

LE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS EN COUCHES GÉOLOGIQUES PROFONDES

>> BENJAMIN BRIGAUD
>> JEAN-FRANÇOIS DECONINCK
>> CHRISTOPHE DURLET
>> PIERRE PELLENARD
>> JACQUES THIERRY

Université de Bourgogne, UMR CNRS 5561 Bio-
géosciences, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon.

>> ALAIN TROUILLER
Andra, Parc de la Croix Blanche,
1-7 Rue Jean Monnet,
92298 Châtenay-Malabry, Cedex.

>> BENOÎT VINCENT
Andra, Laboratoire de Recherche
Souterrain de Meuse/Haute-Marne,
Route Départementale 90 - BP 9, 55290 Bure

Résumé :
>> PRISCA SIMLER

STOCKER LES DÉCHETS RADIOACTIFS SOUS TERRE

Enfouir les déchets générés par la production d'énergie nucléaire à 500 mètres de profondeur ? Oui, mais pas dans n'importe quelles conditions. Le choix du site de stockage est primordial pour assurer sa pérennité et sa non dangerosité. Zoom sur les argiles de la Meuse/Haute-Marne.

La France, comme de nombreux autres pays, a fait le choix de s'équiper en centrales nucléaires pour produire de l'énergie. Cette technique engendre l'émission de déchets radioactifs potentiellement dangereux qui doivent être neutralisés le temps qu'ils deviennent inoffensifs. Une solution actuellement à l'étude consiste à les stocker dans les couches géologiques profondes. Les sites de stockage souterrains ne sont pas choisis au hasard : ils doivent répondre à des critères stricts. Des membres du laboratoire « Biogéosciences » de l'université de Bourgogne étudient aux côtés de l'Andra¹ les formations argileuses âgées d'environ 160 millions d'années de la commune de Bure en Lorraine. Enfouie entre 400 et 600 mètres de profondeur, la couche d'argiles, dites « argiles de la Woëvre », est datée de l'ère secondaire, plus précisément du système dit Jurassique, et des étages Callovien et Oxfordien. Les études relatives à la composition et aux propriétés physiques du site ont révélé que les argiles présentent une perméabilité très faible, ce qui limite la circulation d'eau et ainsi le transport d'éléments radioactifs à travers la couche. Grande homogénéité au sein de la couche, risques sismiques faibles, bonne régulation du pH, capacité à évacuer la chaleur produite par les déchets radioactifs et à absorber les perturbations induites par la construction du site de stockage sont autant d'autres éléments mis en évidence et de qualités nécessaires à un bon site de stockage.

L'étude du site ne se limite néanmoins pas à la couche-hôte, au sein de laquelle seront déposés les radionucléides. Il est nécessaire de caractériser les couches situées dessus et dessous, qui jouent un rôle fondamental dans le système hydrologique du site. Les analyses microscopiques réalisées sur les calcaires encadrant les argiles de la Woëvre révèlent que les grains et débris coquilliers qui les constituent sont étroitement soudés et cimentés entre eux, impliquant une faible porosité, et donc une faible perméabilité. Les vitesses des écoulements d'eau sont ainsi relativement lentes, ce qui contribue encore à la qualité du site.

Les études nombreuses et approfondies réalisées sur le site de Bure lui reconnaissent les qualités requises au stockage des déchets radioactifs. Une telle décision ne pourra cependant intervenir qu'après validation politique, et l'ouverture du centre de stockage n'aurait lieu qu'en 2025. Devant l'échelle géologique, ces quelques années d'attente ne modifieront cependant en rien la valeur du site.

¹ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

1. INTRODUCTION

Les demandes croissantes en énergie de nos sociétés et le manque de ressources fossiles sur son territoire ont conduit la France à faire le choix de l'énergie nucléaire comme source principale de sa production d'électricité. Cette source d'énergie génère des déchets radioactifs, dont une catégorie est dite à haute activité et à vie longue [HAVL¹]. Depuis 1994, l'Andra [Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs] a engagé un programme de recherche pour l'étude du stockage de ces déchets dans des couches géologiques profondes. Dans ce cadre, la communauté géologique s'est mobilisée pour participer à la caractérisation des sites candidats. Parmi les candidats possibles, les formations argileuses du Jurassique supérieur [âgées d'environ 160 millions d'années] situées entre 400 et 600 m de profondeur aux confins des départements de la Meuse et de la Haute-Marne ont été sélectionnées par décision gouvernementale en Décembre 1998 [Fig. 1].

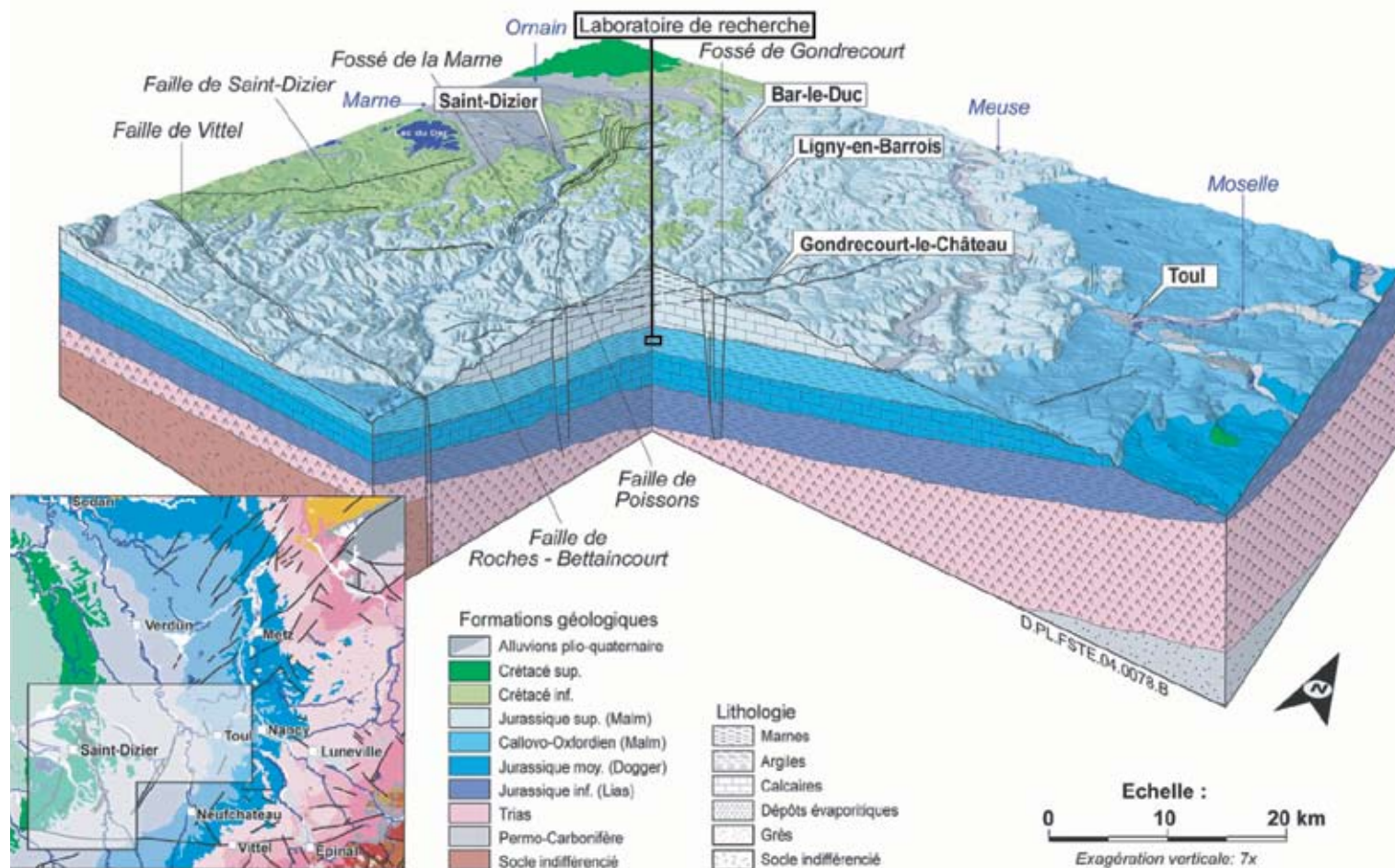
Les études extrêmement détaillées en surface et en profondeur dans le secteur de Meuse/Haute-Marne ont été réalisées en interaction étroite avec de grands organismes tels que le BRGM [Bureau de Recherches Géologiques et Minières], le CEA [Commissariat à l'Energie Atomique] et des laboratoires mixtes Université/CNRS.

Depuis plus d'une dizaine d'années, des géologues, enseignants-chercheurs du Laboratoire Biogéosciences, UMR 5561 uB/CNRS, se sont impliqués dans la caractérisation des couches sédimentaires susceptibles de recevoir les colis de déchets radioactifs [couches-hôtes] et des couches sous et sus-jacentes. Les principales contraintes d'un tel site de stockage doivent prendre en compte le risque sismique, les circulations d'eau au sein du stockage, les propriétés mécaniques des roches encaissantes, les propriétés de confinement [capacité à limiter la migration des éléments radioactifs] des argiles constituant la couche susceptible d'accueillir les déchets radioactifs ainsi que l'impact environnemental et sociétal d'une telle implantation.

Suite au choix du site de Meuse/Haute-Marne en décembre 1998, l'acquisition de données sismiques 3D dans ce secteur en vue de l'implantation d'un laboratoire de recherche souterrain fut entreprise. Les travaux de construction du laboratoire de recherche souterrain démarrèrent en 2001 et des forages furent implantés sur l'ensemble du secteur étudié par l'Andra. Celui-ci couvre 40 km d'Ouest en Est et 60 km du Nord au Sud. Depuis 2005, différentes expérimentations sont menées au sein du laboratoire, dans des galeries horizontales foncées à 490m de profondeur dans la couche d'argile, sur la commune de Bure [Meuse].

Les couches géologiques en question se sont formées à l'ère secondaire [Mésozoïque] au cours du Jurassique moyen et supérieur entre -175 et -150 millions d'années [Ma]. Le Bassin de Paris

Figure 1 : Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne, d'après [Elion et al., 2005a].



était alors occupé par une mer épicontinentale, peu profonde, et entourée de massifs plus ou moins émergés permanents ou temporaires (Massif Central, Morvan, Massif Armoricain, Massif Londres-Brabant) formant autant d'îles vestiges des montagnes hercyniennes qui occupaient l'Europe il y a 300 millions d'années. Au Jurassique, la latitude du Bassin de Paris était plus basse que maintenant (environ 25 - 30°N) et les climats étaient plus chauds. Ils permettaient l'installation d'environnements tropicaux et le développement de vastes plates-formes carbonatées comparables aux actuelles Bahamas. Cette sédimentation carbonatée² est à l'origine des couches calcaires du Dogger (Jurassique moyen) qui constituent le socle de la formation argileuse (couche hôte pour les déchets radioactifs). Un changement majeur de la sédimentation s'est produit au Callovien (fin du Jurassique moyen) et s'est poursuivi au début du Jurassique supérieur (Oxfordien). Des apports de sédiments terrigènes fins, notamment des argiles en provenance du Nord et de l'Ouest, envahissent le Bassin de Paris suite à des changements environnementaux, en particulier un refroidissement du climat et une élévation du niveau marin (Pellenard et al., 1999, Pellenard et Deconinck, 2006). Aujourd'hui, dans le secteur de Bure, cette couche d'argile a une épaisseur comprise entre 130 et 160m. Elle est surmontée à son tour par une nouvelle série calcaire du Malm datée de l'Oxfordien moyen et supérieur.

Les recherches menées au sein du laboratoire Biogéosciences ont porté d'une part sur la couche-hôte argileuse et sur les calcaires encadrant les argiles. Les calcaires sus-jacents du Malm ont fait l'objet d'une thèse financée par l'Andra [1998-2001 ; thèse de Benoît Vincent]. Les calcaires sous-jacents du Dogger font actuellement l'objet d'une thèse également financée par l'Andra. En effet, la connaissance des propriétés pétrophysiques (porosité³ et perméabilité⁴) des deux formations carbonatées [calcaires du Jurassique moyen et calcaires du Jurassique supérieur] encadrant la couche d'argile est primordiale pour comprendre les caractéristiques et le fonctionnement du système hydrogéologique du site. Contrairement aux argiles, les calcaires présentent des textures granulaires, favorables à des porosités et perméabilités importantes. D'ailleurs, dans le centre du Bassin de Paris, les formations carbonatées contemporaines constituent des

aquifères permettant l'utilisation de la géothermie dans la région parisienne. Ces carbonates contiennent également des hydrocarbures exploités (pétrole, gaz) dans la Marne et la Seine-et-Marne.

Les mesures préliminaires de l'Andra montrant des faibles valeurs de perméabilité dans les formations carbonatées sur le site de Bure se sont révélées insuffisantes à la compréhension du système hydrologique, aussi l'objectif de la thèse de l'un de nous (B. Brigaud) est de tenter d'en cerner l'origine. Les objectifs de l'Andra menés en collaboration avec l'UMR Biogéosciences sont donc [1] d'acquiescer de nouvelles données de porosité et de perméabilité afin de mieux comprendre les circulations hydrologiques dans les calcaires (vitesse, localisation en profondeur, sens d'écoulement) et [2] de comprendre l'origine des faibles perméabilités des calcaires à l'Est du Bassin de Paris par rapport à ceux situés dans le centre du bassin.

HENRY DARCY (1803-1858) est né à Dijon le 10 juin 1803. Ingénieur général des Ponts et Chaussées, il est à l'origine de l'adduction d'eau à Dijon (dérivation depuis la source du Rosoir dans le Val Suzon jusqu'au centre ville et mise en place de la distribution en eau potable à Dijon). Il fut aussi l'un des plus fervents acteurs pour le passage du chemin de fer PLM (Paris-Lyon-Marseille) à Dijon, contribuant grandement au développement de la ville.

Henry Darcy est l'un des scientifiques dijonnais les plus célèbres, définissant la loi expérimentale qui porte désormais son nom et qui mesure le débit d'eau pouvant s'écouler à travers un échantillon poreux. Cette loi a été publiée dans son traité sur les fontaines publiques de la Ville de Dijon [1856]. Il laisse également son nom à l'unité qui mesure ce débit en milieu poreux : la perméabilité⁴. Le nom d'Henry Darcy est ainsi connu dans le monde entier par les spécialistes de l'hydrologie, de la pétrophysique et de la recherche pétrolière.



2. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA COUCHE ARGILEUSE

La couche argileuse⁵, dite « callovo-oxfordienne », s'est déposée du début du Callovien moyen, [-162 Ma], jusqu'à la partie moyenne de l'Oxfordien moyen [-156 Ma,] soit en 6 Ma environ. Il s'agit d'une assise argileuse dont l'épaisseur varie géographiquement de 130 à 160m à l'échelle du secteur étudié par l'Andra. Elle est légèrement inclinée en direction du Nord-Ouest. Surmontant les ensembles calcaires du Dogger, elle comprend la succession des formations géologiques classiquement reconnues dans l'Est du Bassin de Paris (Fig. 2) : « Argiles de la Woëvre », « Terrains à Chailles » et « Marnes des Eparges », comme le montre le recoupement par les différents forages et levés géologiques de terrain en surface.

Les conditions de stockage des déchets HAVL en milieu géologique profond doivent répondre à plusieurs critères à des échelles multiples, comme : la stabilité géologique à long terme (sismicité faible ou très faible probabilité de tremblement de terre sur l'échelle de temps de durée de vie des déchets HAVL), l'homogénéité du milieu à petite et à grande échelle dépendant de l'environnement sédimentaire et de l'activité tectonique au moment du dépôt, une très faible perméabilité de la barrière géologique et des capacités fortes à absorber les perturbations chimiques et physiques induites par la construction du site de stockage.

Les études stratigraphiques, sédimentologiques et minéralogiques fines réalisées sur cette couche montrent que les propriétés intrinsèques aux dépôts des argiles callovo-oxfordiennes sont compatibles avec de tels critères.

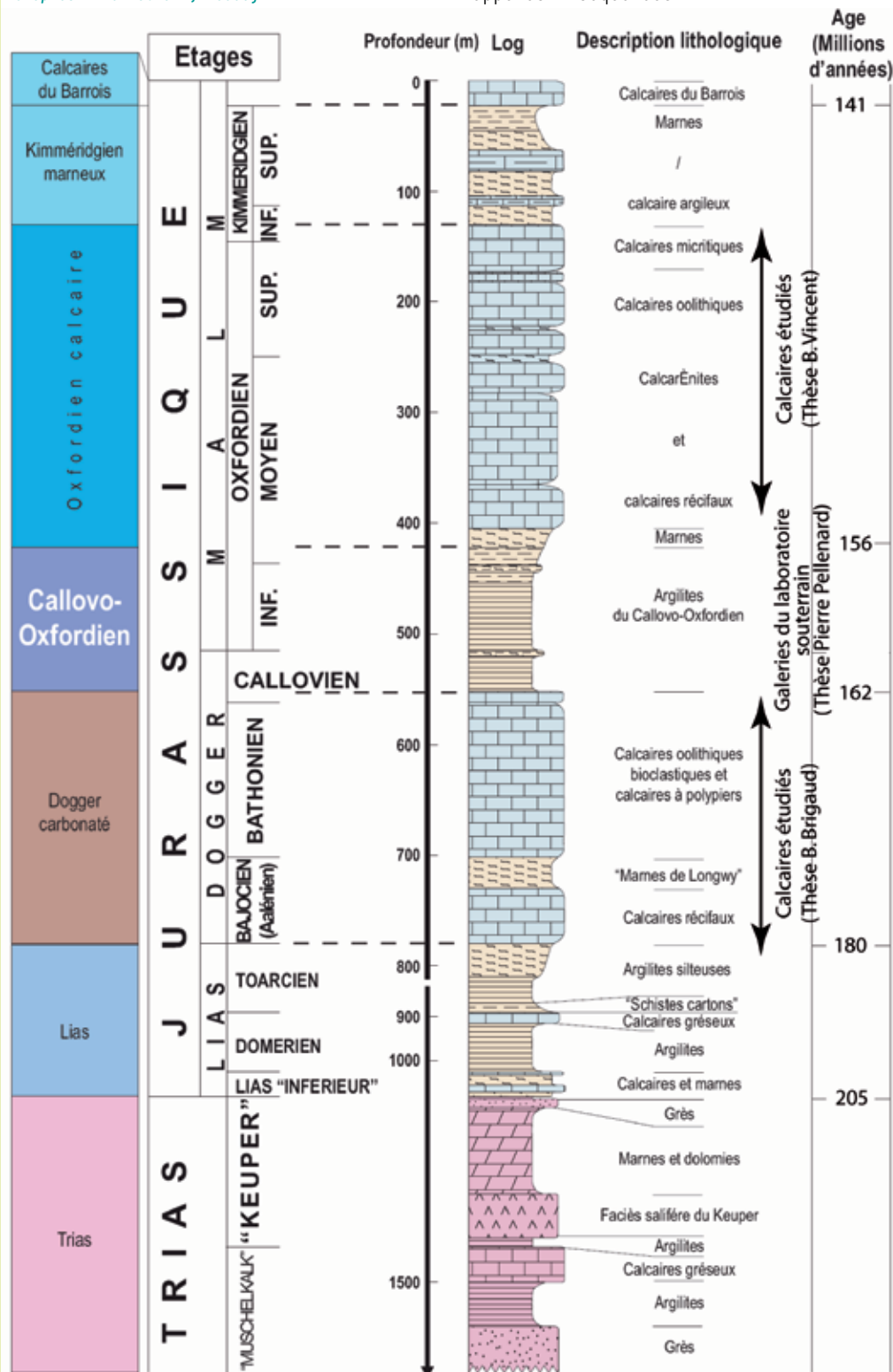
2.1. HOMOGÉNÉITÉ DE LA COUCHE

La synthèse des données lithologiques [relatives à la nature de la roche, Ferry et al., 2007], biostratigraphique [relatives à la datation des terrains par les fossiles marqueurs présents tels que les ammonites que vous connaissez tous avec leur coquille enroulée en spirale plane et ornée de côtes et de tubercules

Thierry et al., 2006], des diagraphies [propriétés physiques des roches :

Figure 2 [voir page suivante] : Coupe lithologique du Trias au Jurassique supérieur dans le secteur de Buce (Meuse). La couche-hôte argileuse du Callovo-Oxfordien est encadrée par des ensembles calcaires [Dogger carbonaté et Oxfordien carbonaté, d'après Elion et al., 2005b].

porosité, perméabilité, radioactivité naturelle, Fig. 3, Elion et al., 2005b] et de la sismique [imagerie 2D ou 3D par propagation des ondes sismiques dans le sous-sol ; Elion et al., 2005b] permet de mettre en évidence de grands ensembles et sous-ensembles sédimentaires communément appelés « séquences ».



Celles-ci sont limitées par des surfaces [notées S ; Fig. 3] interprétées comme des lignes-temps correspondant soit à des périodes de haut niveau marin [transgression] soit au contraire à des périodes de bas niveau marin [régression].

Ce découpage, dit séquentiel, reste constant sur le secteur du site de Meuse-Haute-Marne (environ 2400 km²). On note toutefois des variations légères et continues des épaisseurs révélées par les cartes d'isopaques [d'égale épaisseur au sein des formations sédimentaires] réalisées à partir des données de 27 forages profonds et de l'interprétation des 350 km de profils sismiques. Cette géométrie simple, révélatrice d'un contexte calme et d'une activité tectonique réduite, couplée à des modifications faibles de la lithologie, témoigne de conditions de dépôts semblables sur de grandes surfaces. Ceci explique la grande homogénéité de la couche-hôte à l'échelle du secteur du laboratoire Andra. La finesse des particules sédimentaires, majoritairement de taille inférieure à 63 µm, la présence de faunes et microfaunes marines fossiles [ammonites, bivalves, éponges et foraminifères], ainsi que l'absence de figures sédimentaires⁶ liées à l'agitation des eaux (houle, tempête) sont autant d'indices d'une sédimentation marine, dans un milieu calme, peu oxygéné et relativement éloigné des continents émergés de l'époque [Massifs Londres-Brabant, Armoricaire ou Bohémien]. Les environnements de dépôt stables et pérennes sont ceux d'une plate-forme continentale distale. Bien que l'on ne puisse établir avec certitude la profondeur de l'environnement marin, celle-ci devait osciller entre 100 et 200 m. D'un point de vue prédictif, il est donc très improbable de rencontrer des hétérogénéités telles que des lentilles sableuses au sein de la couche argileuse dans le secteur retenu pour un éventuel stockage. Ceci élimine les risques de zones à plus forte perméabilité [la présence de sable serait favorable à des circulations d'eaux interstitielles]. L'épaisseur de la couche [130 m au niveau du laboratoire souterrain] assure de bonnes propriétés de confinement des radionucléides⁷ empêchant notamment les circulations de fluides des calcaires sous- ou sus-jacents. L'homogénéité de la couche et l'absence de discontinuités majeures au sein de la pile sédimentaire facilitent la conception d'une architecture de stockage et le caractère prédictif de la couche.

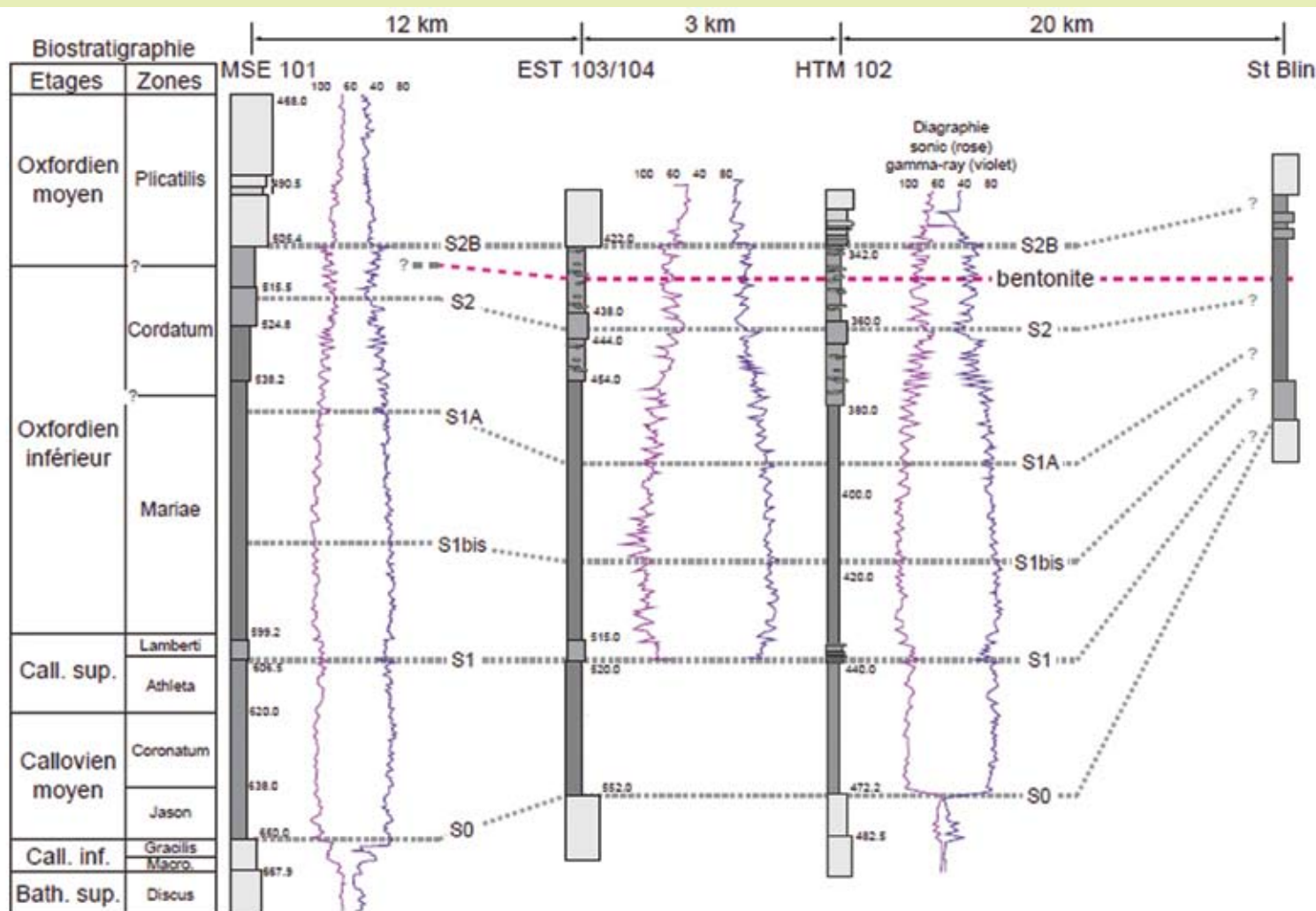


Figure 3. Corrélation stratigraphique au sein de la couche-hôte à partir de forages réalisés dans la zone d'études et de l'affleurement de St Blin situé au Sud. Ces corrélations révèlent la grande continuité latérale de la couche argileuse et sa faible variation d'épaisseur dans la zone d'étude. Les courbes diagaphiques figurées à droite des colonnes lithologiques représentent les variations de la vitesse de propagation des ondes acoustiques (« sonic », courbes roses) et les variations de la radioactivité naturelle des roches (« gamma-ray », courbe bleues). Leur analyse permet de conclure à l'homogénéité de la couche. La bentonite correspond à un niveau de cendres volcaniques aujourd'hui altérées.

2.2. NATURE ET PROPRIÉTÉS DES ARGILES DE LA COUCHE

L'examen détaillé des analyses granulométriques [granulométrie laser], minéralogiques [diffraction des rayons X, microscopie électronique à transmission, calcimétrie], chimiques, ou plus indirectes comme l'interprétation des diagaphies différées réalisées en puits de forages, permettent de définir précisément la composition de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien (Fig. 4). Celle-ci peut être ramenée à trois composantes principales : argiles, silts [fraction fine <63µm composée de quartz, feldspath, micas] et carbonates [calcite et dolomite, qui sont communément appelés carbonates], plus accessoirement des sulfures de fer, comme la pyrite qui témoigne de conditions

réductrices [absence d'oxygène]. Feldspaths, dolomite, micas et pyrite ne constituent qu'une faible proportion de la roche [<5%]. Les minéraux argileux, cristaux microscopiques en forme de plaquettes constituées par l'empilement de feuillets, ont la propriété de retenir certains éléments chimiques et jouent donc un rôle capital dans leur confinement. Les carbonates quant à eux régulent le pH du milieu et assurent sa stabilité chimique. La proportion notable de ces carbonates et leur distribution dans la roche donne une bonne résistance mécanique aux argilites, qualité indispensable pour la faisabilité du stockage. Dans le même temps, les argiles grâce à leur capacité de gonflement offrent une certaine aptitude au fluage⁹ qui permet d'accommoder progressivement dans le temps les déformations induites par l'enfouissement des déchets. Les silts essentiellement constitués de quartz jouent un rôle dans la capacité à évacuer la chaleur produite par les déchets radioactifs en raison de sa forte capacité thermique. La partie médiane de la couche, niveau d'édification du laboratoire, montre une faible variabilité à la fois verticale et horizontale avec un caractère très argileux et une faible dispersion des sédiments dans les diagrammes silts-carbonates-argiles. L'ensemble de la couche offre des caractéristiques de perméabilité très faible (le coefficient de diffusion est de 10^{-12} à 10^{-14} m/s ou perméabilité de 10^{-3} à 10^{-5} milli Darcy⁹) ce qui limite à l'extrême les circulations d'eau à travers la couche [de l'ordre du cm par centaine de milliers d'années] et s'oppose à l'éventuel transport d'éléments

chimiques en solution aqueuse. Les mesures effectuées dans la partie supérieure de la couche regroupant les formations des « Terrains à Chailles » et « Marnes des Eparges » révèlent des sédiments davantage variables, avec des passages plus carbonatés. Cette variabilité au sommet de la couche s'explique par la diminution progressive de la tranche d'eau et la réinstallation progressive d'environnements carbonatés associés à des climats plus chauds [Brigaud et al., 2008].

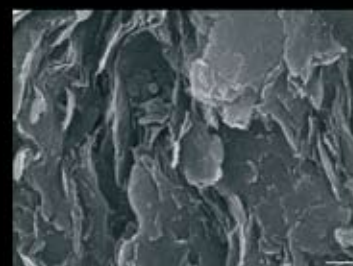
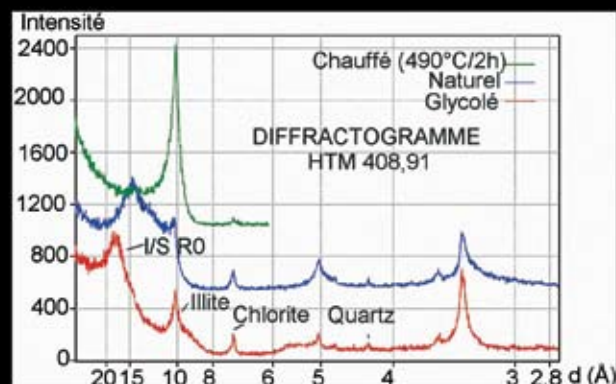
Figure 4 : Carotte de la série argileuse provenant des galeries d'explorations à 490m de profondeur.



La fraction terrigène du Callovo-oxfordien est principalement composée de quartz de la taille des silts et argiles. La connaissance de la nature et de l'évolution des argiles au sein de la couche-hôte est essentielle pour prédire les possibilités de rétention des radionu-

cléides⁷ et de comportement à l'endommagement induit par les infrastructures souterraines, car les minéraux argileux ne réagissent pas tous de la même façon. La minéralogie des argiles est obtenue par diffraction des rayons X. A raison d'un échantillonnage précis (un échantillon/50cm) réalisé sur l'ensemble des 130 à 160m de la couche argileuse, la composition et la variabilité minéralogique de la couche callovo-oxfordienne sont parfaitement connues [Pellenard et al., 1999, Pellenard, 2003, Pellenard et Deconinck, 2006]. Les argiles du callovo-oxfordien, minéraux aluminosilicatés organisés en feuillets, sont composés de mélanges d'espèces minérales simples comprenant de la kaolinite, de la chlorite, de l'illite. La fraction argileuse comprend aussi des interstratifiés [interstratification plus ou moins régulière de feuillets argileux de deux ou plusieurs minéraux argileux simples] comme les interstratifiés illite/smectite désordonnés riches en smectite appelés I/S R0, [45-75% de feuillets de smectites], assimilables aux smectites, une variété de minéraux argileux qui a une forte capacité d'absorption et de gonflement, et les interstratifiés illite/smectite ordonnés riches en feuillets illitiques appelés I/S R1 [25-45% de feuillets de smectites].

Figure 5. Diffractogramme montrant les espèces minérales présentes dans la couche-hôte (I/S R0, Illite, Chlorite et quartz) et photographie MEB de ces minéraux argileux. Chaque pic correspond à une famille argileuse, ce qui permet leur identification.



Echantillon 424.80
(Gr: x 15000 Echelle = 0.5 µm)

Larges feuillets d'argiles détritiques >1 µm (illite et interstratifiés) et de feuillets plus petits <0.3 µm (kaolinite) vues au Microscope électronique à balayage (MEB)

Verticalement et sur l'ensemble des forages, deux grandes unités minéralogiques sont distinguées au sein de la série argileuse avec un passage de l'une à l'autre qui se fait par une zone de transition de quelques mètres [Fig. 6]. Le changement minéralogique se traduit par la disparition de la kaolinite et des I/S R1 [présents dans la moitié inférieure de la couche] et par l'apparition des I/S R0, dans la moitié supérieure. Il correspond simultanément à une diminution des proportions relatives d'illite au profit de l'augmentation des proportions d'interstratifiés I/S R0.

Ce changement des assemblages argileux intervient à la base de l'Oxfordien inférieur. Il semble être isochrone [de même âge] sur une partie de l'Est du Bassin de Paris, d'après les corrélations diagaphiques et les données biostratigraphiques. Rapide à l'échelle géologique, il se produit à la fin d'une sous-zone d'ammonite dont la durée est probablement inférieure à 400 000 ans, [Boulila et al., 2008]. Ce changement minéralogique présentait a priori deux origines possibles : soit il résultait d'une transformation des argiles postérieurement au dépôt sous l'effet d'une augmentation de la température en profondeur [diagenèse] ; soit il résultait d'un changement des conditions de sédimentation [Pellenard et al., 1999, Pellenard et Deconinck, 2006]. Nous avons pu montrer que les modalités du changement minéralogique sont incompatibles avec une transformation minéralogique liée à l'augmentation de la température [diagenèse d'enfouissement] par la surcharge sédimentaire. Cette interprétation fut confirmée grâce aux données issues de la matière organique, constituant sédimentaire particulièrement sensible aux augmentations de température. Celle-ci n'a pas dépassé 40°C au cours de l'histoire thermique du bassin sédimentaire [Elion et al., 2005b, Clauer et al., 2007], alors que les températures actuelles mesurées dans les galeries (à 490m) sont de 23°C. Le changement minéralogique observé est plutôt lié à la mise en place des argiles lors de la sédimentation et interprété en termes d'évolution paléogéographique et géodynamique du Bassin de Paris et des domaines de l'Europe occidentale. Ces perturbations s'inscrivent dans une période de haut niveau marin et dans un épisode climatique relativement froid par rapport aux périodes antérieures, ce qui aurait favorisé la formation et le transport d'un type de minéral argileux au détriment des autres [Pellenard et Deconinck, 2006]. [Vincent, 2001]

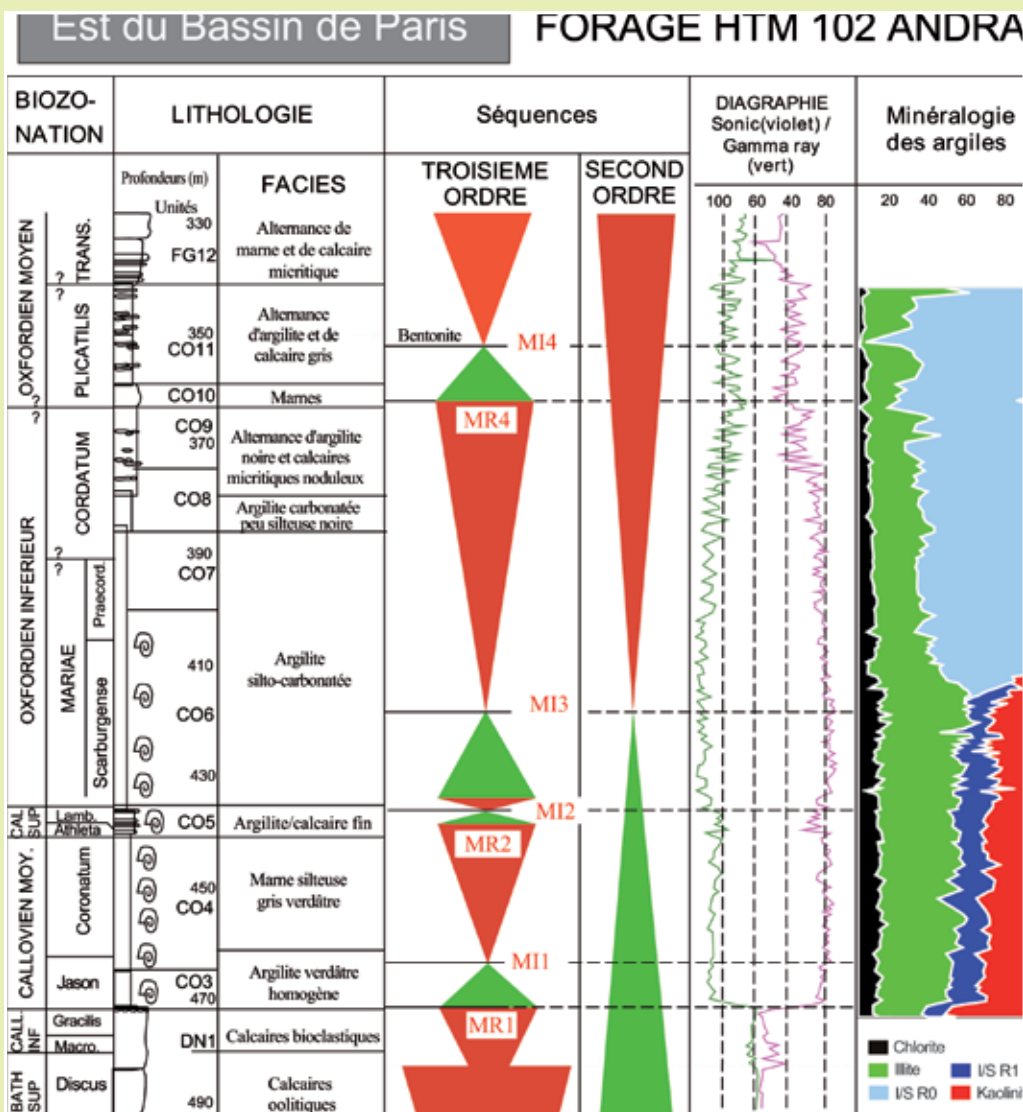


Figure 6 : Coupe sédimentologique du forage HTM102 situé à proximité de Bure [55]. Elle montre la succession lithologique de la couche argileuse (facies), de la biozonation, des séquences de dépôts (variation du niveau marin ; MR = maximum régressif, MI = maximum d'inondation), des diagrapies avec le sonic [courbe violette] : indique la vitesse des ondes acoustiques, qui est faible dans les argiles et la radioactivité naturelle des roches, le gamma ray [courbe verte], qui est élevée dans les argiles, et de la minéralogie des argiles illustrant le changement vers 420m de profondeur, au niveau du maximum d'inondation MI3.

2.3. LA PROVENANCE DES ARGILES DU CALLOVO-OXFORDIEN ET LA MISE EN ÉVIDENCE D'ÉRUPTIONS

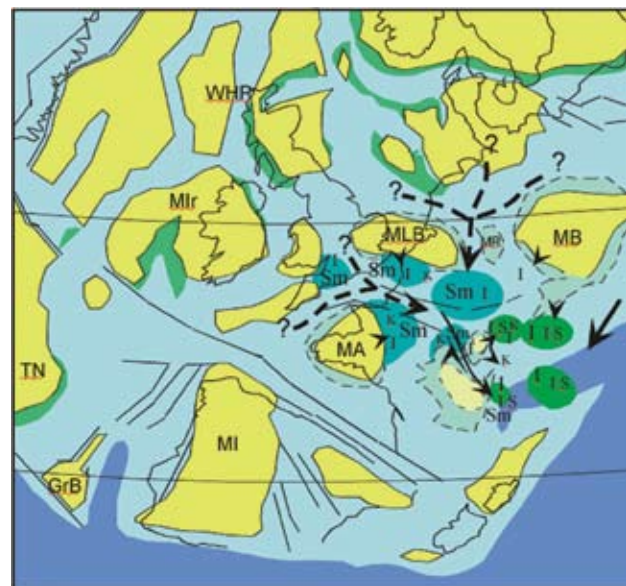
Les argiles constituant la couche argileuse du Callovo-Oxfordien résultent de l'altération puis de l'érosion des roches

constitutives des massifs hercyniens, les plus proches, reconnus comme étant émergés au Callovo-Oxfordien, tels que le Massif Londres-Brabant, le Massif Armoricaire, le Massif Bohémien. Un inventaire de la minéralogie des argiles contemporaines sur l'ensemble du Bassin de Paris révèle des apports complexes de différentes sources détritiques [Fig. 7].

L'analyse détaillée des minéraux argileux de la couche-hôte a également permis de mettre en évidence des argiles particulières attribuées à la transformation sous-marine de cendres et poussières volcaniques retombées lors d'éruptions volcaniques explosives paroxysmales¹⁰. Ces cendres ont la propriété de s'altérer rapidement au contact de l'eau de mer et de se transformer en smectites. Ces argiles forment des niveaux très plastiques appelés bentonites¹¹ qui présentent un intérêt tout particulier pour le géologue. De tels horizons, susceptibles de couvrir de grandes surfaces, représentent en effet

des événements instantanés à l'échelle géologique. Ils fournissent ainsi des lignes temporelles extrêmement précises qui offrent de surcroît la possibilité d'établir des âges isotopiques (« âges absolus ») à partir des cristaux originels résistants comme le zircon ou les feldspaths potassiques formés dans la chambre magmatique. De tels âges numériques bien calibrés dans l'échelle biostratigraphique sont particulièrement rares et difficiles à obtenir au Jurassique, mais indispensables pour améliorer les échelles des temps géologiques [Gradstein et al., 2004]. La bentonite identifiée au passage Oxfordien inférieur-Oxfordien moyen dans les forages de l'Andra peut être considérée comme un niveau-repère, isochrone pour l'Europe occidentale. Elle traduit un événement volcanique exceptionnel dont la source potentielle appartenait probablement au complexe volcanique de Zuidwal [Pays-Bas], localisé à plus de 400 km au Nord du site des forages [Pellenard et al., 2003]. Cette découverte dans les forages de l'Andra a permis par la suite de trouver d'autres niveaux dans d'autres bassins européens témoignant ainsi de l'activité probablement importante du volcanisme explosif aérien sur les environnements oxfordiens.

Figure 7 : Carte paléogéographique de l'Europe au Jurassique supérieur [modifié d'après Thierry, 2000] et origine possible des argiles [Sm = smectite, I = illite, K = kaolinite, I-S = Interstratifiés illite-smectite]. Le Bassin de Paris était situé entre plusieurs massifs émergés de manière permanente de couleur jaune foncée [MA = Massif armoricaire, MLB = Massif Londres-Brabant, MB = Massif Bohémien] ou temporaire en jaune clair [Massif Central, Morvan]. [Thierry, 2000]



3. LES CALCAIRES DU DOGGER

3.1. FAIBLE PERMÉABILITÉ DES FORMATIONS ENCADRANT LES ARGILITES DU CALLOVO-OXFORDIEN ET ÉCOULEMENTS LENTS

Les mesures effectuées sur les carottes des forages du secteur d'étude confirment les faibles perméabilités et porosités des calcaires du Dogger. En effet, 80% des échantillons présentent une porosité inférieure à 10% et une perméabilité inférieure à 0,35 milliDarcy (mD ; Fig.8). Par comparaison, une formation géologique est considérée comme aquifère, c'est-à-dire pouvant contenir une nappe d'eau facilement mobilisable [exploitation de l'eau par l'homme], lorsque la perméabilité est supérieure à 100mD.

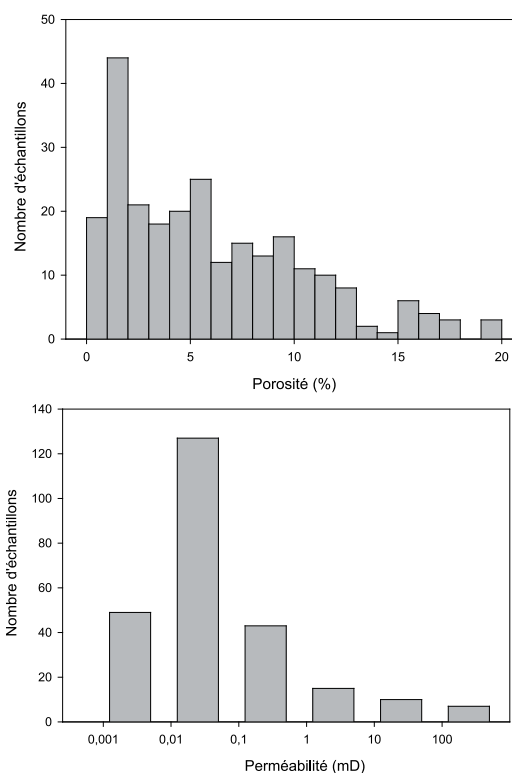


Figure 8: Distribution des porosités et perméabilités (n=251) dans les calcaires du Jurassique moyen (Dogger) du site étudié.

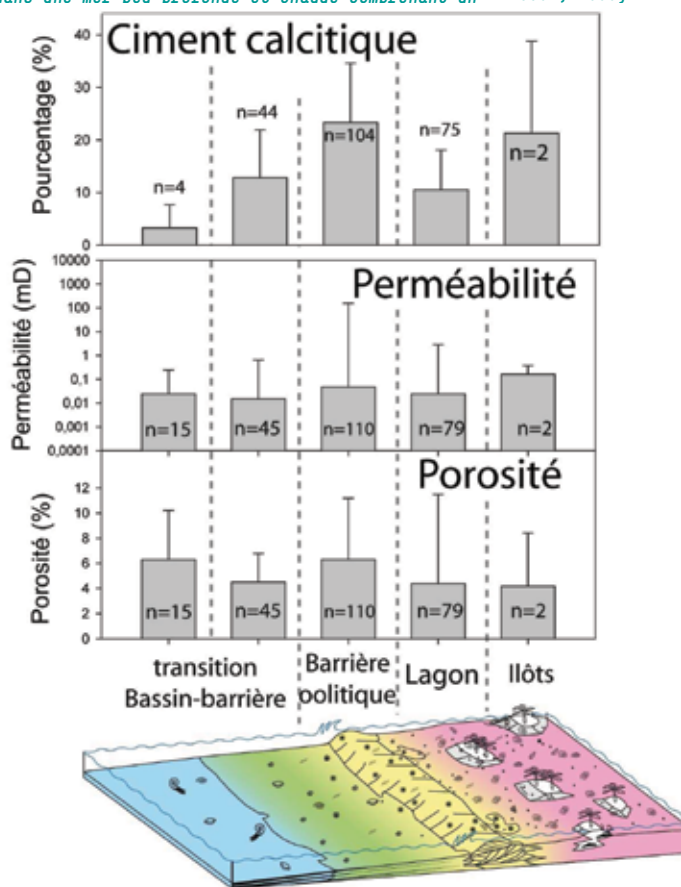
D'une épaisseur cumulée d'environ 500m, les deux formations calcaires encadrant les argilites présentent toutefois quelques niveaux métriques plus perméables (quelques centaines de milliDarcy dans le Dogger ; Fig. 8). Leur organisation apparaît directement liée aux conditions initiales de dépôt des sédiments (Ferry et al., 2007). En effet, certains de ces niveaux se sont formés dans un environnement de barrière oolitique qui caractérise la partie externe d'une plate-forme carbonatée. Actuellement de tels environnements sont bien représentés au large des Bahamas (Fig. 9). Cet environnement initial de dépôt explique la géométrie horizontale et le caractère discontinu des corps sédimentaires oolitiques révélés par les données sismiques. C'est principalement dans ces niveaux que se font les circulations d'eaux en profondeur mais leur faible continuité latérale limite ces circulations. Le débit mesuré en forage pour toute l'épaisseur des calcaires du Jurassique supérieur (300m) est très faible (inférieur à 10 litres par minute ; Elion et al., 2005b).

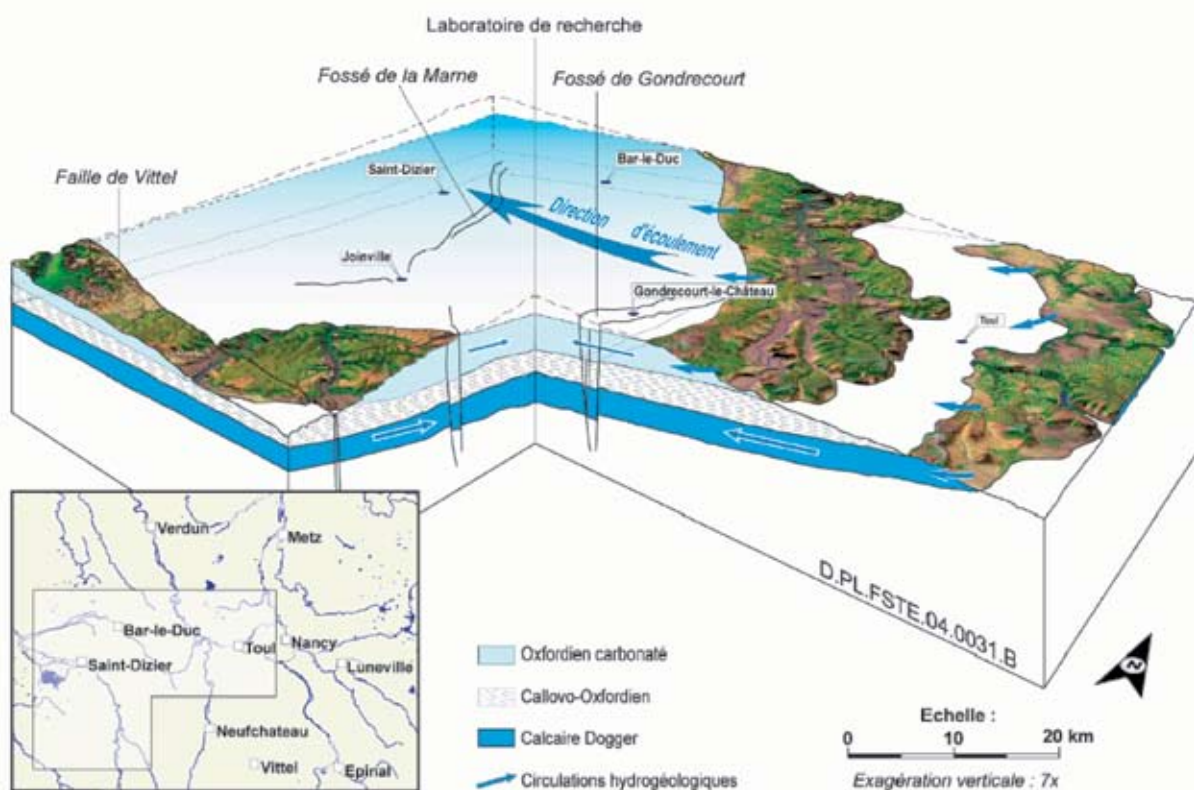
Figure 9: Propriétés pétrophysiques des calcaires du Dogger dont les constituants (débris coquilliers et sables oolitiques) se sont déposés dans une mer peu profonde et chaude comprenant un

lagon, des îlots émergés, une barrière oolitique et une zone de transition entre la barrière et le bassin profond. Des environnements marins similaires actuellement sont ceux des Bahamas. Les ciments calcitiques dans ces échantillons (jusqu'à 30% dans les calcaires de barrière oolitique) sont responsables des faibles porosités (%) et perméabilités (mD). Les valeurs médianes (avec écart type) de porosité, perméabilité et de ciments calcitiques dans les échantillons sont représentées dans les graphiques.

Les perméabilités généralement faibles des calcaires du Dogger expliquent leur très faible potentiel aquifère et des vitesses d'écoulement lentes ; de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années. L'acquisition des données de porosité et de perméabilité des carbonates couplée aux caractéristiques géologiques des corps sédimentaires permet donc de prévoir les écoulements qui sont dirigés vers le centre du Bassin de Paris selon des vitesses d'écoulement très faibles (Fig. 10).

Figure 10 (voir page de droite) : Circulations hydrologiques actuelles dans les calcaires du Jurassique moyen et supérieur déduites de la connaissance géologique et pétrophysique du site (d'après Lebon, 2005).>>





3.2. ORIGINE DES FAIBLES PERMÉABILITÉS

Les calcaires du Jurassique moyen et supérieur du Bassin de Paris sont des roches issues d'un dépôt de débris coquilliers carbonatés (huîtres, coraux, brachiopodes, gastéropodes, oursins...) et de sables blancs oolitiques dans une mer peu profonde et chaude (Durlet et Thierry, 2000, Brigaud et al., 2008), semblable aux environnements sédimentaires des Bahamas ou du Golfe Persique. Lors de leur dépôt en Meuse/Haute-Marne au Jurassique moyen et supérieur, ces sédiments meubles pouvaient avoir des porosités importantes [40% et plusieurs Darcy de perméabilité]. Ils vont progressivement se transformer en roche sédimentaire solide au cours d'un ensemble de processus complexes appelé diagenèse. Ces processus diagénétiques, comprenant la compaction, les cimentations et le développement de nouvelles phases minéralogiques (authigénèse) vont être à l'origine d'une diminution de la porosité (poronécrose) et des perméabilités dans les roches formées dans les environnements de lagon ou de barrière oolitique (Fig. 9). Lors de leur enfouissement pouvant atteindre 500 à 1000m, les sédiments initiaux sont compactés et des cristaux vont progressivement obturer la porosité en formant un véritable ciment entre les grains. Dans la plupart des échantillons, ces ciments représentent 20 à 30% du volume total et sont responsables des faibles porosités (<10%) mesurées aujourd'hui dans les roches. Ce processus diagénétique de cimentation est étudié en détail afin de caractériser, d'établir et de situer dans le temps les différentes phases de cristallisation. L'utilisation du microscope sous cathodoluminescence¹² [l'échantillon observé est soumis à un bombardement d'électron lui donnant une luminescence caractéristique] permet de repérer des ciments principalement composés de calcite [CaCO_3] et de dolomite [$\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$; Fig. 11] se mettant en place en 3 phases successives.

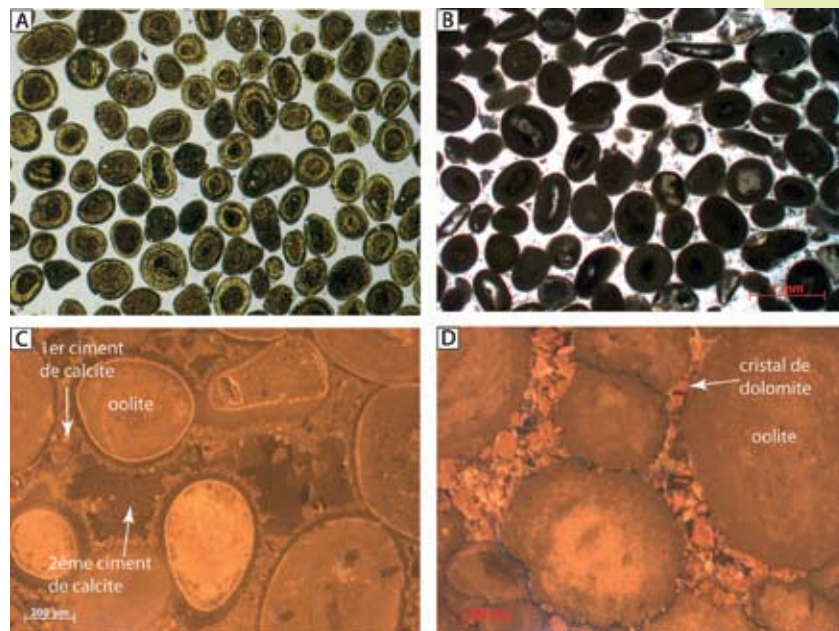


Figure 11 : A- Sable oolitique actuel (aragonite) du Golfe Persique observé au microscope polarisant. B- Observation microscopique d'une lame mince d'un échantillon de calcaire oolitique du Jurassique moyen provenant d'un forage du site étudié. Les grains foncés représentent les oolites¹¹ [qui apparaissent blanches à l'œil nu] et la partie claire un ciment calcitique précipité lors de l'enfouissement en profondeur du sable oolitique [profondeur actuelle de l'échantillon : 688m]. Ce ciment transforme le sable meuble en une roche indurée. C- Observation au microscope sous cathodoluminescence d'un calcaire oolitique du Dogger. Les différentes teintes orangées de luminescence ré-

vèlent deux générations de ciment calcitique obturant la porosité entre les grains oolitiques [profondeur : 690m]. La luminescence orangée est principalement due au manganèse présent dans les cristaux qui active la luminescence, la teinte plus sombre est quant à elle due au fer qui inhibe la luminescence. D- Observation au microscope sous cathodoluminescence d'un calcaire oolitique cimenté par des cristaux losangiques de dolomite [profondeur 675m].

La géochimie isotopique (oxygène, carbone et strontium) permet de montrer que les cimentations sont liées à des circulations d'eaux douces lors de phases d'émersions intervenues dans le Bassin de Paris, au début du Crétacé [entre -140 et -120 Ma ; Fig. 12]. Cette période est à l'origine de deux phases majeures de cimentation dans les calcaires du Jurassique sur le site d'étude [Vincent et al., 2007]. Une dernière phase de cimentation, plus modérée, est à relier à des circulations de fluides chauds remontant le long d'accidents actifs dans la région au début de la mise en place de la chaîne alpine à l'Oligocène [il y a 30 millions d'années]. Les caractéristiques pétrophysiques actuelles de porosité et de perméabilité des formations encaissantes ont donc été acquises il y a au minimum 30 millions d'années lors de circulations hydrologiques très anciennes.

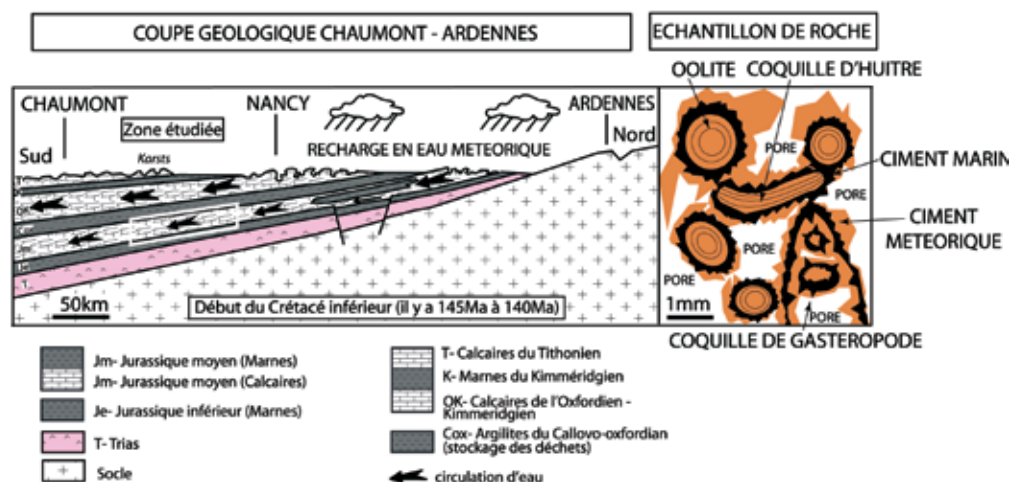


Figure 12: Circulations anciennes d'eaux dans les calcaires au début du Crétacé inférieur. Ces « eaux météoriques » riches en carbonate de calcium sont à l'origine des cristallisations de calcite obturant progressivement la porosité entre les grains oolitiques et fragments coquilliers. Notez que les ciments météoriques apparaissent oranges lorsqu'ils sont observés au microscope sous cathodoluminescence. Les ciments noirs se sont formés pendant le dépôt du sable coquillier et oolitique en milieu marin.

4. CONCLUSION

Il est exceptionnel qu'un site géologique fasse l'objet d'un aussi grand nombre d'études multi scalaires approfondies, à l'aide de techniques très diversifiées. La synthèse de ces études auxquelles les chercheurs de l'UMR Biogéosciences sont associés a montré que la couche argileuse présente une excellente continuité latérale. En dehors d'un changement minéralogique que nous avons mis en évidence dans sa partie moyenne, elle est très peu variable et présente des propriétés physiques tout à fait remarquables et particulièrement bien adaptées aux contraintes d'un stockage profond de déchets radioactifs à longue durée de vie. Les très faibles perméabilités de cette couche assurent des transferts extrêmement limités de l'argile vers les couches calcaires. Les études menées avec l'Andra sur les formations géologiques calcaires ont révélé des faibles perméabilités à l'origine d'écoulements très lents au niveau de la bordure Est du Bassin de Paris. Les observations microscopiques ont montré l'existence d'une importante cimentation en trois phases successives. Après le dépôt des sédiments, les cristallisations de calcite et de dolomite sont liées à des circulations d'eaux anciennes (au moins

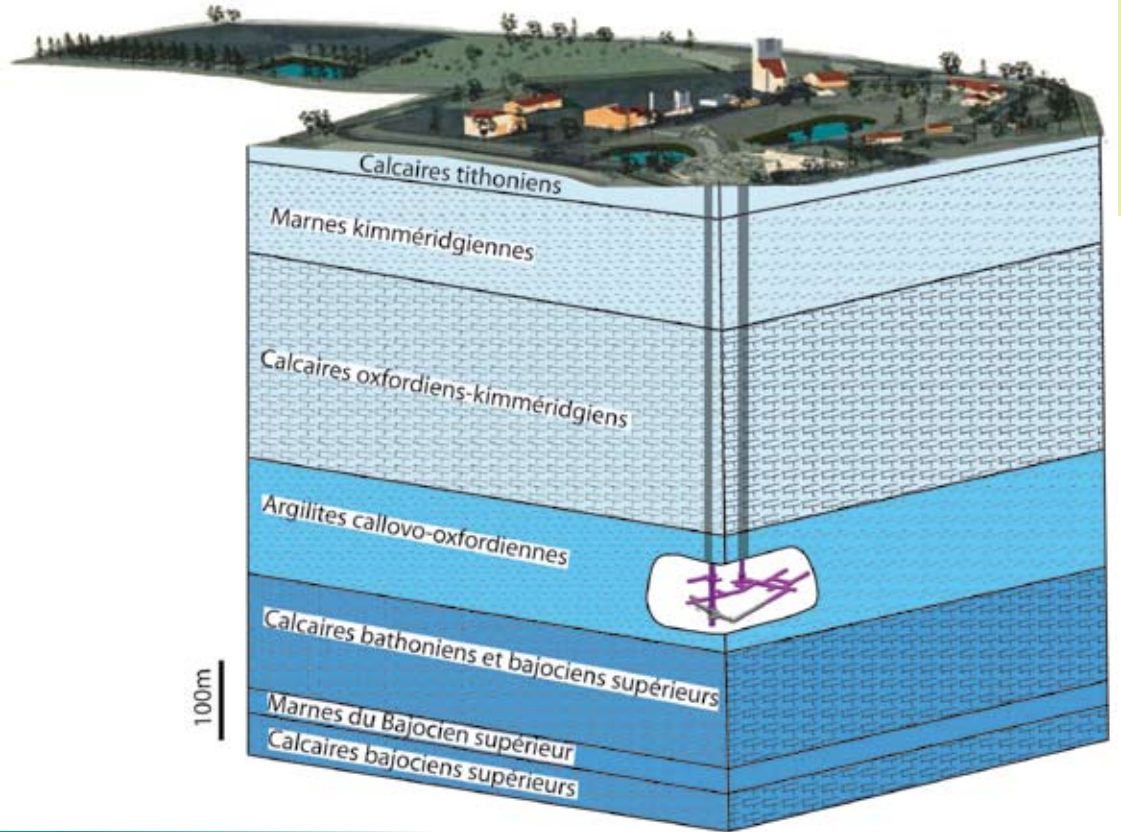
-30 millions d'années]. Des rares horizons poreux de faible extension latérale où se font l'essentiel des circulations d'eaux sont contrôlés en partie par la nature originelle des sédiments elle-même liée à l'environnement de dépôt. Leur reconnaissance couplée aux caractéristiques géologiques et pétrophysiques des roches permet de préciser le modèle hydrogéologique du site où les circulations sont très lentes. Actuellement, le laboratoire

souterrain situé à 490m de profondeur est accessible par deux puits, et plusieurs galeries horizontales ont été réalisées [Fig. 13]. En surface, l'Andra accueille les visiteurs qui souhaitent s'informer sur les études menées. Ce site possède visiblement nombre de qualités pour être élu site d'enfouissement. D'autres tests se poursuivent pour assurer sa totale sécurité et permettre ainsi à la France de maintenir son autonomie énergétique de manière durable.

Figure 13 [voir page de droite] : Représentation en 2006 du laboratoire de Meuse/Haute-Marne avec le positionnement des galeries à 490m de profondeur. >>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boulila, S., Hinnov, L. A., Hurst, E., Collin, P.-Y., Galbrun, B., Fortwengler, D., Marchand, D. et Thierry, J., 2008. Astronomical calibration of the Early Oxfordian [Vocontian and Paris basins, France]: Consequences of revising the Late Jurassic time scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 276: 40-51.
- Brigaud, B., Pucéat, E., Pellenard, P., Vincent, B. et Joachimski, M. M., 2008. Climatic fluctuations and seasonality during the Late Jurassic [Oxfordian-Early Kimmeridgian] inferred from $\delta^{18}O$ of Paris Basin oyster shells. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 58-67.
- Clauer, N., Fourcade, S., Cathelineau, M., Girard, J.-P., Vincent, B., Elie, M., Buschaert, S. et Rousset, D., 2007. A review of studies on the diagenetic evolution of the Dogger to Tithonian sedimentary - sequence in the eastern Paris Basin - Impact on the physical and chemical rock properties. *Mémoire de la Société géologique de France*, 178: 59-71.
- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Victor Dalmont, éditeur, Paris, 657 pp.
- Duclot, C. et Thierry, J., 2000. Modalités séquentielles de la transgression aaléno-bajocienne sur le sud-est du Bassin parisien. *Bulletin de la Société géologique de France*, 171: 327-339.
- Elion, P., Brulhet, J. et Leclerc, E., 2005a. Le site de Meuse/Haute-Marne: histoire géologique et état actuel. Dossier 2005 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne Tome 1. Chapitre 8. C.R.P. ADS.04.0022B, Andra.
- Elion, P., Trouviller, A., Guillemot, D., Buschaert, S., Yven, B. et Vigneron, G., 2005b. Modèle géologique du secteur d'étude. Dossier 2005 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne Tome 1. Volume 1. C.R.P. ADS.04.0022, Andra.
- Ferry, S., Pellenard, P., Collin, P. Y., Thierry,



J., Marchand, D., Deconinck, J. F., Robin, C., Carpentier, C., Durlet, C. et Curial, A., 2007. **Synthesis of recent stratigraphic data on Bathonian to Oxfordian deposits of the eastern Paris Basin.** Mémoire de la Société Géologique de France, 178: 37-57.

• Gradstein, F. M., Ogg, J. G. et Smith, A. G., 2004. **A Geological Time Scale 2004.** Cambridge University Press.

• Lebon, P., 2005. **Présentation générale.** Dossier 2005 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne. C.RP. ADS.04.0022, Andra.

• Pellenard, P., Deconinck, J.-F., Marchand, D., Thierry, J., Fortwengler, D. et Vigneron, G., 1999. **Contrôle géodynamique de la sédimentation argileuse du Callovien-Oxfordien moyen dans l'Est du bassin de Paris : influence eustatique et volcanique.** Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série II Fascicule a-Sciences de la Terre et des Planètes, 328: 807-813.

• Pellenard, P., 2003. **Message terrigène et influences volcaniques au Callovien-Oxfordien dans les bassins de Paris et du Sud-est de la France.** Société Géologique du Nord, Publ. No. 31, 362 pp.

• Pellenard, P., Deconinck, J.-F., Huff, W. D., Thierry, J., Marchand, D., Fortwengler, D. et Trouiller, A., 2003. **Characterization and correlation of Upper Jurassic [Oxfordian] bentonite deposits in the Paris Basin and the Subalpine Basin, France.** Sedimentology, 50: 1035-1060.

• Pellenard, P. et Deconinck, J. F., 2006. **Mineralogical variability of Callovo-Oxfordian clays from the Paris Basin and the Subalpine Basin.** Comptes Rendus Geoscience, 338: 854-866.

• Thierry, J., 2000. **Late Sinemurian, Middle Toarcian, Middle Callovian, Early Kimmeridgian, Early Tithonian.** In: S. Crasquin (Editor), **Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical maps - Explanatory notes.** CCGM/CGMW Édit, Paris, pp. 49-110.

• Thierry, J., Marchand, D., Fortwengler, D., Bonnot, A. et Jardat, R., 2006. **Les ammonites du Callovien-Oxfordien des sondages Andra dans l'Est du bassin de Paris : synthèse biochronostratigraphique, intérêts paléocéologique et paléobiogéographique.** Comptes Rendus Geosciences, 338: 834-853.

• Vincent, B., 2001. **Sédimentologie et Géochimie de la Diagenèse des carbonates. Application au Malm de la bordure Est du Bassin de Paris.** PhD Thesis, University of Burgundy, Dijon, 380 pp.

• Vincent, B., Emmanuel, L., Houel, P. et Loreau, J.-P., 2007. **Geodynamic control on carbonate diagenesis: Petrographic and isotopic investigation of the Upper Jurassic formations of the Paris Basin [France].** Sedimentary Geology, 197: 267-289.

NOTES

• **1 HAVL** : catégorie de déchets de haute activité et à vie longue, ils représentent 1% du volume de déchets radioactifs produits en France, mais 96% de la radioactivité totale. Ce sont des matières non recyclables issues du traitement des combustibles usés des réacteurs nucléaires.

• **2 sédimentation carbonatée** : ensemble des processus conduisant à la formation de sédiments calcaires (= carbonate de calcium, CaCO_3). Dans le cas présent, la sédimentation se produit en milieu marin. Elle est issue de deux processus : (1) productivité biologique (débris coquilliers en calcite ou en aragonite, CaCO_3), et (2) production physico-chimique de carbonate de calcium dans l'eau de mer (comme les oolites).

• **3 porosité** : ensemble des volumes de petite taille pouvant être occupés par des fluides (gaz, eau, pétrole) à l'intérieur d'une roche.

• **4 perméabilité** : aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) ; dans les roches calcaires elle est soit (1) matricielle c'est-à-dire contrôlée par la connexion des pores (ou de la porosité) ou (2) fissurale ou karstique. Elle est mesurée en darcy (voir note 9 et encadré).

• **5 argileuse** : caractérise une roche sédimentaire composée de grain très fins de taille inférieure à 0.004mm [au moins 50% de minéraux argileux auxquels peuvent s'ajouter d'autres minéraux comme des quartz, des micas, des feldspaths, calcite...].

• **6 figure sédimentaire** : géométrie d'un dépôt

sédimentaire reconnaissable par le géologue dans une roche, correspondant à un processus physique ou biologique. Dans les calcaires, nous pouvons reconnaître des lignes obliques correspondant à des structures sédimentaires particulières comme des dunes sous marines.

• **7 radionucléides** : produits radioactifs, de 3 types (1) issus de la fission des atomes d'uranium, plutonium, césium, strontium... Le césium 137 et le strontium 90 sont à l'origine de l'essentiel du rayonnement ; (2) les actinides ou éléments dont le noyau compte un nombre de protons (élément du noyau) supérieur ou égal à 89 [uranium, américium] et (3) les produits d'activations (formés par capture de neutrons, élément du noyau).

• **8 fluage** : phénomène physique qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte.

• **9 darcy** : unité de perméabilité. Elle est utilisée pour mesurer le débit d'eau qui peut s'écouler à travers un échantillon poreux par gravité et par capillarité. Le sous-sol a une perméabilité de 1 darcy, lorsqu'un fluide homogène de viscosité égale à celle de l'eau à 20°C s'y déplace à la vitesse de 1 cm/s sous l'influence d'un gradient de pression de 1 atmosphère. Cette loi expérimentale a été établie par Henry Darcy (1803-1858) et publiée dans son traité sur les fontaines publiques de la Ville de Dijon (1856).

• **10 éruption volcanique paroxysmale** : événement volcanique de très grande ampleur défini par son caractère hautement explosif engendrant des quantités énormes de cendres, poussières et gaz dans les hautes couches atmosphériques.

• **11 bentonite** : argile riche en smectites, correspondant à l'altération de produits d'origine volcanique sédimentés en domaine marin ou lacustre. Dans le domaine industriel, les bentonites sont utilisées pour leur forte capacité de rétention d'eau ou de gonflement lié à leur très forte teneur en smectite, elles ont des usages très diversifiés (produits pharmaceutiques, additifs alimentaires, dégraissants, produits d'étanchéité, boues de forages...).

• **12 cathodoluminescence** : émission de photons par un cristal soumis à un bombardement d'électrons. Cette luminescence est propre à chaque minéral et provient de l'excitation de certains éléments en traces contenues dans les minéraux (comme le manganèse dans les cristaux de calcite). Couplé à un microscope optique et à une caméra numérique à haute sensibilité, la cathodoluminescence permet de différencier les zones de croissance dans les ciments carbonatés, et ainsi de déterminer les grandes étapes de la lithification d'un sédiment.

• **13 oolite** : petite sphère de diamètre 0.5 à 2mm, dont le centre (nucléus) est un débris (fragment de coquille, quartz) et dont l'enveloppe (cortex) est formée de minces couches concentriques. Les oolites actuelles se forment principalement en milieux marins chauds peu profonds et agités (comme les Bahamas).

• **14 météorique** : caractérise tous les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère (exemple : pluie), une eau météorique est une eau d'origine pluviale.