide la colonne d'eau souterraine présente dans le forage et ne permet pas d'attirer l'eau de l'aquifère de façon significative. La phase de pompage est donc caractéristique de l'effet capacitif du forage. L'eau pompée provient donc quasi-uniquement du forage lui-même. Par contre, la phase de remontée des niveaux, très longue, est susceptible de renseigner sur les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. C'est pourquoi l'interprétation s'est focalisée sur les épisodes de remontée. Le meilleur calage sur WinISAPE a été obtenu en utilisant la solution analytique de Theis (aquifère homogène, isotrope, captif d'extension infinie) avec pertes de charge et effet capacitif. La transmissivité calculée de l'aquifère des schistes briovériens est de l'ordre de $4,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui est très faible (aquifère quasi-imperméable).

Pour pouvoir comparer tous les essais par pompages réalisés en 2010 et 2011, les rabattements et temps ont été normalisés par rapport aux débits et aux temps de pompage (Figure 58).

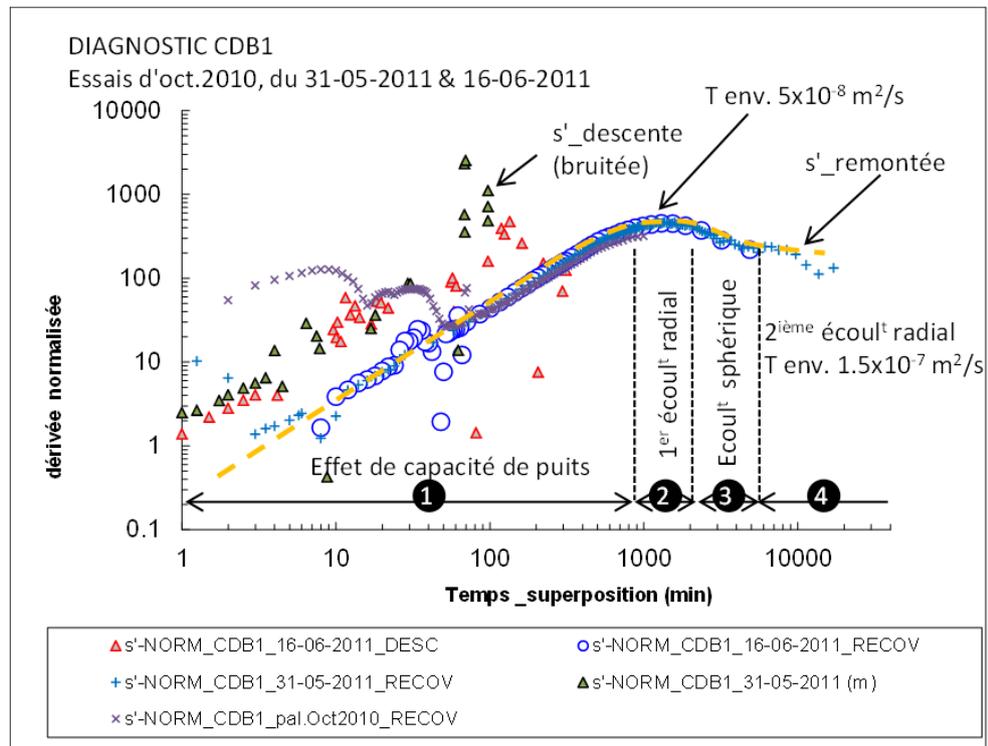


Figure 58 : Interprétation groupée des pompages d'octobre 2010, mai 2011 et juin 2011.
(DESC = descente des niveaux dynamiques, RECOV = remontée des niveaux)

Les épisodes numérotés dans la Figure 58 peuvent s'expliquer par les événements suivants : 1) on vide la colonne d'eau souterraine présente dans le forage au-dessus de la pompe (effet capacitif long), 2) on attire l'eau souterraine présente dans le trou foré (écoulement radial cylindrique à transmissivité $5.10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), 3) on pompe un volume un peu plus grand mais partiel de l'aquifère des schistes briovériens (écoulement sphérique), 4) on capte les deux dernières composantes (second écoulement radial cylindrique à transmissivité $1,5.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; la différence entre ces deux valeurs de transmissivité pourrait indiquer que l'on capte 1/3 de la puissance totale de l'aquifère).

Étant donné la très longue durée de l'effet de capacité du puits (environ 13 heures), les pompages par paliers de débit (classiquement durée d'une heure) ne permettent pas d'établir la courbe caractéristique de l'ouvrage pour déterminer les pertes de charges linéaires et quadratiques.

Ces résultats confirment que le forage est très peu productif. Le terrain capté par le forage est quasi-imperméable. Il est difficilement caractérisable car il nécessiterait un pompage long à faible débit (environ 1 jour) pour mieux définir les caractéristiques de l'aquifère capté (suivi ensuite de la remontée pendant 1 semaine). Étant donné sa faible productivité et l'absence d'utilisation à venir du forage, ce travail n'est sans doute pas nécessaire (temps de pompage conséquent pour amener quelques informations sur le captage partiel de l'aquifère et sur sa géométrie).

3.3.4. Résultats et interprétation des analyses d'eau souterraine

Comme cela a été précisé au chapitre 3.3.1., la couleur noire de l'eau a conduit à filtrer 1 L d'eau brute pour minéralogie par diffractométrie des rayons X (Tableau 8).

Analyses CINERGY		Rapport d'essai 11-1-019-E										
Lieu	Date	Heure	Quartz	Muscovite	Kaolinite	Microcline	Hématite	Chlorite	Calcite	Magnétite	Jarosite	Phase amorphe aux rayons X
CINERGY	12/07/2011	13h30	traces à faible	possible	faible à présente							

Tableau 8 : Résultats des analyses minéralogiques diffractométrie rayons X sur dépôts solides dans l'eau souterraine du forage CDB1

Les minéraux détectés sont assez ubiquistes dans les différentes formations traversées par le forage, mais la chlorite, le microcline et la muscovite signeraient plutôt les schistes briovériens (feldspaths, micas). Le seul marqueur potentiel du Tertiaire serait la phase amorphe en admettant qu'il s'agisse de la matière organique (calcite, argiles, phase amorphe).

Les résultats des prélèvements d'eau souterraine effectués à l'issue du dernier pompage le 12 juillet 2011 sont consignés dans le Tableau 9.

Les résultats des prélèvements sur les deux captages AEP sont reportés dans le Tableau 10 et le Tableau 11.

L'échantillon prélevé en Juillet 2011 est, selon les modes de pompages mis en œuvre, l'échantillon le plus représentatif de l'eau issue du socle. Cette eau présente des paramètres physico-chimiques distincts de ceux des prélèvements réalisés lors de l'essai de pompage d'octobre 2010, mais aussi distincts de ceux des aquifères sus-jacents représentés par les eaux des AEP de la Pavais et du Marionnais. En particulier, on note une conductivité nettement plus élevée à $4710 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, traduisant une minéralisation plus importante des eaux. De même, l'absence d'oxygène dissous et le potentiel redox proche de 0 mv (corrigé de la valeur de l'électrode) marquent une eau d'origine différente de celle des aquifères de surface. Cette eau présente un pH très élevé (pH=10), mais une seule mesure a été effectuée. De telles valeurs ont été mesurées précédemment dans des forages profonds cimentés à faible taux de renouvellement des eaux. Une hypothèse serait une contamination liée à la cimentation de l'ouvrage.

Cette eau, de couleur noire au prélèvement, est très chargée en matière organique, et très légèrement « huileuse ». Des mesures de HAP ont été réalisées sur cet échantillon profond (Tableau 9), les teneurs sont très faibles pour la plupart des composés, voire inférieures à la limite de quantification, ce qui limite fortement une interprétation en termes d'origine de ces composés. Les teneurs les plus élevées (quelques dizaines de $\text{ng}\cdot\text{l}^{-1}$), observées pour le Naphtalène, Phénanthrène et Pyrène, peuvent résulter d'une contamination lors du prélèvement.

	Ag (Argent)	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Be (Béryllium)	CO3 (Carbonates)	Ca (Calcium)	Cd (Cadmium)	Cl (Chlorures)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	Fe (Fer)	HCO3 (Bicarbonates)	K (Potassium)	Li (Lithium)	Mg (Magnésium)	Mn (Manganèse)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	Ni (Nickel)	Pb (Plomb)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	Sr (Strontium)	Th (Thorium)	U (Uranium)	Zn (Zinc)	
Rapport d'essai 11-1-019-B	0.01	0.5	0.05	0.5	0.05	0.01	5	0.5	0.01	0.5	0.05	0.1	0.1	0.02	5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1	0.05	0.5	0.5	0.1	0.1	0.01	0.5	
CINERGY CDB1 (12/07/2011) 13h30	0.1	493	1.4	624	28.3	0.19	67	39.4	1.63	1240	0.73	4.57	26.7	7.44	272	23.1	56.8	4.9	91.8	< LQ	934	7.87	16	164	2.2	990	1	0.43	104	
	Acénaphthylène	Acénaphthène	Anthracène	Benzo (a) anthracène	Benzo (a) pyrène	Benzo (b) fluoranthène	Benzo (ghi) perylène	Benzo (k) fluoranthène	Chrysène	Dibenzo (ah) anthracène	Fluoranthène	Fluorène	Indeno pyrène	Naphtalène	Phénanthrène	Pyrène														
Rapport d'essai 11-1-019-B	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10	2														
CINERGY CDB1 (12/07/2011) 13h30	< LQ	13	6	11	< LQ	19	9	< LQ	< LQ	< LQ	53	< LQ	< LQ	64	81	88														
	δ11B en ‰ vs NBS 951	incert. 11B/10B ± 2σ(m) (‰)	87Sr/86Sr vs NBS 987	incert 87Sr/86Sr 2σ(m)	δD ‰ vs SMOW (± 0.8 ‰)	δ18O ‰ vs SMOW (± 0.1 ‰)	Tritium UT (après enr.)	Sulfate δ34S ‰ vs CDT (± 0.3 ‰)	Sulfate δ18O ‰ vs SMOW (± 0.3 ‰)	δ13C vs PDB ‰ (± 0.1)	Activité 14C pCM																			
Rapport d'essai 11-1-019-C et D	40.72 et 40.69	0.13 et 0.11	0.711922	0.000007	-35.3	-4.7	2 ± 1	25.0	15.2	-19.7	114.1 ± 0.3																			
	Date	Heure	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)	O2 (%)	eH (mV)																							
Paramètres in-situ	12/07/2011	13h30	10.044	4.71	15.1	0.10	-208.3																							

Tableau 9 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du forage CDB1 après le pompage du 12 juillet 2011.

	Ag (Argent)	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Be (Béryllium)	CO3 (Carbonates)	Ca (Calcium)	Cd (Cadmium)	Cl (Chlorures)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	Fe (Fer)	HCO3 (Bicarbonates)	K (Potassium)	Li (Lithium)	Mg (Magnésium)	Mn (Manganèse)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	Ni (Nickel)	Pb (Plomb)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	Sr (Strontium)	Th (Thorium)	U (Uranium)	Zn (Zinc)	
Rapport d'essai 11-1-019-B	0.01	0.5	0.05	0.5	0.05	0.01	5	0.5	0.01	0.5	0.05	0.1	0.1	0.02	5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1	0.05	0.5	0.5	0.1	0.1	0.01	0.5	
AEP La Pavais (12/07/2011) 15h50	< LQ	8.93	0.21	23	28.4	< LQ	< LQ	131	0.02	30.2	< LQ	0.1	2.2	0.04	368	3.3	7.78	12.9	0.19	25.8	21.8	0.2	0.19	51.1	10.6	266	< LQ	2.92	2.13	
			87Sr/86Sr vs NBS 987	incert 87Sr/86Sr 2σ(m)	δD ‰ vs SMOW (± 0.8 ‰)	δ18O ‰ vs SMOW (± 0.1 ‰)																								
Rapport d'essai 11-1-019-C et D			0.709214	0.000007	-40.1	-5.8																								
AEP La Pavais (12/07/2011) 15h50																														
	Date	Heure	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)	O2 (%)	eH (mV)																							
Paramètres in-situ	12/07/2011	15h50	7.685	0.791	12.7	3.36	145.3																							

Tableau 10 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du puits AEP La Pavais.

	Ag (Argent)	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Be (Béryllium)	CO3 (Carbonates)	Ca (Calcium)	Cd (Cadmium)	Cl (Chlorures)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	Fe (Fer)	HCO3 (Bicarbonates)	K (Potassium)	Li (Lithium)	Mg (Magnésium)	Mn (Manganèse)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)	Ni (Nickel)	Pb (Plomb)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	Sr (Strontium)	Th (Thorium)	U (Uranium)	Zn (Zinc)	
Rapport d'essai 11-1-019-B	0.01	0.5	0.05	0.5	0.05	0.01	5	0.5	0.01	0.5	0.05	0.1	0.1	0.02	5	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1	0.05	0.5	0.5	0.1	0.1	0.01	0.5	
AEP La Marionnaise (12/07/2011) 16h10	< LQ	7.14	0.3	50.8	25.9	< LQ	< LQ	143	0.08	40.1	0.11	0.14	21	0.03	438	4.2	2.31	15.4	4.03	29.7	24.1	0.34	2.2	44.8	11.2	486	< LQ	4.75	32	
			87Sr/86Sr vs NBS 987	incert 87Sr/86Sr 2σ(m)	δD ‰ vs SMOW (± 0.8 ‰)	δ18O ‰ vs SMOW (± 0.1 ‰)																								
Rapport d'essai 11-1-019-C et D			0.709336	0.000008	-42.5	-6.3																								
AEP La Marionnaise (12/07/2011) 16h10																														
	Date	Heure	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)	O2 (%)	eH (mV)																							
Paramètres in-situ	12/07/2011	16h10	7.130	0.905	14.2	3.46	107.5																							

Tableau 11 : Résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux du puits AEP La Marionnaise.

La balance ionique des analyses chimiques est calculée suivant le NICB (pour Normalized Inorganic Charge Balance) :

$$\text{NICB} = \frac{\sum^{+} - \sum^{-}}{\sum^{+} + \sum^{-}} * 100$$

Le NICB correspond au pourcentage de charges positives excédentaires ou manquantes pour avoir un bilan des charges nul. Une eau ayant toujours un bilan de charges nul à l'équilibre, un excès de cations ou d'anions dénote d'une analyse chimique incomplète ou de mauvaise qualité. On considère que les analyses sont correctes pour un NICB compris entre -5 % et +5 %. La balance ionique est correcte pour les deux échantillons AEP et l'échantillon du forage profond (12/07/2011), on note cependant un déficit de cations (excès d'anions) pour l'échantillon du forage d'octobre 2010 (Figure 59).

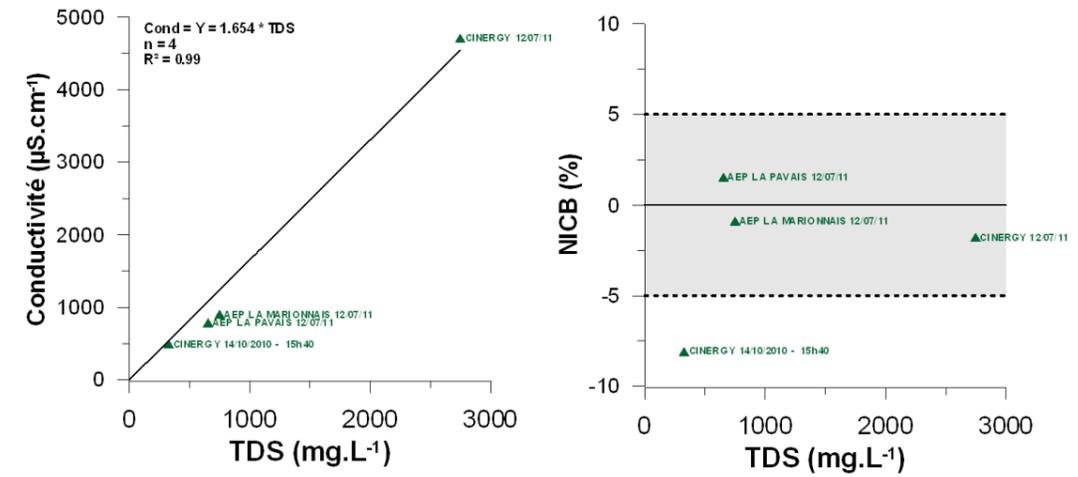


Figure 59 : Gauche : Relation entre la conductivité et le TDS (Total Dissolved Solids). Droite : relation entre la NICB (Balance ionique) et le TDS, pour les échantillons de l'étude Cinergy.

Le TDS (Total Dissolved Solids) est la somme des concentrations en mg/l des cations et des anions mesurés en laboratoire. La conductivité électrique, mesurée sur le terrain, est fonction de la salinité de l'eau ; il existe donc généralement une relation quasi-linéaire entre la conductivité électrique et le TDS calculé à partir des analyses chimiques de laboratoire.

La Figure 59 montre bien une bonne corrélation entre ces deux paramètres. On note que la minéralisation de l'échantillon profond du forage est largement supérieure aux AEP de surface (TDS environ multiplié par 4 par rapport aux AEP). On notera cependant que l'échantillon prélevé lors de l'essai de pompage d'octobre 2010 présente une minéralisation totale inférieure à celle des deux ouvrages AEP, alors que l'eau utilisée lors de la foration est bien celle issue des aquifères supérieurs. Une hypothèse envisageable est que l'eau prélevée en octobre 2010 correspond à un mélange entre les eaux de type AEP et des eaux plus faiblement minéralisées issues des petits niveaux productifs sus-jacents, cette hypothèse ne pouvant cependant être vérifiée. La minéralisation des eaux de type AEP reste quant à elle stable dans le temps (entre 1983 et 2010 pour la Pavais, source ADES).

Les données sur les éléments majeurs sont reportées dans un diagramme de Piper (Figure 60) traduisant le faciès chimique des eaux en se basant sur la proportion relative des anions d'une part et des cations d'autre part. Les eaux des aquifères sus-jacents prélevées dans les captages AEP de la Pavais et du Marionnais présentent un faciès bicarbonaté calcique très commun. L'échantillon du forage prélevé lors de l'essai de pompage d'octobre 2010 présente un faciès différent, de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien, c'est-à-dire sans anions ni cation réellement dominant. L'échantillon profond de CDB1 (12/07/2011) présente un troisième type de faciès, cette fois de type chloruré sodique à hyper chloruré sodique. Ici, ce sont clairement le sodium et le chlorure qui dominent les cations et anions respectivement. Ce changement de composition chimique s'accompagne d'une nette augmentation de la charge ionique de l'eau (TDS = 2,75 g.L⁻¹).

L'ion chlorure (Cl⁻) représente plus de 80 % des anions, et le sodium (Na⁺) près de 95 % des cations (exprimés en eq.L⁻¹). Le chlorure peut avoir plusieurs origines dans un aquifère : (1) l'atmosphère via les précipitations, (2) la dissolution de minéraux évaporitiques, (3) des apports anthropiques et (4) une intrusion marine. L'apport par dissolution d'évaporites peut être exclu dans le contexte géologique local. L'apport via les précipitations a été calculé dans la région par Ayraud *et al.* (2008) en se basant sur des analyses de pluies sur deux années. La moyenne, pondérée des hauteurs de pluie, des teneurs en Cl des précipitations est de 10 ± 2 mg.L⁻¹. L'évapo-transpiration locale a été estimée à 50-60 % des précipitations, ce qui conduit à une teneur moyenne en Cl de la recharge de 30 ± 10 mg.L⁻¹. Ayraud *et al.* (2008) considèrent ainsi que toutes les eaux souterraines présentant des teneurs en Cl supérieures à 40-45 mg.L⁻¹ contiennent une part de Cl qui n'est pas d'origine atmosphérique. La localisation géographique du bassin étudié exclut toute intrusion marine actuelle telle qu'on peut en rencontrer en zone côtière. Si l'impact de l'agriculture sur les teneurs en Cl a été clairement mis en évidence pour les aquifères superficiels bretons situés en contexte agricole (*e.g.* Pauwels *et al.*, 2000 ; Ayraud *et al.*, 2006 et 2008), les eaux profondes sont beaucoup plus riches en Cl que les eaux des aquifères superficiels (AEP) avec un rapport de 1 à 30 ou 40.

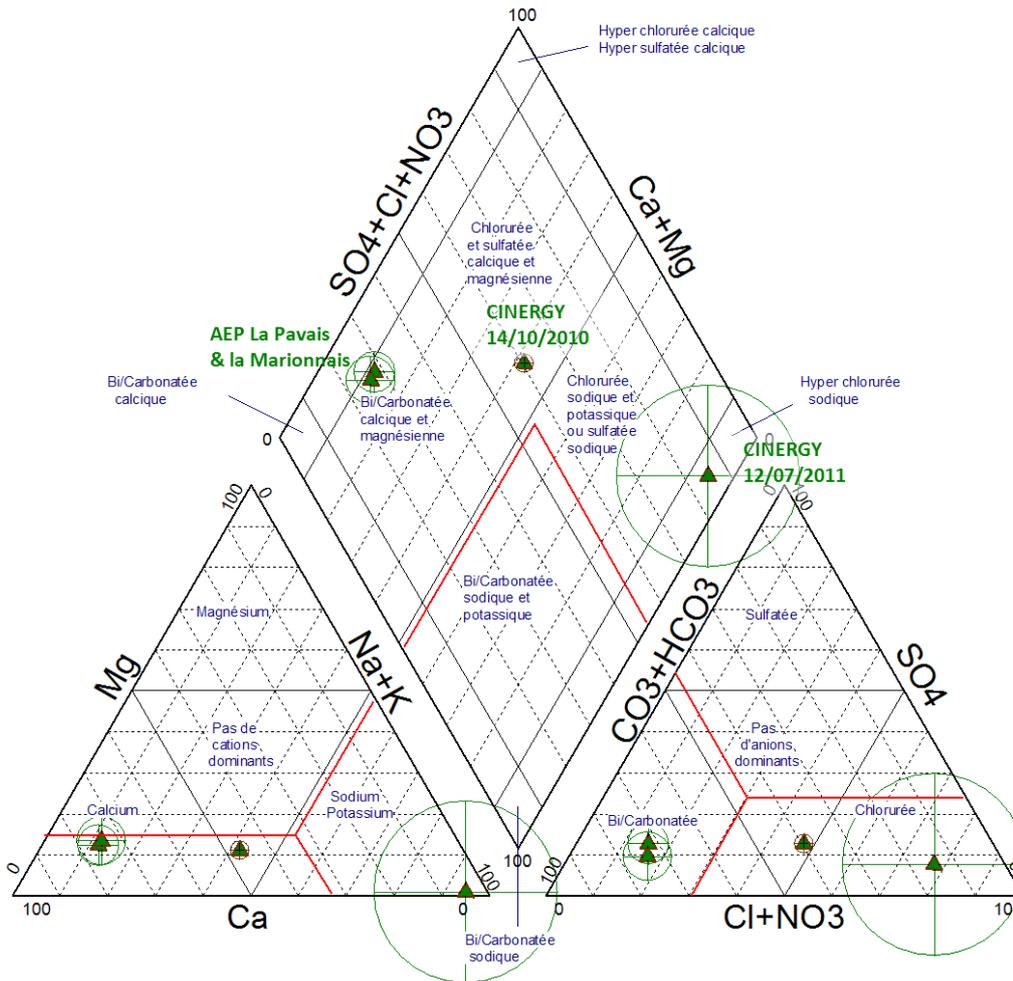


Figure 60 : Diagramme de Piper des eaux du forage CDB1 (octobre 2010 et juillet 2011) et des aquifères sus-jacents.

Les cercles autour de chaque point sont proportionnels à la minéralisation des échantillons.

La Figure 61 (gauche) représente la teneur en chlorure en fonction de celle en sodium. Les points de l'étude Cinergy sont replacés dans un contexte général, avec d'une part la signature des pluies et de la recharge (Clément *et al.*, 2003 ; Ayraud *et al.*, 2008), la référence de l'eau de mer ainsi que les différents stades de l'évaporation de l'eau de mer (triangles noirs). Les échantillons profonds du site de Betton (Pz6 et Pz7), au nord de Rennes, sont reportés pour situer les échantillons dans le contexte régional (Ayraud, 2005 ; Ayraud *et al.* 2008). Ces forages captent les schistes altérés du Briovérien, composés d'alternances centimétriques de grès, de siltites et niveaux riches en argiles.

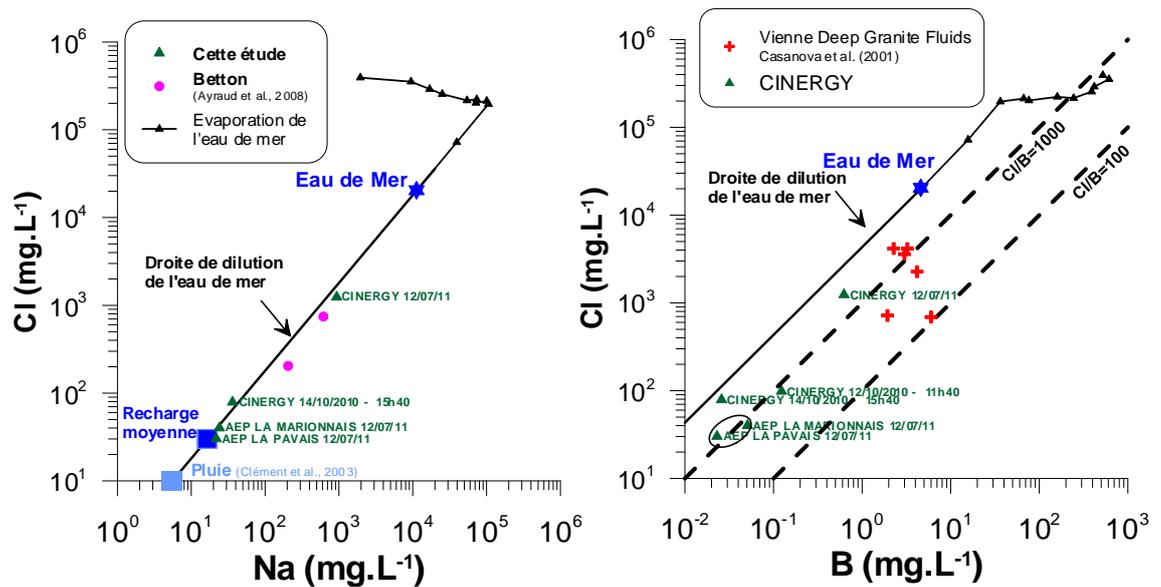


Figure 61 : Relation Cl en fonction de Na et B (en mg.L⁻¹).

Tous les échantillons de cette étude se répartissent le long de la droite de dilution de l'eau de mer. Seul l'échantillon profond (12/07/2011) s'écarte sensiblement de la droite, même si cela est peu visible sur ce diagramme en échelle log. Son rapport massique Na/Cl est de 0,753, pour un rapport de 0,555 dans l'eau de mer. L'enrichissement en Na résulte de l'interaction eau-roche prolongée avec les minéraux riches en Na (e.g. plagioclases). Les échantillons du site de Betton, et en particulier le point Pz6 le plus riche en Na et Cl, sont très similaires à l'échantillon profond de CDB1.

La relation Cl-B (Figure 2, droite) montre que les échantillons de cette étude présentent tous un enrichissement en bore par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer, traduisant une interaction avec la matrice encaissante. Cet enrichissement est marqué quelle que soit la minéralisation totale des échantillons. On note cependant que l'échantillon profond du forage CDB1 présente un rapport Cl/B qui se rapproche de celui de l'eau de mer, pouvant ainsi marquer à la fois des interactions eau-roche et un mélange avec un fluide salé (eau de mer diluée ?). Des fluides profonds issus des granites de la Vienne ont été reportés pour comparaison dans cette même figure. Casanova *et al.* (2001) ont caractérisé la signature de ces fluides profonds comme la résultante à la fois d'interaction eau-roche et de mélange avec un fluide salé.

La Figure 62 représente les teneurs en Cl en fonction de Br, l'échantillon de CDB1 se situe sur la droite de dilution de l'eau de mer. Les échantillons des deux ouvrages AEP captant les aquifères sus-jacents présentent des teneurs en bromure inférieures à la limite de détection (0,1 mg.L⁻¹) et sont ainsi compatibles avec le domaine des eaux de surface (mesurées dans le Massif central et publiées par Casanova *et al.*, 2001). L'échantillon profond de CDB1 pourrait ainsi correspondre à un mélange entre un composant salé et des eaux de surface (recharge et/ou aquifères sus-jacents).

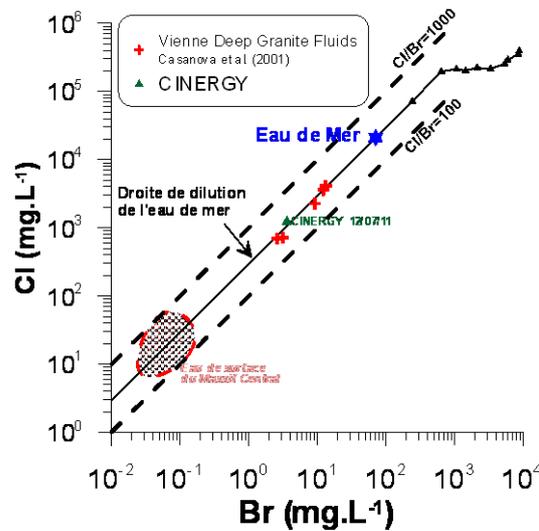


Figure 62 : Relation Cl en fonction de Br (en mg.L⁻¹).

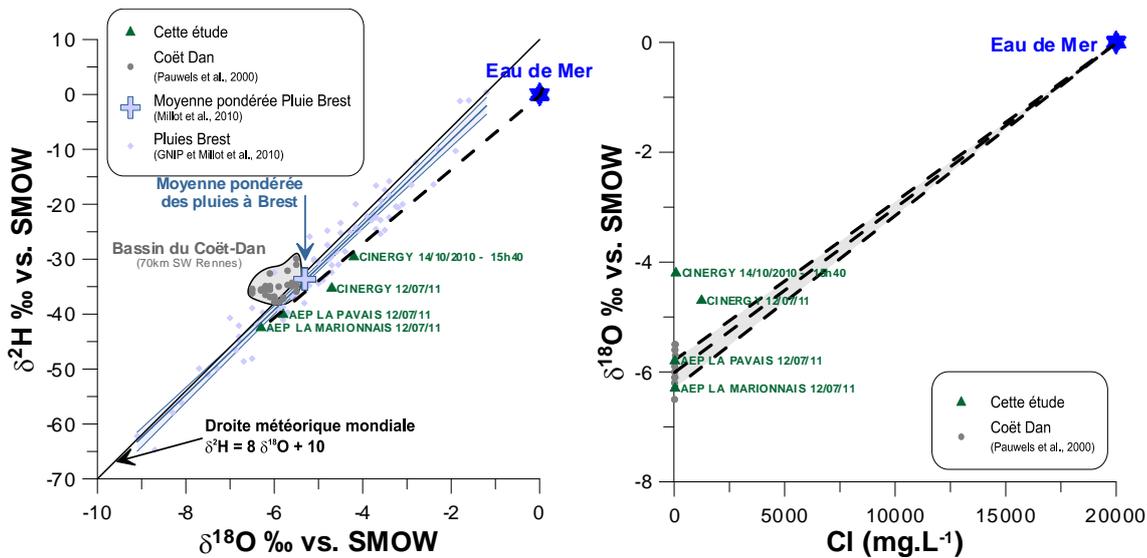


Figure 63 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (gauche) et entre $\delta^{18}\text{O}$ et Cl (droite).

La Figure 63 représente la composition isotopique en O et H de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). Les échantillons sont replacés dans le contexte local, à savoir la recharge caractérisée par les pluies de Brest (Milot *et al.*, 2010) et les eaux souterraines du bassin du Coët-Dan (70 km au sud-ouest de Rennes ; Pauwels *et al.*, 2000). La signature moyenne des pluies pondérées à Brest (Milot *et al.*, 2010) est tout à fait en cohérence avec les signatures des eaux souterraines du bassin du Coët-Dan, marquant bien une recharge par les eaux météoriques sans modifications (évaporation par exemple). Les échantillons des deux captages AEP se situent sur la droite météorique locale de Brest, alors que l'on note une légère déviation de la droite locale vers des valeurs plus enrichies en isotopes lourds pour les échantillons du forage CDB1 (octobre 2010 et juillet 2011). Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ les plus enrichies en

isotopes lourds correspondent à l'échantillon d'octobre 2010 (le moins représentatif du pôle profond). Celui du 12/07/2011 présente des valeurs intermédiaires entre les précédentes et celles des AEP. Les quatre échantillons de cette étude s'ordonnent en un pseudo-alignement avec l'eau de mer, ce qui pourrait donc suggérer un mélange entre des eaux de surface/recharge récentes et une eau type eau de mer (actuelle). Ceci n'est cependant pas confirmé par le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ en fonction des teneurs en Cl (Figure 63, droite), où les échantillons du forage profond ne se placent pas sur une droite de mélange entre les eaux des aquifères superficiels et l'eau de mer.

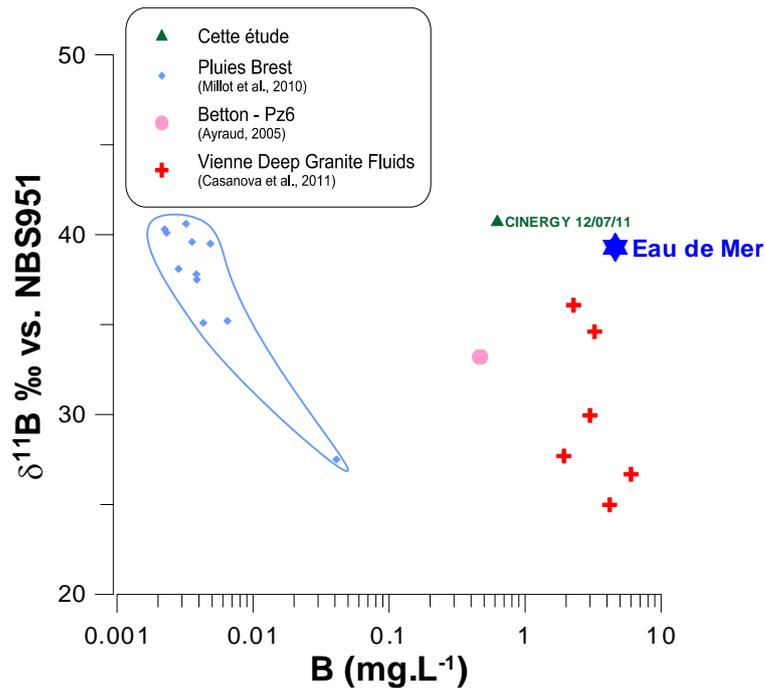


Figure 64 : Relation entre la composition isotopique en bore ($\delta^{11}\text{B}$) et la teneur en bore.

Seul l'échantillon le plus représentatif de l'eau profonde issue du socle (12/07/2011) a été analysé pour la composition isotopique du bore ($\delta^{11}\text{B}$). Cet échantillon présente une signature isotopique $\delta^{11}\text{B} = 40,7 \pm 0,3 \text{ ‰}$, peu différente de celle de l'eau de mer (Figure 64), avec cependant une teneur en bore de l'ordre de $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$ contre $4,6 \text{ mg.L}^{-1}$ pour l'eau de mer. L'échantillon le plus salé du site de Betton présente un rapport isotopique $\delta^{11}\text{B} = 33,2 \text{ ‰}$ pour une teneur de $0,466 \text{ mg.L}^{-1}$ (Ayraud, 2005), et a été interprété comme traduisant un mélange entre une eau de mer ($+39,5 \text{ ‰}$) avec une légère contribution des interactions eau/roche. Cette même interprétation est donnée par Casanova *et al.* (2001) pour caractériser les fluides profonds du granite de la Vienne. La signature de type marin pour l'échantillon profond pourrait donc traduire l'impact d'un fluide salé. Afin d'apporter des contraintes supplémentaires quant à un impact éventuel des boues de forage, des analyses sont en cours sur ces boues.

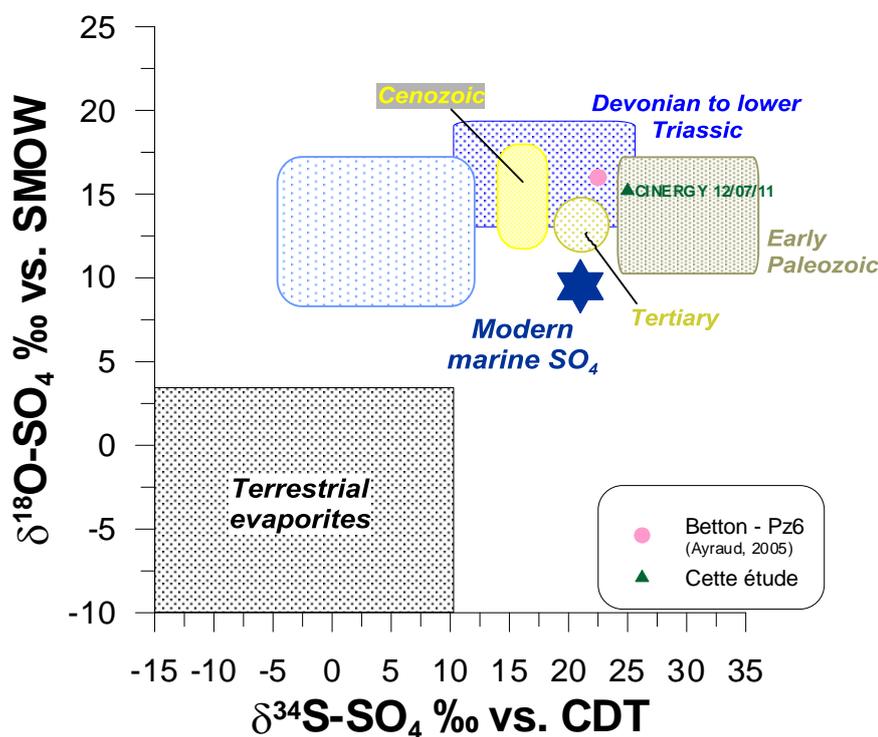


Figure 65 : $\delta^{18}\text{O-SO}_4$ en fonction $\delta^{34}\text{S-SO}_4$ (d'après Clark and Fritz, 1997).

La Figure 65 représente les compositions isotopiques du soufre et de l'oxygène des sulfates mesurées dans le fluide profond de Cinergy (12/07/2011) et dans le forage profond Pz6 du site de Betton (Ayraud, 2005). Ces deux signatures sont très similaires et présentent des valeurs très élevées, supérieures à la signature de l'eau de mer actuelle. De tels rapports isotopiques sont souvent indicateurs d'une réduction dissimilatrice des sulfates, mais les fortes concentrations en sulfate observées dans ce puits (164 et 300 mg.L⁻¹ respectivement) ne permettent pas de valider cette hypothèse. Ainsi, Ayraud (2005) fait l'hypothèse, en se basant sur les isotopes du bore, les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates, mais aussi sur l'histoire géologique de la zone, que les eaux salines du site de Betton seraient des eaux résiduelles de la dernière transgression marine qui date du Tertiaire (Plaisancien à 2,6 Ma). Sur la base de ces mêmes éléments, cette hypothèse peut être étendue aux eaux profondes du forage CDB1.

Des analyses isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ont été réalisées sur les deux aquifères de surface (AEP) et sur l'eau représentative du fluide profond du forage CDB1 (12/07/2012). La Figure 66, replace ces échantillons par rapport à la signature des pluies côtières de Brest (Négreil *et al.*, 2007) dont la signature est similaire à la valeur actuelle de l'eau de mer. Les signatures des deux ouvrages AEP sont relativement similaires ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70921$ et $0,70934$) comparativement à la valeur mesurée dans les eaux profondes du forage CDB1 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,711922$). La signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de cette eau profonde est très différente de la valeur de l'eau de mer, non seulement actuelle mais aussi de sa variation de signature au cours des temps géologiques. Une valeur aussi élevée de composition isotopique en Sr trace une

interaction eau-roche avec la matrice encaissante de schistes briovériens, ce traceur isotopique ne permet donc pas de tracer l'origine de la salinité des eaux du socle briovérien.

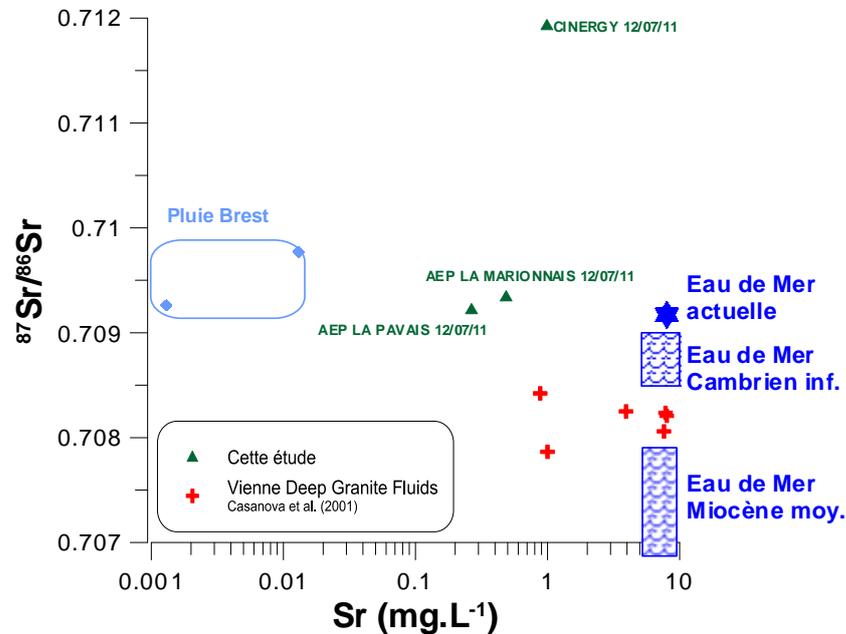


Figure 66 : Relation entre la composition isotopique en strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et la teneur en Sr.

Des essais de datation de cette eau profonde du forage CDB1 ont été réalisés. Une mesure de l'activité tritium donne une valeur de $^3\text{H} = 2 \pm 1$ UT, à comparer avec la valeur actuelle des eaux de pluies régionales dont la valeur est estimée à ~ 4 UT (sur la base de données sur les aquifères de surface de Bretagne et Ille-et-Vilaine – communication personnelle L. Gourcy). Le Laboratoire OSUR de Géosciences Rennes a en parallèle réalisé des mesures de gaz dissous (CFC et SF6) sur ce même échantillon et a montré la présence de ces gaz anthropiques (données non publiées, communication personnelle L. Aquilina) confirmant la « contamination » de cette eau profonde par une eau récente (sans pouvoir à ce stade en déterminer l'origine).

Enfin une analyse de C-14 de cette eau profonde donne une activité de 114 pmc associée à une valeur de $\delta^{13}\text{C} = -19,7$ ‰ qui tracerait une eau moderne. La validité de cette mesure unique sur une eau très chargée en matière organique est cependant à prendre avec réserve.

Les analyses menées par le BRGM montrent que l'eau souterraine du forage CDB1 est :

- une eau salée (conductivité élevée et faciès chloruré sodique, teneur en Cl de 1,25 g.L-1) clairement distincte des eaux des aquifères de surface (AEP) ;
- une eau avec des signatures isotopiques en bore ($\delta^{11}\text{B}$) et soufre et oxygène des sulfates ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$ et $\delta^{18}\text{O-SO}_4$) compatibles avec une origine marine de ce fluide ;

- une eau avec un rapport isotopique en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) nettement plus élevé que celui des aquifères de surface (AEP), marquant l'interaction eau-roche avec l'encaissant briovérien ;
- une eau contenant du ^{14}C (ce qui pourrait indiquer une pollution de l'eau des schistes briovériens avec une eau plus récente et plus en surface), cette analyse étant cependant à prendre avec réserve.

En parallèle, les analyses réalisées par l'OSUR sur l'eau du forage CDB1 (communication personnelle) indiquent :

- des teneurs très importantes en Néon et Argon donc une eau très ancienne ;
- une contamination claire de l'eau des schistes briovériens par des eaux récentes (présence de CFCs, gaz dissous).

Le caractère salé de cette eau pourrait donc correspondre à des eaux résiduelles d'une transgression marine, hypothèse cohérente avec les investigations régionales (Ayraud, 2005 ; Ayraud *et al.*, 2008). Cette salinité (16 fois inférieure à celle de l'eau de mer sur la base des chlorures) et le caractère potentiellement ancien de l'eau souterraine des schistes est donc supposé mais il est perturbé par des apports d'eau souterraine plus récente. À ce stade, différentes hypothèses peuvent être avancées sans pouvoir reconstituer la signature d'un pôle profond pur :

- cette « contamination » provient de l'eau du réseau AEP qui a servi à nettoyer la boue du carottage (hypothèse cependant peu probable car cette eau, qui « flottait » sur la bulle d'eau salée, a été évacuée suite aux 7 pompages successifs). Des investigations complémentaires sur la boue de forage sont en cours pour essayer de lever cette hypothèse ;
- cette « contamination » provient des aquifères tertiaires qui suintent par l'extrados du forage en raison d'une mauvaise cimentation (hypothèse envisageable car les diagraphies SEMM réalisées en 2010 semblent montrer quelques défauts de cimentation, Bauer *et al.*, 2011) ;
- c'est de l'eau des aquifères tertiaires qui tombent dans le forage au niveau des soudures mal faites du tubage acier (probable car des décalages de tubage acier ont été remarqués lors de la descente de la pompe utilisée en 2011).

3.4. CONCLUSION

Les aquifères traversés par le forage CDB1 incluent les aquifères de surface (sables plio-quadernaires, calcaires et faluns miocènes et calcaires oligocènes) et les aquifères de socle (zone fissurée et d'éventuels drains tectoniques).

Les **opérations menées en 2010** comprennent un air-lift du forage précédant une série de pompages d'essai, à l'issue desquels des prélèvements de fluides ont été réalisés pour analyses qualitatives. Les différentes tentatives de pompages d'essai d'octobre 2010 n'ont pas permis de déterminer une productivité cohérente de l'ouvrage. Seule la vitesse de remontée du niveau piézométrique a pu être estimée à environ 2-3 m par heure. Les premières analyses ont montré un taux important de

MES (1 650 mg/l), qui reflète directement la qualité de l'eau du trou. Cependant, malgré sa non-productivité, l'eau primaire du socle est pressentie via les mesures de conductivité, qui atteignent 4,5 mS/cm à 438 m de profondeur, suggérant la présence, en profondeur, d'une eau très minéralisée.

Les **opérations menées en 2011** se sont déroulées dans le cadre d'une convention tripartite entre la commune de Chartres-de-Bretagne, l'université de Rennes 1 et le BRGM. Sept nouveaux micro-pompages ont été réalisés pendant 1 mois ½, avec enregistrement des paramètres physico-chimiques par diagraphie, pour surveiller la remontée de la bulle d'eau salée identifiée en 2010. Celle-ci a pu être échantillonnée à l'issue de cette série de pompages.

Les nouveaux essais ont confirmé que le socle était peu productif (transmissivité de $1,5 \cdot 10^{-7}$ m²/s) en raison d'un terrain capté par le forage quasi-imperméable et donc difficilement caractérisable.

Les analyses effectuées sur l'échantillon prélevé indiquent que l'eau souterraine du forage est salée, chlorurée-sodique, d'origine marine, sans doute très ancienne. Cependant, la présence d'une activité ¹⁴C et surtout de CFC marque clairement un mélange avec de l'eau actuelle. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce mélange, impliquant très probablement une connexion avec les aquifères de surface.

4. Étude de la biomasse profonde

4.1. OBJECTIFS

L'équipe de microbiologie menée par F. Garrido (service EPI) avait pour objectif de recueillir des échantillons du sondage à diverses profondeurs et étudier leur contenu micro-organique.

Bien que le forage et les installations n'étaient pas dimensionnés pour cet objectif, une dizaine de tronçons de carotte, de lithologie et à profondeur variées, ont été isolés et conditionnés selon un protocole mis au point par EPI (voir ci-dessous).

L'objectif du volet « Biomasse » du projet CINERGY était donc relativement réduit, s'agissant principalement de recueillir, conditionner sur le chantier puis reconditionner en laboratoire le matériel.

Cependant, il est apparu que des incertitudes résidaient sur l'intégrité des échantillons vis-à-vis de pollutions extérieures, et notamment en rapport avec le milieu de foration (boue de forage en circulation). Avant toute étude impliquant un investissement analytique et temporel important, il est nécessaire de s'assurer que les échantillons soient, en leur cœur, exempts de toute pollution.

4.2. SÉLECTION ET CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

4.2.1. Stratégie d'échantillonnage

Un objectif d'une dizaine d'échantillons « GMB » (GéoMicroBiologie) a été établi en amont du chantier de forage. Les échantillons devaient comprendre une section entière de carotte, longue de 30 cm, ainsi que des échantillons de la boue de forage avant et après le prélèvement de la carotte. Les échantillons de carottes étaient prévus pour servir à diverses expérimentations dédiées à l'étude de la biosphère profonde et les échantillons de boues et de fluides de forages à l'évaluation de l'éventuelle contamination bactérienne induite par l'action du forage sur les carottes. Ce dernier point est d'une importance capitale pour cette étude.

Pour chaque carotte, les consignes étaient d'éviter la tête de carotte et les zones de fracture qui auront été le plus longtemps en contact avec l'air, ce qui est très défavorable pour la détection des microflores anaérobies colonisant ce type d'écosystème. D'autre part, le risque de pénétration des fluides de forage et donc une contamination potentielle par des bactéries exogène, est plus important dans les zones de fracture.

L'échantillonnage des boues et des fluides de forages devait être réalisé de manière à avoir une correspondance temporelle avec la carotte extraite dans chacun des compartiments ; le but étant d'avoir un échantillonnage de tous les fluides associés aux

carottes récupérées. Compte tenu des précautions à prendre pour cet échantillonnage dédié aux études de géomicrobiologie, il est exclu d'échantillonner les dernières carottes sorties en fin de journée et en fin de semaine qui ne seraient pas immédiatement traitées.

4.2.2. Organisation et protocole d'échantillonnage

Parmi les équipes de suivi, deux personnes (géochimistes) étaient identifiées comme celles qui sélectionneraient et manipuleraient les échantillons GMB. Le protocole a été mis en place avec l'équipe de microbiologistes du BRGM avant le chantier, ces derniers avaient en outre préparé tout le matériel nécessaire à l'échantillonnage et au conditionnement sur place.

Décision d'échantillonner

La nécessité de recueillir du fluide de forage AVANT le carottage a amené les équipes à prendre les décisions d'échantillonner « à l'aveugle », puisque la géologie du forage était inconnue. La décision était donc prise en fonction des passes précédentes, avec des succès mitigés : dans la partie du socle, nous avons dû reporter plusieurs fois l'échantillonnage lorsqu'à la vue des carottes éclatées, aucun échantillon de 30 cm n'était prenable. Enfin, lorsqu'une carotte était échantillonnable, il restait à définir l'intervalle, le plus homogène possible et reflétant au mieux les faciès du moment. Une exception à cette règle : lorsqu'un banc calcaire, poreux et très particulier est carotté à 159 m, il est apparu intéressant de l'échantillonner, vu le contraste lithologique et pétrophysique avec l'encaissant totalement argileux.

Workflow et protocole d'échantillonnage

Dès que la décision d'échantillonner est prise, l'équipe des foreurs en est avertie car ce sont eux qui vont prélever la boue avant et après le carottage (accès à la plateforme restreint aux équipes de COFOR). L'agent référent BRGM fournit les flacons PET stérilisés aux foreurs, qui noteront aussi les heures auxquelles ils prélèveront la boue. À l'arrivée de la carotte, la chaîne de traitement suivante se met en place :

- noter l'heure de sortie de la carotte et du conditionnement de l'échantillon ;
- nettoyer la table d'échantillonnage au préalable avec du produit désinfectant puis à l'alcool à 70° ;
- porter des gants à usage unique pendant toute l'opération de manipulation ;
- le tronçon identifié est, au besoin, découpé à la scie pour obtenir un cylindre de 30 cm de long³ ;
- nettoyer le tronçon au papier stérilisé imbibé d'alcool à 70° ;

³ Au préalable, la carotte aura été nettoyée, orientée, décrite, mesurée, mise en caisse et photographiée voire passée au scan DMT.

- placer l'échantillon dans un sac plastique stérilisé préalablement étiqueté ;
- sceller et flusher à l'azote 3 fois pour éliminer au maximum l'air ambiant dans le sac. Souder le sac ;
- placer le sac plastique dans un sac aluminisé, le sceller, flusher 3 fois à l'azote et souder le sac ;
- réitérer cette opération dans un autre sac aluminisé ;
- étiqueter ce dernier sac.

En parallèle, et en guise de témoin, un échantillon « ISO » a été pris en tête ou en pied du tronçon choisi. Cet échantillon a été traité de façon classique (Bauer *et al.*, 2011).

Régulièrement, les échantillons GMB ont été retournés aux labos d'EPI au BRGM pour y être reconditionnés en salle blanche afin d'en garantir la pérennité. En effet, les analyses n'étant pas prévues dans le cadre de CINERGY, les échantillons devaient pouvoir être stockés correctement à moyen/long terme.

Liste des échantillons

Cotes (m)	Litho	N° échantillon	Lavage/ LM	RX	ISO	MO	GMB	Commentaires
84,50-84,80	A	CDB1-031					X	Echantillon GMB01
84,80-84,90	A	CDB1-032		X	X			+ éch. ISO en pied
97,13-97,23	A	CDB1-042		X	X			Echantillon GMB02
97,23-97,53	A	CDB1-043					X	+ éch. ISO en tête
116,66-116,76	A	CDB1-049			X			Echantillon GMB03
116,76-117,05	A	CDB1-048					X	+ éch. ISO en tête
159,00-159,10	C	CDB1-075		X	X			Echantillon GMB04
159,00-159,10	C	CDB1-076	X					+ éch. ISO en tête
159,10-159,40	C	CDB1-074					X	
228,41-228,46	A	CDB1-1276				X		Echantillon GMB05
228,41-228,46	A	CDB1-1277		X				+éch. ISO & RX en tête
228,46-228,76	A	CDB1-130					X	pris en fév 2012
292,36-292,66	A	CDB1-169					X	
292,66-292,76	A	CDB1-170			X	X		Echantillon GMB06
292,66-292,76	A	CDB1-171				X		+ éch. ISO & MO en pied
414,70-415,00	A	CDB1-318					X	
415,00-415,06	A	CDB1-316			X	X		Echantillon GMB07
415,00-415,06	A	CDB1-317				X		+ éch. ISO & MO en pied
519,48-519,52	A	CDB1-412			X	X		Echantillon GMB08
519,48-519,52	A	CDB1-413				X		+ éch. ISO & MO en tête
519,52-519,82	A	CDB1-414					X	
583,72-583,97	AS	CDB1-451					X	Echantillon GMB09
583,82-583,90	AS	CDB1-452			X			+ éch. ISO & MO en parallèle
583,82-583,90	AS	CDB1-453	X					(morceau en "sifflet")
644,30-644,60	A	CDB1-486					X	
644,60-644,70	A	CDB1-487			X	X		Echantillon GMB10
644,60-644,70	A	CDB1-488				X		+ éch. ISO & MO en pied

Tableau 12 : Liste des échantillons GMB et leur pendant ISO/MO/RX.
En gris-brun, sont colorées les analyses effectuées sur certains d'entre eux.

Au terme du forage, dix échantillons ont été prélevés pour la géomicrobiologie. Il s'agit de six échantillons de couverture sédimentaire et quatre du socle briovérien. Sur les six premiers, cinq sont des argiles, un seul est calcaire. Dans le socle, le premier a été pris dans les altérites, le second à la limite avec le socle sain et les deux derniers dans le socle sain. L'échantillonnage est plus resserré en haut du forage.

4.3. ÉTUDE DE L'INTÉGRITÉ DES ECHANTILLONS

Le contenu micro-organique des roches étant extrêmement sujet à la pollution extérieure, et compte-tenu des conditions opératoires sur le chantier, l'intégrité des échantillons devait être testée en préalable à toute future étude. C'était l'objet exact du volet « Biomasse » de CINERGY.

Nous nous sommes attachés à déterminer si la boue de forage avait pénétré ou non le cœur de la carotte, malgré un temps de contact relativement court (quelques secondes dans l'espace de foration, puis 1 à 3 heures au sein du carottier ; lavage à grande eau ensuite). Différentes approches ont été testées pour déterminer les effets d'une telle pollution : détermination par DRX, observation par microscopie optique, par MEB, par mesure du pH solide, détermination par quantification des diagraphies. L'ensemble des résultats de ces approches sont en Annexe 5. Nous reprenons les grandes lignes de chacune ci-dessous.

4.3.1. Détermination par Diffractométrie des RX

Cette première approche visait à distinguer les zones envahies par la boue à polymères sachant que ces derniers, non cristallins, rendraient un signal amorphe. Le protocole a été le suivant :

- analyser les échantillons « ISO » par DRX des argiles ;
- analyser les échantillons de boue correspondante par DRX des argiles ;
- analyser des échantillons de différents additifs fournis gracieusement par COFOR.

Les résultats montrent que si les polymères ont en effet une réponse amorphe sous la forme d'une bosse dans les diagrammes, celle-ci est beaucoup trop faible pour être distinguée du bruit de fond.

4.3.2. Détermination par observation microscopique optique

Cette approche et la suivante concernent l'unique échantillon carbonaté, présentant une porosité de dissolution très importante. S'il s'avérait que cet échantillon n'avait pas été envahi en son cœur, cela préjugerait de la bonne qualité des échantillons argileux, qui ne présentent aucune perméabilité.

Les observations indiquent que les fissures ouvertes sur l'extérieur sont partiellement colmatées avec de l'argile au faciès microbréchiq, au contraire des argiles des fractures fermées. Les enduits des fractures ouvertes sont maintenus en place par un

liseré microsparitique. La question est donc de savoir si le séchage de l'échantillon est susceptible de faire cristalliser de la microsparite.

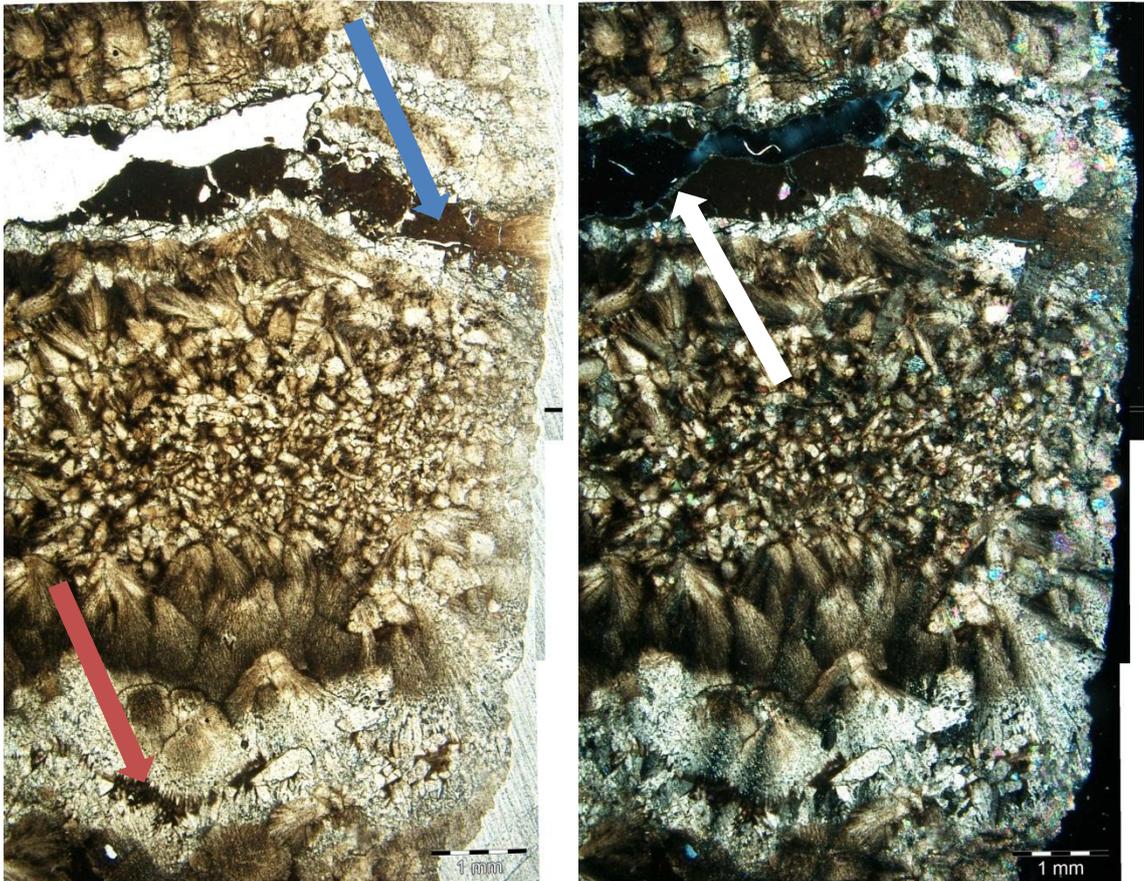


Figure 67 : Calcrète vue au microscope optique, en lumière « naturelle » (gauche) et polarisée-analysée (droite).

Flèche bleue : remplissage argileux d'une fracture ouverte ; flèche rouge : argile de formation, piégée dans la structure calcaire ; flèche blanche : liseré microsparitique.

La différence de faciès ferait pencher pour deux argiles d'origines différentes, mais un processus pédogénétique (illuviation) pourrait tout aussi bien expliquer cette différence faciologique.

4.3.3. Détermination par observation au MEB

L'idée était de compléter les observations optiques pour trancher sur la question de l'origine de l'argile présente dans les fractures. Trois séances de MEB ont été nécessaires pour avancer sur la réflexion. Il apparaît que la comparaison des analyses chimiques ponctuelles entre de l'argile piégée dans les structures fibreuses et celle des fractures indique une origine différente : l'argile des fractures montre un signal fort en Ca, témoin de petits fragments (clastes) de carbonates micritiques dans la matrice argileuse, visibles nettement au MEB, et en relation avec le faciès microbréchi que observé en optique. Les deux argiles se différencient également par leur spectre

chimique, l'argile des fractures fermées étant marquée par l'absence de soufre (S) malgré la présence de fer (Fe). Le soufre n'étant cependant pas un élément probant des additifs de forage, il nous paraît prématuré d'en conclure qu'il s'agirait de l'invasion de boue de forage.

4.3.4. Détermination par mesure du pH « solide »

L'idée de cette approche est de tracer l'invasion de la boue sur son paramètre d'alcalinité : le pH de la boue de forage est très basique (10 à 12) en raison notamment des additifs type carbonate de soude. Le pH du milieu, s'il n'est *a priori* pas connu, est censément acide, compte tenu des faciès en présence : haute teneur en matière organique et beaucoup de pyrite disséminée. En établissant un profil du pH de l'échantillon depuis la périphérie jusqu'à son cœur, l'invasion pourrait être caractérisée.

Trois zones (périphérie, milieu et centre de la carotte) sont micro-drillés pour en faire des poudres mise ensuite en suspension dans une solution électrolytique de pH connu. Le pH est mesuré et l'acidité de l'échantillon apprécié.

Les résultats indiquent une très faible variation du pH entre les trois échantillons (delta de 0,2), ce qui est, à mon sens, peu significatif en regard des variations escomptées. Le pH est d'ailleurs très acide.

L'interprétation que nous pouvons en faire est que soit l'invasion de la carotte est nulle, soit la quantité de boue ayant pénétré est trop faible pour être détectée par cette méthode.

4.3.5. Détermination par les diagraphies de résistivité

Parmi le lot de diagraphies dont nous disposons, deux résistivités (proche et lointaine) ont été acquises. La comparaison de ces deux résistivités permet aux géophysiciens d'apprécier la pénétration de la boue dans les terrains traversés et donc leur perméabilité. Lorsque la résistivité courte et la résistivité lointaine sont équivalentes, cela signifie bien que l'invasion est nulle **dans le rayon investigué par la mesure**. Dans ce type de sonde, les rayons d'investigation respectifs sont de 0,80 m et de 3,25 m. Les conclusions que l'on peut tirer de cette analyse s'appliquent donc à l'échelle métrique.

4.4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE VALORISATION

Cinq approches indépendantes et complémentaires ont été mises en œuvre pour tenter de quantifier l'invasion de la boue de forage dans les échantillons de carotte. Force est de constater qu'aucune ne répond définitivement à la question sans qu'un doute subsiste. Les conclusions sont parfois même opposées : le liseré microsparitique tendrait à indiquer une mise en place ancienne et scellée, mais la composition microbréchique de cette argile tranche avec celle de formation.

En l'état, et même si d'un point de vue du géologue les risques d'invasion par la boue des échantillons argileux est infime, aucune certitude ne peut être acquise à l'issue de ces tests. Si toutefois un échantillon devait être testé pour la réalisation d'analyses, nous préconiserions de choisir un échantillon du socle, la perméabilité des schistes briovériens étant assurément plus faible que celle des argiles non lithifiées tertiaires.

Devant l'incapacité à certifier, malgré de fortes présomptions, la non-invasion de la boue de forage au cœur des échantillons, l'équipe de microbiologie du BRGM opérerait pour une approche radicalement différente de l'étude de la vie microbienne en milieu extrême, par mise en culture de souches connues et maîtrisées avec les roches préalablement stérilisées, en réacteur (T,P) pendant une durée de l'ordre de 3 mois. Cette approche type « modèle » est certes indirecte mais s'affranchirait du coup du problème de l'invasion de la boue.

5. Conclusions et perspectives

5.1. CONCLUSIONS

Comme le prévoyait le cahier des charges du projet, l'année 2011 a vu la réalisation en parallèle des différentes études (géologique, hydrogéologique et géochimique, biomasse) incluses dans le projet CINERGY.

5.1.1. L'étude géologique

L'étude géologique s'est focalisée sur la partie **sédimentaire tertiaire** du forage. Dans le cadre d'un stage de Master 2 de l'université de Rennes, le cadre stratigraphique, paléoenvironnemental et paléoclimatique du bassin de Rennes a pu être détaillé. Parmi les résultats significatifs de cette étude, nous retiendrons :

- la dynamique sédimentaire lacustre particulière qui caractérise l'ensemble argileux priabo-rupélien (alternances de phases lacustres ouvertes et fermées) ;
- les différents ordres de grandeur de séquences sédimentaires enregistrées ;
- le taux de sédimentation moyen du bassin de Rennes, intermédiaire entre celui des bassins intracratoniques et des véritables bassins d'effondrement ;
- l'arrivée massive de Conifères au sommet de l'Éocène et d'argiles smectitiques à la base de l'Oligocène, marquant un refroidissement puis l'installation d'un climat plus contrasté ;
- la stabilité de l'environnement de dépôt lacustre au passage Éocène/Oligocène qui fait du bassin de Rennes un témoin privilégié des changements globaux à cette période.

L'étude du **socle briovérien** s'est focalisée sur son profil d'altération, remarquablement illustré par les diagraphies et, dans une moindre mesure, par la minéralogie des argiles. Le forage CDB1 aura permis, déjà à ce stade, d'avoir une vision complète et multi-paramètres d'un paléoprofil d'altération. Le profil, tronqué à son sommet par le conglomérat basal du bassin, comprend les différents horizons classiquement décrits dans les paléoprofils d'altération, bien que les transitions entre horizons soient beaucoup plus progressives que dans le cas de profils développés sur granite. Pour la première fois cependant, la roche saine est atteinte en forage et la monotonie de la lithologie permet une lecture exceptionnelle de l'évolution des différents paramètres.

La modélisation 3D du bassin de Rennes s'appuie sur les données de forage de la BSS, des données géophysiques et de la carte géologique. Quatre unités sont modélisées, séparées par trois interfaces : une unité Oligo-Néogène principalement carbonatée, une unité « Éocène » argileuse, le socle altéré et le socle sain.

Le modèle géologique du bassin rend compte d'une structure complexe à l'intérieur de laquelle les formations Éocène et Oligo-Néogène ont finalement le même dépôt-centre. Ceci pourrait être la conséquence d'un régime de contraintes tectoniques homogènes, au moins pour l'Éocène et l'Oligocène.

5.1.2. L'étude hydrogéologique et géochimique

Les aquifères de surface étant hors des objectifs de CINERGY, et le reste du remplissage sédimentaire totalement argileux, seul le socle fissuré a pu être testé pour ses propriétés aquifères.

En 2010, directement à la suite du forage, des pompages d'essai ont été réalisés et des fluides recueillis pour de premières analyses. Il est rapidement apparu que le socle testé n'était pas assez productif. Les eaux recueillies étaient pour leur part un mélange d'eau superficielle peu minéralisée et d'une eau plus minéralisée, dont la signature physico-chimique avait été observée à plus de 400 m de profondeur.

En 2011, de nouveaux pompages ont visé à (i) mieux caractériser l'aquifère et (ii) faire remonter la bulle salée jusqu'en surface pour la prélever et l'analyser. La très faible transmissivité ($1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) confirme que le socle est peu productif. Les analyses effectuées sur l'échantillon prélevé indiquent un mélange d'eau primaire salée d'origine marine, très ancienne, et d'une eau actuelle provenant, sans aucun doute, des aquifères de surface. Une connexion entre le forage et les aquifères de surface est très probable.

5.1.3. L'étude de la biomasse

Le volet « Biomasse » de CINERGY était initialement circonscrit au prélèvement et au conditionnement d'une dizaine d'échantillons. Nous avons de surcroît tenté d'estimer l'invasion éventuelle de la boue de forage au sein de la carotte, afin d'évaluer l'intégrité des échantillons pour toute analyse ultérieure.

Cinq approches indépendantes et complémentaires ont été mises en œuvre pour tenter de quantifier l'invasion de la boue de forage dans les échantillons de carotte. Force est de constater qu'aucune ne répond définitivement à la question sans qu'un doute subsiste. En l'état, et même si du point de vue du géologue les risques d'invasions par la boue des échantillons argileux est infime, aucune certitude ne peut être acquise à l'issue de ces tests. Si toutefois un échantillon devait être testé pour une analyse, nous préconiserions de choisir un échantillon du socle, la perméabilité des schistes briovériens étant assurément plus faible que celle des argiles non lithifiées tertiaires.

5.2. ACTIONS 2012 ET PERSPECTIVES

L'année 2012 verra l'achèvement du projet avec le modèle thermique simplifié. Deux publications sur les résultats géologiques, initiées en 2011, seront soumises en 2012,

et une participation à un congrès permettra de présenter une synthèse de ces résultats auprès d'une large audience de spécialistes.

Les perspectives à moyen terme sont d'ores et déjà engagées, notamment sur les sujets **géologiques**. Une thèse, financée par la région Bretagne, a débuté en octobre 2011. Elle va nous permettre de revoir l'histoire géologique du Massif armoricain pendant le Cénozoïque à la lumière des nouvelles données acquises et d'autres futures. En parallèle, des stages de Master 1 et 2, durant le premier semestre 2012, viendront renforcer les études paléoclimatiques sur les dépôts lacustres, initiés en 2011. L'objectif est de déboucher sur une autre proposition de thèse pour septembre 2012.

La complexité du fonctionnement des **aquifères** bretons, croisée à une demande sociétale toujours plus importante et notamment en secteur urbanisé, nous amène naturellement à envisager un projet de modélisation fine des aquifères de surface et des systèmes liés aux failles bordières des bassins. En effet, dans le cadre notamment de Chartres-de-Bretagne, l'unité Oligo-Néogène modélisée dans CINERGY est en réalité une formation aquifère composite qui gagnerait à être plus détaillée en termes de géométrie. Le modèle actuel nous renseigne sur le mur de cet aquifère, mais depuis 1971, il n'y pas eu de réévaluation de la ressource en eaux contenues dans ces aquifères. Leurs relations ne sont pas connues, elles ne sont pas clairement caractérisées. Il serait donc pertinent de réaliser un modèle géologique détaillé de ces aquifères supérieurs, d'en préciser les relations, d'évaluer les aires d'alimentation afin de mieux l'exploiter, mais aussi de mieux la gérer.

Devant l'incapacité de certifier, malgré de fortes présomptions, la non-invasion de la boue de forage au cœur des échantillons, l'équipe de **microbiologie** du BRGM opterait pour une approche radicalement différente de l'étude de la vie microbienne en milieu extrême, par mise en culture de souches connues et maîtrisées avec les roches préalablement stérilisées, en réacteur (T,P) pendant une durée de l'ordre de 3 mois. Cette approche type « modèle » est certes indirecte, mais s'affranchirait du coup du problème de l'invasion de la boue.

5.3. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient particulièrement la société Eradata et M. Châteauneuf pour les analyses biostratigraphiques et palynologiques. Les analyses minéralogiques, granulométriques, géochimiques..., ont été réalisées au BRGM par le service MMA et EPI pour le Niton.

Les diagraphies et micro-pompages ont été réalisés successivement par HAI, SEMM Logging et l'Université de Rennes 1 (Clément Roques, dans le cadre de sa thèse).

6. Bibliographie

Andreieff P. & Lefort J.-P. (1972) – Contribution à l'étude stratigraphique des terrains secondaires et tertiaires affleurant en Manche occidentale. *In* : Colloque sur la géologie de la Manche. *Mém. BRGM*, 79, p. 49-56.

Anonyme (1975) – Révision des périmètres de protection des captages d'Ille-et-Vilaine – Rapport BRGM 75 SGN 269 BPL

Ayraud V. (2005) – Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes. 312 p.

Ayraud V., Aquilina L., Labasque T., Pauwels H., Molenat J., Pierson-Wickmann A.C., Durand V., Bour O., Tarits C., Le Corre P., Fourre E., Merot P., and Davy P. (2008) – Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Applied Geochem.*, 23(9): p. 2686-2707.

Ayraud V., Aquilina L., Pauwels H., Labasque T., Pierson-Wickmann A.C., Aquilina A.M., and Gallat G. (2006) – Physical, biogeochemical and isotopic processes related to heterogeneity of a shallow crystalline rock aquifer. *Biogeochemistry*, 81(3): p. 331-347.

Ballard J.-F., Brun J.-P., Durand J. (1986) – La discordance Briovérien – Paléozoïque inférieur en Bretagne centrale : signature d'un épisode de distension ordovicienne. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, n° 303, p. 1327-1332.

Bauer H., Mougin B. et Dezayes C. (2011) – CINERGY : rapport géologique de fin de sondage. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-59528-FR, 137 p., 8 ann., 1 CD.

Bauer H., Wyns, R., Leclercq M., Palvadeau E. & Guillocheau F. (2010) – CINERGY : un forage profond dans le bassin de Rennes. *Bull. inf. Géol. Bass. Paris*, 47, n° 4, p. 3-6.

Bignot, G. & C. Pomerol (2010) – Extension de la ceinture équatoriale d'eaux littorales chaudes au cours de l'Éocène moyen, fondée sur la distribution latitudinale des grands Foraminifères en Europe occidentale et en Afrique australe. *In*: *Micropalaeontology, Sedimentary Environments and Stratigraphy: A Tribute to Dennis Curry (1912-2001)*: p. 91-98.

Blondeau A., Cavelier C., Labourguigne J., Megnien C. & Megnien F. (1980) – Éocène moyen, *in* Synthèse géologique du Bassin de Paris. *Mém. BRGM* n° 103, p. 367 à 377.

Bollo R., Goguel J., Jaeger J.-L. (1958) – Sur quelques anomalies gravimétriques en Bretagne. *C.R.A.S.*, 246 n° 4, p. 624-626.

- Bonnet S.** (1998) – Tectonique et dynamique du relief. Le socle armoricain au Pléistocène. Mémoire n° 86, *Géosciences Rennes*, 352 p.
- Borne V.** (1978) – Étude d'un sondage profond dans le bassin tertiaire de Saffré (Loire-Atlantique). Sédimentologie, biostratigraphie, paléoécologie. Mémoire de DEA, Université de Nantes, 47 p.
- Borne V.** (1986) – Le Paléogène du bassin de Challans-Noirmoutier (France). Thèse de 3^e cycle, Univ. Nantes, 271 p.
- Borne V.** (coord.) (1989) – Le Tertiaire du Massif armoricain. *Géol. de la France*, n° 1-2, 311 p.
- Borne V. et al.** (1991) – L'évolution des paléoenvironnements au Paléogène dans l'Ouest de la France. Le bassin de Saffré-Nord-sur-Erdre (Loire-Atlantique, France). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 162, n° 4, p. 739-751.
- Borne V., Chevalier M. et al.** (1989) – Les premiers dépôts paléogènes (yprésiens) de la bordure méridionale du Massif armoricain ; aspects sédimentologique, tectonique et paléogéographique. *Géologie de la France 1989 (1-2)*: p. 11-20.
- Bourdet D., Whittle T.M., Dougals A.A., Pirard V.M.** (1983) – A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.
- Brabant P.** (1965) – Contribution à l'étude sédimentologique des formations sableuses aux environs de Ballots et La Guerche. D.E.S. Sc. nat., univ. Rennes.
- Brault, N.** (2002) – Ressources du sous-sol et environnement en Bretagne ; genèse, géométrie et propriétés de différents types d'aquifères. Rennes, Université de Rennes 1 France.
- Brault N., Bourquin S. et al.** (2004) – Mio-Pliocene to Pleistocene paleotopographic evolution of Brittany (France) from a sequence stratigraphic analysis; relative influence of tectonics and climate. *Sedimentary Geology* 163(3-4): p. 175-210.
- Brun J.-P., Ballard J.-F., Le Corre C.** (1991) – Identification of Ordovician block-tilting in the Hercynian fold belt of Central Brittany (France): field evidence and computer models. *J. Struct. Geol.*, Vol. 13, n° 4, p. 419-429.
- Brunel L.** (1971) – Étude hydrogéologique du bassin de Bruz – Chartres, Rapport BRGM, 71-SGN-003-BPL, 125 p.
- Brunel L. & Talbo H.** (1979) – Syndicat intercommunal des Eaux de Lillion - Mairie de Mordelles (35) - Forage de reconnaissance – Avril 1979 – Rapport BRGM BPL 79-25
- Carn-Dheilly A. & Thomas E.** (2008) – RAPSODI, Recherche d'Aquifères Profonds dans le Socle du Département d'Ille-et-Vilaine. Rapport final BRGM/RP-56749-FR, 166 p.

- Casanova J., Négrel P., Kloppmann W. and Aranyosy J.-F.** (2001) – Origin of deep saline groundwaters in the Vienne granitic rocks (France); constraints inferred from boron and strontium isotopes. *Geofluids*, 1: p. 91-102.
- Cavelier C.** (1989) – Le Bassin parisien au Néogène. Progrès récents. 114^e Congr. Nat. Soc. Sav., Paris, Géol. Bassin parisien, p. 41-54.
- Cavelier C., Labourguigne J. et al.** (1980) – "Eocene supérieur." Upper Eocene in Synthèse géologique du Bassin de Paris. *Mem. BRGM* n° 101 : p. 379-399.
- Chantraine J., Chauvel J.-J., Cogné J.** (1988) – Signification du Briovérien et de son soubassement en Bretagne centrale. Implications géodynamiques. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 307, série II, p. 765-770.
- Chantraine J., Chauvel J.-J., Dupret L., Gatineot F., Icart J.-C., Le Corre C., Rabu D., Sauvan P., Villey M.** (1983) – Inventaire lithologique et structural du Briovérien (Protérozoïque) de la Bretagne centrale et du Bocage normand pour la recherche de guides métallogéniques. *Documents du BRGM*, n° 67.
- Cluseau R.** (1958) – Étude par sondages électriques, résistivité et magnétisme des anomalies gravimétriques légères en Bretagne. *Travaux du BRGM*, A1311 (11).
- Delage M.** (1879) – Étude du calcaire de Lormandière. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 3^e série t. VII, p. 426-445.
- Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J.** (1992) – Testing design and analysis. *Oilfield and analysis*. p. 28-45.
- Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S.** (2006) – A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330, p. 260-284.
- Durand S.** (1957) – Le bassin tertiaire de Rennes a été occupé par un lac, dès l'éocène. *C. R. Hebd. Séances de l'Acad. Sc.* 245(23): p. 2067-2069.
- Durand S.** (1960) – Le Tertiaire de Bretagne. Étude stratigraphique, sédimentologique et tectonique. Thèse d'État, *Mém. Soc. Géol. Minéral. Bretagne*, 12, 389 p.
- Durand S., Estéoule-Choux J., Ollivier-Pierre M.F., Rey R.** (1973) – Découverte d'Oligocène reposant sur du Cénomaniens dans un quartier sud de la ville de Laval (Mayenne). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 276, n° 5.
- Eagles G., Livermore R. et al.** (2006) – Small basins in the Scotia Sea: The Eocene Drake Passage gateway. *Earth and Planetary Science Letters* 242(3-4): p. 343-353.
- Estéoule-Choux J.** (1967) – Contribution à l'étude des argiles du Massif armoricain. Argiles des altérations et argiles des bassins sédimentaires tertiaires. 1^{re} thèse, Univ. Rennes, 319 p.

Estéoule-Choux J. (1968) – L'Éocène du Massif armoricain ; données nouvelles apportées par l'étude des minéraux argileux ; applications paléogéographique et paléoclimatique. *Mémoires du BRGM* 58: p. 417-425.

Estéoule-Choux J. (1970) – Contribution à l'étude des argiles du Massif armoricain. *Mém. Soc. géol. minéral. Bretagne*, n° 14, Rennes, 319 p.

Estéoule-Choux J. (1973) – Présence de dépôts lacustres d'âge Éocène en Bretagne Centrale, à la Trinité-Porhoet (Morbihan). *Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 277(7): p. 633-635.

Estéoule-Choux J., Bos P. et al. (1988) – Le bassin tertiaire de Pipriac (Ille-et-Vilaine) ; structure, mise en évidence de dépôts oligocènes. *Géologie de la France* 1988(1): p. 47-50.

Fauconnier D. (2004) – Étude palynologique de huit échantillons en provenance de la feuille à 1/50 000 de Mayenne. Rapp. interne BRGM n° EPI/ENV/2004 n° 535.

Gale A.S., Huggett J.M. et al. (2006) – Correlation of Eocene-Oligocene marine and continental records: orbital cyclicity, magnetostratigraphy and sequence stratigraphy of the Solent Group, Isle of Wight, UK. *Journal of the Geological Society*, London 163: p. 401-415.

Gruas-Cavagnetto C. (1978) – Nouvel apport palynologique à la connaissance du paléoclimat et de la paléophytogéographie de l'Éocène du Bassin anglo-parisien. *286(8)*: p. 591-593.

Guillocheau F., Brault N. et al. (2003) – Histoire géologique du Massif armoricain depuis 140 Ma (Cretace-Actuel). *Bulletin d'information des Géologues du bassin de Paris* 40(1): p. 13-28.

Guillocheau F., Robin C. et al. (2000) – Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints. *Geodinamica Acta* 13(4): p. 189-245.

Hervé J.-Y & Palvadeau E. (2011) – CINERGY, forage CDB1, rapport d'exécution. Rapport BRGM/RP-59523-FR.

Jaeger J.-L. & Corpel J. (1967) – Étude de l'anomalie gravimétrique légère en relation avec le bassin tertiaire de Rennes. *In*: Contribution de la carte gravimétrique à la géologie du Massif Armoricain. *Mém. BRGM* n° 52, p. 103-128.

Jaeger J.-L. (1959) – Étude de l'anomalie gravimétrique légère située au Sud-Ouest de Rennes (Ille-et-Vilaine). *Rapport BRGGM*, inédit.

Jaeger J.-L. (1967) – Un alignement d'anomalies légères coïncidant avec les bassins tertiaires en Bretagne. *In*: Contribution de la carte gravimétrique à la géologie du Massif Armoricain. *Mém. BRGM* n° 52, p. 91-102.

Lachassagne P., Wyns R. (2001) – Nouveaux concepts dans le domaine de l'hydrogéologie des roches de socle. Application au granite de la Margeride (Lozère),

Géologues - Revue officielle de l'union française des géologues, N° spécial Massif central, n° 130/131, p. 212-214

Lachassagne P., Wyns R. (2005) – Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences* – La revue du BRGM pour une terre durable, N° 2 - p. 32-37

Lachassagne P., Wyns R. (2006) – Généralités. 4. Aquifères de socle, *in* Aquifères et Eaux souterraines en France - Roux J.C. (Ed), AIH, 2 vol., p. 43-51, BRGM Editions

Lagabrielle Y., Goddérès Y. et al. (2009) – The tectonic history of Drake Passage and its possible impacts on global climate. *E. & Planet. Sci. Lett.* 279(3-4): p. 197-211.

Lardeux H. (2005) – Guide géologique de la Bretagne. Guides Géologiques Régionaux. Dunod, 221 p.

Lauriat-Rage A., Bréhion P. et al. (1992) – Palaeontological data about the climatic trends from Chattian to present along the Northeastern Atlantic frontage. *Cièncias de Terre* (UNL) 12: p. 167-179.

Le Corre C. (1977) – Le Briovérien de Bretagne centrale : essai de synthèse lithologique et structurale. *Bull. BRGM, Fr.*, I, n° 3, p. 219-254.

Lebesconte P. (1879) – Note stratigraphique sur un bassin tertiaire des environs de Rennes (I. & V.). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 3^e série t. VII, p. 451-464.

Lecuyer C. (1996) – Deciphering 'temperature' and 'salinity' from biogenic phosphates; the $\delta^{18}\text{O}$ of coexisting fishes and mammals of the middle Miocene sea of western France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 126(1-2): p. 61-74.

Miall A.D. (1996) – The geology of fluvial deposits. *Springer*: 586.

Miller K.G. (1991) – Unlocking the Ice House: Oligocene-Miocene Oxygen Isotopes, Eustasy, and Margin Erosion. *Journal of Geophysical Research* 96: p. 6829-6848.

Millot R., Petelet-Giraud E., Guerrot C. and Négrel P. (2010) – Multi-isotopic composition ($\delta\text{Li-7}$ - $\delta\text{B-11}$ - δD - $\delta\text{O-18}$) of rainwaters in France: Origin and spatio-temporal characterization. *Applied Geochem.*, 25(10): p. 1510-1524.

Mosbrugger V., Utescher T. et al. (2005) – Cenozoic continental climatic evolution of Central Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102(42): p. 14964-14969.

Mougin B., Allier D., Blanchin R., Carn A., Courtois N., Gâteau C., Putot E., collaboration Jegou J-P., Lachassagne P., Stollsteiner P. et Wyns R. (2008) – SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR - 129 p., 37 ill., 7 ann. dont 2 planches.

Moussu R., Prouhet J.P. (1957) – Rapport sur la mine de Pont-Péan (Ille-et-Vilaine), Rapport BRGM, A-1168, 34 p., 1 coupe.

Négrel P., Guerrot C. and Millot R. (2007) – Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in France: influence of sources and hydrogeochemical implications. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 43: p. 179-196.

Ollivier-Pierre M.F. and Sittler C. (1991) – Les modalités de la transgression Oligocène dans le Bassin de Rennes; arguments palynologiques. Modes of Oligocene transgression in the Rennes Basin. Palynological evidence 12.

Ollivier-Pierre M.F. and Estéoule-Choux J. (1980) – Palynologie, sédimentologie, reconstitution des climats: Application au Paléogène du Massif armoricain. *Mém. du Mus. Nat. d'Hist. Nat.*: p. 232-238.

Ollivier-Pierre M.F., Gruas-Cavagnetto C. et al. (1987) – Éléments de flore de type tropical et variations climatiques au Paléogène dans quelques bassins d'Europe nord-occidentale. Mémoires et Travaux de l'Institut de Montpellier 17: p. 173-205.

Ollivier-Pierre M.-F. (1980) – Étude palynologique (spores et pollens) de gisements paléogènes du Massif armoricain. Stratigraphie et paléogéographie. *Mém. Soc. Géol. Minéral. Bretagne*, 25, 239 p.

Ollivier-Pierre M.-F., Maupin C., Esteoule-Choux J. & Sittler C. (1993) – Transgression et paléoenvironnement à l'Oligocène en Bretagne (France). Sédimentologie, micropaléontologie, palynologie et palynofaciès du Rupélien du Bassin de Rennes. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 103, p. 223-250.

Pauwels H., Foucher J.C. and Kloppmann W. (2000) – Denitrification and mixing in a schist aquifer: influence on water chemistry and isotopes. *Chem. Geol.*, 168(3-4): p. 307-324.

Pross J. and Schmiedl G. (2002) – Early Oligocene dinoflagellate cysts from the Upper Rhine Graben (SW Germany): paleoenvironmental and paleoclimatic implications. *Marine Micropaleontology* 45(1): p. 1-24.

Rabu D., Chantraine J. et Béchenec F. (2001) – Carte géologique du Massif armoricain à 1/250 000. BRGM.

Renard Ph., Glenz D. and Mejias M. (2009) – Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*. 17: p. 589–600.

Rolet J. (1982) – La « phase bretonne » en Bretagne : état des connaissances. *Bull. Soc. géol. minéral. Bretagne*, 14, 2, p. 63-71.

Roussé S. (2006) – Architecture et dynamique des séries marines et continentales de l'Oligocène Moyen et Supérieur du Sud du Fossé rhénan : évolution des milieux de dépôts en contexte de rift en marge de l'avant-pays alpin, Université Louis Pasteur de Strasbourg: 474.

Talbo H. (1981) – Note sur les possibilités d'utilisation à des fins énergétiques (pompe à chaleur eau-eau) de l'exhaure de l'ancienne mine de Pont-Péan. Note interne, BRGM, 3 p.

- Talbo H., Mougin B., Thomas E.** (2001) – L'eau souterraine sur l'emprise du SAGE Vilaine. Rapport BRGM/RP-50821-FR, 30 p., 5 fig., 6 tabl.
- Thiry M., Quesnel F. et al.** (2006) – Continental France and Belgium during the Early Cretaceous; paleoweatherings and paleolandforms. *B.S.G.F.* 177(3): p. 155-175.
- Thomas E.** (1999) – Évolution cénozoïque d'un domaine de socle : Le Massif armoricain - Apport de la cartographie des formations superficielles, vol. 1 & 2, Université de Rennes 1, 147 p.
- Trautmann F. & Paris F.** (2000) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Rennes (317). Orléans : BRGM. Notice explicative par Trautmann F., Paris F. & Carn A. (2000), 85 p.
- Trautmann F.** (1994) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Janzé (353). Orléans : BRGM. Notice explicative par Trautmann F., Becq-Giraudon J.-F. & Carn A. (1994), 74 p.
- Van Vliet-Lanoë B., Laurent M. et al.** (1998) – Le Mio-Pliocène du Massif armoricain. Données nouvelles. The Mio-Pliocene of the Armorican Massive. New data. *C. R. Acad. Sc. - Series IIA - Earth and Planetary Science* 326(5): p. 333-340.
- Vasseur G.** (1881) – Terrains tertiaires de la France occidentale. Masson, Paris, 432 p.
- Wyns R. & Guillocheau F.** (1999) – Géomorphologie grande longueur d'onde, altération, érosion et bassins épicontinentaux., in Résultats et perspectives, LEDRU.P. (Ed), GéoFrance 3D - résultats et perspectives - ENS - Lyon - France - 23-24/11/1999, Documents BRGM, Orléans : Éditions BRGM, N° 293, p.103-108.
- Wyns R.** (1991) – Évolution tectonique du bâti armoricain oriental au Cénozoïque d'après l'analyse des paléosurfaces continentales et des formations géologiques associées. *Géol. de la France*, 3, p. 11-42.
- Wyns R.** (2002) – Climat, eustatisme, tectonique ; quels contrôles pour l'altération continentale ? Exemple des séquences d'altération cénozoïques en France. *Bulletin d'information des Géologues du bassin de Paris* 39(2): p. 5-16.
- Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J. and Mathieu F.** (2004) – Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 175 (1), p. 21-34
- Wyns R., Bitri A. & Guillocheau F.** (2002) – Le fond du graben de Rennes préserve-t-il un témoin de l'ancienne couverture mésozoïque du Massif armoricain détruite au Tertiaire ? *Résumé des Réunions des Sciences de la Terre*, Nantes 2002.
- Wyns R., Quesnel F., Simon-Coinçon R., Guillocheau F. & Lacquement F.** (2003) – Major weathering in France related to lithospheric deformation. *Géol. de la Fr.*, 1, p. 79-87.

Zachos, J., Pagani M. et al. (2001) – Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292 (5517): p. 686-693.

Annexe 1

BRGM/RP-60977-FRb. Log détaillé du remplissage sédimentaire du bassin de Rennes

Le rapport d'étude est joint sur CD sous format PDF.

Annexe 2

BRGM/RP-60977-FRc. Rapports et synthèse biostratigraphiques du forage – ERADATA

Le rapport d'étude est joint sur CD sous format PDF.

Annexe 3

BRGM/RP-60977-FRd. Résultats d'analyses par fluorescence X (Niton)

Le rapport d'étude est joint sur CD sous format PDF.

Annexe 4

BRGM/RP-60977-FRe. Résultats d'analyses minéralogiques par DRX

Le rapport d'étude est joint sur CD sous format PDF.

Annexe 5

BRGM/RP-60977-FRf. Rapports d'études pour Géomicrobiologie

Le rapport d'étude est joint sur CD sous format PDF.



**Centre scientifique et technique
Service géologie**

3, avenue Claude Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34