

5.3

Modélisation des écoulements et du transfert d'éléments radioactifs en milieu géologique. Application au site de Meuse – Haute-Marne

L'IRSN a évalué les éléments relatifs à la faisabilité d'un stockage de déchets de haute activité et à vie longue dans la formation géologique profonde du site de Meuse – Haute-Marne, présentés par l'Andra⁽¹⁾ dans le « Dossier 2005 Argile » [1]. L'IRSN a notamment analysé les hypothèses et les modèles utilisés par l'Andra afin d'estimer le relâchement et la migration des radionucléides contenus par les colis. Cette analyse a été effectuée sur la base de modélisations propres permettant de simuler le transfert des radionucléides depuis le site de stockage jusqu'aux exutoires de la surface. L'IRSN a réalisé en particulier un modèle des écoulements souterrains calé sur les paramètres hydrodynamiques mesurés *in situ*, et qui permet de localiser des exutoires potentiels des radionucléides et d'estimer le temps de transfert jusqu'à ces exutoires. Ce modèle hydrogéologique est couplé à un modèle de transport des radionucléides permettant d'évaluer les débits d'activité aux exutoires.

L'article présente :

- les données de base et la construction des modèles d'écoulement et de transport ;
- les hypothèses de calage du modèle des écoulements souterrains ;
- les résultats de la simulation du transport des radionucléides.

Données et construction des modèles

Le site actuellement retenu par l'Andra pour évaluer la faisabilité d'un stockage dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, étudiée au moyen du laboratoire de Bure, se situe à la frontière des départements de la Meuse et de la Haute-Marne (*figure 1*).

Les simulations des écoulements souterrains et du transport de radionucléides ont été réalisées sur la base de trois modèles distincts cohérents entre eux.

Modèle de transport de radionucléides dans la couche hôte

Les écoulements souterrains au sein de la couche hôte, homogène à l'échelle du laboratoire, sont majoritairement diffusifs, le gradient hydraulique vertical ascendant (0,2 m/m) ainsi que la perméa-

(1) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

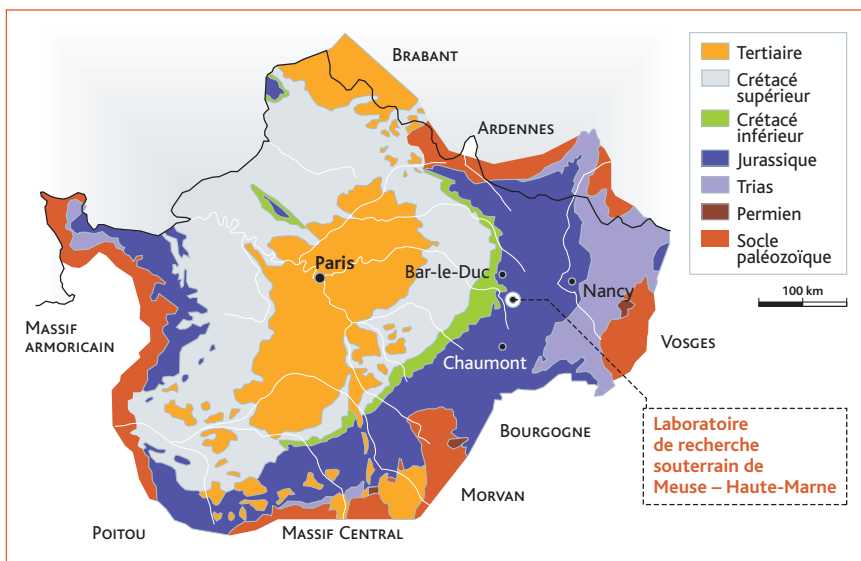


Figure 1 : Carte géologique simplifiée du bassin de Paris et localisation du site Meuse – Haute-Marne (d'après Andra, Dossier 2005 Argile – Document de synthèse, modifié).

bilité moyenne étant trop faibles pour constituer un moteur dominant des écoulements au sein de la formation.

La modélisation du transfert des radionucléides à travers la couche hôte a été réalisée à l'aide du code MÉLODIE⁽²⁾ [2], développé par l'IRSN en collaboration avec l'École des Mines de Paris et l'Université de Pau. Il s'agit d'un programme de simulation numérique dédié à la modélisation du transfert des radionucléides en formation géologique, depuis les colis de déchets jusqu'aux exutoires de la biosphère.

Un modèle numérique du stockage lui-même a également été réalisé avec le code MÉLODIE. Il représente les ouvrages du stockage dans la couche géologique hôte du Callovo-Oxfordien, dans le cas de combustibles usés de type CU1 (figure 2), et permet d'estimer les débits molaires au travers des principales voies de transfert représentées (formation hôte du Callovo-Oxfordien et puits d'accès). Dans le projet de stockage présenté par l'Andra, chaque grande catégorie de colis (déchets C, déchets B et combustibles usés) est stockée dans une zone dédiée. Chacune de ces zones est indépendante

(2) Le modèle mathématique est fondé sur l'hypothèse d'un milieu poreux équivalent continu. Les processus physiques modélisés sont : écoulement d'eau selon la loi de Darcy, transport convectif/diffusif des radionucléides à travers des milieux aux propriétés hétérogènes et anisotropes tenant compte de la décroissance radioactive et de la filiation, et retard du transport dû à la sorption des radionucléides. L'IRSN a par ailleurs développé dans le code MÉLODIE une méthode de parallélisation fondée sur la « décomposition de domaine » pour permettre l'utilisation du code sur des maillages de grande taille.

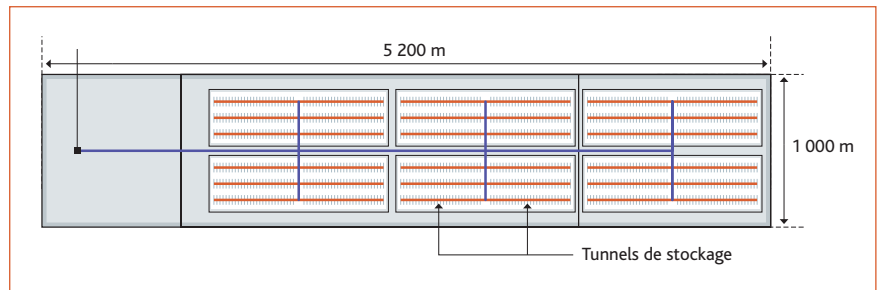


Figure 2 : Schéma du modèle numérique de la zone de stockage CU1 connectée au puits d'accès (coupe horizontale dans l'axe de tunnels).

des autres. Pour cette simulation, seule la zone de stockage des combustibles usés (UOX) est modélisée. La raison de ce choix est que l'inventaire radiologique de ces combustibles est pénalisant par rapport aux autres colis, compte tenu de l'activité de ces combustibles en iode-129 et du mode de relâchement des radionucléides par les assemblages. Cet inventaire a par ailleurs été maximisé en supposant un arrêt du retraitement des combustibles usés à partir de 2010.

Architecture du modèle de stockage

Le modèle numérique du stockage des combustibles usés reprend les hypothèses de l'Andra [3] : en matière d'inventaires radiologiques, de cinétiques des relâchements d'activité, de propriétés chimiques et hydrauliques des différents composants et de la formation hôte. Il reprend également les dimensions et les principes généraux d'architecture du stockage définis par l'Andra [4] : tunnels de stockage borgnes, regroupement des tunnels en modules, scellements dans les galeries de liaison entre la zone de stockage et le puits d'accès, etc. Chaque tunnel contient trois ou quatre conteneurs de combustibles usés. Le stockage est situé au milieu de la couche géologique du Callovo-Oxfordien, sur un seul niveau afin de garder une épaisseur d'argilite d'environ 65 m de part et d'autre. Le creusement des ouvrages entraîne l'endommagement mécanique de la roche autour des excavations : cette zone est appelée EDZ (*Excavation Damaged Zone*). L'EDZ, dont l'extension radiale est proportionnelle au diamètre d'excavation et dépend du champ de contraintes dans la couche géologique, constitue un milieu plus perméable et diffusif que la roche dite « saine », du fait notamment de l'endommagement mécanique. Cette zone, potentiellement favorable aux écoulements d'eau, est interrompue localement par des scellements afin d'éviter ces écoulements et de maintenir un régime de transport des radionucléides globalement diffusif. Dans le même objectif, une barrière ouvragée argileuse est disposée en anneaux autour des colis dans le tunnel de stockage. Le bouchon en argile gonflante placé en bout de tunnel de stockage afin de le fermer ainsi que le massif en béton servant d'appui mécanique à l'argile gonflante ne sont pas représentés. Les tunnels de stockage sont reliés entre eux par des galeries de manutention et sont regroupés en modules de stockage. Les scellements en argile sont placés de manière régulière dans les galeries de manutention et de liaison entre les modules. Enfin, la galerie de liaison est connectée à la surface par un puits d'accès. La zone de stockage modélisée représente ainsi une surface de 5,2 km² dans la formation du Callovo-Oxfordien, dont l'épaisseur constante est de 130 m. L'ensemble des maillages représentant le stockage des combustibles usés compte 6,75 millions de tétraèdres, 1,25 million de nœuds de calculs et 9 domaines de calcul.

Scénarios d'évolution du stockage

Les scénarios d'évolution du stockage ont été définis afin d'estimer les capacités de confinement du stockage pour différentes hypothèses de fonctionnement des composants et des conditions d'environnement. Deux scénarios ont ainsi été traités. Un scénario dit de référence (SEN⁽¹⁾) considère un

- (1) SEN : scénario d'évolution normale. SEA : scénario d'évolution altérée.
- (2) L'ancrage est composé d'un épaulement en bentonite remplaçant localement autour du scellement le revêtement en béton et d'une clé d'ancrage en bentonite permettant de couper hydrauliquement l'EDZ.
- (3) Sorption : fixation réversible des radionucléides sur les phases solides (roche).
- (4) Temps de transfert pour les anions = 1 300 000 ans et pour les cations 100 000 ans.
- (5) Partie de l'inventaire relâchée immédiatement dès l'arrivée de l'eau après la corrosion du conteneur.
- (6) Auparavant appelé Centre d'informatique géologique (CIG).
- (7) Couche géologique contenant de l'eau en quantités exploitables (nappe d'eau souterraine).
- (8) Couche géologique de faible perméabilité (aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide), où le captage de quantités d'eau appréciables n'est pas possible, mais à travers laquelle des transferts d'eau significatifs, par « drainage », sont possibles en provenance d'aquifères adjacents.

fonctionnement des composants dont les performances sont celles attendues en situation d'évolution « normale ». Le second scénario, dit « altéré » (SEA), a pour objet d'évaluer l'influence d'un défaut du concept permettant d'interrompre la zone endommagée sur le transfert des radionucléides. Le scénario « altéré » est donc fondé sur une incertitude d'ordre technologique concernant la mise en place des scellements et bouchons en bentonite, et des performances globales qui en résultent. Ce scénario est schématisé par des scellements sans ancrage⁽²⁾ dans la couche hôte. Pour ces deux scénarios, les niveaux de performances associés aux composants traduisent soit un état des connaissances sur l'évolution du stockage dont le degré de confiance est élevé (dans ce cas, les phénomènes associés sont paramétrés avec des valeurs *best estimate*), soit présentent encore des incertitudes nécessitant de retenir des valeurs de paramètres dites « conservatives » (paramètres des remblais et terme source).

Radionucléides pris en compte dans le modèle de relâchement du combustible usé

Les radionucléides retenus pour les simulations sont ¹²⁹I, ⁷⁹Se et ³⁶Cl. La raison de ce choix est que ces radionucléides ne sont pas sorbés⁽³⁾ dans les matériaux argileux, que leur période est suffisamment longue devant les temps de transfert au travers du Callovo-Oxfordien⁽⁴⁾ et que leurs inventaires dans les colis sont importants. Le ⁷⁹Se est toutefois un radionucléide peu soluble. Le modèle de relâchement des colis pour ces radionucléides est composé d'une fraction labile⁽⁵⁾ instantanément relâchée (environ 10 % de l'inventaire) et d'une partie relâchée au fur et à mesure de la dissolution de la pastille d'oxyde d'uranium et de la corrosion des parties métalliques au contact de l'eau.

Modèle hydrogéologique

Une modélisation préalable des écoulements souterrains incluant les diverses couches encadrant la formation hôte a été réalisée afin de simuler le transfert de radionucléides au-delà de la formation hôte du Callovo-Oxfordien. Cette étude est le résultat d'un travail de collaboration de sept ans entre l'IRSN et le Centre de géosciences⁽⁶⁾ de l'école des Mines de Paris. Le code de calcul utilisé, NEWSAM, a été développé à l'école des Mines et a intégré, au fur et à mesure de l'évolution des connaissances du site, les modifications nécessaires afin de répondre aux besoins et aux questions posées par l'évaluation de sûreté à long terme. NEWSAM est un programme de simulation des écoulements souterrains dans des systèmes hydrogéologiques sédimentaires (schématisés par des empilements de couches horizontales), où alternent des aquifères⁽⁷⁾ et des semi-perméables⁽⁸⁾.

Extension du modèle et paramètres hydrodynamiques utilisés

Cette modélisation hydrogéologique a été réalisée à l'aide d'un modèle multicouche 3D. Son objectif principal est de simuler le comportement des écoulements dans l'ensemble du bassin sédimentaire de Paris. Les propriétés hydrauliques⁽⁹⁾ introduites dans le modèle sont essentiellement issues d'une base de données hydrodynamiques du bassin Parisien établie par l'IRSN et l'école des Mines pour le projet Everest⁽¹⁰⁾. Cette base a ensuite été complétée par les données disponibles dans la bibliographie (données Andra [5], banque de données sous-sol du BRGM, etc.) ainsi que par la base de données BPDATA⁽¹¹⁾ [6], constituée depuis 1998 par l'IRSN. Enfin, ces paramètres hydrodynamiques ont été réévalués lors de la phase de calage du modèle, consistant à faire coïncider au mieux les charges hydrauliques calculées avec celles mesurées en forage. Pour cela, chaque couche du modèle est paramétrée en accord avec les mesures ponctuelles existantes et les données de la littérature ou avec la nature litho-stratigraphique de ces formations. Dans ce modèle, la variation de l'écoulement au cours du temps en fonction des évolutions géomorphologiques possibles n'est pas prise en compte.

Incertitudes concernant la fracturation

La zone de transposition se situe à l'écart des grandes failles régionales. Toutefois, des incertitudes subsistent quant à la représentation et au rôle hydraulique des structures tectoniques identifiées ou

(9) Paramètres physiques définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis du fluide.

(10) *Evaluation of Elements Responsible for the Effective Engaged Dose Rates Associated With the Final Storage of Radioactive Waste.* Projet du 4^e PCRD de la Commission européenne dont l'IRSN était le coordinateur.

(11) Données provenant de forages de pétrole ou de gaz, puits géothermiques et d'alimentation en eau potable, sources, forages de reconnaissance de l'Andra, thèses ainsi que d'analyses d'échantillons d'eaux (compositions chimique et isotopique).

5.3

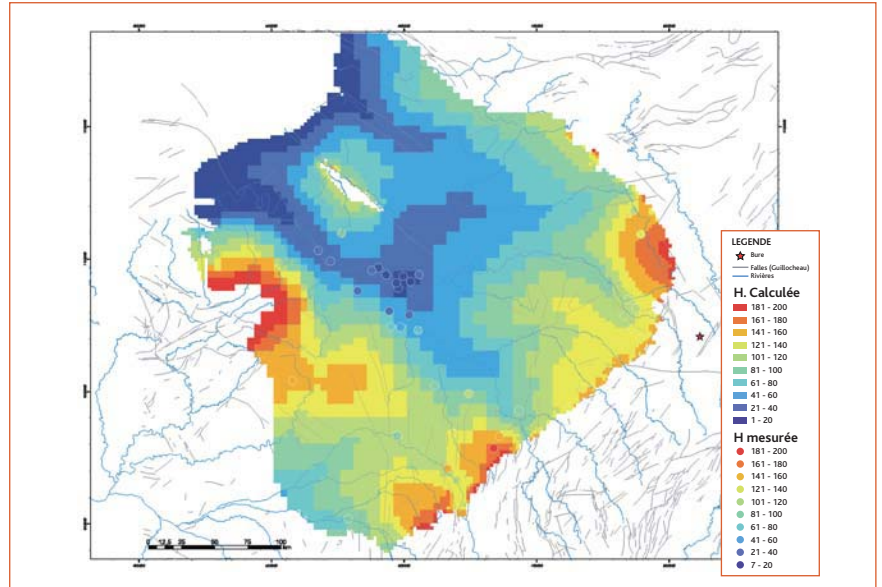


Figure 4 : Charges calculées et mesurées dans l'Albién (échelle du bassin de Paris).

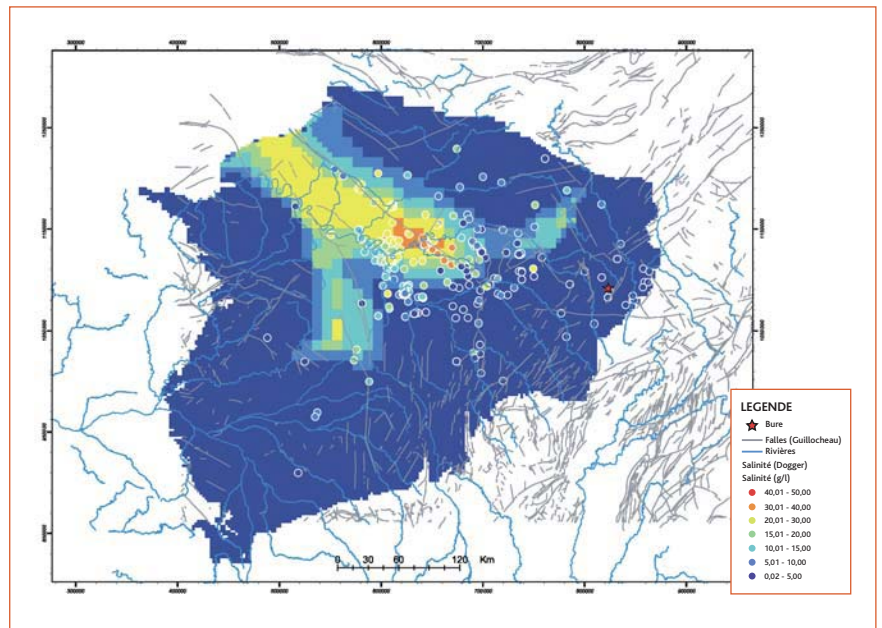


Figure 5 : Salinités calculées et mesurées dans le Dogger (échelle du bassin de Paris).

- (1) Cartes topographiques numérisées.
- (2) Dans le modèle, ces structures sont soit les grandes failles régionales, soit les failles « locales », d'extension plus réduite.

dont l'existence est soupçonnée sur le site. Or la prise en compte de la fracturation est une question clé de l'évaluation de sûreté dans la mesure où ces structures peuvent conduire localement à une chenalisation des écoulements au travers des différents horizons sédimentaires et, le cas échéant, influencer la localisation des exutoires, les temps de transfert et la dilution des radionucléides. Les discontinuités régionales prises en compte dans le modèle ont été identifiées à partir d'une carte des principales failles du bassin de Paris [7]. Une cartographie détaillée du secteur du laboratoire de Bure a également été réalisée par l'Andra afin de mieux connaître la tectonique du site de Meuse – Haute-Marne. L'IRSN a de même effectué sa propre étude en réalisant une carte des différentes échelles de

fracturation à partir des données issues de modèles numériques de terrain (MNT⁽¹⁾), des profils de reconnaissance par sismique 2D, des forages et d'une analyse tectonique de terrain.

Modèle de transport de la couche hôte à la biosphère

Le modèle de transport dans les couches géologiques sédimentaires sus-jacentes au Callovo-Oxfordien sur le site de Meuse – Haute-Marne intègre les éléments du modèle hydrogéologique présenté dans le chapitre précédent. Réalisé avec le code MÉLODIE, il permet d'estimer les temps de transfert et les concentrations des radionucléides du toit de la formation hôte aux exutoires de surface.

L'extension du modèle a été réduite pour ces calculs par rapport au modèle hydrogéologique qui s'étend sur tout le bassin de Paris. Il est centré sur le site de Meuse – Haute-Marne (partie sud-est du bassin) et permet d'obtenir des résultats plus détaillés dans ce secteur. Les deux modèles restent cohérents entre eux, le maillage du modèle MÉLODIE étant directement extrait de celui du modèle NEWSAM. La **figure 3** (maillages des modèles d'écoulement et de transport) présente ces deux maillages pour la couche hôte aux deux échelles de modélisation.

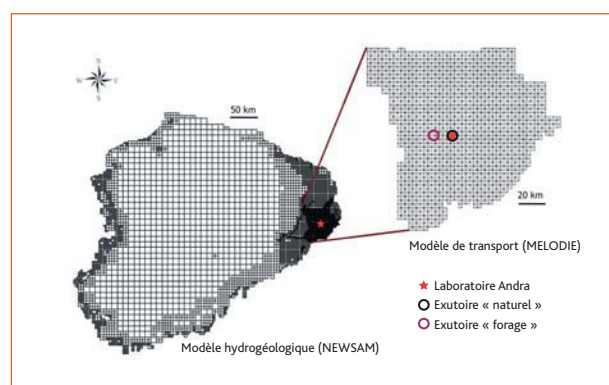


Figure 3 : Maillages des modèles d'écoulement et de transport.

Pour la modélisation du transport, les conditions aux limites hydrauliques appliquées en bordure du modèle et les paramètres hydrodynamiques appliqués en chaque maille sont issus des résultats du calage du modèle hydrogéologique. Ce modèle est discrétisé horizontalement avec des mailles de 1 km de côté, le maillage s'étendant sur environ 90 km d'est en ouest et du nord au sud.

Cette extension vise à intégrer les exutoires potentiels (failles, rivières) des eaux souterraines, ainsi que les principales zones de recharge des aquifères, les portions affleurantes des différentes formations à l'est et au sud du site. Les épaisseurs des différentes couches géologiques de ce modèle ont été fixées à partir de données issues des forages réalisés par l'Andra [5]. Verticalement, le modèle est constitué de 23 couches (**tableau 1**).

Tableau 1

Discretisation verticale du modèle de transport.			
	COUCHE		TYPE
Extension du modèle de transport	1	PORTLANDIEN	Aquifère
	2 à 6	KIMMERIDGIEN (5 couches)	Alternance d'aquifères et de semi-perméables
	7 à 23	OXFORDIEN (17 couches)	Alternance d'aquifères et de semi-perméables
Modèle couche hôte	CALLOVO-OXFORDIEN		Semi-perméable
Extension du modèle hydrogéologique	DOGGER	BATHONIEN	Aquifère
		M.A.O.	Semi-perméable
		BAJOCIEN	Aquifère
	LIAS		Semi-perméable
	RHETIEN		Aquifère
	KEUPER		Semi-perméable
	MUSCHELKALK		Aquifère
	BUNTSANDSTEIN		Aquifère

Calage des écoulements du modèle hydrogéologique

Globalement, le calage du modèle hydrogéologique permet une représentation correcte des diverses mesures de charges hydrauliques (**figure 4**) et géochimiques (notamment la salinité des eaux, comme indiqué **figure 5**) relevées sur tout le bassin parisien [5].

Toutefois, les mesures de charges hydrauliques permettant de caler le modèle au niveau du site de Meuse – Haute-Marne sont peu nombreuses au regard de l'échelle considérée. Ainsi, plusieurs modèles d'écoulement permettent de reproduire correctement les mesures avec des précisions de calage comparables en termes d'erreur moyenne entre charges mesurées et simulées dans les forages du secteur de Meuse – Haute-Marne. Aussi, une analyse complémentaire est nécessaire pour discriminer les modèles proposés. Parmi les divers modèles, certains font jouer un rôle hydraulique aux structures tectoniques⁽²⁾ et d'autres ne le font pas (voir Modèle hydrogéologique). Ainsi, lorsqu'aucune structure n'a pas de rôle hydraulique au niveau du site de Meuse – Haute-Marne, le calage des charges (piézométrie) dans l'Oxfordien et le Dogger nécessite de limiter les échanges hydrauliques entre ces deux aquifères au travers de la formation du Callovo-Oxfordien. Cette contrainte impose de prendre en compte une augmentation sensible des perméabilités en regard de la formation du Dogger au voisinage du site de Meuse – Haute-Marne. Si cette hypothèse permet d'obtenir des piézométries cohérentes avec les mesures, les paramètres hydrodynamiques utilisés ne sont pas vraisemblables, les faibles valeurs de perméabilité mesurées par l'Andra [5] dans ce secteur n'étant pas en accord avec les valeurs introduites dans le modèle.

5.3

Tableau 2

Calage en charge obtenu avec les hypothèses du cas 1 dans le Dogger.						
CAS 1	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	256	0	286	286	0
EST103	304	309	5			
HTM102	317	313	- 4	289	289	0
EST311/312	264	263	- 1	292	292	0
EST321/322	268	267	- 1	272	272	0
EST331	320	321	1			
EST342	196	196	0	251	250	- 1
EST351	273	275	2			
Écart moyen			1,75 m			0,2 m

Tableau 3

Calage en charge obtenu avec les hypothèses du cas 2 dans le Dogger						
CAS 2	Charge Oxfordien (m NGF)			Charge Dogger (m NGF)		
	Mesurée	Calculée	Écart	Mesurée	Calculée	Écart
MSE101	256	256	0	286	286	0
EST103	304	309	5			
HTM102	317	315	- 2	289	294	5
EST311/312	264	263	- 1	292	292	0
EST321/322	268	267	- 1	272	274	2
EST331	320	321	1			
EST342	196	196	0	251	246	- 5
EST351	273	275	2			
Écart moyen			1,5 m			2,4 m

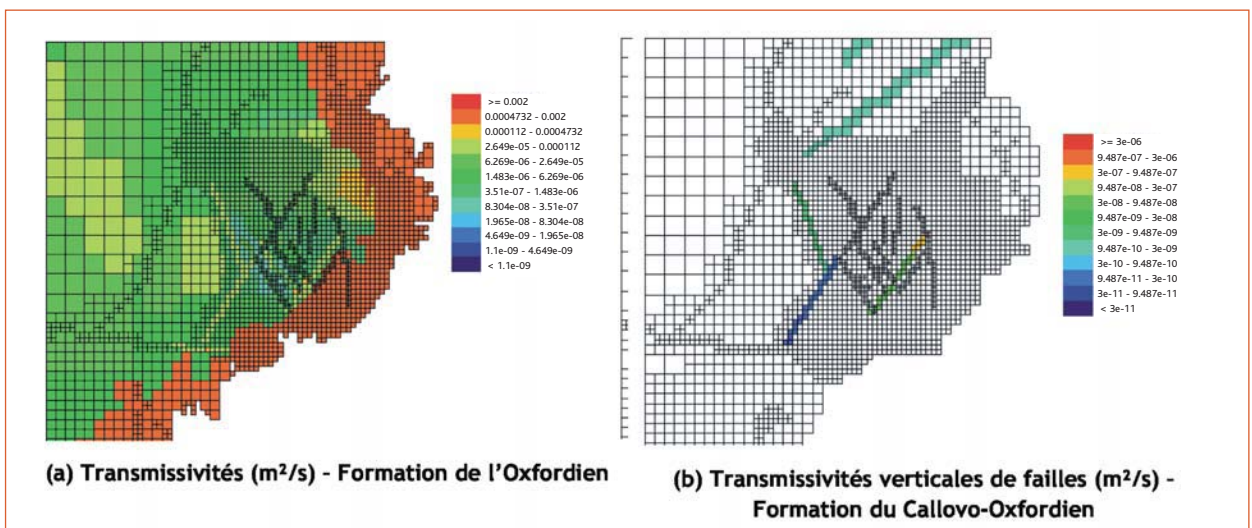


Figure 6 : Paramètres de l'Oxfordien et du Callovo-Oxfordien – Modèle avec failles (zoom sur le site de MHM).

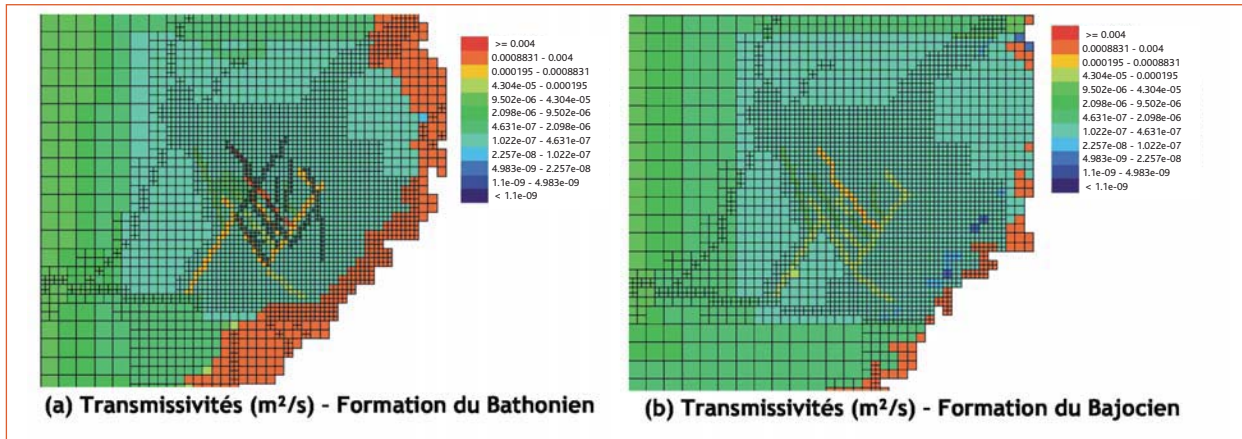


Figure 7 : Paramètres du Dogger – Modèle avec failles, cas n° 1 (zoom sur le site de MHM).

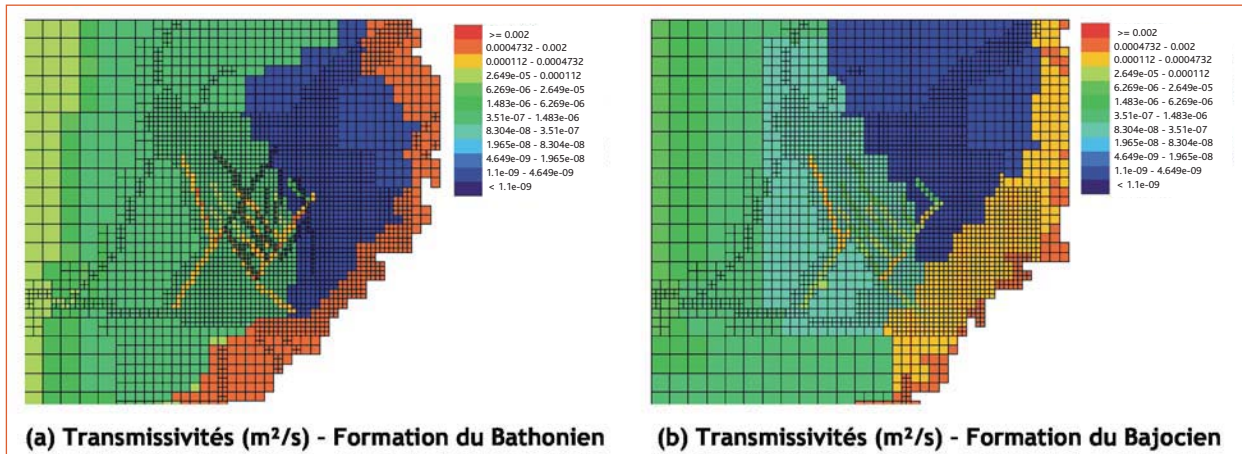


Figure 8 : Paramètres du Dogger – Modèle avec failles, cas n° 2 (zoom sur le site de MHM).

Cette hypothèse n'étant pas satisfaisante, une approche différente a été adoptée visant à affecter un rôle hydraulique aux structures reconnues ou supputées dans le secteur étudié. Selon cette approche, plusieurs schémas hydrauliques peuvent encore être proposés. En particulier, deux modèles, utilisant des hypothèses différentes mais géologiquement plausibles et permettant d'obtenir un calage satisfaisant, sont discutés ci-après. Les transmissivités de failles appliquées dans l'Oxfordien et le Callovo-Oxfordien (figure 6) sont identiques dans les deux modèles. C'est au niveau de l'aquifère sous-jacent du Dogger en revanche que les deux modèles diffèrent. Dans le cas n° 1, une perméabilité de matrice très faible est imposée dans la formation (figure 7). À cette perméabilité globale sont associés un réseau de failles locales à transmissivité de fracture élevée, notamment une faille orientée NO-SE située dans l'axe d'une rivière, la Saulx, et des transferts hydrauliques relativement importants au travers des grands accidents structuraux du secteur. Il est à noter qu'aucune faille n'a été reconnue dans l'axe de la Saulx, mais les observations de surface et géophysiques *in situ* sont peu nombreuses dans ce secteur. La présence d'une telle structure

n'est pas exclue, notamment du fait de l'observation d'importantes anomalies du réseau de drainage, et de l'orientation NO de la rivière, proche de celle de la contrainte tectonique horizontale maximale actuelle, qui tend à maintenir ouvertes, et donc à rendre conductrices, les structures de cette orientation. Dans le cas n° 2, les transmissivités de failles sont imposées différemment, avec notamment une transmissivité moindre au niveau de la Saulx dans le Dogger. Le calage du modèle nécessite alors l'élargissement de la zone plus transmissive se trouvant à proximité des affleurements du Bajocien (Dogger inférieur) et l'attribution, à la partie est du secteur, d'une zone de faible perméabilité, pour tout le Dogger (figure 8). La modification de la zone d'affleurement du Bajocien est, pour l'IRSN, compatible avec les observations de terrain qui montrent que cette formation est plus karstifiée⁽¹⁾ à l'affleurement que celle du Bathonien.

(1) Les formations calcaires sont souvent soumises à un phénomène de karstification lorsqu'elles affleurent. Il s'agit d'une altération des calcaires lorsqu'ils sont en contact avec l'air, les rendant ainsi beaucoup plus perméables.

5.3

Ces modèles prenant explicitement en compte la présence de failles conductrices reproduisent les charges mesurées dans l'Oxfordien et le Dogger de manière satisfaisante, tout en privilégiant dans les couches géologiques des paramètres cohérents avec ceux issus des investigations de terrain. Les **tableaux 2 et 3** présentent le calage ainsi obtenu pour le cas n° 1 et le cas n° 2. Au niveau du site de Meuse – Haute-Marne, l'écart moyen est inférieur à 2 m dans l'Oxfordien, et ce pour les deux modèles (**figure 9**). Dans le Dogger, l'écart entre les valeurs calculées et mesurées est de 0,2 m pour le premier modèle et de 2,4 m pour le second (**figure 10**). Le premier modèle, *a priori* plus pénalisant (cas n° 1 où les failles sont plus transmissives), a été retenu pour simuler le transport des radionucléides du toit de la formation hôte du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires de la biosphère.

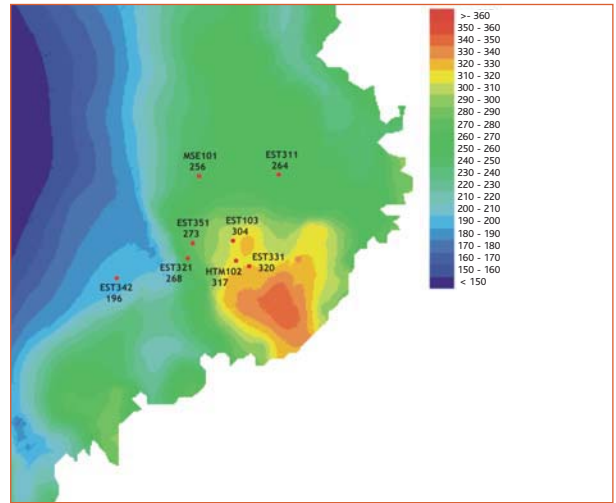


Figure 9 : Charges calculées et mesurées au niveau du site de MHM – Oxfordien (modèle avec failles).

Résultats des simulations du transport de radionucléides

Transfert des radionucléides au travers de la couche hôte et des ouvrages

Étant donné que les valeurs des vitesses d'écoulement dans la couche hôte sont extrêmement faibles (0,4 µm/an) du fait de la très faible perméabilité du Callovo-Oxfordien, entre $5 \cdot 10^{-13}$ et $5 \cdot 10^{-14}$ m/s, la diffusion est le régime de transfert dominant des radionucléides au travers de la couche hôte homogène. Dans les ouvrages, les vitesses d'écoulement varient d'un à deux ordres de grandeur suivant les performances des scellements. Dans l'hypothèse défavorable d'un défaut de scellement, les valeurs des vitesses dans les tunnels restent néanmoins faibles (de l'ordre de 5 mm/an). Ces faibles vitesses sont notamment dues à l'apport d'eau limité dû à la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et à l'architecture borgne des tunnels de stockage. Au niveau des tunnels de stockage, du fait du caractère diffusif du transfert des radionucléides et de l'importante surface d'échange entre la roche et un tunnel, un pourcentage important de la masse relâchée par les colis (80 à 90 % pour l' ^{129}I) est transféré des tunnels vers

la roche. Cette masse diffuse alors vers le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien dans le sens des gradients de concentration. De plus, la majeure partie de la masse initialement relâchée vers les galeries est transférée vers la roche. En effet, les longueurs importantes des galeries de liaison contribuent à diminuer les gradients hydrauliques entre les tunnels de stockage et les puits, et à favoriser la diffusion des panaches d'activité vers la couche d'argile au travers des surfaces d'échange entre les galeries et la formation hôte. Ces caractéristiques du stockage permettent donc de limiter les flux de radionucléides qui transitent vers le puits d'accès. La **figure 11** présente le débit molaire d' ^{129}I au sortir d'un puits et du Callovo-Oxfordien (toit et mur⁽¹⁾). Pour ces calculs, le gradient ascendant est de 0,2 m/m.

Les débits molaires calculés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien (permettant d'estimer les transferts au travers de la couche hôte) et au sortir du puits (permettant d'estimer les transferts au travers des

(1) Le mur correspond à la limite inférieure de la formation, le toit à sa limite supérieure.

Tableau 4

Synthèse des résultats pour le puits et le Callovo-Oxfordien						
Sortie	Valeur du débit molaire maximal (mol/an)		Temps d'obtention du débit molaire maximal (an)		Pourcentage d'activité sortant au toit du Callovo-Oxfordien (COX) et au puits par rapport à l'activité totale relâchée (%)	
	Puits	COX sain	Puits	COX sain	Puits	COX sain
^{129}I (SEN)	$1,02 \times 10^{-4}$	$9,24 \times 10^{-2}$	520 000	240 000	0,07	77,6
^{36}Cl (SEN)		$6,19 \times 10^{-4}$		180 000		32,1
^{79}Se (SEN)		$1,39 \times 10^{-6}$		1 000 000		0,04
^{129}I (SEA)	$2,09 \times 10^{-3}$	$9,13 \times 10^{-2}$	260 000	240 000	2,1	75

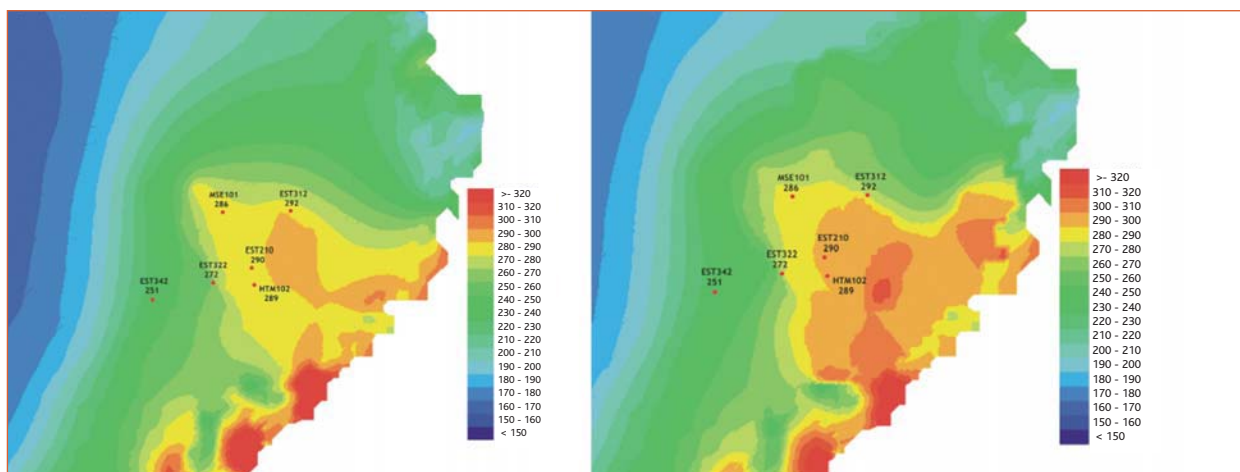


Figure 10 : Charges calculées et mesurées au niveau du site de MHM – Dogger (modèle avec failles).

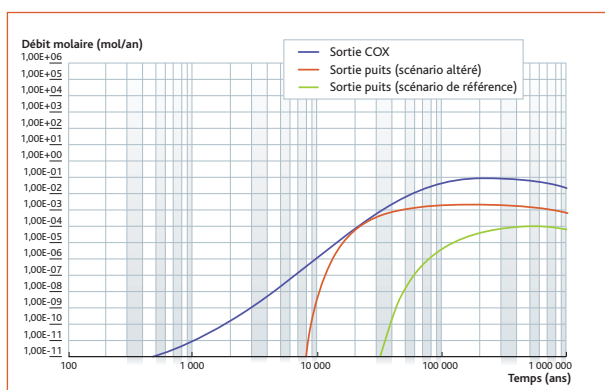


Figure 11 : Débit molaire d' ^{129}I au sortir d'un puits et du Callovo-Oxfordien (toit et mur).

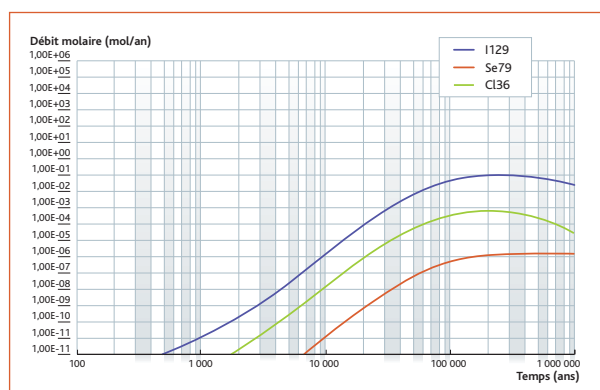


Figure 12 : Débits molaires d' ^{129}I , de ^{79}Se et de ^{36}Cl au sortir du Callovo-Oxfordien (toit et mur).

ouvrages) montrent que la formation hôte est la principale voie de transfert des radionucléides quel que soit le scénario envisagé sur les performances des scellements (figure 12 et tableau 4). Au bout d'un million d'années de simulation, pour ^{129}I , 78 % de la masse relâchée par les colis est sortie par le toit et le mur du Callovo-Oxfordien alors que seulement 0,07 % de cette masse est sortie par le puits, et que le pourcentage d'activité restante dans la couche hôte correspond à plus de 20 % de la masse injectée initialement.

La figure 12 montre les résultats de simulations du transfert de trois radionucléides (^{129}I , ^{79}Se et ^{36}Cl) au sortir du Callovo-Oxfordien. Au toit et au mur de la formation, ^{129}I est le radionucléide pour lequel les débits molaires sont les plus importants (0,1 mol/an) avec un écart d'environ deux ordres de grandeur du ^{36}Cl et cinq ordres de grandeur du ^{79}Se . Le maximum de débit molaire estimé pour le ^{36}Cl est obtenu plus tôt que pour ^{129}I , la période du ^{36}Cl étant du même ordre de grandeur que le temps de transfert au travers du Callovo-Oxfordien. Le relâchement du ^{79}Se est contrôlé par la faible solubilité dans l'argile, comme l'indique la forme de la courbe de flux avec un palier caractéristique d'un contrôle par précipitation autour des colis.

Les courbes de flux de ^{129}I et de ^{36}Cl sont quant à elles caractéristiques d'un régime de transfert diffusif fortement influencé par l'épaisseur de la couche hôte au regard des temps de dégradation des colis.

Pour le SEA, les débits molaires en sortie du puits augmentent d'un facteur 20 par rapport au scénario de référence lorsque les scellements ne sont pas ancrés. De plus, à 20 000 ans, les débits molaires en sortie du puits sont équivalents aux débits molaires en sortie de la roche saine du fait de l'augmentation de la vitesse d'écoulement dans les galeries limitant l'influence de la diffusion vers le Callovo-Oxfordien. Un régime quasi stationnaire s'établit ensuite avec des débits molaires maximaux au sortir du puits inférieurs de plus d'un ordre de grandeur aux débits molaires maximaux en sortie de la roche saine. Pour ce scénario également, le pourcentage de masse relâchée à la sortie de la roche hôte reste très supérieur à celui de la masse relâchée par le puits (75 % contre 2 %). Toutefois, au regard du rapport entre la surface du puits et l'emprise du stockage au toit du Callovo-Oxfordien (qui est de l'ordre de 50 000), il apparaît que le rapport des débits maximaux entre les deux voies de transfert est plus faible, que ce soit pour le SEN (égal à 1 000) ou pour le SEA (égal à 50, figure 12).

5.3

Ce qui traduit le fait que même si une part majoritaire de l'activité diffuse au travers de la roche saine, les galeries et le puits sont dans tous les cas des drains importants de l'activité sortant des colis.

Transfert des radionucléides du Callovo-Oxfordien jusqu'aux exutoires de la biosphère

Le modèle hydrogéologique retenu pour servir de base aux simulations du transport des radionucléides du toit de la formation hôte vers la surface au travers des aquifères de l'Oxfordien et du Portlandien (cas n° 1 présenté ci-dessus) postule, entre autres, la présence de failles conductrices dans l'Oxfordien et une perméabilité de matrice faible de la formation du Dogger. Par ailleurs, compte tenu des incertitudes portant sur la valeur du coefficient de diffusion (D_p) dans les aquifères, une étude de sensibilité sur ce paramètre est réalisée afin d'en estimer l'influence. Les valeurs choisies sont égales à 10^{-9} , 10^{-10} et 10^{-12} m^2/s . La source de soluté radioactif entrant dans les formations sus-jacentes au Callovo-Oxfordien est le débit molaire de ^{129}I calculé au toit de la couche hôte du Callovo-Oxfordien au droit du stockage. Lors du transfert, le panache radioactif est soumis à des phénomènes de dilution et de dispersion dus à l'eau circulant dans les aquifères de l'Oxfordien. La diffusion dans les niveaux semi-perméables de l'Oxfordien et du Kimméridgien contribue également à étaler le panache au fur et à mesure de son développement. Les trajectoires et les temps de transfert associés dépendent donc de l'influence relative de ces différents phénomènes, liée en particulier à la présence d'hétérogénéités structurales. Le transfert de ^{129}I au travers des formations sus-jacentes au Callovo-Oxfordien met en évidence un exutoire « naturel » situé à la surface (Portlandien), et un second exutoire « artificiel » situé dans l'Oxfordien dans une zone de forte transmissivité, à 5 km à l'ouest du site de stockage, où pourrait être positionné un forage d'alimentation en eau

(figures 3 et 13). Pour l'exutoire « naturel » situé dans l'aquifère du Portlandien à l'aplomb du stockage, le maximum de débit molaire est obtenu, suivant les valeurs de coefficient de diffusion choisies, entre 350 000 et 550 000 ans après les premiers relâchements hors des colis de déchets (tableau 5).

Le transfert des radionucléides vers cet exutoire est contrôlé par la diffusion au travers des semi-perméables et par le phénomène de diffusion/dispersion au travers des aquifères. Comme le montrent les résultats de la figure 14 (débits molaires aux exutoires des encaissements supérieurs), les débits molaires augmentent proportionnellement aux valeurs des coefficients de diffusion des couches géologiques.

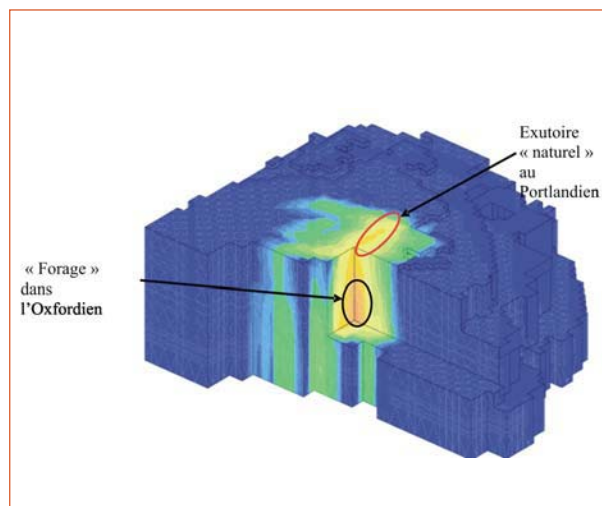


Figure 13 : Isovaleurs de concentration à 500 000 ans et localisation des exutoires.

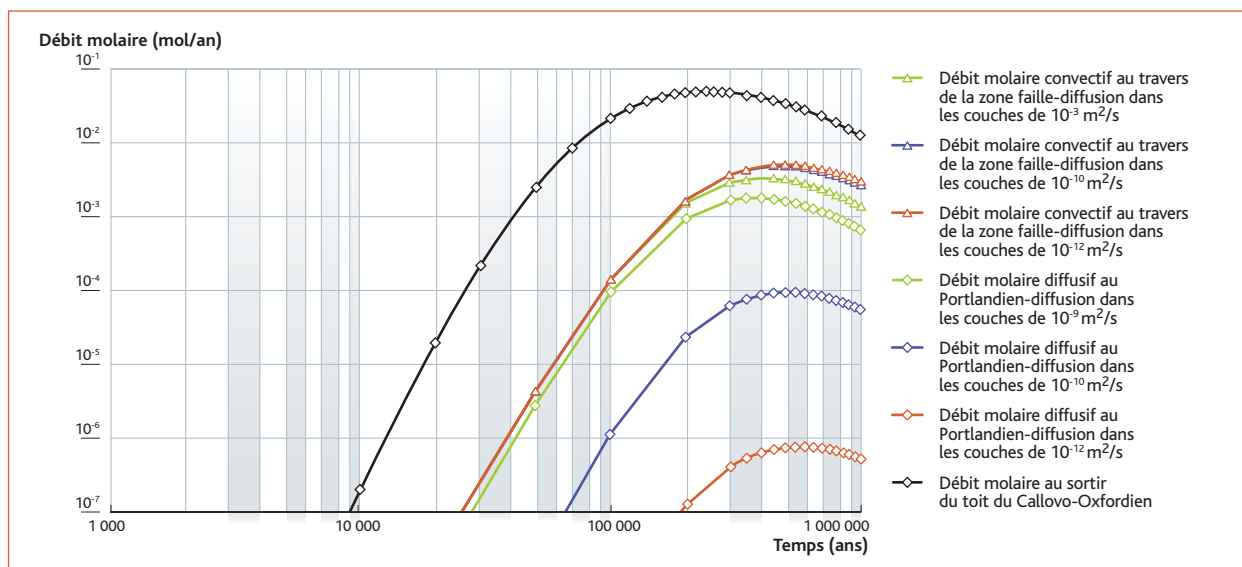


Figure 14 : Débits molaires d' ^{129}I , de ^{79}Se et de ^{36}Cl au sortir du Callovo-Oxfordien (toit et mur).

Tableau 5

Synthèse des résultats aux exutoires « naturel » et « forage » pour ¹²⁹ I						
	Valeur du débit molaire maximal (mol/an)		Temps d'obtention du débit molaire maximal (années)		Pourcentage d'activité sortie à 1 Ma au toit du COX par rapport à l'activité totale relâchée (%)	
	Exutoire « naturel »	Exutoire « artificiel »	Exutoire « naturel »	Exutoire « artificiel »	Exutoire « naturel »	Exutoire « artificiel »
Dp = 10 ⁻⁹ m ² /s	3,28 x 10 ⁻³	1,80 x 10 ⁻³	350 000	400 000	3,9	7,3
Dp = 10 ⁻¹⁰ m ² /s	9,57 x 10 ⁻⁵	4,83 x 10 ⁻³	500 000	500 000	0,2	11,2
Dp = 10 ⁻¹² m ² /s	7,88 x 10 ⁻⁷	4,93 x 10 ⁻³	550 000	500 000	0,002	11,8

Pour ce qui concerne l'exutoire dit « artificiel », le maximum de débit molaire de ¹²⁹I est obtenu entre 400 000 et 500 000 ans (tableau 5).

Le régime de transfert vers cette zone étant dominé par la convection au travers des aquifères de l'Oxfordien et de la zone de faille, l'activité est diluée de manière importante lors du transfert de ¹²⁹I : un facteur 400 entre les concentrations maximales au toit du Callovo-Oxfordien et les concentrations maximales au niveau du forage. Néanmoins l'activité totale relâchée à cet exutoire reste plus importante, environ 10 % de la masse relâchée au toit du Callovo-Oxfordien, que celle relâchée à l'exutoire « naturel », qui varie entre 0,002 et 3,9 % (tableau 5).

L'analyse de sensibilité réalisée montre que cet exutoire dépend peu des coefficients de diffusion caractérisant les couches géologiques traversées. Les valeurs de débit molaire (figure 14) restent du même ordre de grandeur quelle que soit la valeur de diffusion, mais on peut noter que les débits molaires, dans le cas d'un coefficient de diffusion de 10⁻⁹ m²/s, sont plus faibles du fait de l'augmentation des débits molaires obtenus à l'exutoire « naturel ». On note que, dans ce cas, les deux exutoires sont d'importance similaire, ce qui a pour conséquence de donner un poids non négligeable aux paramètres de diffusion dans les encaissants.

■ Conclusion et perspectives

Hormis le colis, dont l'influence sur le relâchement des radionucléides ne fait pas l'objet de la présente étude, les débits molaires obtenus au travers du stockage sont contrôlés par les deux éléments essentiels du concept de stockage que sont la formation hôte et les dispositifs de scellement destinés à empêcher les mouvements d'eau. L'influence respective de ces deux éléments mérite toutefois d'être examinée à la lumière des enseignements que l'on peut tirer des modélisations précédentes.

Lorsque les scellements sont défectueux, on observe l'établissement d'un régime de transfert pour lequel l'influence de la convec-

tion est plus marquée dans les galeries et le puits, ce qui a une influence sur la répartition des transferts entre les tunnels de stockage (jusqu'au puits) et la formation hôte. Mais les transferts au travers de la formation restent dominants quel que soit le scénario étudié, du fait notamment des surfaces d'échange importantes entre les ouvrages et la couche géologique qui favorisent la diffusion des radionucléides vers les argilites. L'architecture borgne des modules de tunnels de stockage contribue également à maintenir un régime diffusif au voisinage des tunnels.

De ce fait, la formation hôte continue de jouer un rôle de « pompe » pour le panache de radionucléides, même dans l'hypothèse d'un écoulement convectif dans le stockage, sous réserve que ses propriétés chimiques et hydrauliques soient préservées dans l'environnement du stockage. Les propriétés de confinement de la formation hôte et l'architecture du stockage sont donc des facteurs essentiels pour la sûreté de l'installation. Ces résultats confirment les enseignements de l'exercice BENIPA [8], qui avait permis de hiérarchiser l'importance des différentes barrières en bentonite destinées à maintenir ou à rétablir un régime d'écoulement diffusif dans les ouvrages et de préciser le rôle et l'importance des argiles à Opalinus en fonction des différents scénarios d'évolution étudiés.

La définition des exutoires nécessite de caractériser les régimes d'écoulements souterrains ainsi que les discontinuités conductrices potentielles, qu'il s'agisse d'un forage d'alimentation en eau dans une zone perméable ou d'un exutoire « naturel ». La simulation du transport des radionucléides au travers des formations perméables et semi-perméables nécessite également de quantifier le phénomène de transfert par diffusion. Ce phénomène est reconnu comme dominant au travers de la formation homogène du Callovo-Oxfordien et a donné lieu à des études visant à le préciser.

Néanmoins les modélisations précédentes montrent qu'un tel phénomène doit également être l'objet d'une caractérisation plus précise dans les encaissants hydrauliques afin de discriminer

l'importance d'exutoires plus diffus dans des zones à l'écart des discontinuités hydrauliques. À défaut, les incertitudes résultant d'un manque de connaissance sur ce point doivent être prises en compte par une analyse de sensibilité.

Enfin, les résultats obtenus pour les différentes simulations d'écoulement ont mis en évidence, au niveau du site de Meuse – Haute-Marne, le fait que le calage des charges hydrauliques dans les formations encaissantes pouvait être obtenu avec différents schémas d'écoulements profonds, faisant jouer ou non un rôle hydrau-

lique aux structures identifiées ou soupçonnées dans le secteur d'étude. La modélisation du transport de radionucléides relâchés par un éventuel stockage doit à ce stade faire l'objet d'une étude de sensibilité afin d'évaluer l'influence de ces différentes représentations d'écoulements souterrains sur les temps de transfert et concentrations des panaches de radionucléides aux exutoires. Des études hydrogéologiques de terrain supplémentaires seront nécessaires s'il est entrepris de réduire le nombre de modèles d'écoulement envisageables sur ce site représentatif.

Références

- [1] ANDRA, « Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse – Document de synthèse », Dossier Argile 2005.
- [2] BOURGEOIS, M., « MÉLODIE – Modèle d'évaluation à long terme des déchets irradiants enterrés – Notice théorique 2002 », IRSN/DPRE/SERGD/02-13, 2002.
- [3] ANDRA, *Tome d'évaluation de sûreté du stockage géologique*, Dossier Argile 2005.
- [4] ANDRA, *Tome d'architecture et de gestion du stockage géologique*, Dossier Argile 2005.
- [5] IRSN, Rapport DSU n° 106, 2005.
- [6] GROS, J.-C., BODILIS, S., « BPDATA (Base de données géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques sur le bassin de Paris », IRSN – DEI/SARG, version 2.6.
- [7] GUILLOCHEAU *et al.*, « Évolution géodynamique du bassin de Paris : apport d'une base de données stratigraphiques 3D », *Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris*, volume 36, n° 4, décembre 1999.
- [8] PELLEGRINI, D., BESNUS, F., CERTES, C., DELERUYELLE, F., SERRES, C., « Lessons Learnt from IRSN Modelling Performed for the 5th EC PCRD BENIPA », Eurosafe 2003.