

Geomaterials

Le Callovo-Oxfordien du bassin de Paris : du contexte géologique à la modélisation de ses propriétés

The Callovo-Oxfordian of the Paris Basin: From its geological context to the modelling of its properties

Avant-propos

Les besoins croissants en énergie de notre société et les difficultés d’approvisionnement qui lui sont inhérents ont amené la France à faire le choix de l’énergie nucléaire comme source principale de production d’électricité. Comme toute activité humaine, cette option est génératrice de déchets, dont la gestion constitue un enjeu sociétal majeur. À cette fin, la loi du 30 décembre 1991 [21] sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue a confié à l’Andra, l’Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, la mission d’évaluer la possibilité d’un stockage des déchets en formation géologique profonde, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains (axe 2 de la loi). Cette loi énonce les grands principes à prendre en compte dans les recherches, en particulier la nécessité de travailler dans « le respect de la protection de la nature, de l’environnement et de la santé » et de « prendre en considération le droit des générations futures » [voir encadré].

Dans le cadre fixé par la loi, les recherches menées par l’Andra ont porté sur le milieu géologique, sur les colis de déchets, sur la conception et l’exploitation réversible du stockage, ainsi que sur la sûreté à long terme du stockage et de son environnement. Elles ont donné lieu à la production d’un dossier 2005 Argile, remis dans sa version parlementaire en juin 2005, et dans sa version actualisée en décembre 2005 [1].

Les études conduites sur le milieu géologique avaient pour objectifs de s’assurer que celui-ci présente les propriétés attendues et d’évaluer son comportement à long

Foreword

The constantly increasing energy requirements of our society coupled with our inherent supply problems have led France to select nuclear energy as the main source of electricity. As is the case for any human activities, this option generates wastes whose management constitutes a major societal challenge. In this context, the law of 30 December 1991 [21] concerning the management of high-level and long-lived radioactive waste entrusted the French Radioactive Waste Management Agency (ANDRA) with the mission of assessing the feasibility of a deep geological repository, notably through implementation of underground research laboratories (area 2 of the law). The law describes the main principles to be taken into account throughout the investigations, in particular the requirement that the work “ensures the protection of nature, of the environment and of public health” and “respects the rights of posterity” [see text box].

Within the framework of the law, the investigations conducted by ANDRA focused on the geological context, the waste packages, the design and reversible operation of the repository, as well as on the long-term safety of the repository and its environment. They served as the basis for the preparation of the *Dossier 2005 Argile*, the preliminary version of which was submitted to Parliament in June 2005 and the final version in December 2005 [1].

The purposes of the studies concerning the geological context were to confirm that the formation actually had the required properties and to assess its long-

Les déchets à haute activité et à vie longue contiennent à la fois des radioéléments à vie courte, généralement en quantité importante (haute activité) et des radioéléments à vie longue en quantité moyennement à très importante. La radio-toxicité de certains isotopes dépasse la centaine de milliers d'années.

Le confinement des déchets dans une formation géologique s'effectue de manière passive (sans reposer à terme sur une maintenance ou une surveillance des installations). Le stockage en profondeur met les déchets à l'abri de phénomènes d'érosion et des principales activités humaines, qui n'affectent, à l'échelle de centaines de milliers d'années, qu'une épaisseur superficielle de terrain. Dans ce contexte, le stockage doit (i) s'opposer à la circulation d'eau, (ii) limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser à l'intérieur du stockage lui-même, (iii) retarder et atténuer la migration des radionucléides qui auraient été relâchés par les déchets.

High-level and long-lived waste usually contains a large quantity of short-lived elements (high radioactivity), as well as a medium to very significant quantity of long-lived elements. Some isotopes remain radiotoxic for more than 100 000 years.

The containment of radioactive waste within a geological formation relies on a passive methodology, which means that it does not require any maintenance or monitoring of the facilities over the long term. Deep geological disposal protects the waste against erosion and most human activities that at the scale of several hundreds of thousands of years, will only involve superficial ground layers. Within such a context, waste disposal is designed (i) to limit water circulation, (ii) minimise radionuclide releases and to immobilise them within the repository itself, and (iii) to delay and mitigate any potential radionuclide migration from the waste.

terme, notamment sous l'effet des perturbations que l'implantation d'ouvrages de stockage lui ferait subir. Dès le début de 1994, l'Andra a entrepris des investigations dans l'Est du bassin de Paris, en s'intéressant plus particulièrement au Callovo-Oxfordien, formation à dominante argileuse. Très vite, les recherches se sont focalisées sur le Sud du département de la Meuse et le Nord du département de la Haute-Marne (Fig. 1). Ces investigations ont abouti, à partir de 2000, au creusement d'un laboratoire souterrain sur la commune de Bure (Meuse), avec deux niveaux de galeries, à –445 m (partie supérieure du Callovo-Oxfordien) et à –490 m (partie médiane du Callovo-Oxfordien). Le détail des phases d'études sur le secteur de Meuse/Haute-Marne et dans le laboratoire souterrain est présenté dans la référence [1]. Les résultats acquis sont exposés dans la référence [2 (tome 1, vols. 1 à 3)]; ils proviennent de la mise en œuvre de plusieurs démarches complémentaires :

- investigations depuis la surface sur l'ensemble du secteur et de la région ;
- analyses et tests sur échantillons ;
- étude géologique détaillée du Callovo-Oxfordien et des formations sus-jacentes lors du creusement des puits et des galeries du laboratoire souterrain ;
- mesures et expériences pour évaluer le comportement in situ des argilites du Callovo-Oxfordien.

term behaviour, especially when submitted to the disturbances induced by the implementation of disposal structures. In early 1994, ANDRA launched its investigations in the eastern part of the Paris Basin, focussing on a clay mineral-rich formation, the Callovo-Oxfordian. Very rapidly, research activities were narrowed down to an area straddling the southern section of the Meuse Department and the northern section of the Haute-Marne Department (Fig. 1). Starting in 2000, these investigations led to the excavation of an underground research laboratory near the village of Bure (Meuse) with two drift levels, one at a depth of 445 m (upper part of the Callovo-Oxfordian formation) and another at 490 m (intermediate part of the Callovo-Oxfordian formation). A detailed description of the study phases on the Meuse/Haute-Marne sector and in the underground laboratory is provided in [1]. Results are given in [2 (Part 1, vols. 1–3)] and were achieved through implementation of several complementary approaches as follows:

- investigations from the surface over the entire sector and the region;
- analyses and tests on samples;
- a detailed geological survey of the Callovo-Oxfordian formation and of its underlying formations during shaft-sinking and drift-opening operations within the underground laboratory;
- measurements and experiments designed to assess the in-situ behaviour of Callovo-Oxfordian argilites.

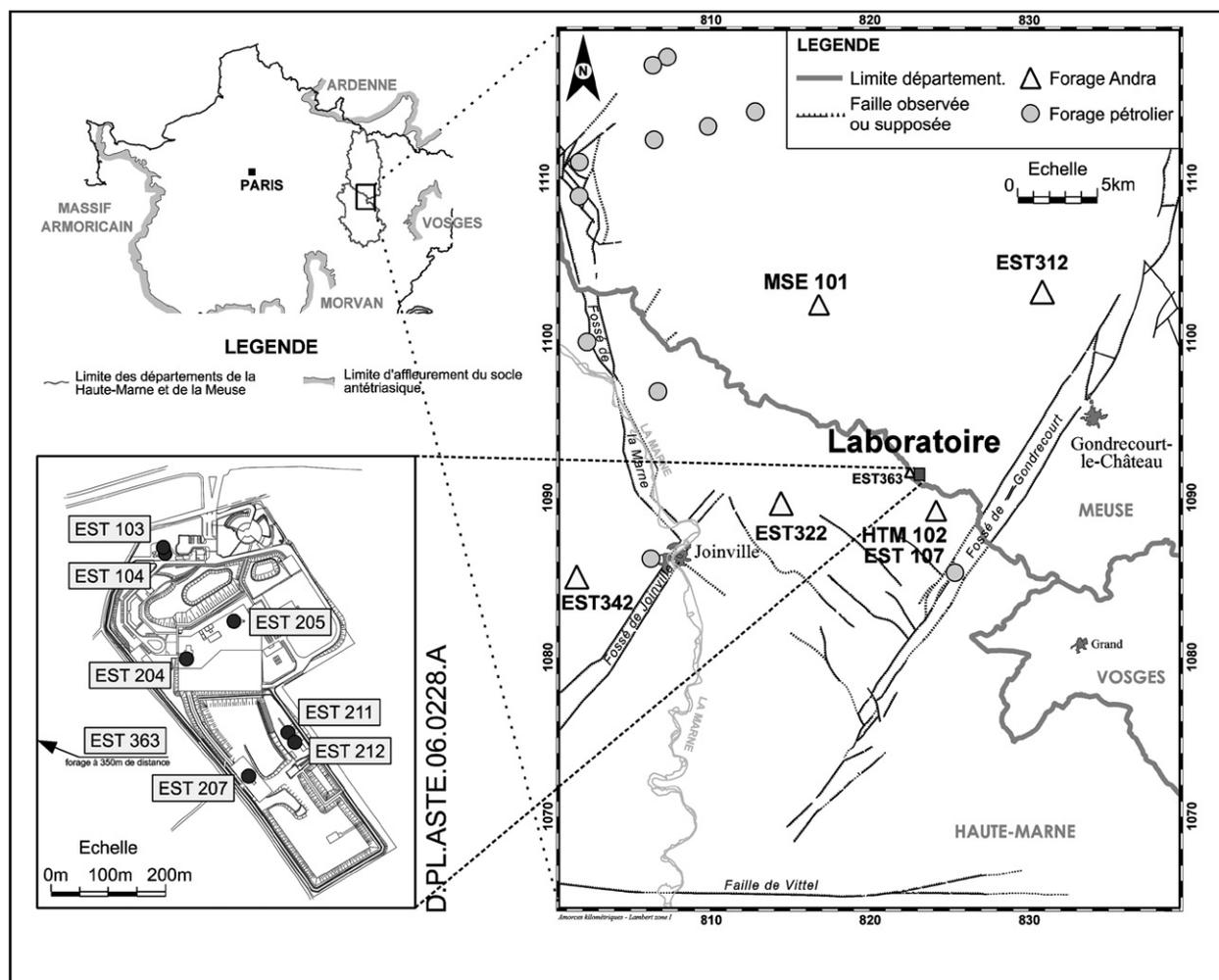


Fig. 1. Localisation des forages géologiques réalisés par l'Andra.

Fig. 1. Location of boreholes drilled by ANDRA.

Ces travaux ont été pilotés par l'Andra et ont reposé sur une large mobilisation de la communauté scientifique, en particulier avec des universités ou au travers de partenariats avec des organismes français tels que le CNRS, le CEA, le BRGM, l'Ineris, l'INPL et l'École des mines de Paris, pour ce qui concerne les investigations portant sur le milieu géologique.

L'évaluation des propriétés du Callovo-Oxfordien et de sa variabilité ne peut reposer que sur la reconstitution de son histoire, qui permet d'en comprendre la genèse. P.-Y. Collin [8,9] restitue le cadre paléogéographique du bassin de Paris pendant la phase du Callovo-Oxfordien, qui représente une période de profonds changements dans la sédimentation, avec la disparition de la majorité des plates-formes carbonatées. Cette évolution de la sédimentation, mise en relation

The work was directed by ANDRA and called upon a massive mobilisation of the scientific community, particularly involving university laboratories and research partnerships with other French organisations. Among the organisations most active in geological context investigations were the National Centre for Scientific Research (CNRS), the French Atomic Energy Commission (CEA), the Geological and Mining Research Agency (BRGM), the French National Institute for Industrial Environment and Risks (INERIS), the National Polytechnic Institute of Lorraine (INPL) and the Paris Mining School (ENSMP).

The properties of the Callovo-Oxfordian formation and their variability can only be explained on the basis of a detailed reconstruction of the history of the formation, i.e. its genesis. P.-Y. Collin [8,9] relates the

avec une période de haut niveau marin [17], se marque à l'échelle de l'Ouest téthysien et affecte largement le bassin de Paris pendant toute la période comprise entre le Callovien moyen [30] et l'Oxfordien inférieur. Elle pourrait s'expliquer par un changement climatique [9,13,18]. Les environnements de dépôt du Callovo-Oxfordien sur le secteur Meuse/Haute-Marne correspondent à l'*offshore* inférieur médian distal (tranche d'eau supérieure à 100 m), qui garantit une bonne continuité latérale des unités sédimentaires. Plus au sud, au-delà de la faille de Vittef, les faciès à oolites ferrugineuses sont répartis dans des milieux à la transition entre *shoreface-offshore* inférieur proximal [7,9,10].

Ces reconstitutions paléogéographiques s'appuient sur une biostratigraphie précise des ammonites [22], qui permet de contraindre le cadre chronologique des observations et d'approcher le contexte paléo-environnemental de la région. Grâce aux nombreux fossiles trouvés dans les forages et dans les puits d'accès au laboratoire souterrain, la série du Callovien et de l'Oxfordien est souvent datée à la sous-zone d'ammonites, voire à l'horizon [31]. Si les faunes d'ammonites présentes dans l'Est du bassin de Paris sont le résultat de mélanges de populations, boréales et téthysiennes, elles sont cependant marquées par deux arrivées de taxons septentrionaux, l'un à la base du Callovien moyen, l'autre à la transition Callovien supérieur-Oxfordien inférieur. Ce constat est bien en accord avec le contexte paléogéographique général [8,26]. Les ammonites confirment, d'autre part, un gradient des dépôts sur le secteur, avec une tranche d'eau plus importante à l'ouest qu'à l'est, alors que la plus forte épaisseur de Callovo-Oxfordien dans les forages EST312 et MSE101 prouve que la subsidence est plus importante en direction orientale. Elle s'accompagne d'une proportion de fraction silteuse, légèrement plus élevée dans ces deux forages [2 (tome 1, vol. 1)].

Sur tout le secteur étudié, la proportion de minéraux argileux par rapport à la phase carbonatée dépend directement de l'évolution séquentielle [26]. Le remplacement de la kaolinite et des interstratifiés illite/smectite de type R1, dans la moitié inférieure du Callovo-Oxfordien, par des interstratifiés I/S de type R0 dans la moitié supérieure de la formation, alors que la chlorite, les micas et l'illite restent présents en pourcentages peu variables, ne peut être d'origine diagénétique [29] ; il est le résultat des évolutions climatiques et des modifications des courants marins, en liaison avec les transformations géomorphologiques [25–27]. Il en résulte que ces évolutions minéralogiques sont diachrones à l'échelle du bassin de Paris, en fonction des modifica-

palaeographic context of the Paris Basin during the Callovo-Oxfordian phase, a period characterized by severe changes in the sedimentation process leading to disappearance of most of the carbonate-rich platforms. This evolution of the sedimentation, associated with a period of a high sea level [17], is noticeable at the scale of the western Tethysian and significantly affects the Paris Basin throughout the period extending from the Middle Callovian [30] to the Lower Oxfordian. It likely resulted from a climate change [9,13,18]. The Callovo-Oxfordian deposits in the Meuse/Haute-Marne sector correspond to lower median-to-distal offshore (water level higher than 100 m) environments, ensuring good lateral continuity of sedimentary units. Further south, beyond the Vittef fault, facies with ferruginous oolite are distributed throughout the geological media present at the interface between the shoreface and the lower proximal offshore [7,9,10].

These palaeogeographical reconstitutions are founded on a precise biostratigraphy of the ammonites [22], which helps to restrict the chronological framework of the observations and to give a good indication concerning the palaeoenvironmental context of the region. Thanks to the many fossils found in the boreholes and in underground laboratory access shafts, the Callovian and Oxfordian series can generally be dated as belonging to a given ammonite subzone, or even horizon [31]. Although the ammonite fauna present in the eastern Paris Basin results from a mixture of Boreal and Tethysian populations, they are however marked by the arrival of two northern taxons, the first one located at the base of the Middle Callovian, and the second at the interface between the Upper Callovian and the Lower Oxfordian. This observation is consistent with the overall palaeogeographical context [9,26]. In addition, ammonites confirm a deposit gradient in the sector with a higher water level westwards than eastwards, whereas the greater thickness of the Callovo-Oxfordian formation in boreholes EST312 and MSE101 shows that subsidence is more significant eastwards. That subsidence is accompanied by a slightly higher silt fraction proportion in both boreholes [2 (Part 1, vol. 1)].

The proportion of clay minerals relative to carbonated phases depends directly on the sequential evolution throughout the entire study sector [26]. The replacement of kaolinite and interstratified R1-type illite/smectite in the lower half of the Callovo-Oxfordian by interstratified R0-type illite/smectite in the upper half of the formation, accompanied by only slight variations in chlorite, mica and illite concentrations, has no diagenetic origin [29]. It results in fact from climatic evolution and changes in sea currents associated with geomorphologi-

tions de la répartition des masses d'eau océanique lors des maxima d'inondation.

Le changement minéralogique des argiles et la variabilité verticale des teneurs en carbonates et en silt ont une influence, conjointe avec les oxydes et sulfures de fer, sur les propriétés magnétiques de la roche [14]. L. Estéban, en étudiant la susceptibilité magnétique [K] et l'aimantation rémanente [NRM] de 600 échantillons de Callovo-Oxfordien, met en évidence des évolutions du rapport K /NRM, en relation avec des surfaces séquentielles de troisième ordre. Dans le détail, les propriétés magnétiques présentent une anisotropie directionnelle dans le plan de stratification. Cette anisotropie évolue selon la verticale [14], mais reste toujours proche de l'axe nord-sud. L'auteur constate que cette direction est proche de celle des apports d'argiles relevés par P. Pellenard [25,26], pour en conclure à l'orientation des plaquettes d'argile lors de la sédimentation. Il ne semble pas, en effet, que l'extension NE-SW à est-ouest qui prévaut au Jurassique [3,11,32] puisse être à l'origine de cette direction.

Cette anisotropie directionnelle ne transparait pour aucune autre propriété des argillites. En revanche, l'argillite étudiée présente une anisotropie liée au plan de stratification pour la plupart de ses propriétés mécaniques et pétrophysiques : vitesse ultrasonique, module de compressibilité, diffusivité thermique, etc., comme le montre la synthèse et l'interprétation entreprises par F. Homand et al. [19] sur un millier de résultats obtenus dans ce domaine [2 (tome 2, vol. 5), 5]. Cependant, les conséquences de cette anisotropie sur le comportement mécanique de la formation argileuse sont limitées.

La capacité de confinement du Callovo-Oxfordien repose sur la faible mobilité des radionucléides en son sein. En premier lieu, il est donc nécessaire de déterminer la perméabilité et la porosité des argillites [33]. Pour F. Homand et al. [19], la diminution du coefficient de Biot avec la contrainte axiale enregistrée sur les argillites ne peut s'expliquer par la seule diminution de porosité ; il est nécessaire de faire intervenir une perte de connectivité d'une partie du réseau poreux. L'apparition de zones non drainées se traduit alors par une augmentation du module de compressibilité drainé global.

La mesure de la perméabilité en milieu argileux pose de nombreuses difficultés techniques. Diverses méthodes ont été mises en œuvre par l'Andra [12] ; en plus des mesures en forages et sur échantillons, développées selon différentes techniques, la perméabilité des argillites a pu être évaluée à l'aide de petits forages réalisés dans les galeries du laboratoire sou-

cal transformations [25–27]. Consequently, these mineralogical evolutions are diachronous at the scale of the Paris Basin and depend on the changes in the distribution of seawater bodies during maximum flood peaks.

The mineralogical change in the clays and the vertical variability of the carbonate and silt concentrations, together with the presence of iron oxides and sulphides, have had an influence on the magnetic properties of the rock [14]. By means of studies of the magnetic susceptibility [K] and the natural remanent magnetism [NRM] of 600 Callovo-Oxfordian samples, L. Estéban [14] was able to bring to light evolutions in the relationship between the K /NRM ratio and third-order sequential surfaces. More specifically, the magnetic properties present a directional anisotropy in the stratification plane: it evolves vertically [14], but is always oriented in a north-south direction. Based on the fact that such an orientation is close to that of clay inputs observed by P. Pellenard [25,26], the author was able to determine the orientation of the clay platelets during sedimentation. In fact, it does not seem that the orientation shift from NE-SW to east/west that prevailed during the Jurassic age [3,11,32] was responsible for the observed orientation.

This directional anisotropy does not exist for any other property of the argillites. On the other hand, the argillite under study presents a form of anisotropy associated with the stratification plan for most of its mechanical and petrophysical properties: ultrasonic velocity, compressibility modulus, thermal diffusivity, etc., as demonstrated by the synthesis and interpretation carried out by F. Homand, J.-F. Shao, A. Giraud, C. Auvray, D. Hoxha [19] taking into account roughly 1000 results of measurement in this field [2 (Part 2, vol. 5), 5]. However, the consequences of these anisotropies on the mechanical behaviour of the clay formation remain limited.

The capability of the Callovo-Oxfordian formation to limit radionuclide release relies on their low mobility in this formation. A key starting point is determination of argillite permeability and porosity [33]. For F. Homand J.-F. Shao, A. Giraud, C. Auvray, D. Hoxha [19], it is impossible to explain the reduction in the Biot coefficient as a function of the axial stress to which the argillites were submitted only in terms of a reduction in porosity; it is also necessary to assume that a loss in connectivity occurred in part of the porous network. Under such conditions, the presence of undrained zones will be reflected by an increase of the overall drained compressibility modulus.

Determining the permeability in clay media raises numerous technical difficulties. Various methods were

terrain. Quelles que soient les méthodes employées (forages, échantillons ou mesures in situ), la gamme des perméabilités reste toujours du même ordre de grandeur, inférieure à $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$. Il en résulte que, dans un milieu peu poreux comme celui des argillites, où les interactions fluides/roche sont importantes [28], les transferts de solutés relèvent principalement de la diffusion, dont les valeurs, propres à chaque élément considéré, peuvent être obtenues par essais sur échantillons [2 (tome 1, vol. 3), 6], mais également grâce à des expérimentations menées dans le laboratoire souterrain.

Mais les phénomènes, dits « transverses », tels que l'osmose, l'électro-osmose et la thermo-diffusion, doivent être quantifiés dans le cas d'un stockage de déchets, qui introduira, non seulement de nouveaux éléments chimiques, mais aussi une modification du champ de température. M. Paszuka et al. [24] ont ainsi évalué les coefficients propres au Callovo-Oxfordien, alors que ce type de mesure est rarement entrepris [20]. Parmi les résultats obtenus, on relèvera que l'osmose n'a pas d'effet important sur le transport de fluides et de solutés.

La chimie des eaux interstitielles joue également un rôle important dans les phénomènes de transfert, mais l'extraction de ce fluide s'avère délicate et les résultats d'analyse peuvent être entachés de nombreuses incertitudes [2 (tome 1, vol. 3)]. Pour pallier ces limitations, une méthodologie, en partie inspirée de celle de Bradbury et Baeyens [7] et profitant du retour d'expérience du programme *Archimède* [16], a été développée pour construire des modèles d'équilibre eau/argillite sans ajustement de paramètres [15], en s'appuyant sur les résultats issus de l'analyse des eaux et du solide. À l'échelle du secteur étudié, les résultats mettent en évidence une influence de la chimie des eaux du Dogger sous-jacent en ce qui concerne le chlore contenu dans la formation argileuse, avec un profil de diminution rapide des concentrations du Nord-Est du secteur vers le Sud-Ouest. Pour E. Gaucher et al. [15], ce résultat s'explique par une remontée de solutions salées du Trias à la faveur de failles situées au nord-est.

Ces différents résultats montrent que les propriétés intrinsèques du Callovo-Oxfordien sont aptes à la rétention des radionucléides. Il n'en demeure pas moins que la formation peut être traversée par des structures cassantes susceptibles de favoriser les transferts verticaux. Les quelques structures de ce type trouvées dans la partie supérieure du Callovo-Oxfordien sont précoces et colmatées. G. André [4] discute de l'impact de la lithologie, de la rhéologie et de la profondeur sur l'expression et la distribution de la frac-

implemented by ANDRA [12]: over and above measurements made in boreholes and on samples using a variety of specifically developed techniques, permeability was also measured in small boreholes drilled in the underground laboratory drifts. Irrespective of the methods used (boreholes, samples or in-situ measurements), the permeability spectrum always remains within the same order of magnitude (below $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$). Consequently, in a porous medium such as argillites where fluid/rock interactions are significant [28], solute transfers are due mainly to diffusion, for which the specific values for every element under study may be obtained not only by tests on samples [2 (Part 1, vol. 3), 6], but also by experiments in the underground laboratory.

The importance of other so-called 'off diagonal' mass-transport-inducing phenomena such as osmosis, electroosmosis and thermal diffusion, must be quantified in the case of any waste repository that will introduce not only new chemical elements, but also a change in the temperature field. The work carried out by M. Paszuka, M. Rosanne, P.M. Adler [24] focuses on the determination of the values of the coupling coefficients for certain of these processes in the argillites of the Callovo-Oxfordian formation, an endeavour rarely undertaken [20]. One of the results shows that osmosis does not have a significant impact on the transport of fluids and solutes.

The chemistry of interstitial waters also plays an important role as regards transfer phenomena, but direct determination of a complete pore water composition is impossible because of difficulties in extracting a representative sample [2 (Part 1, vol. 3)]. In order to counter these limitations, a methodology, based in part on that of Bradbury and Baeyens [7] and benefiting from the lessons learned in the *Archimède* programme [16], was developed by the BRGM in order to build water/argillite-equilibrium models containing only parameters that could be determined by measurements carried out on rock samples [15]. Other results along the same line, this time at the scale of the sector under investigation, show an influence of the chemistry of the underlying Dogger waters with regard to the chloride contained in the clay formation, with a reduction in the steepness of the profile of pore water chloride concentrations with depth from the northeast to the southwest. For E. Gaucher, P. Blanc, F. Bardot, G. Braibant, S. Buschaert, C. Crouzet, A. Gautier, J.-P. Girard, E. Jacquot, A. Lassin, G. Negrel, C. Tournassat, A. Vinsot, S. Altmann [15], such a result may be indicative of upward movement of saline Trias solutions through the northeastern faults.

turation à partir des observations structurales faites dans les puits d'accès au laboratoire souterrain (diamètres de 5 à 6 m) et en conclut à la capacité des argilites à jouer un rôle de barrière à la fracturation entre les terrains calcaires du Dogger et de l'Oxfordien.

Les résultats obtenus montrent clairement que le milieu géologique présente des caractéristiques différentes selon les critères retenus et l'échelle d'investigation. L'anisotropie directionnelle ne concerne que les particules magnétiques, et l'anisotropie planaire mesurée pour les propriétés mécaniques et pétrophysiques à l'échelle de l'échantillon n'a pas d'influence sur le comportement mécanique en grand. Contrairement à ce qui pourrait être attendu, la perméabilité est peu variable selon la verticale du Callovo-Oxfordien et sans anisotropie planaire marquée. Pour cette propriété, il semble, en fait, que les incertitudes relèvent plus des difficultés techniques à la mesurer qu'à la variabilité du milieu géologique.

De façon générale, tous les paramètres destinés à quantifier la migration potentielle des éléments chimiques dans ce milieu choisi pour ses capacités de confinement, nécessitent la mise au point d'approches et de techniques particulières. Leur faible variabilité constatée actuellement s'explique par le contexte géologique général et les résultats obtenus dans le laboratoire souterrain et à ses abords peuvent, par conséquent, être raisonnablement extrapolés à une zone plus vaste.

Au stade actuel des investigations, la formation du Callovo-Oxfordien et son environnement présentent des propriétés favorables pour un éventuel stockage de déchets radioactifs. Cette conclusion a été exprimée dans le dossier 2005 Argile remis par l'Andra en décembre 2005 [1] et confirmée par différentes évaluations dont a fait l'objet ce document [23].

Consécutivement à la loi votée le 28 juin 2006, l'Andra s'est vue confier la poursuite des recherches dans ce domaine, en particulier grâce à l'exploitation du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Remerciements

Je tiens à remercier tous les auteurs qui ont présenté les résultats de leurs recherches sur les argilites Callovo-Oxfordien et les rapporteurs qui ont apporté des remarques constructives à ces différents textes. J'adresse également mes remerciements à mes collègues de l'Andra, en particulier Scott Altmann, Patrick Landais et Patrick Lebon, ainsi qu'à Christian Ravenne, de l'IFP, pour leur aide et leurs conseils.

These different results show that the intrinsic properties of the Callovo-Oxfordian formation are suitable for radionuclide retention. However, one can still pose the question as to the existence of structural discontinuities within the formation that might facilitate vertical radionuclide transfers. The few structures of this type that were found in the upper part of the Callovo-Oxfordian formation are precocious and completely filled in G. André [4] discusses the impact of the lithology, rheology and depth on the expression and distribution of fractures on the basis of the structural observations made in the underground laboratory access shafts (diameters of 5–6 m), concluding as to the capability of the argillites to act as a barrier to development of fracturing connecting the calcareous layers of the Dogger and Oxfordian formations.

Taken together, these results show clearly that the geological medium has different characteristics depending on the criteria and investigation scale being used. Directional anisotropy only concerns magnetic particles, whereas the measured planar anisotropy for mechanical and petrophysical properties at the sample scale does not impact the full-scale mechanical behaviour. Contrary to expectations, permeability varies only slightly at the vertical scale of the Callovo-Oxfordian formation and does not present significant planar anisotropy. In addition, it seems that uncertainties in permeability values are related more to technical problems involved in their measurement than in the variability of the geological medium.

In general, all parameters designed to quantify the potential migration of chemical elements in such a medium selected for its containment features require the development of specific approaches and techniques. The currently observed low variability is attributable to the overall geological context, and the results obtained in the underground laboratory and in its vicinity may therefore be reasonably extrapolated to a broader zone.

At the current investigation stage, the Callovo-Oxfordian formation and its environment present favourable properties for the implementation of a potential radioactive-waste repository. That conclusion was formulated in the *Dossier 2005 Argile*, which was submitted by ANDRA in December 2005 [1] and confirmed by various assessments in the framework of that document [23].

According to the new planning act promulgated on 28 June 2006, ANDRA is responsible for pursuing investigations in that field, particularly with regard to the operation of the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory.

Alain Trouiller

*Andra DS/ Milieu géologique
1–7, rue Jean-Monnet
92290 Châtenay-Malabry cedex
France*

Adresse e-mail : Alain.Trouiller@andra.fr (A. Trouiller)

Acknowledgements

I wish to thank all writers who presented results of their research about the Callovo-Oxfordian argillites and the reviewers who made constructive remarks on the different texts. I also thank my colleagues of ANDRA, particularly to Scott Altmann, Patrick Landais and Patrick Lebon, as well as Christian Ravenne, from IFP, for their help and their advice.

Alain Trouiller

*ANDRA DS/ Milieu géologique
1–7, rue Jean-Monnet
92290 Châtenay-Malabry cedex
France*

E-mail address: Alain.Trouiller@andra.fr (A. Trouiller)

Références / References

- [1] Andra – collectif, Dossier 2005 Argile, Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, Document de synthèse, Andra Éd. n° 284 B, décembre 2005.
- [2] Andra – collectif, Dossier 2005 Argile, Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne, Andra Éd. n° 271 B à 275 B, décembre 2005.
- [3] G. André, Caractérisation de la structuration de l'Est du bassin de Paris : discrimination des déformations syn-sédimentaires mésozoïques, thèse, université Henri-Poincaré, Nancy-1, France, 2003 (308 p.).
- [4] G. André, B. Proudhon, H. Rebours, Y. Wileveau, Paramètres contrôlant la distribution de la fracturation : exemple dans une série marno-calcaire du Jurassique supérieur (Est du bassin de Paris), C. R. Geoscience 338 (2006).
- [5] C. Bauer-Plaindoux, D. Tessier, M. Ghoreychi, Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA 326 (1998) 231–237.
- [6] V. Blin, M. Descostes, B. Grenut, P. Meier, E. Tevissen, S. Buschaert, HTO and $^{36}\text{Cl}^-$ diffusion in Callovo-Oxfordian argillites and Oxfordian Limestones, in: Clay in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Proceedings International Meeting (Tours, France, 2005), Physics and Chemistry of the Earth (special issue) (2005).
- [7] M.H. Bradbury, B. Baeyens, A physicochemical characterisation and geochemical modelling approach for determining pore-water chemistries in argillaceous rocks, Geochim. Cosmochim. Acta 62 (1998) 783–795.
- [8] P.-Y. Collin, P. Courville, Paléoenvironnements et biostratigraphie d'une série oxfordienne non condensée de référence (Saint-Blin-Sémilly, Haute-Marne, France), Geol. France 1 (2000) 59–63.
- [9] P.-Y. Collin, P. Courville, Sedimentation and palaeogeography of the eastern part of the Paris Basin (France) at the Middle-Late Jurassic boundary, C. R. Geoscience 338 (2006).
- [10] P.-Y. Collin, J.-P. Loreau, P. Courville, Depositional environments and iron ooid formation in condensed sections (Callovian–Oxfordian, south-eastern Paris basin, France), Sedimentology 52 (2005) 969–985.
- [11] M. Coulon, D. Frizon de Lamotte, Les extensions cénozoïques dans l'Est du bassin de Paris : mise en évidence et interprétation, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 307 (1988) 1113–1119.
- [12] J. Delay, A. Trouiller, J.-M. Lavanchy, Propriétés hydrodynamiques du Callovo-Oxfordien dans l'Est du bassin de Paris : comparaison des résultats obtenus selon différentes approches, C. R. Geoscience 338 (2006).
- [13] G. Dromart, J.-P. Garcia, F. Gaumet, S. Picard, M. Rousseau, F. Atrops, C. Lecuyer, S.M.F. Sheppard, Perturbation of the carbon cycle at the Middle/Late Jurassic transition: geological and geochemical evidence, Am. J. Sci. 303 (2003) 667–707.
- [14] L. Esteban, J.-L. Bouchez, A. Trouiller, The Callovo-Oxfordian argillites from eastern Paris basin: magnetic data and petrofabrics, C. R. Geoscience 338 (2006).
- [15] E.C. Gaucher, P. Blanc, F. Bardot, G. Braibant, S. Buschaert, C. Crouzet, A. Gautier, J.-P. Girard, E. Jacquot, A. Lassin, G. Negrel, C. Tournassat, A. Vinsot, S. Altmann, Modeling the pore-water chemistry of the Callovian–Oxfordian formation at a regional scale, C. R. Geoscience 338 (2006).
- [16] L. Griffault, T. Merceron, J.-R. Mossman, B. Neerdael, P. de Canniere, C. Beaucaire, S. Daumas, A. Bianchi, R. Christen, Acquisition and regulation of the water chemistry in clay environment. Project 'Archimède', CEC final report EUR 17454, Science and nuclear techniques, Luxembourg, 1997.
- [17] F. Guillocheau, C. Robin, P. Allemand, S. Bourquin, N. Brault, G. Dromart, R. Friedenberg, J.-P. Garcia, J.-M. Gaulier, F. Gaumet, B. Grosdoy, F. Hanot, P. Le Strat, M. Mettraux, T. Nalpas, C. Prijac, C. Rigollet, O. Serrano, G. Grandjean, Mesozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints, Geodin. Acta 13 (2000) 189–246.
- [18] Y. Hautevelle, R. Michels, F. Malartre, A. Trouiller, Vascular plant biomarkers as proxies of paleoflora and paleoclimatic changes at the Dogger/Malm transition of Paris Basin (France), Org. Geochem. (in press).

- [19] F. Homand, J.-F. Shao, A. Giraud, C. Auvray, D. Hoxha, Pétrofabrique et propriétés mécaniques des argilites, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [20] S.T. Horseman, J.J.W. Higgo, J. Alexander, J.F. Harrington, Water, gas and solute movement through argillaceous media, Report CC-96/1, Nuclear Energy Agency, 1996.
- [21] Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. *J.O. de la République française* du 1^{er} janvier 1992.
- [22] D. Marchand, J. Thierry, Enregistrement des variations morphologiques et de la composition des peuplements d'ammonites durant le cycle régressif/transgressif de 2^e ordre Bathonien inférieur, Oxfordien inférieur en Europe occidentale, *Bull. Soc. géol. France* 168 (2) (1997) 121–132.
- [23] OCDE Sécurité du stockage géologique de déchets radioactifs HAVL en France, Safety of geological Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste in France. NEA n° 6179, NEA n° 6178, OCDE/OECD éd., France, 92130 Issy-les-Moulineaux, 2006.
- [24] M. Paszkuta, M. Rosanne, P.M. Adler, Transport coefficients of saturated compact clays, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [25] P. Pellenard, Message terrigène et influences volcaniques au Callovo-Oxfordien dans les bassins de Paris et du Sud-Est de la France, thèse, université Lille-1, France, Société Géologique du Nord, publication n° 31, 2003 (362 p.).
- [26] P. Pellenard, J.-F. Deconinck, Mineralogical variability of Callovo-Oxfordian clays from the Paris basin and the Subalpine Basin, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [27] P. Pellenard, J.F. Deconinck, D. Marchand, J. Thierry, D. Fortwengler, G. Vigneron, Contrôle géodynamique de la sédimentation argileuse du Callovo-Oxfordien moyen dans l'Est du bassin de Paris : influence eustatique et volcanique, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 328 (1999) 807–813.
- [28] A. Revil, P.W.J. Glover, Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones and clays, *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998) 691–694.
- [29] D. Rousset, Étude de la fraction argileuse de séquences sédimentaires de la Meuse et du Gard. Reconstitution de l'histoire diagénétique et des caractéristiques physicochimiques des cibles, thèse, université Louis-Pasteur, Strasbourg, France, 2002.
- [30] J. Thierry, E. Barrier, Middle Callovian, map 9, in: J. Dercourt et al. (eds). Atlas Peri-Tethys, Paleogeographical maps. CCGM/CGMW, Paris, 2000.
- [31] J. Thierry, D. Marchand, D. Fortwengler, A. Bonnot, R. Jardat, Les ammonites du Callovien-Oxfordien des sondages Andra dans l'Est du bassin de Paris : synthèse bio-chronostratigraphique, intérêts paléocéologique et paléobiogéographique, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [32] T. Villemin, La chronologie des événements tectoniques dans le Nord-Est de la France et le Sud-Ouest de l'Allemagne du Permien à l'Actuel, *C. R. Acad. Sci. Paris* 303, Ser. II (1986) 1685–1690.
- [33] B. Yven, S. Sammartino, Y. Géraud, F. Homand, F. Villiéras, Mineralogy, Texture and Porosity of Callovo-Oxfordian Argillites of the Meuse/Haute-Marne Region (eastern Paris Basin), *Bull. Soc. géol. France* (in press).