

Projet de stockage Cigéo Ouvrages de fermeture

RAPPORT IRSN N° 2014-00006

Réunion du groupe permanent d'experts pour les « Déchets »
du 1^{er} juillet 2014

RESUME DU RAPPORT

Le présent rapport constitue l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier de l'Andra relatif aux ouvrages de fermeture du stockage de déchets radioactifs de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL) en formation géologique profonde actuellement en projet (Cigéo). Ce Dossier se situe à la fin de la phase « d'esquisse » (mi-2013) et précède les phases d'« Avant-Projet Sommaire » (APS) et d'« Avant-Projet Détaillé » (APD) que l'Andra prévoit de développer jusqu'en 2017.

Au terme d'une exploitation séculaire, il est prévu que la partie souterraine de l'installation de stockage soit remblayée et scellée. À la différence d'un simple remblai, un scellement est un ouvrage localisé, de dimensions décimétriques avec une performance hydraulique requise, construit dans les liaisons surface-fond (puits et descenderies), dans les galeries de liaison et aux extrémités des alvéoles de stockage de déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL). Les alvéoles de stockage de déchets de haute activité (HA) sont quant à eux obturés par des ouvrages plus petits (environ 70 cm de diamètre, quelques mètres de longueur) appelés « bouchons HA ». Ces dispositifs dits « de fermeture » (scellements de liaisons surface-fond, scellements de fond et bouchons d'alvéoles HA) participent aux fonctions de sûreté du stockage et ont notablement évolué depuis le « Dossier 2005 » de l'Andra. À cet égard, il convient de rappeler que l'Andra s'était engagée à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 » à étudier, en vue de la demande d'autorisation de création du stockage (DAC), des concepts de référence plus simples que ceux présentés alors et pour lesquels suffisamment d'éléments probants quant à la démonstration de leur faisabilité industrielle pourraient être réunis. Le présent Dossier permet d'apprécier, à ce stade du projet, la pertinence des objectifs de performance retenus par l'Andra pour les ouvrages de fermeture précités ainsi que celle des concepts proposés pour les atteindre et l'impact possible sur leurs performances des perturbations auxquelles ces ouvrages pourraient être soumis après la fermeture du stockage.

S'agissant des scellements, l'Andra retient un schéma de principe composé d'un noyau en argile gonflante encadré de deux massifs « d'appui » en béton. En fonction de l'endommagement présent à la paroi de l'ouvrage à sceller, l'Andra prévoit une dépose totale (cas des liaisons surface-fond) ou partielle (cas des scellements de fond, *i.e.* de galeries et d'alvéoles MAVL) des revêtements en béton afin d'assurer un contact direct du noyau argileux avec la roche. Les éléments en béton laissés en place à proximité des scellements seront de type « bas pH » afin de limiter la perturbation chimique des argiles.

Sur cette base, l'Andra décline les options techniques retenues pour les scellements « composant par composant » (noyau argileux, interface avec la roche, zone endommagée en paroi...) avec une attention particulière portée aux performances hydromécaniques des composants pouvant être justifiées par des résultats de recherche et des essais relatifs à leur faisabilité industrielle.

La principale fonction de sûreté attribuée par l'Andra aux scellements est de « s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage », avec une contribution plus importante attendue des scellements de liaisons surface-fond, en cohérence avec le guide de sûreté de l'ASN. L'Andra considère que leur implantation au toit de la formation hôte,

dans des unités plus carbonatées où la paroi des ouvrages est moins endommagée, permet de viser une perméabilité équivalente « en grand » de l'ordre de 10^{-11} m/s, soit du même ordre de grandeur que celle retenue dans le « Dossier 2005 ». L'IRSN estime, compte tenu de la configuration de ces scellements en puits ou en descenderie, qui facilite leur mise en œuvre à l'échelle industrielle, que cet objectif peut être atteint. Il sera toutefois nécessaire de confirmer l'atteinte de cet objectif par la réalisation d'un essai en vraie grandeur, d'ores et déjà prévu par l'Andra en descenderie pendant la « phase pilote » de Cigéo. En outre, l'IRSN considère que le concept de scellement retenu pour la descenderie devrait concerner une hauteur de Callovo-Oxfordien supérieure à celle visée à ce stade.

S'agissant des scellements de fond, leur implantation est prévue dans l'unité la plus argileuse de la formation hôte où une EDZ (*Excavation Damaged Zone*) est attendue à la paroi des ouvrages. Sur la base d'observations réalisées *in situ* et sur échantillons montrant que cette EDZ peut s'auto-colmater sous certaines conditions, l'Andra retient un concept « de référence » du scellement de fond prenant en compte cet auto-colmatage. En parallèle, l'Andra poursuit l'étude d'une variante avec « coupures hydrauliques » de l'EDZ dont les performances ne reposeraient pas nécessairement sur ce processus d'auto-colmatage et qui permettrait en outre d'interrompre une EDZ plus conductrice. L'Andra vise une perméabilité équivalente « en grand » des scellements de fond inférieure ou égale à 10^{-9} m/s, soit d'un ordre de grandeur plus élevé que dans le « Dossier 2005 ».

L'IRSN observe que cette valeur limite découle principalement de la perméabilité de la zone d'argilites en paroi des ouvrages, retenue de manière prudente par l'Andra à partir des connaissances actuelles en matière de maîtrise de l'endommagement. L'IRSN estime qu'une valeur de perméabilité équivalente « en grand » des scellements égale à la valeur limite ainsi identifiée (10^{-9} m/s) peut, le cas échéant, être retenue dans le cadre d'évaluations pénalisantes dans la démonstration de sûreté (à titre conservatif pour les calculs d'impact, par exemple) mais ne constituerait pas un objectif de performance suffisant à ce stade du projet, *i.e.* en phase d'optimisation pour limiter notamment le transfert de radionucléides par la voie des ouvrages de liaison. En effet, cette valeur limite, avec les concepts présentés par l'Andra, ne permettrait pas de maintenir la prédominance de la voie de transfert par la roche hôte en cas de défaillance de scellements de liaison surface-fond et éviter ainsi l'apparition de « points chauds » au droit des ouvrages de liaison surface-fond.

À cet égard, sur la base de ses propres simulations, l'IRSN estime que l'architecture générale du stockage est à même d'apporter des marges supplémentaires de sorte qu'en cas de défaillance d'un ou de plusieurs scellements de liaisons surface-fond, la voie de transfert par la formation hôte reste prépondérante. Aussi, l'IRSN recommande que l'Andra justifie, dans le « Dossier d'options de sûreté », que l'architecture retenue est optimisée à ce stade du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, sur la base d'une étude présentant les avantages et inconvénients des dispositions de conception envisagées eu égard à l'objectif de réduire les relâchements à long terme via les ouvrages et d'assurer la sûreté en exploitation.

Enfin, l'IRSN estime qu'il est nécessaire de poursuivre toutes études susceptibles d'une part de limiter l'endommagement de la roche, d'autre part de réduire la perméabilité de l'EDZ. À cet égard, l'Andra s'est engagée à poursuivre pendant la « phase pilote » de Cigéo le développement de la variante avec coupures hydrauliques de l'EDZ, qui pourrait augmenter sensiblement l'efficacité du scellement de fond mais qui nécessite, en plus d'éléments de démonstration *in situ* à l'échelle 1, la mise au point d'un procédé industriel.

L'Andra présente une évolution phénoménologique des scellements dont l'analyse est encore en cours. À ce stade, il ressort de celle-ci que la sollicitation hydraulique-gaz des scellements de liaisons surface-fond est particulière du fait d'une part, de leur resaturation et mise en charge hydraulique relativement rapides en partie haute par les eaux de l'Oxfordien calcaire et d'autre part, de l'absence d'EDZ en paroi conduisant à une possible sollicitation directe du noyau argileux par les gaz. Compte tenu de l'importance prépondérante des scellements de liaisons surface-fond pour la sûreté en phase post-fermeture du stockage, l'IRSN considère que l'évaluation de l'impact de ces sollicitations sur ces scellements doit être confortée. Par ailleurs, l'Andra devra vérifier que l'activité bactérienne ne remet pas en cause l'efficacité des ouvrages de fermeture.

S'agissant de l'utilisation du béton bas pH, l'IRSN convient que ce choix est favorable à la limitation des perturbations chimiques à long terme des argiles. Des incertitudes relatives à la dégradation physico-chimique de ces bétons, pouvant avoir des conséquences importantes en termes de propriétés mécaniques, demeurent néanmoins à ce stade. En particulier, l'IRSN estime que la tenue mécanique d'un béton bas pH pourrait être plus sensible à l'homogénéité du mélange de ses constituants lors de sa mise en œuvre, ce qui pourrait avoir des conséquences pendant la période d'exploitation s'il était mis en place dès la construction du stockage. Des travaux sont en cours visant à réduire ces incertitudes, notamment une solution technique de co-broyage des constituants évoquée par l'Andra pour assurer l'homogénéité du béton lors de sa mise en place. Ces études vont dans le sens d'une amélioration de la maîtrise des composants ouvragés à base de bétons bas pH. Néanmoins, l'IRSN s'interroge à ce stade sur le bien-fondé du choix d'un béton bas pH par rapport aux bétons classiques pour les éléments autres que les parties de revêtement non déposées des scellements de fond, où le gain substantiel en terme de préservation des propriétés des argiles apporté par ce matériau innovant pourrait être obtenu avec un matériau plus classique et des dispositions de dimensionnement adaptées. Les résultats d'études à venir de l'Andra devraient permettre de lever cette interrogation.

S'agissant des bouchons HA, les principales fonctions que l'Andra leur attribue sont de « limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques » et de « retarder et atténuer leur migration » ; concernant la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau », l'Andra estime qu'en situation de fonctionnement normal, leur contribution à cette fonction dépend peu de leur perméabilité hydraulique et ne leur en spécifie donc plus. Cette approche amène l'Andra à confirmer le concept présenté dans le « Dossier 2009 » d'un bouchon HA mis en place dans le chemisage métallique (appelé « insert », en tête d'alvéole), sans déposer de celui-ci, bien que sa dégradation par corrosion soit attendue à long terme. L'IRSN indique qu'à ce stade, ses propres évaluations et simulations ne remettent pas en cause l'option de conception avec insert mais considère que l'Andra devra en apporter la démonstration. À cet égard, des évaluations complémentaires hors situation de fonctionnement normal sont prévues par l'Andra et dans l'hypothèse où elles montreraient un intérêt à la dépose de l'insert, des essais prévus au Laboratoire souterrain seront à même d'apporter des éléments relatifs à la faisabilité et à la performance d'un concept avec dépose de l'insert. Enfin, s'agissant des perturbations subies par les ouvrages de fermeture pendant les différentes phases de vie du stockage, l'IRSN estime que l'analyse de l'évolution phénoménologique des bouchons HA, à l'instar de celle relative aux scellements, nécessite d'être confortée par des études et essais complémentaires relatifs aux évolutions, en tête d'alvéole, thermique, hydraulique, mécanique, chimique et de la sollicitation due aux gaz.

Enfin, pour ce qui concerne la réversibilité, l'IRSN considère que les opérations de retrait des colis nécessiteraient une déconstruction des ouvrages de fermeture (bouchons d'alvéoles HA, scellements) lourde et délicate. À cet égard, une validation expérimentale de ces opérations est nécessaire. L'Andra a indiqué que des essais de réouverture d'alvéoles pourraient être envisagés pendant la phase pilote de Cigéo.

SOMMAIRE

RESUME DU RAPPORT	1
1 INTRODUCTION	7
1.1 OBJET DU PRESENT RAPPORT	7
1.2 CONTEXTE	8
1.3 PRESENTATION DU DOSSIER.....	11
1.4 PRESENTATION GENERALE DU PROJET CIGEO	11
1.4.1 Le Centre industriel de stockage géologique	11
1.4.2 La fermeture du stockage.....	15
2 FONCTIONS DE SURETE ET OUVRAGES DE FERMETURE	16
2.1 OBJECTIF FONDAMENTAL DE SURETE	16
2.2 FONCTIONS DE SURETE APRES LA FERMETURE DU STOCKAGE	16
2.3 ROLE DES OUVRAGES DE FERMETURE VIS-A-VIS DES FONCTIONS DE SURETE.....	16
3 LES SCHELLEMENTS	18
3.1 DEMARCHE D'ANALYSE.....	18
3.2 SCHEMAS DE PRINCIPE - OBJECTIF PRELIMINAIRE DE PERMEABILITE	18
3.3 LES COMPOSANTS	22
3.3.1 La zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages	22
3.3.2 Le noyau argileux.....	28
3.3.3 L'interface du noyau avec la roche	35
3.3.4 Les massifs de confinement	37
3.3.5 Variante du scellement de fond avec coupures hydrauliques	42
3.3.6 Intégration des contraintes liées à la radioprotection du personnel dans l'étude de faisabilité technique des scellements.....	46
3.4 OBJECTIFS DE PERFORMANCE HYDRAULIQUE DES SCHELLEMENTS	47
3.5 IMPACT DES PERTURBATIONS	50
3.5.1 Contexte thermique.....	50
3.5.2 Transitoire hydraulique-gaz	50

3.5.3 Perturbations liées aux interactions béton-argiles	56
3.5.4 Impact des bactéries.....	60
3.5.5 Transitoire hydromécanique.....	60
3.5.6 Conclusion sur la phénoménologie prise en compte	64
3.6 ROLE DES SCHEMEMENTS SUR LA PERFORMANCE GLOBALE DU STOCKAGE	64
4 LE BOUCHON D'ALVEOLE HA	68
4.1 OBJECTIF DE PERFORMANCE HYDRAULIQUE DU BOUCHON D'ALVEOLE HA	71
4.2 FONCTIONS « PROTEGER LES COLIS », « ATTENUER-RETARDER LES RELACHEMENTS »	75
4.3 LES COMPOSANTS	75
4.3.1 La zone d'argilites endommagées en paroi d'alvéole.....	75
4.3.2 Le noyau argileux.....	77
4.3.3 L'interface du noyau avec la roche (l'insert)	77
4.3.4 Le dispositif de confinement	78
4.3.5 Intégration des contraintes liées à la radioprotection du personnel	79
4.4 IMPACT DES PERTURBATIONS	79
4.4.1 Contexte thermique.....	79
4.4.2 Transitoire hydraulique-gaz	79
4.4.3 Transitoire chimique	80
4.4.4 Impact des bactéries.....	81
4.4.5 Transitoire hydromécanique.....	81
4.4.6 Conclusion sur la phénoménologie prise en compte	82
4.5 CONCLUSION RELATIVE AU BOUCHON D'ALVEOLE HA	82
5 ASPECTS LIES A LA REVERSIBILITE	83
6 CONCLUSION GENERALE	85
REFERENCES.....	88
LISTE DES TABLEAUX	91
LISTE DES FIGURES	92

1 INTRODUCTION

1.1 OBJET DU PRESENT RAPPORT

Par lettre ASN/CODEP-DRC-2013-055527 du 5 novembre 2013 [1] (cf. Annexe A1 du présent rapport), le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé au Président du groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD) l'avis du groupe d'experts qu'il préside sur le Dossier « Projet Cigéo - ouvrages de fermeture ». La lettre CODEP-DRC-2013-055527 précitée précise que « *ce dossier est à considérer dans la continuité des dossiers déjà déposés par l'Andra et examinés par le groupe permanent d'experts pour les déchets sur le projet de stockage en couche géologique profonde* » et que cet examen devra porter en particulier sur :

- « *la pertinence des objectifs de performance retenus par l'Andra pour les scellements des galeries et des liaisons jour-fond ainsi que les bouchons d'alvéole HA ;*
- *la pertinence des concepts proposés pour atteindre ces objectifs, en tenant compte notamment des contraintes liées à la réversibilité ainsi que des perturbations hydromécaniques (incluant celles liées aux gaz), chimiques et bactériennes auxquelles ces ouvrages pourraient être soumis ;*
- *la faisabilité industrielle des ouvrages présentés ».*

Le présent rapport constitue l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) relatif au Dossier « Projet Cigéo - Ouvrages de fermeture » présenté lors de la réunion du GPD du 1^{er} juillet 2014. Cet avis tient compte des compléments recueillis au cours de l'instruction ainsi que des engagements pris par l'Andra par la lettre DG/14-0162 du 3 juin 2014 citée en référence [37] et jointe en annexe A2 du présent rapport.

Le premier chapitre du présent rapport rappelle le contexte général de la demande de l'ASN et présente le Dossier de l'Andra intitulé « Ouvrages de fermeture » ainsi qu'un aperçu général du projet de stockage géologique développé par l'Andra nommé Cigéo (Centre industriel de stockage géologique). Le chapitre 2 rappelle les fonctions de sûreté attribuées par l'Andra aux différents ouvrages de fermeture du stockage que sont les scellements et les bouchons d'alvéoles de stockage de déchets de haute activité (HA). Le chapitre 3 présente l'examen par l'IRSN de la pertinence des objectifs de performance attribués par l'Andra aux ouvrages de scellement, de celle des options de conception retenues pour ces ouvrages et de leur rôle sur la performance globale du stockage. Le chapitre 4 présente l'examen par l'IRSN de la pertinence des objectifs de performance attribués par l'Andra aux bouchons d'alvéoles HA ainsi que de celle des options de conception retenues. L'examen par l'IRSN de la réversibilité des options de conception des ouvrages de fermeture retenues par l'Andra est présenté au chapitre 5 du présent rapport. Le chapitre 6 présente la conclusion générale de l'IRSN sur le Dossier examiné.

Les conclusions de l'IRSN résultant de l'instruction sont repérées dans le texte de la façon suivante :

- en **caractères gras encadrés** figurent les conclusions qui font l'objet de propositions de recommandations présentées lors de la réunion du GPD ;
- en **caractères gras précédés d'une barre verticale** figurent les conclusions ayant fait l'objet d'engagements de la part de l'Andra à l'issue de la réunion préparatoire à la réunion du groupe permanent, par la lettre DG/14-0162 du 3 juin 2014 ;

- en caractères gras sont mentionnées les autres conclusions de l'IRSN.

En outre, sauf mention contraire, les échéances associées aux recommandations de l'IRSN et aux engagements de l'Andra font référence au Dossier qui accompagnera la Demande d'autorisation de création (DAC) du projet Cigéo.

1.2 CONTEXTE

La lettre CODEP-DRC-2013-055527 précitée rappelle que la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs prévoit la poursuite des études et recherches sur le stockage réversible en couche géologique profonde « *de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. °542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015* ».

Cette réunion du GPD a pour but d'apprécier l'avancement du projet Cigéo pour ce qui concerne la sûreté des options de fermeture retenues par l'Andra, au regard notamment des engagements, demandes et recommandations issus de l'instruction du « Dossier 2005 - Argile » [27], du « Dossier 2009 » [28], du « Dossier Jesq03 (2012) » (Jalon d'esquisse n°3) [29] et du Dossier « Examen des études remises depuis 2009 » en 2013 [30].

Ce Dossier se situe à la fin de la phase dite « d'esquisse » (mi-2013) qui précède les phases d'« Avant-Projet Sommaire » (APS) et d'« Avant-Projet Détaillé » (APD) prévues par l'Andra jusqu'en 2017.

Pour ce qui concerne les scellements de galeries ou d'alvéoles de stockage de déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL), il convient de rappeler que le « Dossier 2005 » de l'Andra prévoyait des dispositions particulières visant à limiter l'extension de la zone endommagée autour des tronçons de galeries appelés à recevoir un scellement, telle que par exemple la limitation du diamètre excavé à 7,50 m. Le concept de référence présenté alors par l'Andra prévoyait la dépose partielle du revêtement en béton des galeries puis la réalisation de coupures hydrauliques ayant pour but de remplacer la roche fracturée par un matériau moins perméable. La perméabilité « en grand » de l'ouvrage de scellement résultant pouvait se situer dans un ordre de grandeur de 10^{-10} m/s. L'IRSN estimait [27] qu'en l'état des connaissances d'alors, des éléments de démonstration encourageants existaient mais qu'ils demeuraient néanmoins qualitatifs. Selon l'IRSN, ces éléments nécessitaient une vérification *in situ* (démonstrateur à une échelle représentative). L'IRSN considérait aussi que la validité du dimensionnement des scellements de galeries, en particulier au niveau des interfaces entre le béton et l'argile gonflante des saignées, nécessitait également d'être confirmée par des essais *in situ* permettant une observation du comportement hydrique et mécanique des composants et de leurs interfaces. En outre, ce dimensionnement semblait présenter peu de marges vis-à-vis de la capacité de ces composants à absorber la perturbation alcaline sans conséquences sur leur performance de confinement. Le groupe permanent a émis à cet égard une recommandation à l'issue de sa réunion des 12 et 13 décembre 2005.

Au stade du « Dossier 2009 », le concept de référence restait inchangé mais les dispositions particulières précitées, visant à limiter l'extension de la zone endommagée, étaient revues à la baisse sur la base de l'évolution des connaissances : l'Andra indiquait alors que le diamètre excavé minimal des tronçons de galeries appelés à recevoir des scellements pourrait dépasser 7,50 m et l'IRSN soulignait [28] que ces évolutions allaient dans un sens défavorable eu égard à l'endommagement de la roche et à l'extrapolation d'essais réalisables dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Par ailleurs, l'IRSN rappelait que la recommandation précitée du GPD en 2005 relative à la prise en compte des perturbations chimiques restait d'actualité. L'Andra annonçait en outre qu'« un

pilote préindustriel de l'ensemble de l'ouvrage de scellement » ne pourrait être envisagé qu'au-delà de 2015. L'IRSN concluait d'une part que les éléments qui seraient apportés dans le Dossier accompagnant la DAC ne constitueraient pas une véritable démonstration *in situ* d'un ouvrage de scellement mais plutôt des éléments de justification d'un choix de concept à venir, d'autre part qu'une vigilance particulière s'imposait quant à la représentativité des conditions dans lesquelles serait testé chaque composant desdits ouvrages, notamment qu'il conviendrait d'utiliser avec prudence les résultats obtenus en Laboratoire souterrain pour justifier les concepts de référence qui seraient retenus pour la DAC, compte tenu des dimensions des ouvrages souterrains notablement supérieures dans l'architecture générale de Cigéo. **D'une manière générale, l'IRSN constatait que le « Dossier 2009 » n'apportait pas encore les confirmations *in situ* et en vraie grandeur relatives aux performances des ouvrages de scellement demandées à l'échéance de la DAC par l'ASN et le GPD suite à l'examen du « Dossier 2005 ».** Sur la base des éléments apportés par l'Andra, l'IRSN estimait que peu de résultats nouveaux pourraient être acquis avant 2015 et recommandait, dans l'optique d'une DAC en 2015, que des concepts de référence plus simples que ceux retenus alors par l'Andra, et pour lesquels suffisamment d'éléments probants quant à la démonstration de leur faisabilité industrielle pourraient être réunis, soient étudiés. Un effort particulier devait être accordé à la détermination des performances minimales de ces concepts, en tenant compte de la présence d'une zone endommagée à la paroi des ouvrages et des effets éventuels des gaz, pour les diverses situations de fonctionnement du stockage et en particulier, le degré de saturation du noyau, compte-tenu des incertitudes sur le processus de resaturation naturelle.

Au stade du « Dossier Jesq03 (2012) », l'IRSN [29] notait une évolution importante des choix d'architecture générale de Cigéo (notamment la diminution de la longueur des galeries et l'emplacement des scellements). S'agissant de l'impact de ces évolutions sur la sûreté à long terme, l'IRSN [29] considérait alors que l'Andra devrait s'assurer qu'elles n'obèreraient pas l'objectif de minimisation des transferts de radionucléides à travers les liaisons surface-fond. D'une manière générale, l'IRSN considérait qu'au-delà de la performance seule des ouvrages de scellement, c'était l'évaluation de la performance du système de stockage dans son ensemble, incluant l'architecture générale, les rôles combinés des ouvrages de fermeture et de la roche hôte, qui permettrait de statuer sur le bien-fondé des solutions de fermeture du stockage présentées par l'Andra. En particulier, le relâchement d'exigences considérées jusqu'alors comme favorables, liées à l'architecture du stockage ou aux performances hydrauliques des barrières ouvragées, devrait être justifié en montrant que la stratégie de scellement du stockage qui serait retenue permettrait de conserver une performance globale de confinement du stockage élevée et de respecter l'objectif de minimisation du transfert des radionucléides par les infrastructures, en particulier les liaisons surface-fond. Afin d'apporter des éléments de démonstration probants des performances pouvant être atteintes par ces solutions techniques, l'IRSN estimait en 2013 [35] que la confirmation au moyen d'essais en vraie grandeur du bien-fondé des solutions techniques retenues restait d'actualité, mais que celle-ci ne pourrait pas être apportée avant l'échéance de 2015, alors visée pour la DAC de Cigéo : une phase de qualification *in situ* par des essais en vraie grandeur, qui précéderait la mise en service nominale de Cigéo, était donc considérée comme indispensable, dans des conditions de sûreté particulières [30] (limitation de l'inventaire stocké aux besoins de la démonstration et modalités d'exploitation spécifiques apportant l'assurance de pouvoir récupérer les colis stockés). Enfin, à l'issue du débat public en 2014, l'IRSN s'est exprimé favorablement quant à la mise en œuvre d'une phase « pilote » de Cigéo qui vise, entre autres considérations quant aux éléments

de démonstration de la sûreté du stockage restant à apporter, à lever les incertitudes relatives aux conséquences de la construction des ouvrages sur la roche (extension et perméabilité de la zone endommagée) et à l'atteinte des performances attendues des dispositifs de fermeture, notamment les scellements.

Pour ce qui concerne les scellements de liaisons surface-fond, l'Andra présentait dans le « Dossier 2005 » uniquement des concepts relatifs à des puits. L'IRSN considérait alors que l'Andra avait rassemblé un certain nombre d'éléments laissant penser que la perméabilité équivalente de ces scellements pourrait être de l'ordre de 10^{-11} m/s. Toutefois ces valeurs devaient être considérées comme des ordres de grandeur possibles, à confirmer par des essais plus représentatifs à réaliser *in situ*. En outre, l'Andra envisageait ces scellements en partie supérieure du Callovo-Oxfordien « *sur la plus grande hauteur possible* » soit « *au moins une trentaine de mètres* ». Au stade du « Dossier 2009 », l'Andra indiquait que des descenderies (rampes de pente de 10 à 12 %) pourraient également être construites et que les scellements de ces ouvrages seraient « *de conception similaire à celle décrite pour un scellement de galerie de liaison ou un scellement d'alvéole MAVL* ». Tout comme les scellements de galerie précités, l'IRSN constatait que les diamètres excavés des tubes de descenderie mentionnés par l'Andra (8 à 10 m) dépassaient les 7,5 m maximum envisagés dans le « Dossier 2005 ». L'IRSN alertait en outre sur la nécessité, en raison de leur pente, de sceller les descenderies sur plusieurs centaines de mètres de longueur pour obtenir des scellements d'une hauteur équivalente à celle des scellements de puits, ce qui dépassait la dimension « *décamétrique à pluridécamétrique (en fonction de leur section)* » mentionnée dans le « Dossier 2009 » pour les scellements en général. L'IRSN recommandait à cet égard de préciser, à l'échéance de la DAC, l'option de scellement de la descenderie et d'évaluer la robustesse de ce concept en termes de faisabilité et de performance globale. Enfin, les concepts de scellements de liaisons surface-fond n'ont pas fait l'objet d'évolutions notables aux stades ultérieurs (2012-2013) et le recours aux descenderies a été retenu dans l'option de référence.

Pour ce qui concerne les bouchons d'alvéoles HA, l'Andra considérait cet ouvrage dans le « Dossier 2005 » comme un scellement, associé à une performance hydraulique et participant à la fonction de sûreté « *s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage* ». Ce « *bouchon argileux* » était composé d'un noyau en argile gonflante en contact avec la roche hôte, sur une longueur de 3 m, d'un bouchon d'appui en béton et d'un bouchon métallique. Au stade du « Dossier 2009 », l'Andra introduisait un nouveau composant (insert métallique) dans la tête d'alvéole afin de prendre en compte des contraintes d'exploitation et indiquait que son maintien « *induit une interface [argile gonflante/insert/roche] avec un composant métallique qui n'existait pas dans le Dossier 2005* ». L'IRSN estimait alors [28] que ce nouveau concept, en cours d'étude, présentait des avantages en termes de facilité de mise en œuvre et d'exploitation mais qu'il convenait que l'Andra poursuive également la recherche de méthodes permettant une dépose, au moins locale, de l'insert permettant une mise en place du bouchon argileux au contact direct de la roche et approfondisse son analyse de l'impact sur la sûreté à long terme du retrait ou non de l'insert. Les interrogations de l'IRSN quant au maintien de l'insert après le remplissage de l'alvéole HA concernaient ainsi le cheminement de l'eau, notamment à l'extrados de l'insert, les performances hydrauliques du bouchon HA et la fonction d'appui du bouchon en béton (aujourd'hui appelé « *dispositif de confinement* »). Au stade du « Dossier Jesq03 (2012) », l'IRSN remarquait [29] que l'exigence sur les performances de ce même bouchon HA avait été significativement revue à la baisse : en effet, l'Andra indiquait alors ne plus retenir de performance hydraulique spécifiée pour cet ouvrage. Il convient en outre de rappeler (*cf. supra*) que l'Andra présentait dans le même

dossier des évolutions notables d'architecture générale du stockage, avec un relâchement de certaines exigences. La conclusion de l'IRSN quant à ces évolutions du bouchon HA était ainsi du même ordre que celle relative aux scellements de galeries, à savoir que le relâchement d'exigences considérées jusqu'alors comme favorables devait être justifié (*cf. supra*).

Les chapitres suivants examinent les ouvrages de fermeture présentés au stade de la fin de la phase d'esquisse à la lumière des évolutions précitées.

1.3 PRESENTATION DU DOSSIER

La lettre ASN [1] précise les éléments constituant le Dossier initial de l'Andra :

- « Projet Cigéo - Scellements - Options de conception et programme d'essais », CG.NT.ADPG.13.0003/A. Ce document a ensuite été annulé et remplacé par une version B du même document [2] ;
- « Retour d'expérience sur les essais in-situ et les maquettes d'ouvrages à base d'argile gonflante - Mise en place et comportement THM-gaz », CG.NT.ADSD.13.0005/A [3] ;
- « Projet Cigéo - Bouchons d'alvéoles de déchets HA - Options de conception et programme d'essais », CG.NT.ADPG.13.0004/A [4] ;
- « La zone endommagée initiale autour des ouvrages : synthèse des travaux de caractérisation autour des ouvrages du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne », CG.NT.AMFS.13.0025/A [5].

Lors de la réunion d'enclenchement de la présente instruction tenue le 27 septembre 2013, il a été convenu que le document « Référentiel du comportement THM des formations sur le site de Meuse/Haute-Marne » [6], qui faisait partie du référentiel de site déposé fin 2012 qui n'a finalement pas donné lieu à instruction, ne serait pas instruit en lui-même mais se positionnerait en support du document [5] relatif à la zone endommagée. L'ASN a en outre souhaité que la présente instruction tienne compte du programme d'essais de l'Andra relatif aux ouvrages de grandes dimensions [7].

Au cours de l'instruction, le Dossier de l'Andra a été complété des documents référencés [8] à [17] dans le présent rapport et des réponses de l'Andra aux questions posées par l'IRSN.

1.4 PRESENTATION GENERALE DU PROJET CIGEO

1.4.1 LE CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GEOLOGIQUE

Le Centre industriel de stockage géologique (Cigéo) est conçu pour stocker les déchets de moyenne et haute activité et à vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles, incluant l'EPR (Flamanville 3) et ITER.

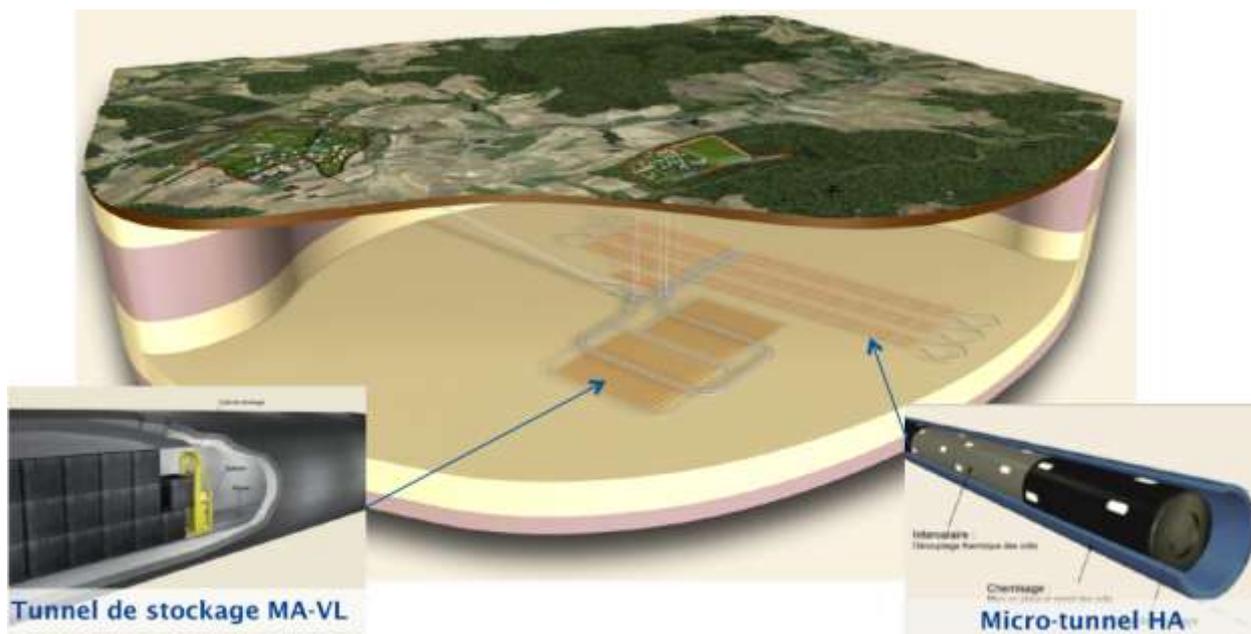


Figure 1 : Vue générale des installations de Cigéo : schéma de principe (d'après l'Andra)

Ce projet se compose d'installations de surface, de liaisons surface-fond (puits et descenderies) et d'une installation souterraine située à environ 500 m de profondeur où seront stockés les déchets.

Les installations de surface se répartissent en deux zones (« puits » et « descenderies ») distantes d'environ 5 km. La zone « descenderies » servira notamment à la réception et à la préparation des colis de déchets avant leur transfert dans l'installation souterraine. La zone « puits » servira essentiellement aux travaux de creusement et de construction des ouvrages souterrains.

Avant d'atteindre la formation hôte du Callovo-Oxfordien, les liaisons surface-fond traversent les formations géologiques sus-jacentes du Barrois, du Kimméridgien et de l'Oxfordien (cf. Figure 2). Ces formations sus-jacentes présentent deux aquifères principaux : les calcaires du Barrois, karstiques et donc potentiellement très productifs, et ceux de l'Oxfordien. Ces deux aquifères sont séparés par le semi-perméable marneux du Kimméridgien. La formation sous-jacente des calcaires du Dogger est également aquifère. La formation hôte est une roche argileuse indurée (appelée argilite) choisie notamment pour ses propriétés de confinement.

L'installation souterraine se compose d'une zone centrale de soutien logistique, de galeries de liaison et d'alvéoles de stockage. Son architecture générale a fait l'objet de plusieurs évolutions notables entre les « Dossier 2005 - Argile », « Dossier 2009 » et « Dossier Jesq03 (2012) » (Jalon d'esquisse n°3), cf. § 1.2 du présent rapport. Néanmoins, les principes généraux ont été conservés comme le stockage des déchets HA et MAVL dans des zones séparées, le regroupement des liaisons surface-fond, une architecture globalement « borgne ».

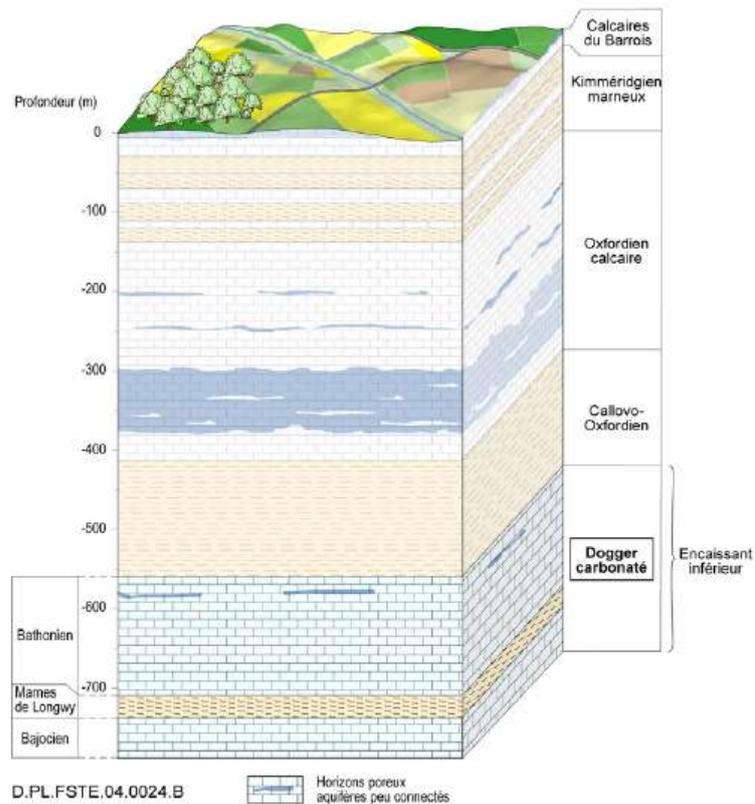


Figure 2 : Représentation schématique des lithologies et horizons poreux sur le site de Meuse/Haute-Marne (Andra, « Dossier 2005 »)

Fin 2013, au stade de l'esquisse, l'installation souterraine proposée par l'Andra (cf. Figure 3) comporte un quartier de stockage MAVL et deux zones de stockage HA : une zone constituée d'un quartier pour les colis moyennement exothermiques (quartier HA0) et une zone comprenant six quartiers pour les colis HA fortement exothermiques (quartiers HA).

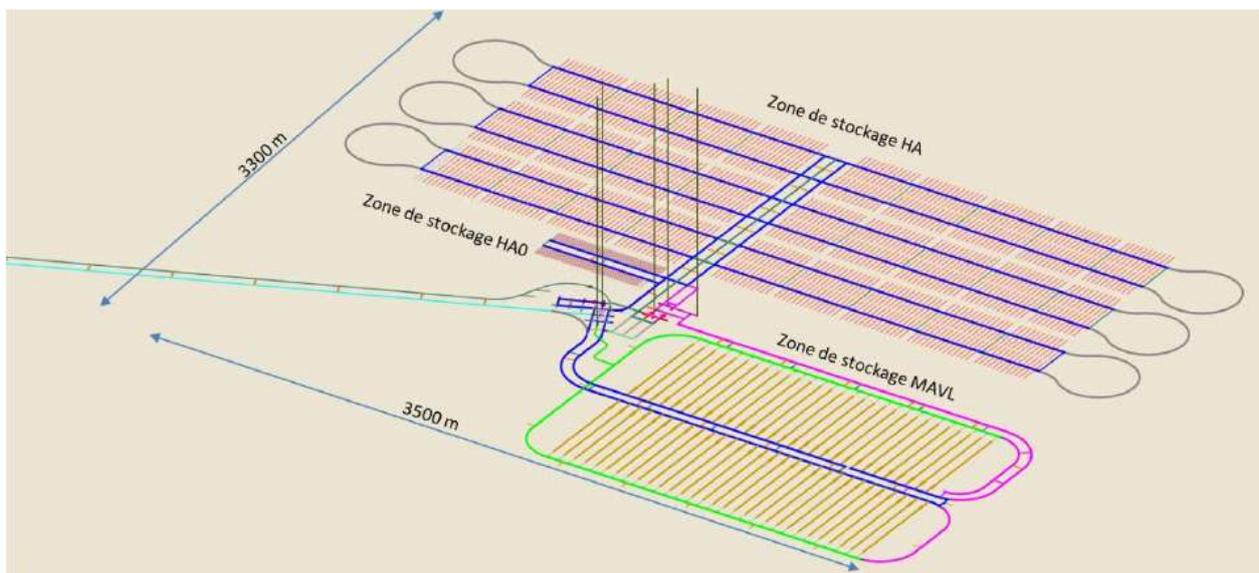


Figure 3 : Architecture de l'installation souterraine au stade de l'esquisse (d'après l'Andra - cette architecture, en cours d'optimisation, est en évolution au stade de l'APS-APD)

Le réseau de galeries du quartier de stockage MAVL comprend (cf. Figure 3) un bitube de galeries de liaison MAVL de 60 m d'entraxe formant une boucle, des galeries de recoupe techniques, des alvéoles de stockage MAVL de 500 m de longueur utile situés de part et d'autre des galeries de liaison et deux galeries de retour d'air situées respectivement au nord et au sud des alvéoles, les deux demi-quartiers en vis-à-vis pouvant présenter un dénivelé de l'ordre de 7 m. Les galeries de liaison et alvéoles MAVL ont un diamètre excavé de l'ordre de 10 m. La Figure 4 présente un schéma de principe d'un alvéole MAVL en phase d'exploitation et scellé.

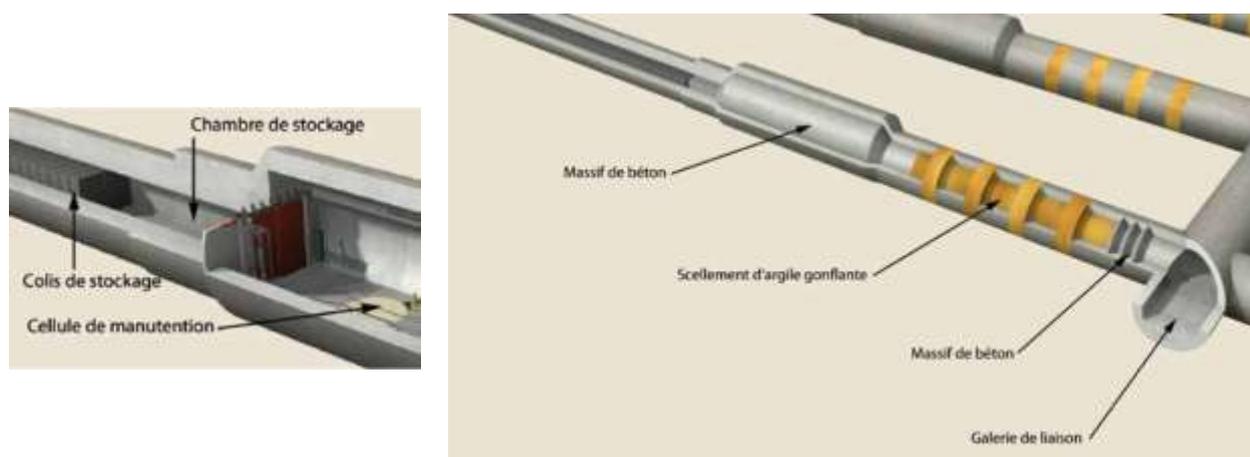


Figure 4 : Schéma de principe d'un alvéole de stockage de déchets MAVL en phase d'exploitation (à gauche) et scellé (à droite) (d'après l'Andra)

Le réseau de galeries des quartiers de stockage HA comprend (cf. Figure 3) trois galeries de liaison (« exploitation », « travaux » et « secours »), des galeries d'accès aux alvéoles par quartier et des galeries de recoupe techniques. Les alvéoles de stockage sont horizontales et les galeries de liaison, d'accès et de recoupe suivent le pendage de la formation hôte. Les alvéoles de stockage HA sont des micro-tunnels borgnes de 80 m de long dans la zone HA0 et 100 m de long dans la zone HA, chemisés et d'un diamètre excavé d'environ 70 cm suivant les colis. La Figure 5 présente le schéma de principe d'un alvéole HA, en cours de remplissage (noté « en cours d'exploitation » sur le schéma) et après scellement, retenu au stade du « Dossier 2009 ». Entre ces deux phases, l'alvéole est au niveau 2 de l'échelle de récupérabilité avec le bouchon métallique de radioprotection mis en place et les bouchons d'argile et de béton en attente (cf. Figure 26 du présent rapport).

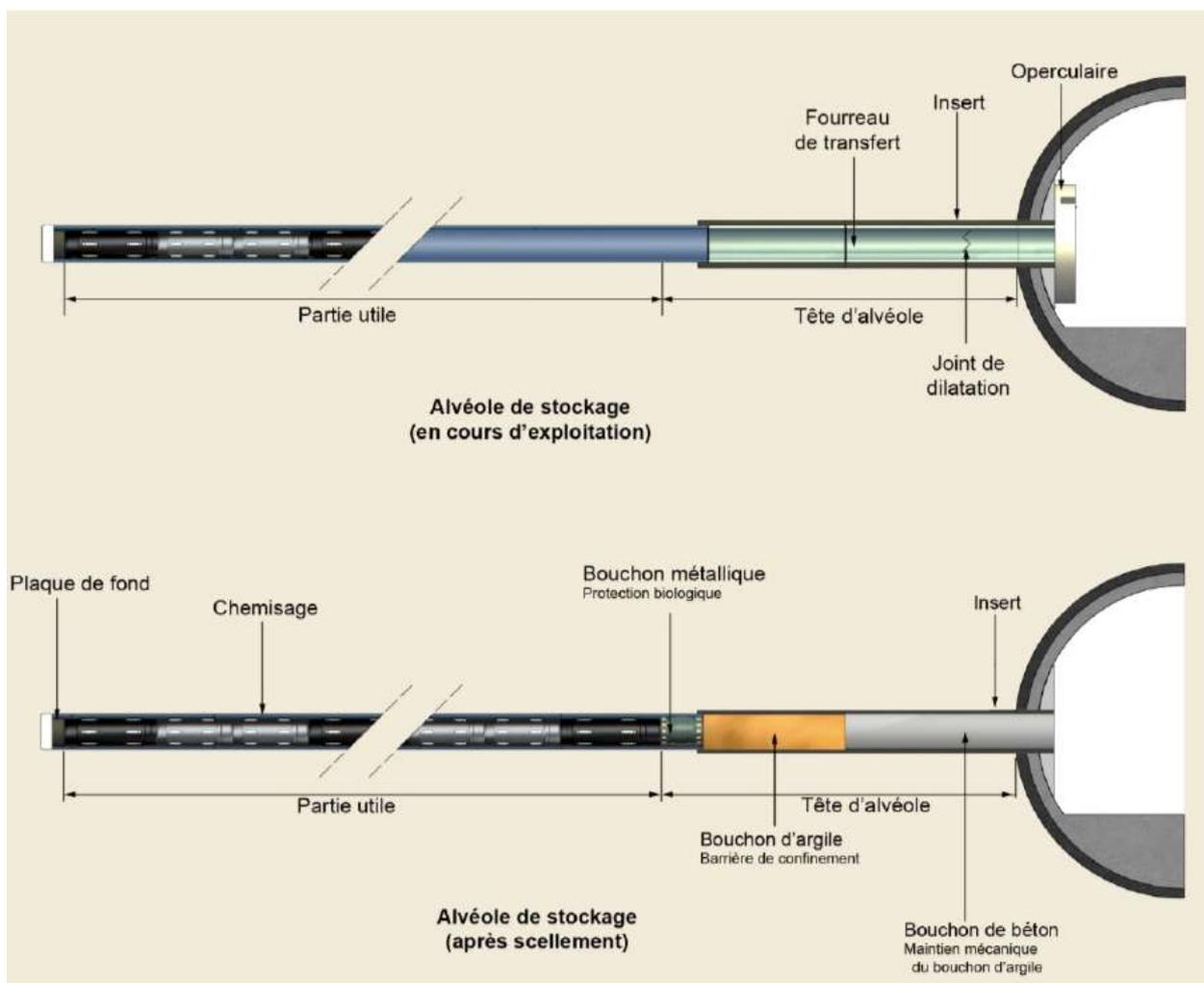


Figure 5 : Schéma de principe d'un alvéole de stockage de déchets HA en cours de remplissage (en haut) et scellé (en bas) (Andra, « Dossier 2009 »)

1.4.2 LA FERMETURE DU STOCKAGE

L'Andra [2] indique qu'au terme d'une exploitation de l'ordre d'une centaine d'années pendant laquelle les colis de déchets seront progressivement stockés, l'installation souterraine sera remblayée et scellée. Ces opérations de fermeture du stockage comprennent : l'obturation des alvéoles de stockage, le remblaiement et scellement des galeries, puis des liaisons surface-fond (puits et descenderies). L'IRSN souligne la différence qui existe dans le projet de l'Andra entre un remblai et un scellement : à la différence du remblai, un scellement est un ouvrage localisé, de quelques dizaines de mètres de longueur, destiné à isoler hydrauliquement l'installation souterraine de son environnement. Le « Dossier 2005 » précise à cet égard que si les remblais peuvent atteindre une perméabilité à l'eau de l'ordre de 10^{-8} m/s, il ne leur est cependant pas attribué de fonction particulière sur ce point car les revêtements laissés en place, en se dégradant, finiraient par les court-circuiter. Les différents scellements comprennent ceux des liaisons surface-fond, ceux des galeries de liaison et ceux des alvéoles MAVL. Les alvéoles de stockage de déchets HA sont obturés par des ouvrages plus petits qu'un scellement (environ 70 cm de diamètre, quelques mètres de long) appelés « bouchons HA ». Ce sont ces différents ouvrages dits « de fermeture », scellements et bouchons d'alvéoles HA, qui font l'objet du présent rapport. Leurs fonctions de sûreté

sont précisées au chapitre suivant du présent rapport. Leur schéma de principe sont présentés aux § 3 et § 4 du présent rapport.

2 FONCTIONS DE SURETE ET OUVRAGES DE FERMETURE

2.1 OBJECTIF FONDAMENTAL DE SURETE

L'objectif fondamental de sûreté du stockage géologique est énoncé dans le Guide de sûreté [18] de l'ASN. Il s'agit d'assurer « *la protection de la santé des personnes et de l'environnement [...] envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques* ». Ce Guide de sûreté [18] indique qu'après fermeture de l'installation, cet objectif « *ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée* ».

L'Andra [2] indique que l'objectif fondamental de sûreté après fermeture du stockage implique que ce dernier :

1. isole les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines, fonction satisfaite principalement par les caractéristiques du site telle que la profondeur d'implantation ;
2. limite le transfert jusqu'à la biosphère des substances radioactives et toxiques contenues dans les déchets, par voies gazeuse ou aqueuse.

L'Andra [2] précise que l'acceptabilité de l'impact des radionucléides gazeux sera vérifiée lors de l'établissement du Dossier accompagnant la DAC. Ce point ne fait par conséquent pas l'objet de la présente instruction.

2.2 FONCTIONS DE SURETE APRES LA FERMETURE DU STOCKAGE

Pour ce qui concerne la voie de transfert par l'eau, afin de limiter le transfert des substances radioactives et toxiques, l'Andra [2] confère au stockage les trois fonctions de sûreté après fermeture suivantes :

- 2.1. s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage ;
- 2.2. limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques et les immobiliser dans le stockage ;
- 2.3. retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques éventuellement relâchées hors des alvéoles de stockage.

L'IRSN rappelle [28] [29] que ces fonctions de sûreté sont cohérentes avec les principes exposés dans le Guide de sûreté [18].

2.3 ROLE DES OUVRAGES DE FERMETURE VIS-A-VIS DES FONCTIONS DE SURETE

Comme rappelé au § 1.4.2 du présent rapport, les ouvrages de fermeture objets du présent rapport comprennent les « bouchons d'alvéoles HA » et les « scellements ». L'Andra [2] se réfère au Guide de sûreté [18] selon lequel « *les fonctions, les performances et les caractéristiques des composants ouvragés devront être définies et justifiées en rapport avec celles des colis et de la roche hôte, car ils interviennent en complément de ces deux composants pour pallier d'éventuelles faiblesses. [...] Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries*

et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception ».

L'Andra [2] prévoit ainsi trois types de scellements :

- les scellements de liaisons surface-fond, qui apportent la plus grande contribution à la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » en limitant les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations encaissantes via ces liaisons ;
- les scellements de galeries de liaison, qui augmentent la résistance hydraulique des galeries et qui, par leur positionnement dans l'installation souterraine, contribuent à diminuer les gradients hydrauliques, les flux et les vitesses d'écoulement dans l'installation ; en cas de défaillance des scellements de liaisons surface-fond, les scellements de galeries limitent les flux d'eau le long des galeries ;
- les scellements d'alvéoles MAVL, qui comme les scellements de galeries de liaison maintiennent des conditions d'écoulements très lents et qui, par leur position à proximité des entrées des alvéoles, contribuent au confinement au plus près des déchets.

L'IRSN constate que la notion de « scellements de fractionnement », qui était présente dans les « Dossiers 2005 » et « 2009 », n'est plus retenue à ce stade du projet. Ces scellements permettaient de fractionner le stockage, notamment la zone HA, en différents « modules » de sorte qu'en cas d'intrusion humaine par forage par exemple, seule une partie de l'inventaire était à considérer. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'au stade de l'esquisse (cf. Figure 3), les scellements situés entre ceux des liaisons surface-fond et ceux des alvéoles MAVL ont été requalifiés et que « *les quartiers HA situés symétriquement par rapport aux galeries de liaison sont dans une configuration similaire à celle de 2005* » mais en nombre moins important. L'impact de cette évolution sur la performance globale du stockage est présenté au § 3.6 du présent rapport.

L'Andra [2] attribue aux scellements principalement la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau dans le stockage ». Elle souligne cependant que cette fonction mobilise aussi les caractéristiques hydrogéologiques du site et l'architecture de l'installation souterraine et que « *l'objet des scellements est d'y contribuer également par une faible transmissivité hydraulique* ». La contribution des scellements à la performance globale du stockage fait l'objet du § 3.6 du présent rapport.

L'Andra [4] indique que les bouchons d'alvéoles HA contribuent principalement aux fonctions « limiter le relâchement des substances radioactives et toxiques... » et « retarder et atténuer leur migration ». Pour ce qui concerne la fonction « limiter le relâchement des substances... », l'Andra [4] précise que le bouchon d'alvéole HA, placé en tête de chaque alvéole, assure un rôle de tampon vis-à-vis de l'environnement physico-chimique des galeries et contribue à maintenir un environnement favorable dans l'alvéole, ce qui limite la vitesse d'altération de la matrice de verre des colis. Pour ce qui concerne la fonction « retarder et atténuer... », l'Andra [4] précise que le bouchon d'alvéole HA, placé en tête de chaque alvéole, contribue à retarder et à atténuer la fraction minoritaire des flux qui transitent longitudinalement par les alvéoles et les galeries. Enfin, concernant la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau... », l'Andra [4] indique que les évaluations menées depuis 2009 montrent qu'en situation de fonctionnement normal, l'influence de la performance hydraulique du bouchon d'alvéole HA est négligeable sur la voie de transfert vers la galerie d'accès ; l'Andra [4] ne lui attribue par conséquent qu'une

performance hydraulique limitée. Ce point, apparu dans le « Dossier 2009 », est examiné au § 4.1 du présent rapport.

Ainsi, l'IRSN note :

- l'importance prépondérante attribuée par l'Andra aux scellements des liaisons surface-fond pour ce qui concerne la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » et qui ressort dès l'attribution des fonctions de sûreté aux différents scellements du stockage ;
- que la notion de « sectorisation » du stockage est préservée mais celle de « scellements de fractionnement » n'est plus retenue à ce stade du projet ; en pratique, le nombre de scellements participant au fractionnement de l'inventaire a diminué ;
- que l'évolution apparue dans le « Dossier 2009 » relative à une moindre performance hydraulique requise pour le bouchon d'alvéole HA est confirmée.

3 LES SCHELLEMENTS

3.1 DEMARCHE D'ANALYSE

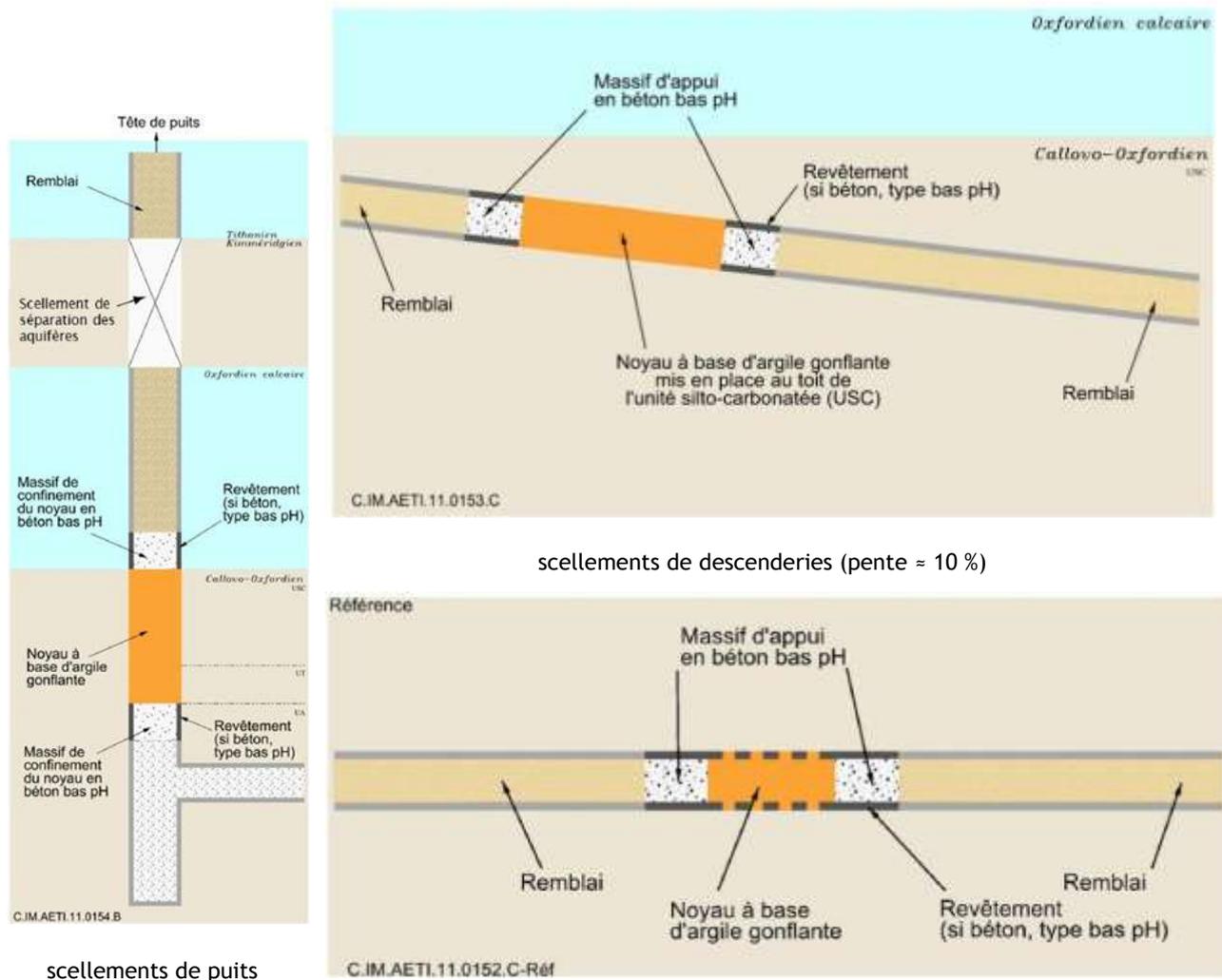
Ce chapitre présente tout d'abord les schémas de principe des différents scellements et examine une première estimation, réalisée par l'Andra hors de toute considération relative à leur faisabilité technologique ou aux perturbations auxquelles ils peuvent être soumis, de la perméabilité hydraulique qu'ils doivent atteindre pour remplir leur fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ». Ensuite, les options techniques retenues par l'Andra pour les scellements sont déclinées composant par composant avec une attention particulière portée sur les performances attendues, sur la justification de la possibilité de les atteindre et sur la faisabilité industrielle du composant. La performance hydraulique attendue des différents scellements, puis l'impact des perturbations susceptibles de nuire aux performances de ces scellements, sont examinés. Enfin, la contribution des scellements à la performance globale du stockage est évaluée.

3.2 SCHEMAS DE PRINCIPE - OBJECTIF PRELIMINAIRE DE PERMEABILITE

L'Andra [2] retient un schéma de principe de scellement ayant pour composant principal un noyau à base d'argile gonflante encadré de deux massifs de confinement (appelés également massifs d'appui) en béton. La Figure 6 résume les options de conception des scellements de puits, de descenderies et de galeries de liaison. L'Andra [2] précise que « *les options techniques des scellements d'alvéoles de stockage MAVL, mis en place dans les entrées ou à leur proximité, sont identiques à celles des scellements de galeries de liaison* » ; pour cette raison, les scellements de galeries de liaison et d'alvéoles MAVL seront appelés « scellements de fond » dans la suite du présent rapport. Il est à noter que pour les scellements de liaisons surface-fond, le revêtement en béton est complètement déposé avant la mise en place du noyau alors que pour les scellements de fond, ce revêtement n'est déposé que localement ; les raisons de cette différence sont présentées au § 3.3.3 du présent rapport. Enfin, l'Andra [2] précise que le scellement de séparation des aquifères mis en place au droit du Kimméridgien conformément au Code de l'Environnement a pour fonction de limiter la circulation d'eau entre l'Oxfordien et le

— —

Tithonien mais n'a pas de fonction de sûreté après fermeture du stockage ; ce scellement ne fait donc pas l'objet de cette instruction.



scellements « de fond » (galeries de liaison ou d'alvéoles MAVL)
Figure 6 : Schéma de principe des scellements (Andra [2], 2013)

L'Andra [2] examine « dans un premier temps » la contribution attendue des scellements sous l'angle de leur performance hydraulique, « indépendamment de toute considération relative à leur environnement phénoménologique ou à leur faisabilité technologique ». L'Andra [2] rappelle que la perméabilité équivalente d'un scellement ($K_{\text{scellement}}$) peut être estimée analytiquement à partir des caractéristiques de ses composants que sont le noyau à base d'argile gonflante (perméabilité K_1 , section S_1) et le composant situé entre le noyau et la roche (perméabilité K_2 , section S_2) selon la formule suivante (cf. Figure 7) :

$$K_{\text{scellement}} = (K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2) / (S_1 + S_2) \quad (\text{équation 1})$$

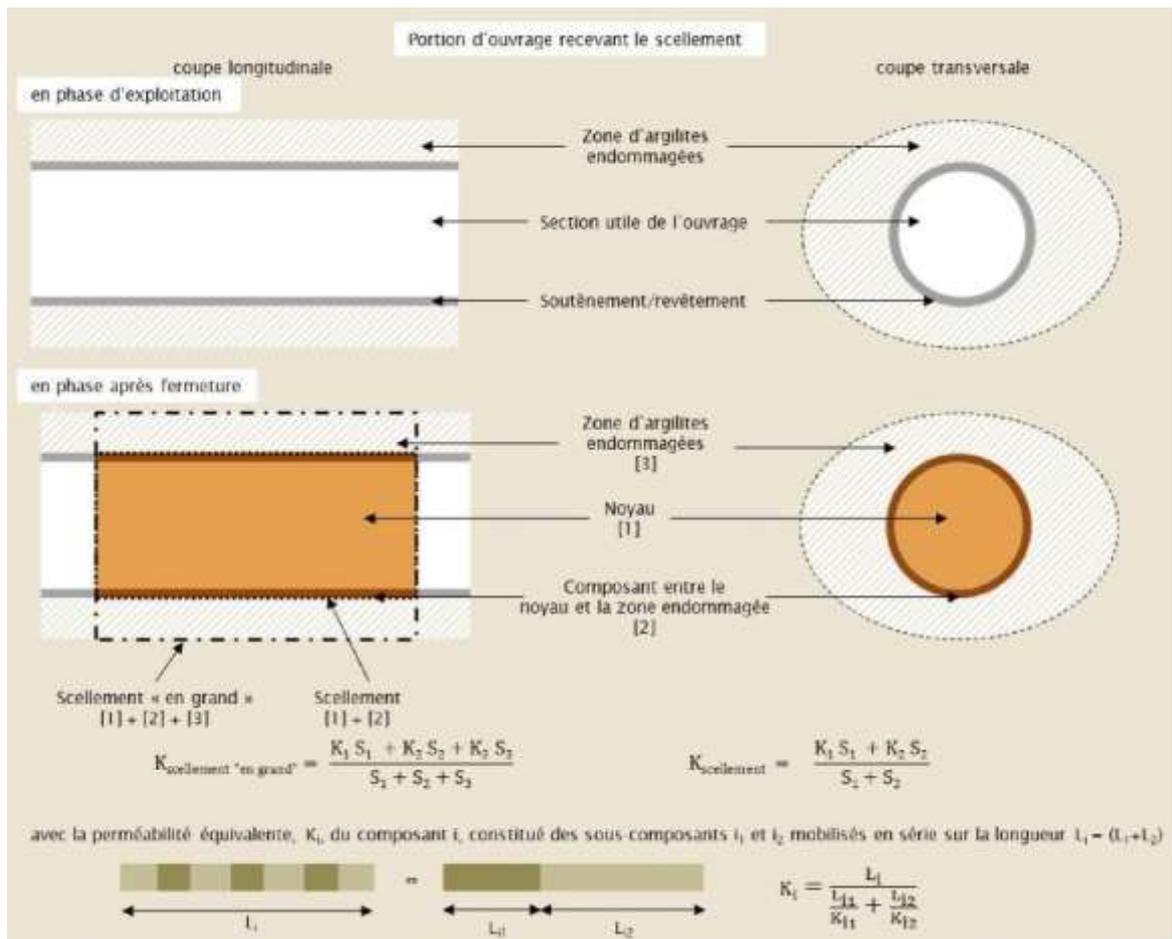


Figure 7 : Schéma de calcul de la perméabilité équivalente d'un scellement (Andra [2], 2013)

Le composant situé entre le noyau d'argile gonflante et les argilites en paroi est un contact noyau/argilites pour les scellements de liaisons surface-fond et une succession de zones de revêtement en béton déposé ou laissé en place pour les scellements de fond.

En généralisant l'équation 1, l'Andra [2] indique que la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages (perméabilité K_3 , section S_3) peut être incluse dans une perméabilité équivalente « en grand » du scellement ($K_{\text{scellement « en grand »}}$) de la façon suivante :

$$K_{\text{scellement « en grand »}} = (K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2 + K_3 \cdot S_3) / (S_1 + S_2 + S_3) \quad (\text{équation 2})$$

L'Andra [2] indique que « l'objectif étant de privilégier le transfert des substances radioactives et toxiques par la formation du Callovo-Oxfordien et non par les ouvrages de stockage, les différentes évaluations [...] menées depuis 2009 indiquent que le maintien de la prépondérance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est obtenu dès lors que la perméabilité équivalente de chaque scellement « en grand » est inférieure à environ 10^{-9} m/s », ce qui est illustré sur la Figure 8 où une prépondérance de la voie de transfert par les ouvrages est observée durant quelques dizaines de milliers d'années tant que la perméabilité équivalente des scellements est supérieure à 10^{-9} m/s . Il convient de noter que la perméabilité de la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages considérée dans cette évaluation est également de l'ordre de 10^{-9} m/s . L'IRSN précise qu'il retrouve ce résultat avec le modèle développé pour ses propres évaluations et dont les résultats sont présentés au § 3.6 du présent rapport.

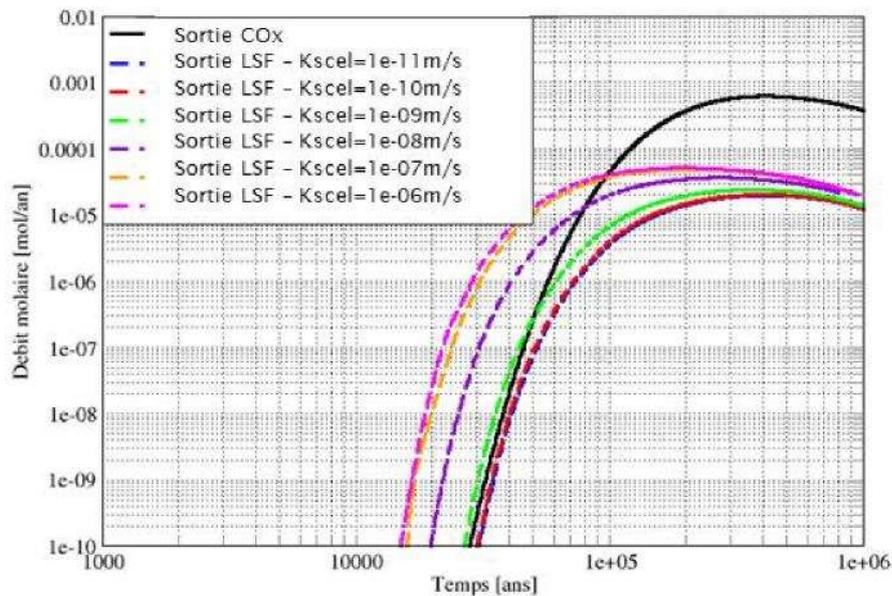


Figure 8 : Débits molaires d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond et en sortie du Callovo-Oxfordien en fonction de la perméabilité équivalente des scellements (architecture du « Dossier 2009 », perméabilité de la zone endommagée de l'ordre de 10^{-9} m/s) (Andra [2], 2013)

Compte tenu de l'équation 2, l'Andra [2] estime qu'une perméabilité significativement supérieure à 10^{-9} m/s (typiquement, un ordre de grandeur) de l'un des trois composants que sont (1) le noyau en argile gonflante, (2) l'interface noyau/argilites ou (3) la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages, conduirait à une perméabilité équivalente du scellement « en grand » supérieure à 10^{-9} m/s. Par conséquent, l'Andra [2] présente un premier objectif de performance hydraulique des scellements, hors de toute considération relative à leur environnement ou à leur faisabilité technologique, à savoir « l'atteinte et le maintien d'une perméabilité à saturation de chacun des composants du scellement la plus petite possible, et en tout état de cause inférieure ou égale à 10^{-9} m/s ».

L'IRSN estime que la démarche présentée par l'Andra, qui consiste à identifier une valeur limite de perméabilité à partir de laquelle la prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien serait remise en cause, ainsi que l'objectif d'une perméabilité à saturation de chacun des composants des scellements la plus petite possible et en tout état de cause inférieure à cette limite, sont satisfaisants.

L'IRSN considère que le résultat présenté par l'Andra [2] sur la Figure 8 ne permet toutefois pas de distinguer l'influence respective des différents scellements (de liaisons surface-fond, de galeries, d'alvéoles MAVL...), de leur nombre ou position, ni celle de l'architecture générale du stockage (distances entre les zones de stockage et les liaisons surface-fond par exemple). Au cours de l'instruction, l'Andra a présenté des évaluations complémentaires visant à clarifier l'influence des différents éléments évoqués ci-avant et a précisé que le résultat présenté sur la Figure 8 supposait la présence d'une zone endommagée en paroi des ouvrages d'une perméabilité de l'ordre de 10^{-9} m/s continue le long des galeries et des liaisons surface-fond. L'IRSN estime que cette hypothèse, qui conduit à court-circuiter la totalité des scellements par une zone endommagée qui impose sa valeur de perméabilité (K_3 dans l'équation 2 ci-dessus) aux scellements « en grand », est particulièrement forte pour les liaisons surface-fond, qui ne devraient pas développer de zone endommagée aussi prononcée (cf. § 3.3.1.2 du présent rapport), et

considère que cette hypothèse forte explique l'absence d'intérêt apparent d'atteindre une perméabilité équivalente des scellements inférieure à 10^{-9} m/s, ainsi qu'observé sur la Figure 8, car elle revient à considérer un noyau très peu perméable dans un environnement nettement plus conducteur.

L'IRSN note (cf. Figure 8) que pour une perméabilité « en grand » (i.e. zone endommagée en paroi incluse) de l'ensemble des scellements égale à la valeur limite précédemment identifiée (i.e. de l'ordre de 10^{-9} m/s), le rapport entre les débits molaires maximaux sortant par le Callovo-Oxfordien et par les liaisons surface-fond serait de l'ordre de 30, i.e. beaucoup plus faible que les 4 ordres de grandeur obtenus pour ce même indicateur en scénario d'évolution altérée « tous scellements défaillants » dans le « Dossier 2005 ».

De plus, l'IRSN rappelle que le Référentiel de site 2012 [26] présente, pour le coefficient de diffusion dans le Callovo-Oxfordien, une gamme de valeurs issues de mesures sur des échantillons provenant de divers forages (dans et hors zone de transposition). L'IRSN estime que la prédominance de l'ordre de 30 observée sur la Figure 8 pourrait être remise en cause par le choix d'une valeur du coefficient de diffusion dans le Callovo-Oxfordien dans la limite basse de cette gamme. En effet, un coefficient de diffusion dans le Callovo-Oxfordien plus faible revient à considérer une roche hôte plus performante en termes de confinement et donc une atténuation du transfert des radionucléides par cette voie ; les radionucléides sont alors canalisés vers les ouvrages de liaison, ce qui conduit à une augmentation des débits d'activité pour la voie de transfert par ces ouvrages. En d'autres termes, une meilleure performance de confinement du Callovo-Oxfordien conduit à viser de meilleures performances pour les scellements afin d'éviter l'apparition de « points chauds » au droit des ouvrages. **L'IRSN a conscience qu'il existe une limite à la performance des scellements et qu'un optimum est à trouver pour fixer les performances minimales requises. À cet égard, l'IRSN estime qu'une valeur de perméabilité équivalente « en grand » de l'ensemble des scellements égale à la valeur limite précédemment identifiée (10^{-9} m/s) peut, le cas échéant, être retenue dans le cadre d'évaluations pénalisantes dans la démonstration de sûreté (à titre conservatif pour les calculs d'impact, par exemple) mais ne constitue pas, à ce stade du projet, un objectif suffisant au titre de l'optimisation recherchée pour limiter le transfert de radionucléides par les ouvrages de liaison.**

Ce point est développé en détail au § 3 du présent rapport ; les objectifs de performance finalement attribués par l'Andra aux scellements sont présentés au § 3.4 et examinés au § 3.6 du présent rapport.

3.3 LES COMPOSANTS

3.3.1 LA ZONE D'ARGILITES ENDOMMAGÉES EN PAROI DES OUVRAGES

3.3.1.1 Le Callovo-Oxfordien

La formation du Callovo-Oxfordien se compose de différentes unités lithologiques plus ou moins carbonatées ou argileuses. Le stockage est envisagé avec une garde minimale d'argilites saines de 50 m entre le toit du stockage et celui de la formation hôte, dans l'unité d'argilosité maximale dite « UA ». Sus-jacentes à celle-ci se trouvent, de bas en haut, les unités de transition (UT) et silto-carbonatées (USC) où les contraintes *in situ* sont plus faibles et la résistance mécanique plus élevée que dans l'UA. La perméabilité à l'eau des argilites saines est de l'ordre de 10^{-13} m/s dans l'ensemble de la formation géologique.

3.3.1.2 La zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages

Dans l'unité argileuse (UA) dans laquelle est prévue l'implantation du stockage, les observations réalisées au Laboratoire souterrain [2] montrent que la zone endommagée en paroi des ouvrages s'organise en deux zones :

- à proximité de la paroi, une zone caractérisée par un réseau dense de fractures interconnectées et mixtes (cisaillement et extension) dite « zone fracturée connectée » ;
- au-delà de la « zone fracturée connectée », une zone caractérisée par des fractures de cisaillement peu ou pas interconnectées, dite « zone de fracturation discrète ».

L'Andra [5] indique que la nature de la fracturation induite dépend peu de l'orientation de l'ouvrage par rapport aux contraintes *in situ*. En revanche, la géométrie et surtout l'extension de la zone où coexistent les différents types de fractures en dépendent, comme l'illustre la Figure 9.

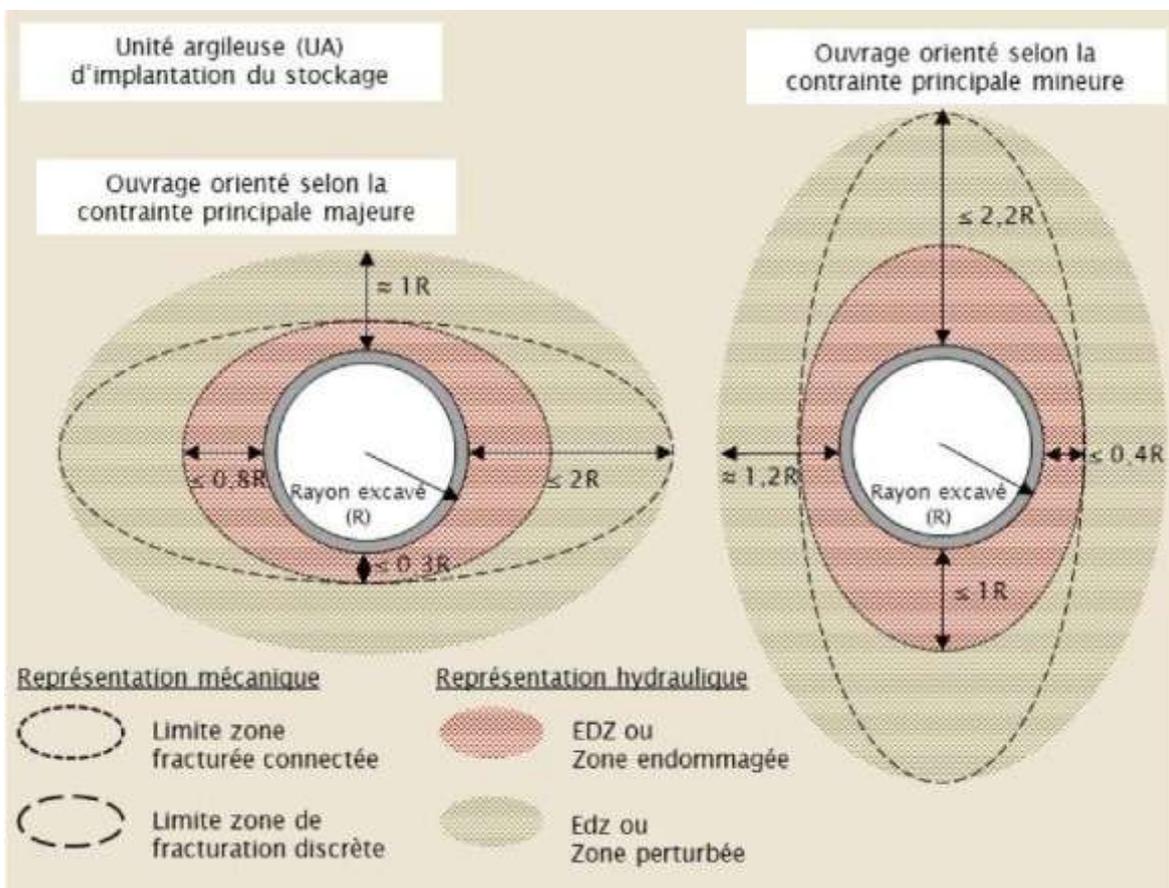


Figure 9 : La zone d'argilites endommagées initiale en paroi des ouvrages dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien - représentations schématiques sur les plans mécanique et hydraulique (Andra [2], 2012)

La zone fracturée connectée [2] [5] présente des valeurs de perméabilité à l'eau élevées (supérieures à 10^{-10} m/s et jusqu'à 10^{-4} m/s localement) ; l'Andra [5] estime toutefois que des valeurs aussi élevées ne sont pas représentatives d'un milieu poreux équivalent mais de la transmissivité des fractures rencontrées par la chambre de mesure et de leur état de saturation au moment du test. L'Andra [2] précise que sur des échantillons fracturés mais totalement saturés, les mesures de perméabilité sont significativement moins élevées (inférieures à

10^{-10} m/s). Au-delà de la zone fracturée connectée, la perméabilité décroît progressivement avec la distance à la paroi pour atteindre des valeurs inférieures à 10^{-11} m/s. L'IRSN convient que des valeurs de perméabilité mesurées *in situ* supérieures à 10^{-6} m/s sont probablement le fait de fractures ou de fissures situées dans ou à proximité de la chambre de mesure.

Ainsi, l'Andra [2] définit par convention l'« EDZ » (*Excavation Damaged Zone*) comme la zone de perméabilité supérieure à 10^{-10} m/s (cf. Figure 9) ; son étendue est assimilée à celle de la zone fracturée connectée, où sont pourtant parfois observées des perméabilités basses. La zone de perméabilité augmentée, restant en-dessous de 10^{-10} m/s, est appelée « zone perturbée » (ou « Edz » - *Excavation disturbed zone*). Dans le présent rapport, sauf mention contraire, l'appellation « zone endommagée » désigne la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage et comprend l'ensemble {EDZ et Edz}.

Perméabilité de la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages dans les unités USC et UT

Dans l'unité silto-carbonatée (USC) où est envisagé le scellement des liaisons surface-fond, l'Andra [2] indique que les conditions mécaniques sont plus favorables et que la zone endommagée en paroi des ouvrages se limite à une zone perturbée (perméabilité inférieure à 10^{-10} m/s) d'extension inférieure au rayon excavé de l'ouvrage.

Cependant, l'Andra [5] indique l'apparition dans l'USC d'une EDZ locale au parement de la niche du Laboratoire souterrain, située à -445 m, et pouvant atteindre 0,5 m d'extension. Au cours de l'instruction, l'Andra a rappelé que cette niche avait été creusée à l'explosif (méthode de creusement non retenue pour Cigéo), dans une direction non parallèle aux contraintes principales, non revêtue et qu'elle ne montrait initialement (hors radier) que quelques fissures éparses. Entre 2005 et 2010, l'Andra a observé localement une très légère augmentation de la fracturation au parement et en voûte de cette niche, sans conduire pour autant à un réseau connecté tel qu'observé dans l'unité argileuse (UA). L'Andra a indiqué que cette observation pourrait s'expliquer par la désaturation de la roche ou par un endommagement différé de celle-ci (propagation lente de microfissures) sans qu'il soit encore possible de trancher entre ces deux hypothèses. L'Andra a rappelé que le concept de scellement des liaisons surface-fond prévoit la dépose du revêtement au moment de la mise en place du noyau d'argile gonflante et estime que les caractéristiques de cet endommagement conduisent à considérer la purge des éventuelles parties fracturées comme aisée et de nature à les éliminer totalement.

Enfin, l'Andra [5] indique que dans la partie du puits d'accès au Laboratoire souterrain située sous cette niche et instrumentée entre -460 m et -475 m dans le cadre de l'expérience REP (REponse au creusement du Puits), la zone d'argilites endommagées en paroi ne montre pas d'évolution significative six ans après le creusement. L'IRSN considère que ceci constitue une indication probante de l'absence d'accroissement de l'endommagement mais observe cependant que les puits disposent d'un revêtement rigide en béton et moins instrumenté que la niche située à -445 m.

L'IRSN rappelle que le concept de scellement des liaisons surface-fond retenu par l'Andra prévoit la dépose de leur revêtement dans l'USC, la mise en place d'un noyau d'argile gonflante au contact direct des argilites et l'absence d'EDZ en paroi. L'IRSN considère que pendant la durée nécessaire à la resaturation du noyau en argile gonflante, qui peut s'étendre jusqu'à quelques milliers d'années pour atteindre l'ensemble du noyau (cf. § 3.3.2 du présent rapport), l'ouvrage en question peut être considéré comme peu soutenu et que les observations faites au

Laboratoire souterrain ne permettent pas d'exclure la possibilité d'un endommagement différé en paroi. L'IRSN estime donc que l'efficacité des scellements dans l'USC en termes de performances hydrauliques est soumise à des incertitudes résiduelles. L'IRSN rappelle l'importance prépondérante de ces scellements (cf. § 2.3 du présent rapport) et constate que l'Andra ne dispose pas d'autres ouvrages instrumentés que la niche du Laboratoire, lui permettant d'étudier le comportement différé d'ouvrages peu soutenus dans l'USC. Par conséquent,

l'IRSN estime que l'Andra devra expliquer l'apparition d'une fracturation éparse dans la niche (-445 m) et montrer que l'évolution de cette fracturation dans l'USC, le cas échéant, est un phénomène suffisamment maîtrisé pour ne pas remettre en cause la possibilité d'y sceller efficacement les liaisons surface-fond du stockage. Ce point fait l'objet de l'engagement E.1.2 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport).

L'IRSN souligne que si la possibilité d'un endommagement différé dans l'USC se confirmait, l'orientation des descenderies dans une direction non parallèle à celles des contraintes naturelles *in situ* pourrait accentuer ce phénomène.

Perméabilité de la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages dans l'unité argileuse (UA)

L'Andra indique [2] que dans l'unité argileuse (UA) où est prévu le niveau principal du stockage (environ -500 m au Laboratoire souterrain), la zone endommagée présente autour des ouvrages évolue en fonction des conditions aux limites appliquées à la paroi : rigidité du soutènement/revêtement, désaturation due à la ventilation, décharge mécanique due à la dépose d'un revêtement, resaturation due à la mise en place du scellement et à l'arrêt de la ventilation, application d'une pression mécanique par un noyau d'argile gonflante, etc. L'Andra estime [2] [5] que la perméabilité de la zone endommagée au droit d'un ouvrage de scellement évolue favorablement après mise en place de celui-ci du fait de deux mécanismes : (1) l'auto-colmatage des fissures dû à la resaturation de la paroi et (2) la fermeture des fissures due à la pression mécanique appliquée par l'argile gonflante sur la paroi.

Pour ce qui concerne l'auto-colmatage des fissures dû à la resaturation de la paroi, l'Andra [2] [5] indique que des essais réalisés sur échantillons et *in situ* au Laboratoire souterrain (essai CDZ) tendent à montrer l'existence d'un auto-colmatage des fissures allant jusqu'au millimètre d'ouverture et s'initiant rapidement après le démarrage de la resaturation. Une diminution de perméabilité de quelques ordres de grandeur est obtenue en quelques heures à quelques mois selon les conditions expérimentales (échantillon ou Laboratoire souterrain) [5] [6]. L'Andra [2] explique cet auto-colmatage par (i) le gonflement des minéraux interstratifiés illite/smectite des argilites, (ii) le gonflement interparticulaire par effet osmotique et (iii) l'obstruction des fissures par agrégation de particules. L'IRSN constate que les résultats présentés à ce jour par l'Andra [5] de ce volet de l'essai relatif à l'auto-colmatage des fissures dû à la resaturation de la paroi réalisé au Laboratoire souterrain montrent, pour les fractures initialement les plus ouvertes, un retour de la perméabilité en paroi à une valeur proche de 10^{-10} m/s, soit inférieure à 10^{-9} m/s avec une marge de l'ordre d'un ordre de grandeur.

Pour ce qui concerne l'effet d'une pression mécanique appliquée sur la paroi, l'Andra [2] [5] [6] indique que les premiers résultats du second volet de l'essai CDZ (Compression de l'EDZ) réalisé au Laboratoire souterrain montrent une diminution de la perméabilité au gaz de la zone endommagée due à la fermeture mécanique des

fissures, notamment celles de l'EDZ. L'Andra [5] précise que cette diminution atteint 3 ordres de grandeur sous 4 MPa de chargement pour les fractures initialement les plus ouvertes.

Il convient de noter que l'essai CDZ étudie ces deux mécanismes indépendamment l'un de l'autre. Sur la base de ces résultats, l'Andra [2] retient le gain de perméabilité associé au processus d'auto-colmatage de l'EDZ observé au Laboratoire souterrain, qui démarre avec la resaturation après la mise en place des scellements, et considère une « perméabilité équivalente de l'EDZ initiale de référence » de 10^{-9} m/s.

L'IRSN constate donc que le phénomène d'auto-colmatage des fissures par resaturation a été confirmé et quantifié au Laboratoire souterrain, comme il le recommandait à l'issue de l'examen du « Dossier 2009 », et estime que la valeur de référence de la perméabilité de l'EDZ de 10^{-9} m/s retenue par l'Andra présente une marge raisonnable par rapport aux résultats expérimentaux de CDZ présentés à ce jour.

Il convient de noter que l'Andra [2] se réserve la possibilité de ne pas tenir compte de cet auto-colmatage (*i.e.* de retenir une perméabilité de l'EDZ de référence supérieure à 10^{-9} m/s) à l'échéance de la DAC et poursuit l'étude d'un concept alternatif de scellement de fond (galeries de liaison ou d'alvéoles MAVL) faisant l'hypothèse d'une perméabilité de l'EDZ égale à 10^{-6} m/s. Ce concept est examiné au § 3.3.5 du présent rapport.

Pour ce qui concerne l'application de ces résultats obtenus au Laboratoire souterrain sur une galerie expérimentale d'environ 5 m de diamètre aux ouvrages de Cigéo qui peuvent atteindre 10 m de diamètre, l'IRSN considère que celle-ci suppose une certaine « similitude » en termes d'extension et d'intensité entre les zones endommagées en question. L'IRSN estime que parmi les paramètres à prendre en compte pour évaluer cette similitude figurent l'ouverture des fissures, leurs nombre et densité, leurs modes de sollicitation, les glissements maximaux entre blocs, *etc.* L'IRSN considère que l'appréciation de cette similitude comporte deux volets : le changement d'échelle et l'évolution post-fermeture de l'ouvrage à sceller.

- Pour ce qui concerne le changement d'échelle, l'Andra [5] a acquis au Laboratoire souterrain un retour d'expérience couvrant des dimensions d'ouvrages allant du centimètre (boulon d'ancrage) à 7,80 m pour la galerie GRD3 (chambre de montage du tunnelier) et indique que quel que soit le type d'ouvrage et la méthode de construction expérimentée, la structure générale de la zone endommagée est toujours la même dans un horizon donné. L'Andra [5] estime que les mécanismes de formation de la zone endommagée sont bien identifiés et que « rien ne permet de considérer que pour des ouvrages de grand diamètre, les mécanismes mis en jeu dans les argilites au moment du creusement des ouvrages seront différents de ceux observés jusqu'à présent ». L'Andra [5] admet cependant que « l'absence actuelle de définition de la relation entre la densité de fractures (*idem* pour les ouvertures initiales des fractures), et le diamètre de l'ouvrage conduit à rester prudent sur la capacité d'extrapolation aux ouvrages de grand diamètre sur la base du calage des paramètres au Laboratoire souterrain ». Au cours de l'instruction, l'Andra [7] a proposé « en réponse à la demande d'un démonstrateur pour qualifier les ouvrages de grandes dimensions » la construction au Laboratoire souterrain en 2017-2018 d'une galerie de grande dimension (GGD, 9 à 10 m de diamètre excavé) représentative d'une portion courante d'alvéole MAVL telle que prévue dans Cigéo avec toutefois des techniques de réalisation « adaptées aux limites techniques imposées par les capacités du Laboratoire souterrain (réalisation en sections divisées) ». L'IRSN estime que la réalisation du démonstrateur GGD au Laboratoire souterrain donnera à l'Andra

l'occasion de caractériser la zone endommagée susceptible d'apparaître autour d'un ouvrage d'une dizaine de mètres de diamètre et d'en vérifier l'évolution favorable par auto-colmatage.

- Pour ce qui concerne l'évolution post-fermeture de l'ouvrage à sceller, l'IRSN estime qu'à l'instar des observations faites dans la niche du Laboratoire souterrain et ayant conduit à la conclusion ci-avant reprise par l'engagement E.1.2 de la lettre Andra [37], l'Andra devra montrer que le comportement différé de la zone d'argilites endommagées en paroi d'une galerie de stockage à sceller n'est pas de nature à remettre en question la possibilité de son auto-colmatage. Ce point fait intervenir le comportement d'autres composants du scellement tels que le noyau d'argile gonflante (dont la resaturation en galeries nécessiterait, d'après l'Andra [2], de 1 000 à 10 000 ans) et celui des portions de revêtement éventuellement laissées en place dont la rupture est attendue après quelques milliers d'années. Il est repris en fin du présent chapitre 3.3.1.2 ainsi qu'au § 3.3.2 du présent rapport.

En conclusion, l'IRSN estime qu'une valeur de 10^{-9} m/s retenue pour la perméabilité de l'EDZ présente une marge raisonnable (environ un ordre de grandeur pour les fractures initialement les plus perméables) au regard des résultats expérimentaux acquis à ce stade au Laboratoire souterrain dans une galerie de 5 m de diamètre, soit environ la moitié de la dimension envisagée pour les ouvrages de Cigéo. Toutefois, comme indiqué au § 3.2 du présent rapport, cette valeur reste élevée par rapport aux autres composants du scellement et, comme le montre l'équation 2 page 20 du présent rapport, imposera son ordre de grandeur à la perméabilité équivalente « en grand » des scellements de fond. Enfin, l'IRSN estime que l'Andra devra préciser de quelle manière (définition/justification de critères, tests d'acceptabilité, méthodes d'exécution qualifiées...) elle s'assurera que la zone endommagée présente à la paroi d'un ouvrage de Cigéo est suffisamment similaire à celle présente à la paroi de la galerie expérimentale CDZ pour pouvoir appliquer ce résultat expérimental relatif à l'auto-colmatage. Ce point est repris ci-après.

Influence des méthodes de construction (creusement/revêtement)

L'Andra [2] indique que la méthode de construction des ouvrages du stockage visera à limiter autant que possible l'étendue et l'intensité de la zone endommagée en paroi. Des méthodes par attaque mécanique ponctuelle, partielle ou globale seront autant que possible privilégiées. L'IRSN estime que ces méthodes « douces » pourraient contribuer à obtenir une perméabilité de l'EDZ inférieure à 10^{-9} m/s comme évoqué précédemment. À cet égard, l'IRSN rappelle que concernant l'utilisation d'un tunnelier « pleine face », l'ASN a demandé [34] la qualification de cet équipement au regard de l'endommagement qu'il induit. Par ailleurs, l'IRSN constate que l'Andra ne précise pas comment une zone endommagée pourra être déclarée « acceptable » au regard des options de scellement retenues, c'est-à-dire avec auto-colmatage de la zone d'argilites endommagées en paroi pour l'option « de référence » dans l'unité argileuse (UA). À cet égard, l'IRSN estime que l'Andra devra définir des exigences (critères, essais, méthodes qualifiées de réalisation...) relatives à la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage à sceller, en vue de s'assurer au long de la phase d'exploitation et au moment de la fermeture du stockage que ce composant reste dans son domaine de fonctionnement qui lui permettra d'atteindre les performances visées à long terme.

L'Andra [2] indique que dans l'unité silto-carbonatée (USC) où est envisagé le scellement des liaisons surface-fond, la méthode de construction des ouvrages devra autant que possible ne pas créer d'EDZ (perméabilité inférieure à

10⁻¹⁰ m/s). L'Andra a confirmé au cours de l'instruction que l'abattage mécanique était la méthode de creusement privilégiée aussi bien pour les puits que pour des descenderies, ce qui est satisfaisant. Néanmoins, à l'instar de l'UA évoqué ci-avant, l'IRSN constate que l'Andra ne précise pas comment sera appréciée, compte tenu de l'option de scellement retenue, l'acceptabilité de la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage. Par conséquent, aussi bien pour l'UA que pour l'USC et l'UT,

l'IRSN estime que l'Andra devra définir comment la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage à sceller pourra être déclarée « acceptable » au regard des options de scellement retenues. Cette définition devra présenter des marges pour tenir compte d'un possible sur-endommagement produit lors de la mise en place du scellement (dépose du revêtement...) et d'éventuelles incertitudes résiduelles relatives au comportement différé des ouvrages. Ce point fait l'objet de l'engagement E.1.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.3.2 LE NOYAU ARGILEUX

L'Andra [2] indique que le composant principal de l'ouvrage de scellement est un noyau d'argile gonflante, pure ou mélangée à des additifs naturels [2] sans préciser à ce stade sa composition exacte, en particulier la proportion de sable et de bentonite.

L'Andra [3] se réfère à un vaste retour d'expérience international acquis sur ce matériau par des essais et maquettes réalisés jusqu'à des échelles pluri-métriques et correspondant à diverses méthodes de mise en place (blocs précompactés, pellets, damage, projection). Il existe une relation entre perméabilité à saturation, pression de gonflement et densité sèche du matériau que la Figure 10 illustre pour deux types d'argile gonflante (MX80 et Kunigel) utilisés respectivement dans les essais ESDRED (*Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs*) et FEBEX (*Full-scale Engineered Barriers Experiment*). La particularité de la mise en place d'un noyau de scellement par rapport à un remblayage ordinaire est que celle-ci doit se faire en respectant une densité de mise en place requise et homogène, y compris dans les éventuels hors-profils susceptibles d'apparaître à la paroi de l'ouvrage lors de la dépose du revêtement.

À cet égard, l'IRSN indique avoir observé dans le cadre de son programme expérimental SEALEX (*SEALing performance EXperiments* réalisé au laboratoire de Tournemire) qu'un mélange de bentonite et de sable peut, dans le cas d'une resaturation relativement rapide (dite « en phase liquide »), perdre son homogénéité à l'interface avec la roche par ségrégation entre le sable et la bentonite ; cette observation ne s'applique probablement plus dans le cas d'une resaturation lente, dite « en phase vapeur ». L'IRSN estime par conséquent que pour des noyaux susceptibles de subir une resaturation relativement rapide tels que ceux des liaisons surface-fond, une composition en argile gonflante pure permettrait d'éviter une hétérogénéité du noyau argileux à l'interface avec la roche.

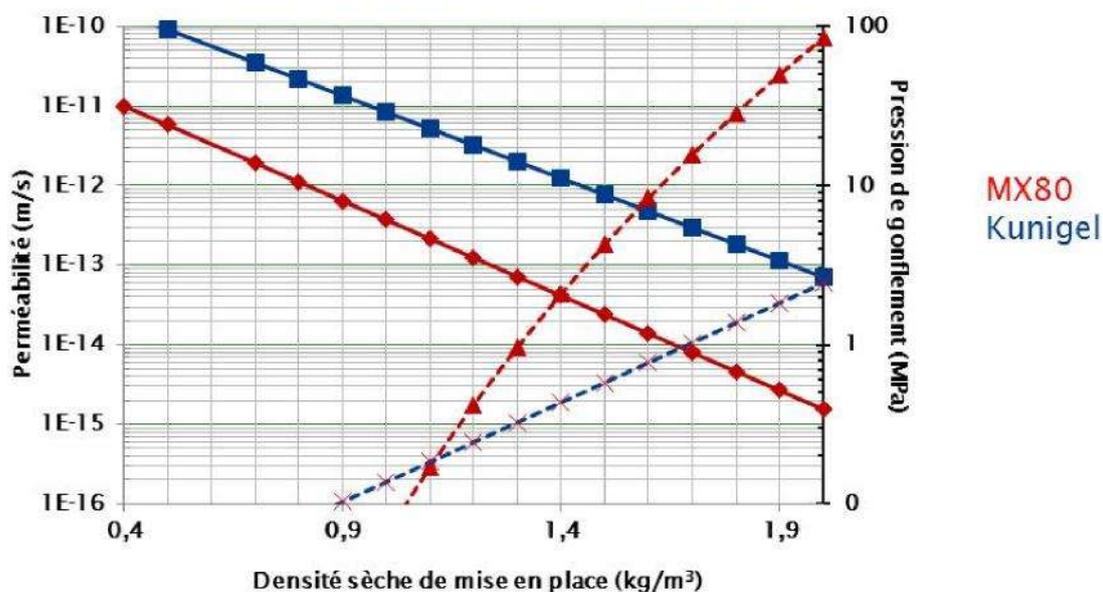


Figure 10 : Perméabilité (traits pleins) et pression de gonflement (pointillés) des argiles gonflantes MX80 et Kunigel (Andra [2], 2013)

Performances hydrauliques

L'Andra [2] indique que des densités sèches de mise en place élevées (au-delà de 1,6 à 1,8) ont été obtenues dans des expérimentations menées jusqu'à des échelles de quelques mètres. Compte tenu des grandes sections à remplir dans Cigéo (jusqu'à 100 m² dans les galeries de liaison ou descenderies), des hors-profil susceptibles d'apparaître lors de la dépose du revêtement et des difficultés technologiques éventuelles pour remplir de façon homogène l'ensemble du volume (par exemple en voûte pour un ouvrage horizontal), l'Andra [2] retient l'objectif d'une perméabilité homogénéisée à saturation du noyau et de son interface avec la roche de l'ordre de 10⁻¹¹ m/s. Compte-tenu de la Figure 10, l'IRSN estime *a priori* cet objectif facilement atteignable puisque ne nécessitant des densités sèches de mise en place que de l'ordre de 0,4 (respectivement 0,9) pour des argiles gonflantes de type MX80 (respectivement Kunigel) et rappelle que la perméabilité du noyau et de son interface retenue dans le « Dossier 2005 » était déjà de cet ordre de grandeur.

Pour ce qui concerne l'évaluation de la longueur nécessaire des noyaux des scellements de fond, l'Andra [2] tient compte de considérations d'ordre technologique (longueur supérieure à deux diamètres de galerie), de marges vis-à-vis d'éventuelles perturbations induites par les massifs d'appui en béton (perturbation alcaline, glissement à long terme...) ainsi que du linéaire d'ouvrages spécifiques qui en résulte, notamment aux extrémités des alvéoles MAVL. L'Andra [2] retient ainsi une longueur minimale du noyau des scellements de fond de 20 m et précise que des évaluations menées dans une gamme de 20 à 40 m montrent « une très faible sensibilité des indicateurs de débit molaire sortant des ouvrages de liaison surface-fond à la longueur des noyaux de scellements ». L'IRSN rappelle que la longueur des noyaux de scellement de galeries était supérieure à 40 m dans le « Dossier 2009 » et remarque que la justification apportée par l'Andra de cette évolution ne concerne que la « partie courante » du noyau de scellement, sans prendre en compte la totalité de la longueur de l'ouvrage de scellement et les possibles perturbations mécaniques induites à ses extrémités par les massifs d'appui (cf. § 3.5.5.1.2 du présent rapport). Par ailleurs, l'IRSN estime qu'une diminution de la longueur des noyaux de scellement réduit également la

« réserve » de gonflement disponible en cas de glissement des massifs d'appui. Ces considérations viennent à l'appui de la conclusion (cf. § 3.5.6 du présent rapport) reprise par l'engagement E.3.1 de la lettre Andra [37].

Pour ce qui concerne les scellements de liaisons surface-fond, l'Andra [2] spécifie une longueur du noyau de 40 m, ce choix étant motivé par « *le rôle essentiel des scellements de liaisons surface-fond* » et « *les caractéristiques mécaniques des argilites dans l'USC favorables au retrait du revêtement et à sa performance hydraulique* ». L'IRSN convient que cette longueur permet de sceller les puits sur pratiquement toute la hauteur disponible des unités carbonatées de la formation hôte. Pour ce qui concerne les scellements de descenderies, l'Andra [2] estime que la position de ceux-ci au toit ou au mur de l'unité silto-carbonatée (USC) n'est pas discriminante vis-à-vis des débits molaires de radionucléides et que quelle que soit la position choisie, la contribution des descenderies reste similaire à celle des autres liaisons surface-fond. Afin de favoriser une saturation totale rapide du noyau, l'Andra implantera celui-ci dans la partie supérieure de l'USC et estime que la garde d'argilites entre le toit du Callovo-Oxfordien et la base du scellement, réduite par rapport aux puits (4 m et 40 m respectivement), ne conduit pas à augmenter le débit molaire sortant de l'ouvrage. L'IRSN ne conteste pas la validité du calcul théorique présenté par l'Andra mais estime néanmoins qu'il est douteux qu'une hauteur de garde maximale de seulement 4 m (soit une moyenne de 2 m sur la longueur du scellement), dans une zone de transition entre deux formations géologiques, soit suffisante pour écarter tout risque de court-circuit hydraulique par d'éventuelles fractures. À cet égard, l'IRSN considère que le concept de scellement retenu devrait concerner une hauteur de garde supérieure à celle visée à ce stade, mettant en œuvre le cas échéant plusieurs ouvrages de scellement répartis dans la partie de descenderie qui intercepte l'USC et l'UT.

L'IRSN estime que l'Andra devra présenter un concept de scellement pour les descenderies qui tire davantage profit de la hauteur des unités carbonatées de la formation hôte. Ce point fait l'objet de l'engagement E.3.2 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

L'Andra [2] indique que des progrès restent possibles dans la simulation numérique de la saturation de noyaux à base d'argile gonflante, notamment pour les assemblages à base de pellets où les interactions entre macro- et micro-porosité (inter- et intra-pellets) sont plus marquées. L'essai *in situ* RESEAL [3] souligne des écarts d'un facteur 2 à 4 sur les temps d'atteinte de la saturation totale. L'IRSN confirme ce phénomène qu'il observe dans le cadre de son propre programme expérimental SEALEX. Finalement, l'Andra [2] estime que les durées de saturation totale des scellements de fond devraient globalement rester dans l'intervalle de 1 000 à 10 000 ans. L'Andra [2] précise que la différence de cinétique de saturation et de mise en charge hydraulique entre les remblais et les scellements conduit à des différences de charges hydrauliques, transitoires et lentes, pouvant atteindre 2 à 3 MPa de part et d'autre d'un scellement. Pour ce qui concerne les scellements de liaisons surface-fond, la saturation de leur partie haute par les eaux de l'Oxfordien est totale en quelques années (sur *a minima* quelques décimètres, cf. § 3.5.2.3.3.1 du présent rapport) et prend quelques milliers d'années pour atteindre l'ensemble du noyau, ce qui conduit à un déséquilibre des pressions d'eau entre les parties haute et basse du noyau pouvant atteindre 3 MPa (pression hydrostatique dans l'Oxfordien), transitoire mais plus rapide. Ces phénomènes complexes sont présentés plus en détail au § 3.5.2.3.3 du présent rapport.

Performances mécaniques

L'Andra [2] indique qu'au-delà d'une performance hydraulique, une performance mécanique du noyau de scellement est également recherchée car sa pression de gonflement contribue à limiter les déformations différées des argilites en paroi et la possible réactivation de la zone endommagée ainsi qu'à refermer les fissures et à réduire la perméabilité de l'EDZ. En contrepartie, cette pression de gonflement sollicite les massifs d'appui dont les études de dimensionnement mécanique sont en cours.

À ce stade, l'Andra [2] vise une pression de gonflement du noyau de quelques mégapascals (de l'ordre de 4 MPa) ce qui exclut *de facto* l'argile gonflante de type Kunigel (*cf.* Figure 10) et conduit à viser, avec une argile de type MX80, une densité sèche à la mise en place de l'ordre de 1,5. Les raisons de ce choix sont discutées au § 3.5.2.3.3.1 du présent rapport. L'IRSN note que la pression de gonflement visée (4 MPa) est bien dans la gamme expérimentée lors de l'essai CDZ mais qu'elle est inférieure à la contrainte effective *in situ* (environ 7 MPa au niveau principal du Laboratoire souterrain) ce qui pourrait prolonger le fluage des argilites au droit du noyau au-delà de la durée nécessaire à la saturation de celui-ci et augmenter le risque d'endommagement différé de la paroi. L'IRSN estime que l'Andra devra montrer que l'évolution post-fermeture de la zone endommagée en paroi des ouvrages ne la conduit pas dans un état qui ne serait plus compatible avec l'option de scellement retenue, c'est-à-dire basée sur un auto-colmatage de celle-ci dans l'unité argileuse (UA) et sur une absence d'endommagement différé dans les unités calcaire et de transition (UT et USC). Ce point (*cf.* § 3.3.1.2 du présent rapport) fait l'objet de l'engagement E.1.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

Justifications expérimentales

Pour vérifier les performances hydrauliques en conditions *in situ* du noyau argileux et de son interface avec la roche, l'Andra [2] mène au Laboratoire souterrain l'essai NSC (*cf.* Figure 11 et Figure 12), en saturation artificielle et à l'échelle ½ par rapport aux dimensions des ouvrages envisagés dans le projet Cigéo. Le massif d'appui en béton bas pH fait également l'objet d'un suivi hydromécanique. L'Andra précise que la mise en place de cet essai n'est pas représentative de conditions industrielles, la faisabilité industrielle d'un scellement faisant l'objet de l'essai FSS actuellement en cours de mise en œuvre (*cf.* Figure 14 ci-après). La mise en place de l'essai NSC s'est achevée au 2nd semestre 2013 et le démarrage de l'hydratation forcée a débuté au 1^{er} trimestre 2014. Les premiers résultats seront disponibles fin 2014-début 2015 et le suivi se poursuivra jusqu'en 2020 environ. L'IRSN estime que, sauf difficultés expérimentales liées à la complexité d'instrumenter cet ouvrage sans le perturber outre mesure, cet essai est de nature à permettre d'évaluer la perméabilité d'un noyau de scellement en grand et de son interface avec la roche une fois totalement resaturé.

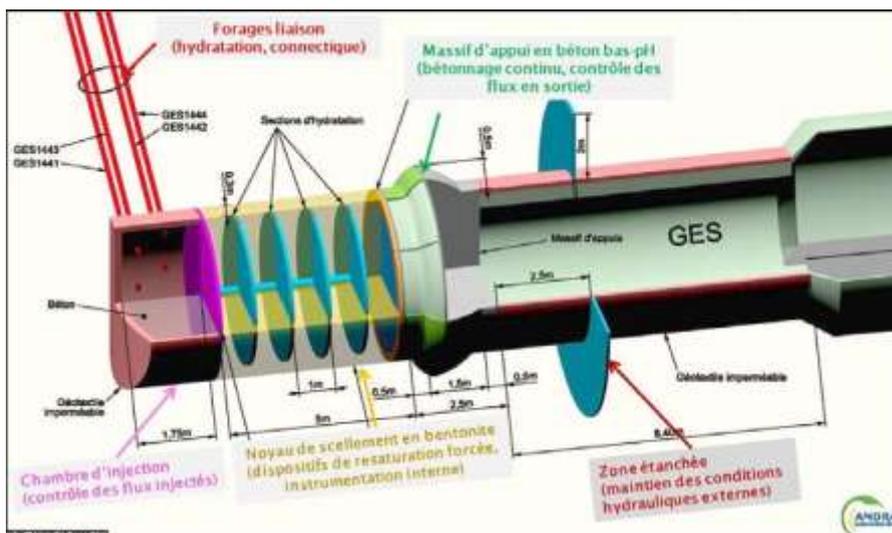


Figure 11 : NSC (Noyau de SCellement) : schéma de principe (Andra [2], 2013)



Figure 12 : NSC : mise en place du noyau de briques de bentonite compactées (Andra [2], 2013)

En complément de l'essai NSC qui a lieu en saturation forcée, l'Andra [2] mène au Laboratoire souterrain l'essai BHN (cf. Figure 13) de suivi de la saturation naturelle d'un noyau argileux de 3 m de long placé dans un forage de 75 cm de diamètre. L'Andra précise que cette échelle est intermédiaire entre celle (environ 10 cm de diamètre) des essais PGZ (Perturbation induite par les GaZ) et celle décimétrique des scellements envisagés pour Cigéo. Le forage a été réalisé en janvier 2013, la mise en place du noyau est prévue en 2014 et les principaux résultats sont attendus pour la DAC. L'IRSN estime que cet essai est particulièrement intéressant car la plupart de ceux réalisés jusqu'à présent au Laboratoire souterrain l'ont été en saturation forcée ; il devrait permettre de conforter et de caler les modèles nécessaires au calcul des durées de saturation.

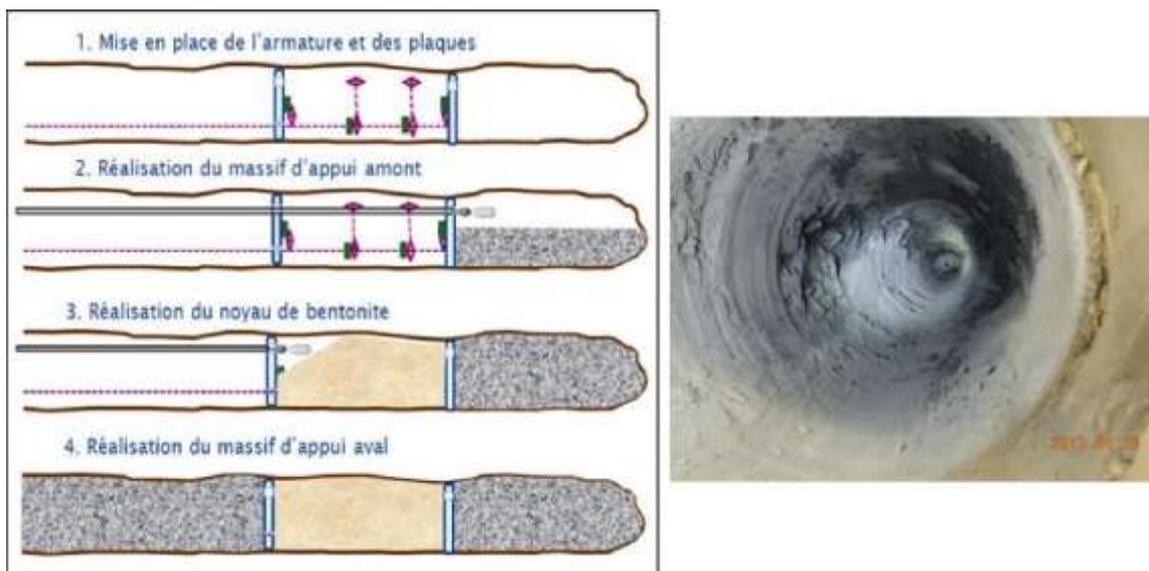


Figure 13 : BHN (Bentonite Hydratation Naturelle) : schémas de principe et forage (Andra [2], 2013)

Faisabilité industrielle

Pour ce qui concerne les puits, l'Andra [2] indique que la verticalité est favorable à une mise en place aisée. Pour les galeries, l'Andra indique que le test de faisabilité de l'essai NSC réalisé au Laboratoire souterrain en 2012 et la mise en place proprement dite de cet essai au 2nd semestre 2013, bien que ne visant pas spécifiquement à une démonstration de faisabilité industrielle, constituent néanmoins une démonstration d'ores et déjà disponible de la faisabilité de la mise en place d'un noyau de scellement pour des ouvrages de 5 à 6 mètres de diamètre. L'IRSN convient que ces éléments sont favorables à la démonstration de faisabilité.

En outre, l'Andra [2] estime que la méthode la plus adaptée aux dimensions des ouvrages du stockage pourrait être la projection de pellets. Cette méthode, appliquée à une argile MX80, a ainsi été retenue pour l'essai FSS (*Full Scale Seal*, cf. Figure 14). FSS est un essai de démonstration technologique de la mise en place d'un noyau de scellement à une échelle représentative des ouvrages à sceller réalisé dans un local situé à Saint-Dizier. D'un diamètre d'environ 9 m, il correspond à un diamètre utile d'environ 7,60 m. L'Andra [2] précise que des conditions représentatives du stockage sont imposées (température, hygrométrie, ventilation, délai de transport du béton...). Les interfaces avec le revêtement laissé en place et les argilites dans les zones de dépose sont représentées par des simulations d'alternances de portions de revêtement maintenues et déposées et de hors-profils (jusqu'à 1 m de profondeur). L'essai FSS inclut la définition et la qualification de moyens de contrôle pour la recette du scellement. La saturation en grand de ce noyau n'est toutefois pas prévue, ni l'évaluation de sa performance hydraulique (cf. NSC et BHN ci-avant).

Un premier massif d'appui en béton bas pH auto-plaçant de 250 m³ a été coulé en juillet 2013. La mise en place du noyau d'argile gonflante de 750 m³ (pellets/poudre) est prévue d'ici juillet 2014. La construction d'un massif d'appui en béton projeté bas pH de 250 m³ suivra. Selon l'Andra [2], l'essentiel des résultats devrait être disponible pour la DAC.

Enfin, un essai complémentaire (REM, Resaturation à l'Echelle Métrique) sera mis en place à l'été 2014 à l'Espace Technologique (ETe) du Centre de Meuse/Haute-Marne (CMHM) afin d'apprécier l'effet du changement d'échelle

par rapport aux essais réalisés en laboratoire lors de la mise au point du matériau argileux de FSS. Il concernera la phénoménologie et la durée de la saturation de ce matériau (homogénéité du comportement hydraulique, pression d'entrée de gaz, perméabilités à l'eau et au gaz, pression de gonflement à saturation...) à une échelle métrique. Le suivi de la saturation, dont la durée totale est estimée à une dizaine d'années, sera réalisé en continu. Les premiers résultats seront exploités fin 2014-début 2015.

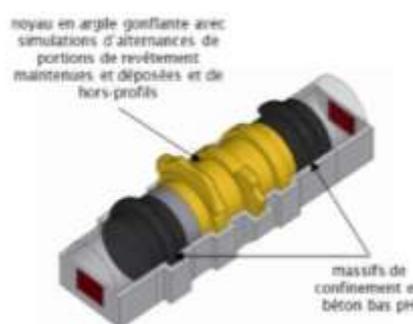
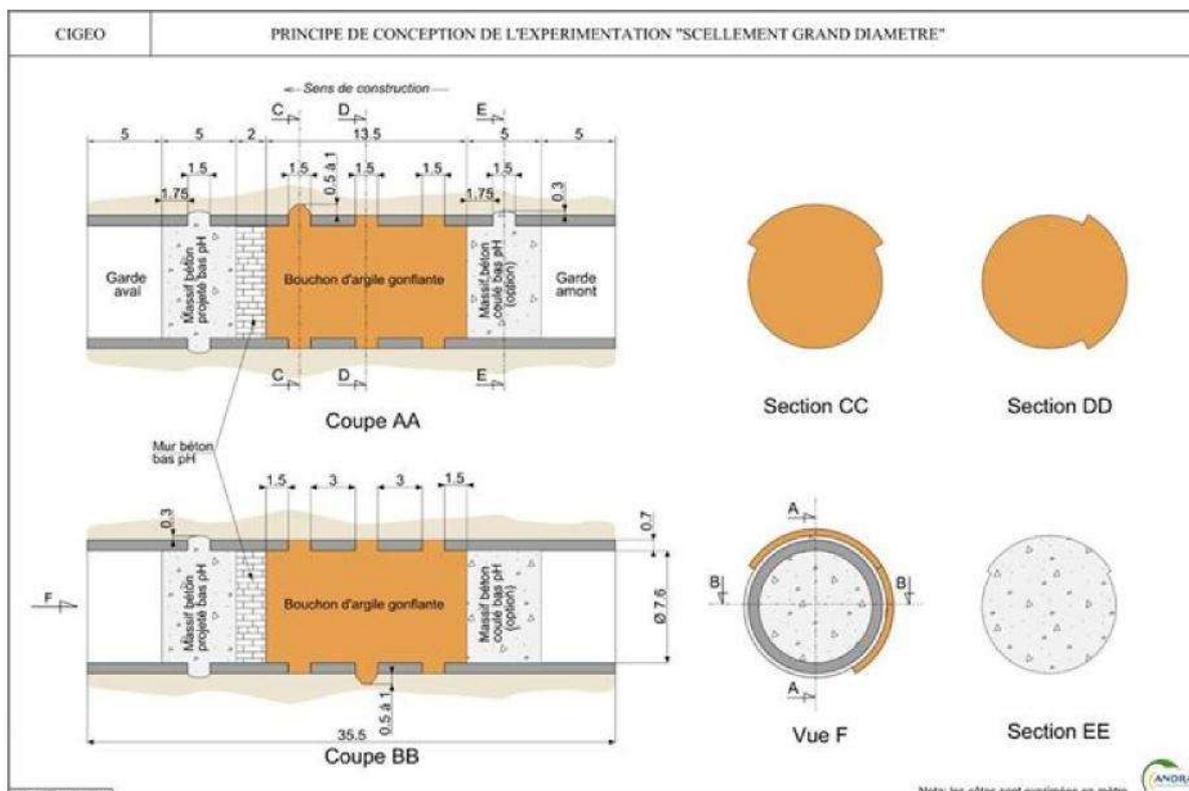


Schéma de principe



Structure d'accueil (St-Dizier)



Représentation de la texture

Figure 14 : FSS (*Full Scale Seal*) : schémas de principe, vue générale et représentation de la texture des argilites (Andra [2], 2013)

L'IRSN estime que par rapport aux essais passés ou en cours dont l'Andra [3] présente une synthèse, l'essai FSS est particulièrement intéressant car il vise à vérifier la possibilité de maintenir, en conditions industrielles et représentatives de celles d'un stockage, la densité de mise en place requise, y compris en voûte d'un ouvrage horizontal et notamment dans des hors-profil. En effet, cette caractéristique de l'argile gonflante mise en place au contact de la roche dans des zones de dépose du revêtement est un paramètre fondamental pour évaluer la

perméabilité équivalente de l'ouvrage (cf. § 3.3.3 du présent rapport). Cet essai offre également la possibilité d'apprécier, à une échelle représentative, l'ouvrabilité et la qualité d'un béton bas pH mis en œuvre selon deux procédés (coulé et projeté). L'essai complémentaire REM fait un lien, en termes de performances hydrauliques, entre FSS et d'autres essais réalisés à plus petites échelles.

L'IRSN estime que les différents essais mis en œuvre par l'Andra semblent à ce stade être en mesure de fournir des éléments probants pour statuer sur la faisabilité industrielle du noyau argileux à l'horizon de la DAC que l'Andra prévoit en 2017.

3.3.3 L'INTERFACE DU NOYAU AVEC LA ROCHE

L'Andra [2] estime que quelle que soit la nature du revêtement de l'ouvrage destiné à recevoir un scellement (béton, cintres métalliques...) une dépose *a minima* partielle de celui-ci est nécessaire afin de permettre un contact direct entre le noyau argileux et la roche. Les enjeux associés au composant « interface du noyau avec la roche » sont donc sa perméabilité hydraulique équivalente et la faisabilité industrielle d'une dépose, au moins partielle, du revêtement.

Performance hydraulique

L'Andra [2] évalue la perméabilité équivalente d'un composant constitué d'une succession de zones de dépose et de maintien du revêtement à l'aide de l'équation illustrée au bas de la Figure 7 du présent rapport. Considérant une perméabilité élevée (10^{-6} m/s) pour les tronçons de revêtement laissés en place et de 10^{-11} m/s pour les remplissages en argile gonflante (noyau et zones de dépose du revêtement), l'Andra [2] estime (cf. Figure 15) qu'au-dessus d'une longueur de dépose de l'ordre de 10 % de la longueur totale du noyau, la perméabilité équivalente du scellement ($K_{\text{scellement}}$) est inférieure à 10^{-10} m/s et ne diminue au-delà que très lentement. L'IRSN observe que la perméabilité équivalente ainsi calculée ($K_{\text{scellement}}$) ne comprend pas la zone d'argilites endommagées en paroi des ouvrages et souligne l'importance prépondérante dans ces calculs de la perméabilité de l'argile gonflante mise en place dans les zones de dépose du revêtement ; **il appartiendra à l'expérience FSS de montrer que la densité à la mise en place de l'argile gonflante dans ces zones de dépose est conforme à la densité requise.** Par ailleurs, l'IRSN souligne le rôle complémentaire de l'essai NSC mené *in situ* au Laboratoire souterrain (cf. § 3.3.2 du présent rapport) et qui vise à vérifier la perméabilité du noyau et de son interface lorsqu'il est en contact direct avec la roche.

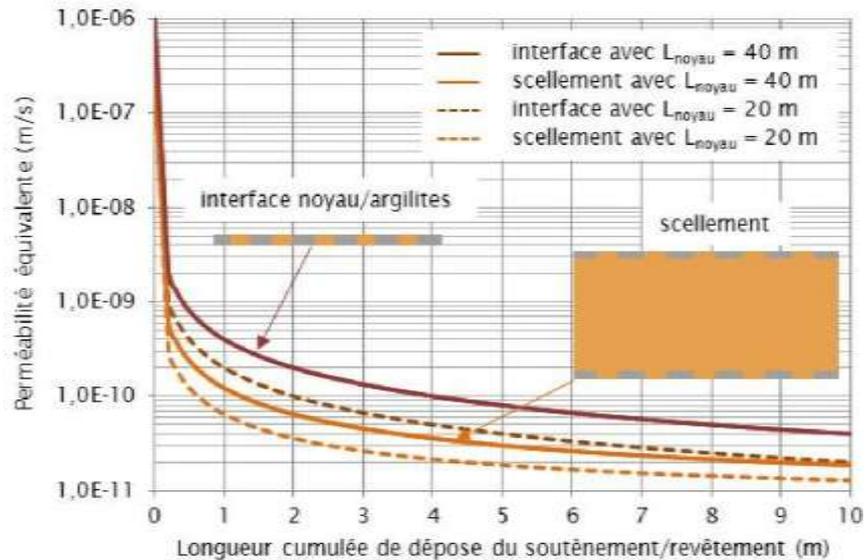


Figure 15 : Perméabilités équivalentes de l'interface noyau/argilites et du scellement en fonction de la longueur cumulée de dépose du revêtement (Andra [2], 2013)

Faisabilité de la dépose du revêtement

L'Andra [2] estime que la faisabilité technique de la dépose d'un revêtement dépend de l'endommagement de la roche derrière celui-ci et rappelle que dans la partie supérieure de la formation hôte traversée par les liaisons surface-fond, les observations faites au Laboratoire souterrain [5] montrent une zone endommagée limitée.

Pour ce qui concerne les liaisons surface-fond, l'Andra retient donc une dépose complète des revêtements des puits et descendries sur la totalité de la longueur du noyau (40 m) ; cependant, pour des raisons de stabilité d'ouvrage lors de la dépose, des anneaux porteurs pourront être maintenus en tant que de besoin. L'Andra [2] précise que la surface d'argilite qui apparaîtrait altérée lors de la dépose sera traitée (purge, surfaçage...) pour assurer un bon contact avec le noyau de scellement. La pente des descendries (environ 10 %) permet d'envisager la totalité de la longueur de leur scellement (40 m) dans l'unité la plus carbonatée (USC). Dans les puits, le scellement sera réalisé sur toute l'épaisseur de l'USC (environ 30 m) et prolongé dans l'unité de transition (UT) pour atteindre la longueur de 40 m.

Dans l'unité argileuse (UA) où sont envisagés les scellements de fond (galeries et alvéoles MAVL) d'une longueur de 20 m, les observations faites au Laboratoire souterrain [5] montrent une zone endommagée plus importante (cf. Figure 9) et des conditions par conséquent moins favorables pour retirer les revêtements. L'Andra [2] retient une dépose partielle du revêtement sur une longueur cumulée de quelques mètres et indique que le retour d'expérience relatif à la dépose des revêtements montre que la stabilité de l'ouvrage et la sécurité du personnel peuvent être assurées moyennant des précautions telles qu'une conception des revêtements favorable à une dépose, un démontage du revêtement par petites portions (typiquement 1 à 2 m) et le maintien d'anneaux porteurs de quelques mètres entre les zones de dépose. L'Andra précise par ailleurs que l'orientation des galeries destinées à recevoir un scellement (parallèle à la contrainte *in situ* majeure), en limitant l'extension de la zone endommagée à leur toit, est également favorable à la dépose de leur revêtement (cf. Figure 9).

L'IRSN estime que la dépose d'un revêtement reste une opération délicate, particulièrement en galeries, ce qui est attesté par le retour d'expérience des activités minières. L'IRSN considère que l'objectif de l'Andra [2] visant

à limiter le linéaire d'ouvrages spécifiques dédiés à la mise en place des scellements doit prendre en compte la possibilité de désordres plus ou moins prononcés lors de la dépose du revêtement et donc l'instauration de marges suffisantes dans la longueur des scellements de fond, notamment aux extrémités des alvéoles MAVL, dès la conception. En effet, une fois les galeries d'accès aux alvéoles MAVL construites, il sera impossible de revoir à la hausse la longueur des scellements destinés à y être implantés. Ce point contribue à la conclusion ci-après, qui fait l'objet de l'engagement E.1.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

L'Andra [2] indique qu'un premier essai de dépose partielle de revêtement (DCN, Dépose de Cintres dans la Niche) est planifié au Laboratoire souterrain au second semestre 2014 à une profondeur de -445 m dans l'unité silto-carbonatée (USC) et que l'essentiel des résultats sera disponible pour la DAC ; cet essai devrait permettre d'observer l'état de la roche en paroi après dépose, d'évaluer la nécessité d'une purge des argilites et de mettre au point un procédé le cas échéant. Un essai de dépose de revêtement dans l'unité argileuse (UA) du Laboratoire souterrain pourra être réalisé au-delà de 2016 lorsque le revêtement rigide mis en place en 2013 (voussoirs) sera suffisamment mis en charge.

L'IRSN estime que la dépose d'un revêtement en vue de la mise en place d'un noyau de scellement est d'autant plus délicate que celle-ci doit être réalisée en limitant la réactivation de la zone endommagée présente à la paroi des ouvrages et que les essais de dépose envisagés par l'Andra seront, à cet égard, nécessaires.

En conclusion, l'IRSN :

- souligne le rôle prépondérant de l'argile gonflante mise en place dans les zones de dépose du revêtement vis-à-vis des performances mécaniques et hydrauliques globales du scellement ;
- estime que l'Andra devra préciser comment la possibilité de désordres plus ou moins prononcés lors de la dépose d'un revêtement, notamment aux extrémités des alvéoles MAVL où le linéaire de galerie disponible est à prévoir dès la conception, est prise en compte. À cet égard, l'Andra s'est engagée lors de la réunion préparatoire à la réunion du groupe permanent à prévoir des dispositions « *en cas de non-respect des exigences spécifiées* » (engagement E.1.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport).

3.3.4 LES MASSIFS DE CONFINEMENT

Les massifs de confinement (ou « massifs d'appui ») ont pour fonction de confiner mécaniquement le noyau argileux, c'est-à-dire de s'opposer aux déformations à ses extrémités afin de lui permettre, par butée, de développer et de maintenir sa pression de gonflement. Afin de limiter les interactions chimiques avec les matériaux argileux, l'Andra retient la mise en œuvre de bétons bas pH (pH de l'eau interstitielle ≤ 11 , cf. § 3.5.3 du présent rapport).

Performances attendues

L'IRSN note que les remblais d'appui, présents dans les « Dossiers 2005 » et « 2009 » en complément des massifs d'appui en béton, ne sont plus retenus. L'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'elle considère à ce stade des études que « *les massifs d'appui en béton disposeraient dans le temps d'une rigidité et d'une résistance en*

cisaillement suffisantes pour assurer leur fonction d'appui pendant le transitoire hydraulique-gaz et limiter le déplacement du noyau au-delà. Par ailleurs, la conception d'un remblai frottant assurant les mêmes performances apparaît peu maîtrisable pour les diamètres de descenderies et de galeries envisagés. Dans ces conditions, le remblai disposé au contact des massifs d'appui en béton ne fait pas l'objet de spécifications particulières par rapport à celles du remblai courant. Les études en cours sur le dimensionnement mécanique des massifs d'appui permettront de vérifier ce choix de conception ». Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

L'Andra [2] indique que des travaux de pré-dimensionnement réalisés en 2005 ont abouti à différents concepts de massifs d'appui de longueur pluri-métrique à décamétrique mais que plusieurs points, faisant l'objet d'études en cours, restent à approfondir comme par exemple la prise en compte du transitoire de saturation et d'équilibrage hydromécanique entre les argilites et les autres composants du scellement ou les effets des évolutions chimiques aux interfaces sur les propriétés mécaniques des massifs d'appui, notamment les frottements aux interfaces argilites/béton et béton/béton. Au cours de l'instruction, l'Andra a confirmé que les dispositifs envisagés dans le « Dossier 2005 » pour assurer la stabilité des massifs d'appui (*cf. Figure 16*) étaient toujours en cours d'analyse « *sur la base notamment de critères de faisabilité et de maîtrise des frottements nécessaires à la stabilité du massif* ». Le principe de conception du massif d'appui, frottant ou ancré dans la roche, n'est donc pas encore fixé.

L'Andra [2] se réfère aux règles de l'art en matière d'ouvrages tels que les barrages et indique que les interfaces avec la roche (ou le revêtement laissé en place) seront traitées ; elle vise un module d'Young du béton sur échantillons supérieur à 30 GPa et des coefficients de frottement argilites/béton et béton/béton élevés (supérieurs à 0,7). L'Andra [2] précise que des essais de frottement argilites/béton réalisés sur des bétons classiques CEM V ayant subi une lixiviation extrême par du nitrate d'ammonium (*i.e.* une dissolution de la phase cimentaire) ne montrent pas de modification significative des propriétés de frottement et ajoute que sous contraintes mécaniques, la dégradation chimique du béton et des argilites pourrait créer une imbrication entre zones reminéralisées.

L'IRSN constate que les essais de frottement argilites/béton évoqués par l'Andra n'ont pas été réalisés avec un béton bas pH (*cf. § 3.5.3* du présent rapport), ce qui ne permet pas de conclure à ce stade quant à l'absence d'effet d'une lixiviation sur les propriétés de frottement des bétons qui seraient effectivement mis en œuvre dans Cigéo. Pour ce qui concerne les règles de l'art en matière d'ouvrages tels que les barrages [31] [32], l'IRSN note que ceux-ci sont généralement fondés sur un massif résistant avec, le cas échéant, un traitement de la roche par injection ; dans l'unité la plus argileuse de la formation hôte, la présence d'une EDZ autour de la galerie pourrait rapprocher ce cas de celui d'une roche stratifiée ou fracturée pour laquelle le coefficient de frottement béton/roche est limité à 0,5. Par ailleurs, l'IRSN estime que certaines pratiques usuelles en génie civil, telles que la nécessité ou non d'injecter les interfaces, devront être analysées au regard de la durée particulièrement longue pendant laquelle le massif d'appui doit remplir ses fonctions. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'un programme d'essais « *sur échantillons mais aussi directement à la paroi d'une galerie dans le laboratoire souterrain [est prévu] d'ici 2015* ». L'IRSN souligne que la valeur du coefficient de frottement qui sera finalement retenue conditionnera la longueur du massif d'appui dans le cas où celui-ci serait supposé frottant.

À cet égard, l'IRSN estime que le dimensionnement d'un massif d'appui frottant nécessite de connaître la distribution et l'évolution des contraintes effectives aux interfaces au regard de l'évolution de la pression de gonflement du noyau de scellement, c'est-à-dire de prendre en compte le transitoire de saturation et d'équilibrage hydromécanique entre la roche et l'ensemble du scellement dans une approche poromécanique. Compte tenu de la durée sur laquelle le massif d'appui doit remplir ses fonctions (jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années), le comportement rhéologique du béton fait l'objet d'incertitudes (évolution de sa cohésion par exemple) que les études en cours doivent prendre en compte au même titre que celles relatives au comportement différé de la roche ou à l'effet du rééquilibrage hydraulique sur les contraintes effectives appliquées sur les interfaces frottantes. Dans le cas où le massif d'appui serait ancré dans la roche, l'IRSN estime que l'impact de cet ancrage sur la roche environnante devra également être évalué.

L'IRSN souligne le rôle prépondérant du massif d'appui pour maintenir une condition de « volume constant » pendant la saturation du noyau, ce qui lui permet de développer sa pression de gonflement, et que cet enjeu est d'autant plus important que la longueur du noyau, et donc la « réserve » en termes de potentiel de gonflement, est faible. Ce point (cf. § 3.5.6 du présent rapport) fait l'objet de l'engagement E.3.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport, de la lettre Andra [37].

place, en particulier aux interfaces. Elle précise que la mise en place doit néanmoins tenir compte d'un retrait endogène du même ordre de grandeur que pour les bétons classiques, nécessitant une attention sur le traitement des interfaces avec la roche ou le revêtement s'il est laissé en place.

L'Andra [2] estime que, pour autant que les règles de l'art soient respectées (coulage par plots, reprises de bétonnage, injections aux interfaces...), l'essai TSX (*Tunnel Sealing eXperiment*, Canada, 1998-2004), le projet européen ESDRED (*Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs*, 2004-2008) et récemment le coulage d'un premier massif d'appui dans l'essai FSS (*Full Scale Seal*, en cours) valident la faisabilité de la mise en place de volumes de béton bas pH significatifs en configuration de galerie, avec notamment un bon contact avec la roche (ou le revêtement s'il est maintenu en place). L'Andra [2] précise que la mise en place du massif d'appui aval de l'essai FSS sera réalisée de sorte à éviter tout échange d'eau entre le béton et le noyau argileux. L'IRSN estime que cet objectif visant à vérifier la possibilité de limiter l'impact chimique du béton sur les argilites lors de sa mise en place (cf. § 3.5.3 du présent rapport) est satisfaisant.

L'Andra [2] rappelle que l'essai TSX a été l'occasion d'un premier retour d'expérience avec un volume de béton bas pH de l'ordre de 76 m³ coulé en un peu plus de 8 heures par passes d'environ 1,6 m³. Des élévations de température maximales de 20 °C ont été atteintes à cœur au cours d'un transitoire thermique limité à quelques mois. Les retraits mesurés au contact de la roche ont été faibles (250 µm en moyenne) et ont fait l'objet d'injections de reprises de bétonnage qui avaient été anticipées. Les propriétés mécaniques obtenues ont été élevées (résistance à la compression simple (Rc) d'environ 60 à 80 MPa). L'essai TSX a néanmoins souligné l'intérêt d'une géométrie simple du massif d'appui pour éviter les concentrations de contraintes au niveau des zones à angles prononcés, susceptibles de générer des fissures/fractures locales importantes [5].

L'essai « *Full Scale In Situ Test* » réalisé au laboratoire du Grimsel (Suisse) dans le cadre du projet européen ESDRED a montré la possibilité de réaliser par projection (suivant une série de passes incurvées) un massif d'appui de 3,5 m de diamètre et 4 m de long, soit près de 40 m³, capable de résister à une poussée de 4 MPa, ce qui est du même ordre que la pression de gonflement visée à ce stade par l'Andra.

En juillet 2013, un premier massif d'appui en béton bas pH autoplaçant de 250 m³ (massif amont) a été coulé dans le cadre de l'essai FSS (cf. Figure 17). Ce massif a été réalisé de manière continue en 72 heures dans des conditions représentatives de celles du stockage (température et hygrométrie). L'Andra [2] précise que la température maximale mesurée est inférieure à 50 °C et que le très faible volume de coulis injecté pour combler les retraits suggère un bon remplissage du volume, y compris dans les zones représentatives de la dépose du revêtement visibles sur la Figure 17. Le massif suivant (aval) sera construit en béton bas pH projeté.

L'IRSN estime que les éléments réunis par l'Andra relatifs à la démonstration de la faisabilité industrielle d'un massif d'appui sont satisfaisants à ce stade du projet.



Figure 17 : FSS (*Full Scale Seal*) : coulage d'un massif d'appui en béton bas pH autoplaçant de 250 m³ (Andra [2], 2014)

3.3.5 VARIANTE DU SCHELLEMENT DE FOND AVEC COUPURES HYDRAULIQUES

L'Andra [2] indique qu'afin de laisser ouverte à ce stade la possibilité de prendre en compte ou non le phénomène d'auto-colmatage de la zone endommagée dans l'unité argileuse (UA), une variante du concept de scellement de fond est également étudiée. Celle-ci consiste en la réalisation de saignées radiales, remplies d'argile gonflante, venant interrompre la continuité de l'EDZ et du revêtement laissé en place (cf. Figure 18).

L'Andra précise que l'utilisation de béton bas pH évite la dépose du revêtement à proximité des saignées et que la profondeur de celles-ci est déterminée par l'extension de l'EDZ en paroi de galerie, au maximum de l'ordre de 1 fois le rayon excavé pour une galerie de 4 à 5 m de diamètre (cf. Figure 9). L'IRSN constate que cette « variante » est très proche de l'option qui était présentée en « référence » dans les « Dossiers 2005 » et « 2009 ».

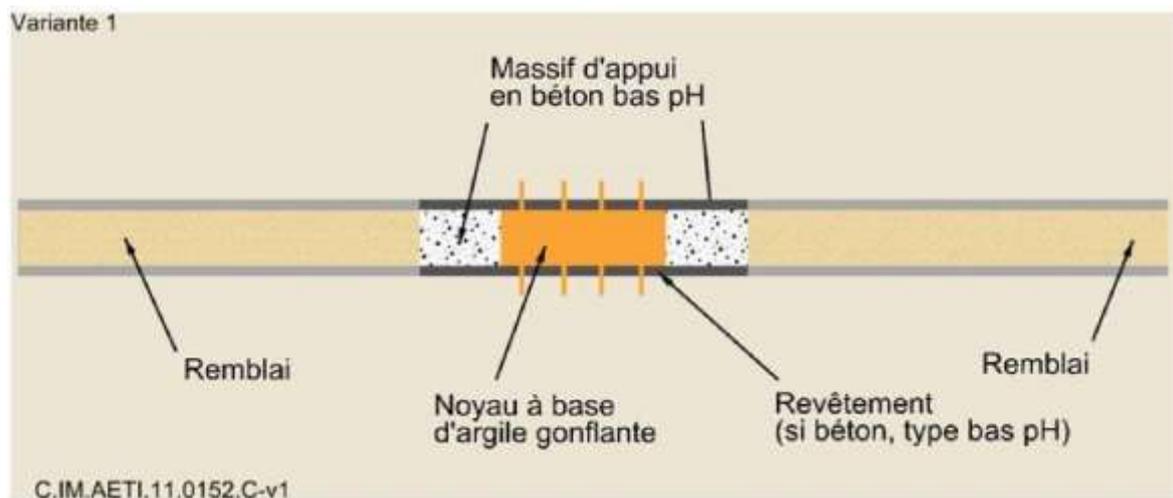


Figure 18 : variante du concept de scellement de fond (Andra [2], 2013)

Performance hydraulique

L'Andra [2] évalue analytiquement la perméabilité équivalente de l'ensemble {EDZ + coupures hydrauliques} et indique qu'en supposant une perméabilité élevée (10^{-6} m/s) pour l'EDZ et de 10^{-11} m/s pour l'argile gonflante mise en place dans les saignées, la perméabilité équivalente de l'ensemble diminue rapidement, dès une longueur cumulée d'interruption de l'EDZ de quelques décimètres, pour tendre vers 10^{-10} m/s. La perméabilité équivalente du revêtement traversé par ces saignées évolue de la même manière, comme le montre la Figure 19. Sur cette base, l'Andra retient pour cette variante la réalisation de 3 à 5 coupures hydrauliques de 30 cm d'épaisseur espacées régulièrement et remplies d'argile gonflante.

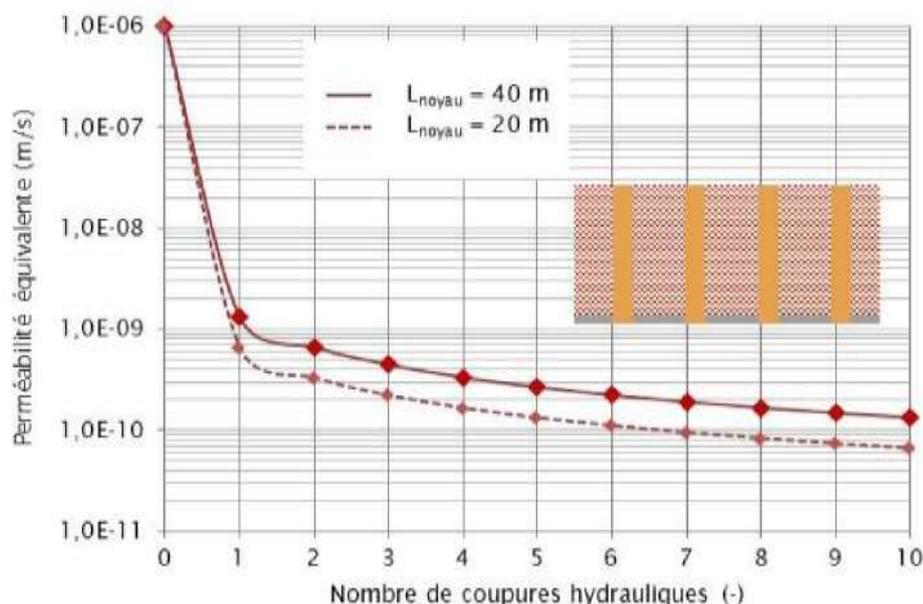


Figure 19 : Perméabilités équivalentes du revêtement (10^{-6} m/s) et de l'EDZ (10^{-6} m/s) interrompus par des saignées (30 cm, 10^{-11} m/s) en fonction du nombre de saignées pour deux longueurs de noyau (40 m et 20 m)

Sur le plan des performances hydrauliques, l'IRSN convient de l'intérêt d'examiner cette variante qui pourrait permettre de pallier une EDZ de forte perméabilité (10^{-6} m/s) et de s'affranchir de la dépose du revêtement. L'IRSN estime que cette variante pourrait également permettre, toutes choses égales par ailleurs, d'augmenter

sensiblement l'efficacité des scellements de fond. L'IRSN ajoute que les conditions d'acceptabilité de l'EDZ associées à l'utilisation de cette variante paraissent également plus simples à définir car elles sont *a priori* seulement liées à la profondeur de la saignée. Cependant, à l'instar de l'examen des « Dossiers 2005 » et « 2009 », l'IRSN estime toujours que cette variante nécessite une démonstration de performance *in situ* et en vraie grandeur. Par ailleurs, elle nécessite la mise au point d'un procédé industriel pour ce qui concerne à la fois la possibilité de réaliser des saignées stables suffisamment profondes et d'y mettre en place une argile gonflante. À cet égard, le programme d'essais présenté par l'Andra [2] comporte un volet réalisé en surface (essai SET pour « Saignée à l'Espace Technologique ») et un autre réalisé au Laboratoire souterrain (essais TSS pour « Tests de Scellement en Saignée ») à une échelle proche de 1/2 par rapport aux dimensions des ouvrages envisagés pour Cigéo. Ce programme est examiné ci-après.

Faisabilité technique des saignées

L'Andra [2] estime que le retour d'expérience acquis au laboratoire souterrain du Mont-Terri (EZ-A en 2004) et au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (KEY en 2005, TSS1 en 2011) montre que le creusement de saignées de 30 cm d'épaisseur est acquis jusqu'à 2,5 m de profondeur. L'Andra précise que la saignée KEY réalisée en 2005 a montré un très faible sur-endommagement de la roche à son voisinage, y compris à l'intersection avec la galerie, ce qui est cohérent avec les simulations numériques réalisées à ce jour. Par ailleurs, l'Andra [2] indique que la saignée TSS1 réalisée en 2011 sur une section complète (360°) et laissée en l'état pour le suivi de sa géométrie est stable depuis et présente un état de surface satisfaisant (cf. Figure 20). L'IRSN convient de ces résultats favorables mais souligne que selon les observations faites au Laboratoire souterrain (cf. Figure 9), la profondeur nécessaire pour interrompre l'EDZ est d'environ un rayon d'ouvrage, ce qui pour des galeries de 10 m de diamètre conduit à des saignées de 5 m de profondeur, soit le double des profondeurs expérimentées à ce jour.

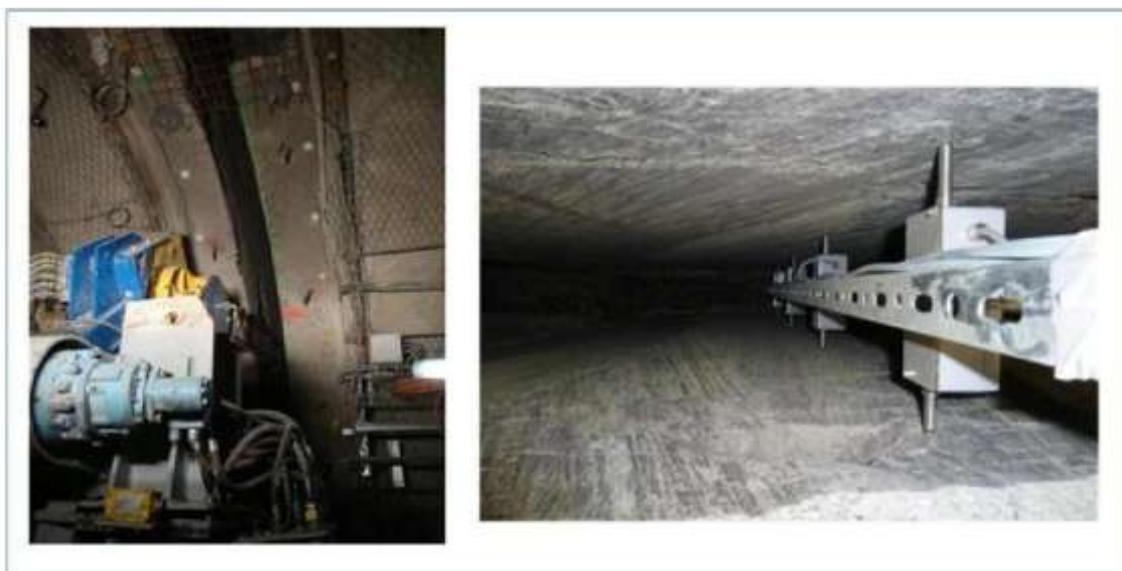


Figure 20 : TSS1 (Test Scellement Saignée 1) : saignée sur un tour complet réalisée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2011 (Andra [2], 2013)

Mise en place d'une interruption de l'EDZ avec de l'argile gonflante

Concernant le remplissage d'une saignée respectant la densité requise, l'Andra [2] rappelle qu'un premier essai réalisé au Mont-Terri selon une méthode expérimentale a donné un résultat satisfaisant avec un taux de vides technologiques de quelques pourcents ; depuis, l'essai SET réalisé fin 2013 dans une maquette de galerie du Laboratoire souterrain (à l'échelle 1 pour le Laboratoire, à l'échelle ½ pour Cigéo) a montré, dans des conditions représentatives d'un stockage, la faisabilité de la mise en place robotisée d'un assemblage de briques compactées dans la partie haute d'une saignée de 2,5 m de profondeur et 30 cm de large ainsi que la possibilité de mettre en place un mélange pulvérulent dans la partie basse de celle-ci (cf. Figure 21). L'IRSN convient de ces résultats prometteurs mais souligne à nouveau qu'ils doivent être confirmés à l'échelle 1 des ouvrages du stockage.



Mise en place robotisée de briques compactées en partie haute - Mise en place de pellets/poudre en partie basse

Figure 21 : SET (Saignée à l'Espace Technologique) : méthode industrielle de remplissage d'une saignée (Andra [2], 2014)

Enfin, l'Andra [2] rappelle les résultats obtenus en 2005 au Laboratoire souterrain sur une demi-saignée au radier d'une galerie dans le cadre de l'expérimentation KEY :

- augmentation significative des vitesses d'ondes dans la roche, signe d'une fermeture mécanique des fissures, observée au voisinage d'une saignée remplie d'argile gonflante en resaturation forcée (résultat identique obtenu en simulant la pression de gonflement avec un vérin plat et déjà observé par ailleurs au Mont-Terri lors de l'essai EZ-A) ;
- interruption de la connectivité de l'EDZ mise en évidence par des essais d'interférence au gaz et de traçage à l'hélium de part et d'autre d'une saignée remplie de résine.

L'IRSN avait estimé lors de l'examen du « Dossier 2009 » que ces résultats, obtenus sur des saignées partielles, restaient qualitatifs et constaté qu'un dysfonctionnement dans la resaturation forcée de l'expérience KEY ne

permettait pas de quantifier la performance de ce type d'ouvrage avant 2015 ; l'Andra a depuis expliqué ce dysfonctionnement par celui du système d'hydratation qui ne fonctionnait pas dans la partie supérieure de la saignée (*i.e.* en piédroit de la galerie expérimentale). L'IRSN soulignait déjà que la quantification de performance d'une saignée complète envisagée au-delà de 2015 devrait, pour être représentative, se faire à l'échelle 1 des concepts de stockage.

L'Andra étudie actuellement la possibilité de suivre, en surface et sur maquette, la saturation d'un assemblage de briques tel que mis en place dans l'essai SET et notamment, la fermeture des jeux technologiques de mise en place et l'homogénéisation du remplissage.

En conclusion, l'IRSN estime que la variante étudiée par l'Andra pourrait :

- permettre de s'affranchir de la dépose du revêtement ;
- conduire à des conditions d'acceptabilité d'une EDZ plus faciles à définir ;
- permettre de pallier l'éventualité d'une EDZ de forte perméabilité et ainsi augmenter sensiblement l'efficacité du scellement.

Toutefois, à ce stade du projet, une démonstration de performance *in situ* ainsi que la mise au point d'un procédé de réalisation ne sont pas encore acquis à l'échelle 1 des ouvrages du stockage. L'IRSN note cependant les éléments encourageants obtenus à l'échelle ½.

L'IRSN estime que les investigations pour développer cette variante devront se poursuivre jusqu'au stade du prototype *in situ* et à l'échelle 1 des ouvrages du stockage dans le cadre de la phase pilote. Ce point fait l'objet de l'engagement E.1.3 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.3.6 INTEGRATION DES CONTRAINTES LIEES A LA RADIOPROTECTION DU PERSONNEL DANS L'ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE DES SCHELLEMENTS

L'Andra [2] n'indique pas comment les contraintes liées à la radioprotection du personnel seraient prises en compte lors de la construction d'un ouvrage de scellement. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que : « pour l'alvéole MAVL, des protections radiologiques sont mises en place aux deux extrémités de la partie utile :

- en fond d'alvéole, la protection radiologique consistant en un mur de béton est mise en place dès la construction de l'alvéole ; celle-ci est équipée d'une vis de protection radiologique assurant ainsi la protection du personnel pendant les opérations de construction du scellement dans la galerie de retour d'air déséquipée ;
- en tête d'alvéole, un mur de radioprotection, a priori constitué de blocs de béton, est mis en place à proximité des derniers colis de déchets afin d'assurer la protection du personnel pendant les opérations de déséquipement [de la cellule de manutention] puis de construction du scellement ».

L'IRSN convient que les contraintes les plus fortes du point de vue de la radioprotection sont au voisinage des alvéoles MAVL. La réponse de l'Andra n'appelle pas de commentaire particulier à ce stade du projet mais l'IRSN

estime que ce point devra être précisé dans le « Dossier d'options de sûreté » que l'Andra prévoit de déposer en 2015.

3.4 OBJECTIFS DE PERFORMANCE HYDRAULIQUE DES SCELLEMENTS

À titre indicatif et sans que ces choix soient définitifs, l'Andra [2] retient pour les évaluations phénoménologiques présentées au § 3.5 du présent rapport les éléments généraux suivants :

- pour le noyau en argile gonflante :
 - un assemblage à base de poudre et de pellets en argile gonflante de type MX80 ;
 - une densité sèche à la mise en place (jeux de mise en place inclus) de l'ordre de 1,5 visant une perméabilité à saturation inférieure à 10^{-11} m/s et une pression de gonflement d'environ 4 MPa ;
- une dépose du revêtement, *a minima* partielle par tronçons de 1 à 2 m ;
- pour les massifs d'appui :
 - un béton bas pH coulé par plots avec revêtement laissé en place, reprises de bétonnage entre plots, injections aux interfaces avec le revêtement laissé en place ;
 - une mise en place évitant tout échange d'eau de gâchage du béton avec le noyau argileux ;
- pour les éventuelles coupures hydrauliques (en variante) :
 - une réalisation à la scie (en une ou plusieurs sections) et la mise en place d'un matériau de remplissage à base d'argile gonflante (pièces/briques compactées et/ou de pellets) ;
 - une densité sèche à la mise en place du matériau de remplissage (jeux compris) visant une perméabilité à saturation inférieure à 10^{-11} m/s.

À l'aide de calculs analytiques simples (cf. Figure 22 et Figure 23), l'Andra estime que les scellements retenus visent une perméabilité équivalente « en grand » (*i.e.* zone endommagée en paroi incluse) :

- de l'ordre de 10^{-11} m/s pour les scellements de liaisons surface-fond ;
- inférieure à 10^{-9} m/s pour les scellements de fond (galeries ou alvéoles MAVL, référence et variante).

L'IRSN souligne que si les perméabilités équivalentes « en grand » des options « de référence » et « en variante » des scellements de fond indiquées ci-dessus sont du même ordre de grandeur (10^{-9} m/s), la perméabilité de l'EDZ prise en compte diffère de trois ordres de grandeur (10^{-6} m/s et 10^{-9} m/s avec auto-colmatage). À perméabilité de l'EDZ identique, l'IRSN estime par conséquent que la variante pourrait augmenter sensiblement l'efficacité des scellements de fond.

L'Andra [2] estime que ces valeurs de perméabilité équivalente, combinées aux principes et exigences architecturaux retenus (regroupement des liaisons surface-fond, organisation spatiale par quartiers borgnes, au moins deux scellements le long des galeries jusqu'à la base des liaisons surface-fond, distance maximale de 400 m entre un scellement et l'alvéole le plus proche, scellements aux extrémités des alvéoles MAVL...), répondent à l'objectif de privilégier la voie de transfert des radionucléides par la formation du Callovo-Oxfordien.

L'IRSN constate que l'ordre de grandeur de perméabilité retenu dans le « Dossier 2005 » pour les scellements de liaisons surface-fond est inchangé. En revanche, pour les scellements de fond, l'IRSN constate une perméabilité visée supérieure à celle indiquée par le « Dossier 2005 » (10^{-10} m/s). Le rôle des scellements sur

la performance globale du stockage compte tenu de ces objectifs de performance est examiné au § 3.6 du présent rapport ; auparavant, le § 3.5 examine les éléments apportés par l'Andra pour justifier que les différentes sollicitations susceptibles de nuire aux performances des scellements sont maîtrisées.

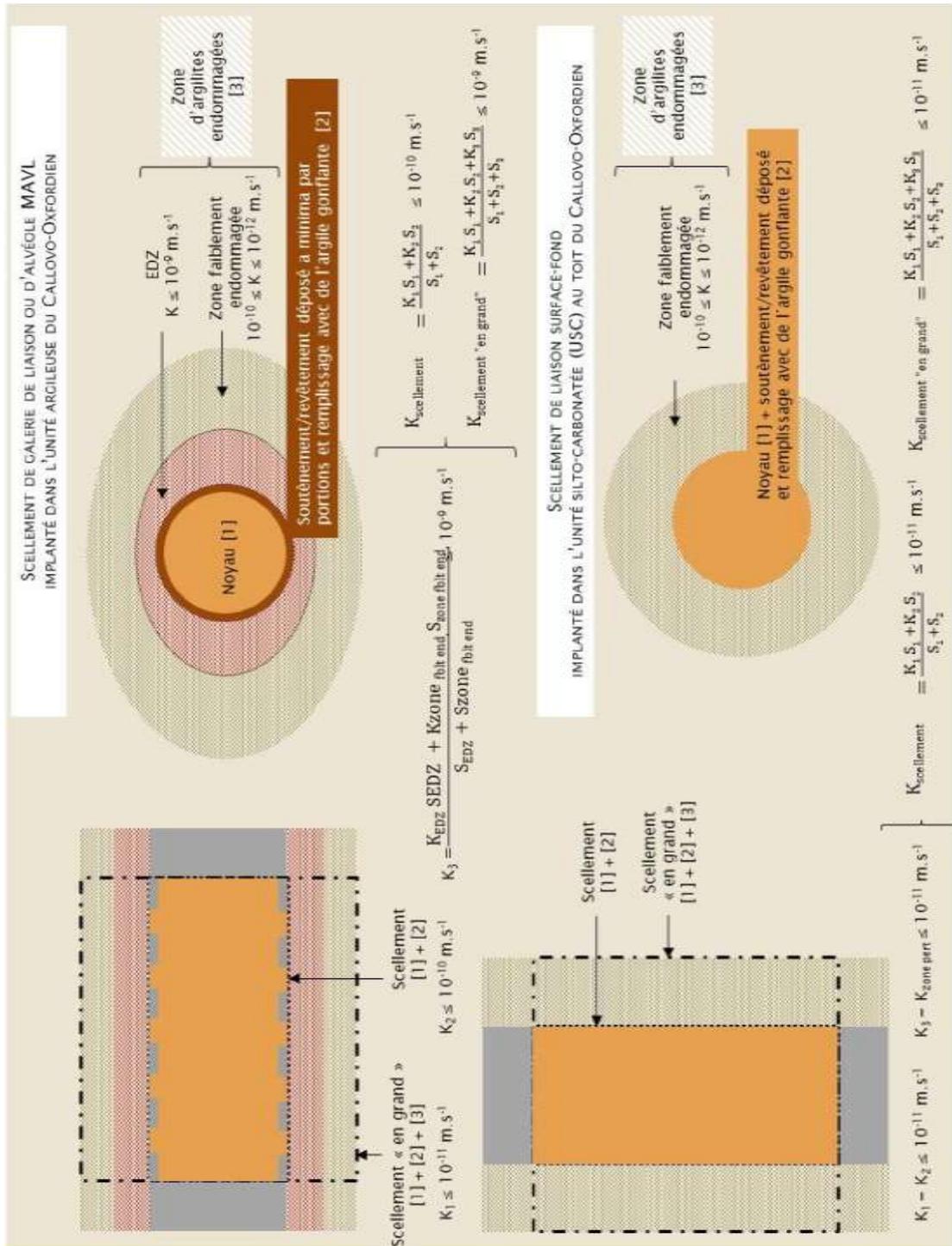


Figure 22 : Concepts de référence : principe et calcul des perméabilités équivalentes (Andra [2], 2013)

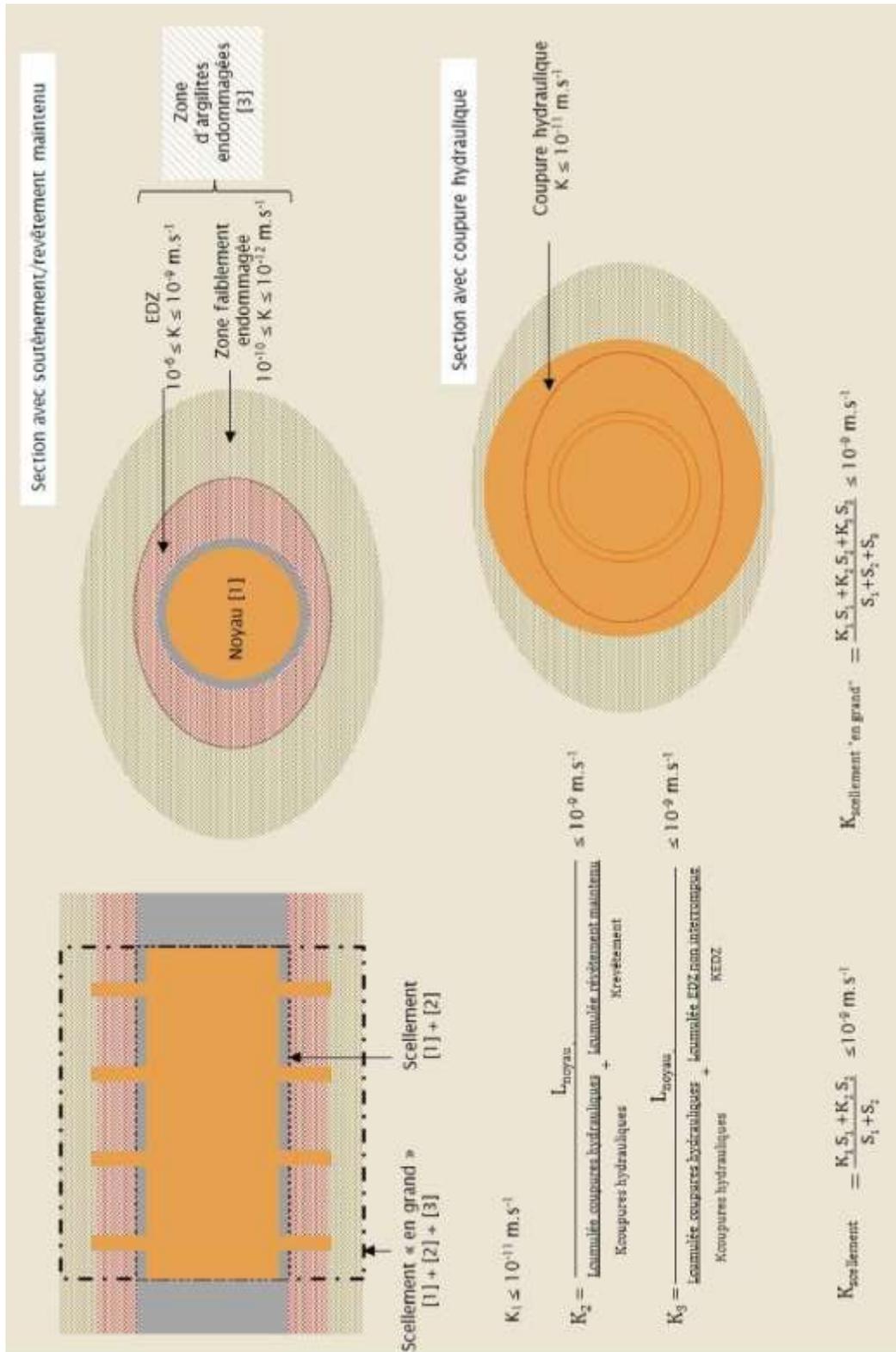


Figure 23 : Variante avec coupures : principe et calcul de la perméabilité équivalente (Andra [2], 2013)

3.5 IMPACT DES PERTURBATIONS

3.5.1 CONTEXTE THERMIQUE

En dehors de phénomènes très locaux comme par exemple ceux liés à la prise du béton, l'Andra [2] estime que seuls les scellements situés à proximité des quartiers de déchets HA subissent un échauffement significatif, de 20 à 25 °C au maximum, ce qui compte tenu de la température naturelle de la roche (23 °C) pourrait amener leur température entre 30 et 50 °C maximum. Pour ces scellements, les maxima sont atteints en un millier d'années environ et la période de temps pendant laquelle leur échauffement est significatif est de l'ordre de 10 000 ans. Les cinétiques d'échauffement/refroidissement et les gradients thermiques sont faibles, inférieurs au degré Celsius respectivement par an et par mètre. Les autres scellements subissent des échauffements de quelques degrés Celsius, les maxima étant atteints en quelques milliers d'années. L'Andra [2] estime par conséquent que la charge thermique ne devrait pas avoir d'influence marquée sur l'évolution phénoménologique des scellements. Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

3.5.2 TRANSITOIRE HYDRAULIQUE-GAZ

L'Andra [2] indique que la resaturation du stockage a lieu de façon concomitante avec une production d'hydrogène gazeux issu de la corrosion anoxique des éléments métalliques et de la radiolyse des déchets organiques. Cette production de gaz est élevée au cours des premiers milliers d'années, puis décroît et cesse au-delà de quelques dizaines de milliers d'années.

L'IRSN estime que la présence de gaz pendant la resaturation du stockage soulève plusieurs questions : la possibilité pour les gaz d'induire un endommagement mécanique des ouvrages de scellement, la possibilité pour les gaz de créer un gradient hydraulique au sein du stockage et l'incidence des gaz sur la resaturation du stockage. Ces points sont examinés ci-après.

3.5.2.1 Endommagement mécanique lié au passage des gaz

L'Andra [2] estime que tant que les composants d'un scellement (noyau, interface avec la roche, zone endommagée, massifs de confinement) ne sont pas saturés en eau, le gaz produit pendant les premiers milliers d'années peut facilement migrer à travers celui-ci. À l'inverse, lorsque ces différents composants sont saturés en eau, le gaz doit vaincre un ensemble de forces, synthétisé sous la forme d'une pression d'entrée de gaz, pour migrer à l'état gazeux à travers le scellement (forces capillaires, forces de contact viscoplastiques...).

Selon l'Andra [2], les données expérimentales montrent que les argiles gonflantes compactes, les argilites saines et le béton ont des potentiels capillaires très élevés, de plusieurs centaines de mégapascals pour les états fortement désaturés à près de 10 MPa pour des états faiblement désaturés (95 à 98 %), ce qui signifie que seules des pressions de gaz très élevées (au-delà de la dizaine de MPa) pourraient pénétrer ces matériaux lorsqu'ils sont saturés en eau ou empêcher leur saturation lorsqu'ils ne le sont pas. Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

L'Andra [2] indique que la zone fracturée connectée en paroi des galeries (EDZ) présente des pressions d'entrée de gaz faibles (de l'ordre de 3 MPa) et considère donc que celle-ci constituera toujours une voie de transfert

privilegiée et aisée pour les gaz. L'IRSN convient que l'EDZ devrait être une voie de transfert privilégiée pour les gaz. Toutefois, l'IRSN note que lors de l'expérience Lasgit (*L*Arge *S*cale *G*as *I*njection *T*est) réalisée au laboratoire souterrain d'Äspö (Suède) en milieu granitique [24], le cheminement du gaz a pu être bloqué par une hétérogénéité locale ce qui, dans le cas d'un stockage, pourrait conduire à une remontée de la pression de gaz dans l'EDZ.

Néanmoins, l'Andra a précisé au cours de l'instruction que « *tous les essais réalisés à ce jour sur les argilites et sur les argiles gonflantes indiquent que le passage du gaz à travers ces matériaux a un impact très limité à nul sur leurs propriétés hydromécaniques. Ainsi, les mesures de perméabilité à l'eau et de pression de gonflement avant et après des essais d'injection de gaz sur échantillons et in situ donnent des valeurs similaires* ». L'IRSN en convient mais rappelle que selon les conclusions du projet européen FORGE [24], au-delà d'un degré de saturation en eau de 85 à 90 %, l'écoulement du gaz ne se ferait plus par un mécanisme visco-capillaire « classique » (cf. contributions de BGS, Clay Tech et LML) mais par des chemins localisés et instables (*i.e.* qui se referment) ; l'IRSN estime que si un certain consensus international émerge quant à la phénoménologie, les modèles associés restent à développer et la valeur de leurs paramètres clés sont encore difficiles à déterminer.

3.5.2.2 Possibilité pour les gaz d'induire une surpression hydraulique

L'IRSN s'est interrogé sur la possibilité pour les gaz d'induire dans la roche un gradient hydraulique à prendre en compte dans des calculs de transport et sur la possibilité que ce phénomène de surpression hydraulique induite par les gaz ait été observé dans le cadre de l'expérience PGZ (Perturbation induite par les GaZ) réalisée au Laboratoire souterrain. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que « *la première phase d'injection GAS1 [réalisée dans le cadre de l'expérience PGZ1] a montré une très légère surpression hydraulique (5 à 15 kPa) [à 90 cm de la zone d'injection] lors du dernier palier d'injection pour atteindre 9,1 MPa [...] Il n'est pas certain que la surpression observée [...] soit due à la percolation du gaz dans les argilites saines. Cette surpression pourrait être due à de l'eau contenue dans la zone endommagée autour du forage repoussée par le gaz.*

L'actuelle phase d'injection GAS2 (palier de pression maintenue constant à 9,8 MPa depuis janvier 2013) ne montre pas de surpression hydraulique [...]. Dans les essais sur échantillons destinés à évaluer les pressions de percée, il n'a pas été observé de déplacement d'eau important. Pour les niveaux de pressions de gaz attendus dans le stockage, si le gaz migre sous forme exprimée, il ne mobilisera qu'une très petite partie du réseau poreux ce qui explique certainement les faibles quantités d'eau déplacées dans le matériau sain. Les caractérisations de la microstructure de l'argilite semblent confirmer cette analyse ».

L'IRSN retient que la surpression hydraulique observée lors de la phase d'injection GAS1 n'est pas forcément liée à l'injection de gaz et que l'actuelle phase d'injection GAS2 ne montre pas de surpression hydraulique à 90 cm de distance, ce qui peut également s'expliquer par la phénoménologie mise en œuvre. L'IRSN estime que la justification apportée par l'Andra est satisfaisante à ce stade des connaissances.

Pour ce qui concerne l'influence du gaz sur les écoulements de l'eau le long des galeries (possibilité pour les gaz de « pousser » l'eau, « effet piston »), l'Andra [2] estime qu'elle est faible et correspond tout au plus à un transfert d'eau sur quelques dizaines de mètres au sortir des zones de stockage. L'IRSN considère que cette

conclusion, qui est corroborée par celles du projet européen FORGE [25], est cohérente avec l'état des connaissances.

3.5.2.3 Saturation en présence de gaz

3.5.2.3.1 Saturation des noyaux argileux de scellements de fond

L'Andra [2] précise que dans une première phase, la saturation des composants d'un scellement n'est pas influencée par la présence de gaz : des degrés de saturation de l'ordre de 70 % pour les bétons et 95 % pour les noyaux argileux sont atteints entre le millier et quelques milliers d'années ; plus tard, lorsque la pression de gaz augmente et atteint le seuil permettant un épanchement au-delà du scellement, des passages localisés de gaz empêchent la saturation jusqu'à 100 %, qui n'est atteinte qu'après l'arrêt de la production de gaz, soit au-delà de quelques dizaines de milliers d'années. **L'IRSN estime également que pour des argiles compactes (argilites ou blocs précompactés) et pour des pressions de gaz suffisamment basses, l'effet du gaz pourrait se limiter à retarder la saturation des argiles.**

En revanche, l'Andra [3] indique que *« pour les mélanges pellets/poudre, les résultats actuels ne permettent pas de conclure sur le rôle du gaz sur le transitoire de saturation. Dans l'essai PGZ2, [...] un chemin continu au gaz perdure à travers le bouchon après 600 jours de saturation [...]. Cependant, les informations ne sont pas suffisantes pour savoir »* s'il s'agit d'*« une conséquence de l'injection de gaz »* ou d'*« un défaut de remplissage en voûte »*. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que *« l'interprétation avancée est l'existence d'une hétérogénéité locale de la densité, du fait de la méthode de mise en place propre à cet essai. Cette hétérogénéité permettrait un transfert transitoire de gaz plus important. En revanche, un défaut de remplissage en voûte (au sens de la présence d'un vide) n'est pas envisagé car il devrait de facto se traduire par un flux de gaz très important, ce qui n'est pas le cas. Cet essai ne remet pas en cause le schéma d'atteinte de la pression de gonflement et de la saturation totale »*. L'IRSN note que l'effet du gaz sur la saturation d'un assemblage de pellets reste à éclaircir. De plus, l'Andra [2] indique que la saturation d'un tel assemblage est un processus encore mal modélisé où des réarrangements entre pellets conduisent à une croissance irrégulière de la pression de gonflement. L'Andra [2] estime toutefois que *« toutes les expériences à petite et à grande échelle montrent que la pression de gonflement des assemblages de pellets tend asymptotiquement vers la pression de gonflement correspondant à la densité sèche équivalente de pièces compactées »*. **L'IRSN estime, comme l'Andra, que la modélisation et la compréhension de la saturation d'un assemblage de pellets nécessitent encore des progrès, avec ou sans prise en compte de l'effet des gaz, mais que cette incertitude résiduelle ne devrait pas remettre en cause la possibilité pour un noyau argileux d'atteindre finalement la pression de gonflement visée.**

3.5.2.3.2 Resaturation du stockage « en grand »

En l'absence de gaz, l'Andra [2] estime qu'avec l'architecture générale retenue dans le « Dossier 2009 », le temps de saturation totale du stockage serait au plus de quelques milliers d'années. En présence de gaz, les temps de saturation varient d'une zone à l'autre [2]. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la zone centrale, qui ne contient pas de déchet, se sature en premier 10 000 à 20 000 ans après la fermeture du stockage ; puis la zone HA vers 20 000 à 30 000 ans ; enfin les alvéoles MAVL entre 70 000 et 150 000 ans, en fonction des déchets

qu'ils contiennent et des gaz qu'ils produisent. L'Andra [2] précise que le décalage entre l'équilibre hydraulique en grand du stockage et l'atteinte de la saturation d'ensemble n'est que de quelques dizaines de milliers d'années au plus car la remontée en charge hydraulique débute avant la fin de la saturation totale. L'Andra [2] considère ainsi que l'équilibre hydraulique du stockage est atteint après saturation de la zone MAVL, autour de 100 000 à 150 000 ans environ. L'IRSN estime que ces résultats sont globalement cohérents avec l'état des connaissances.

Cependant, l'IRSN constate que l'Andra [2] [4] n'indique pas comment les possibles surpressions hydrauliques qui pourraient être localement induites par la rupture des revêtements en béton laissés en place (ou des chemisages d'alvéoles HA) sont prises en compte. En effet, l'IRSN estime que la rupture de ces éléments est attendue après quelques milliers d'années et que dans un ouvrage fermé et saturé en eau, si cette rupture se produisait de façon brutale, elle pourrait induire localement des surpressions hydrauliques importantes dont les conséquences sur les performances hydrauliques ultérieures des ouvrages de fermeture devraient être évaluées. Au cours de l'instruction, l'Andra a indiqué que ces surpressions n'étaient pas évaluées à ce stade et a précisé qu'« *en premier lieu, par conception et/ou phénoménologiquement, il n'est pas attendu de chute brutale (et importante) des revêtements ou de rupture brutale du chemisage : le remblai des galeries est conçu pour limiter son tassement sous son propre poids, et le chemisage [des alvéoles HA] se déformera progressivement et avec des pressions de fluide égales en intrados et en extrados. Qualitativement, un tel évènement produirait non pas une surpression continue mais un Dirac de surpression. Au niveau d'une galerie, ce Dirac devrait être absorbé par le remblai car il ne s'agit pas d'un milieu poreux rigide et il présentera un emmagasinement qui ne sera pas très petit ; au niveau d'une galerie ou d'un alvéole (HA et MAVL), les flux d'eau générés seraient limités de facto par les ouvrages de fermeture (en considérant l'absence d'impact sur leur tenue mécanique donc leur performance hydraulique), et il ne devrait pas se produire de déplacement significatif des radionucléides par déplacement de l'eau* ». L'IRSN estime que ces éléments qualitatifs sont suffisants à ce stade. Néanmoins, l'IRSN note que l'Andra n'a pas intégré dans les situations de fonctionnement normales post-fermeture du stockage la rupture prévisible à long terme d'ouvrages du stockage. Aussi,

l'IRSN estime que l'Andra devra évaluer l'impact des éventuelles surpressions hydrauliques induites par la rupture d'ouvrages du stockage sur les performances des scellements. Ce point fait l'objet de l'engagement E.2.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.5.2.3.3 Cas des liaisons surface-fond

3.5.2.3.3.1 Schéma de saturation

L'Andra [2] indique que le schéma de saturation des scellements de fond est différent de celui des liaisons surface-fond, ainsi que l'illustre la Figure 24 issue du « Dossier 2005 » :

- La saturation des scellements de fond situés au sein de la formation hôte se fait de façon radiale et centripète en 1 000 à 10 000 ans par les eaux du Callovo-Oxfordien. L'Andra [2] indique que l'expérience PGZ ainsi que les simulations montrent que le gaz ne peut pas s'opposer à la saturation d'un scellement du fait de la succion extrêmement élevée de l'argile gonflante. Tant que l'argile gonflante n'est pas saturée, le gaz peut facilement migrer au travers de cette dernière. Néanmoins, les différences de

cinétique de saturation et de remise en charge hydraulique entre les remblais et les scellements conduisent à des différences de charges pouvant atteindre 2 à 3 MPa de part et d'autre de ceux-ci ; elles apparaissent et se résorbent entre 2 000 et 35 000 ans environ (cf. Fig.4-10 de [2]).

- La saturation des scellements de liaisons surface-fond se fait en partie par les eaux de l'Oxfordien et débute par la partie la plus haute des scellements. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que cette saturation devenait totale sur *a minima* quelques décimètres en seulement quelques années. Elle s'étend ensuite au reste du noyau sur quelques milliers d'années [2]. La face supérieure des noyaux subit donc une mise en charge hydraulique très rapide, en quelques dizaines d'années au plus [2] ; ensuite, au-delà de quelques milliers d'années [2], le comportement des scellements de liaisons surface-fond suit celui des scellements de fond.

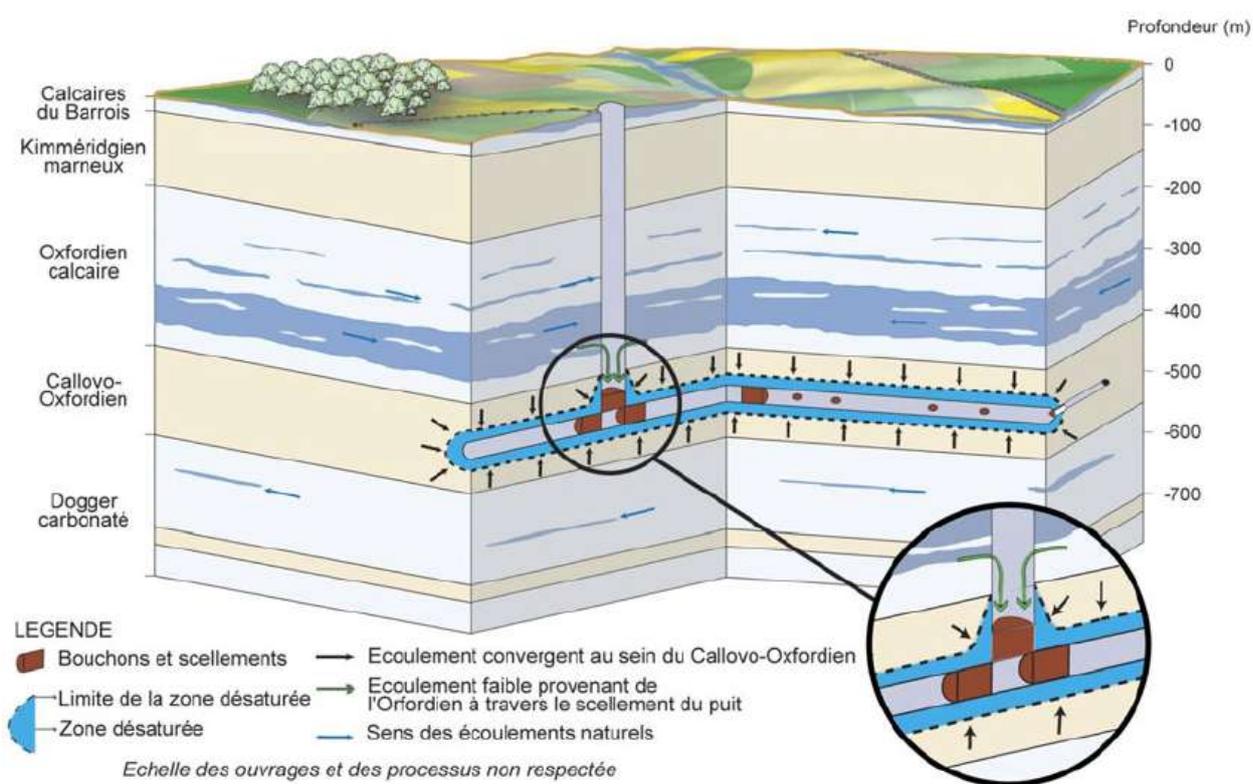


Figure 24 : Schéma général de resaturation du stockage : la partie supérieure des scellements de puits est resaturée par l'eau de l'Oxfordien carbonaté, le reste du stockage est resaturé par l'eau du Callovo-Oxfordien (Andra, « Dossier 2005 »)

L'Andra [2] précise que la mise en charge hydraulique de la partie haute des scellements de liaisons surface-fond conduit à des pressions d'eau de l'ordre de 3 MPa (pression hydrostatique dans l'Oxfordien) sur la face supérieure des noyaux alors que ceux-ci sont encore loin de la saturation en partie basse et surtout, avant même que la pression d'eau ne soit significativement remontée dans leur partie saturée. Pour ce qui concerne les risques de claquage hydraulique (tel qu'observé lors de l'essai TSX [3]) ou d'érosion de l'interface noyau/roche dans ces conditions, l'Andra a précisé pendant l'instruction que « dans l'essai TSX, la montée en pression d'eau imposée sur la face amont du noyau en argile gonflante a été très rapide, d'où le claquage du noyau à l'interface avec la roche, la pression de gonflement n'ayant pas eu le temps d'atteindre sa valeur maximale. Cette vitesse de

montée en pression d'eau a été un choix expérimental. Le claquage a été local et transitoire, même avec le maintien de la pression d'eau. [...] La cinétique de montée en pression de l'eau en face supérieure des scellements des liaisons surface-fond en conditions de stockage, se fera naturellement et ce progressivement sur plusieurs dizaines d'années, du fait de la remontée des charges hydrauliques des eaux de l'Oxfordien. L'hydratation complète de la partie supérieure des scellements aura déjà affecté une épaisseur significative (échelle décimétrique à métrique) lorsque la pression d'eau sera maximale (environ 3 MPa dans l'Oxfordien). Cette pression étant inférieure à la pression de gonflement de l'argile gonflante constituant le noyau des scellements liaisons surface-fond, un claquage n'est donc pas envisagé. Par ailleurs, les flux d'eau provenant de l'Oxfordien seront très faibles puisque limités de facto par les performances hydrauliques du noyau. Les vitesses de l'eau associées seront faibles (au plus quelques dizaines de mètres par an). Même en supposant une interface de 1 mm entre le noyau et l'argilite, cela ne conduirait pas à une érosion des matériaux argileux à l'interface bentonite/argilite, au regard des données existantes sur le sujet ».

L'IRSN estime cette réponse satisfaisante à ce stade du projet et convient que pour l'ensemble des scellements (fond et liaisons surface-fond), la pression de gonflement actuellement visée par l'Andra (de l'ordre de 4 MPa) présente des marges par rapport aux possibles différences de charge hydraulique de part et d'autre de ceux-ci (2 à 3 MPa) de 1 à 2 MPa. Cependant, l'IRSN observe que la valeur minimale de ces marges (1 MPa) est atteinte pour les scellements de liaisons surface-fond pour lesquels (i) la pression d'eau attendue en face supérieure (3 MPa) est la plus grande, (ii) la mise en charge hydraulique est particulièrement rapide par rapport aux durées de rééquilibrage hydraulique d'ensemble et (iii) la réserve d'eau que représentent les aquifères sus-jacents est extrêmement importante. L'IRSN estime en outre que les pressions de gonflement actuellement visées par l'Andra sont principalement guidées par les premiers résultats de l'expérience FSS relative à la faisabilité industrielle de scellements en galerie alors que la configuration en puits pourrait permettre d'atteindre des densités plus élevées. Néanmoins, compte tenu de la relation exponentielle qui existe entre la densité sèche d'une argile gonflante et sa pression de gonflement (cf. Figure 10), l'IRSN estime que les incertitudes et possibles hétérogénéités locales de mise en place sur un ouvrage de taille industrielle tel que ceux envisagés par l'Andra doivent être prises en compte, aussi bien en termes de risques de ne pas atteindre localement la pression de gonflement visée (risque d'écoulement chenalisé en paroi) que de la dépasser (risque de sur-endommager la paroi). Etant donné le rôle essentiel joué par les scellements de liaisons surface-fond (cf. § 2.3 et § 3.6 du présent rapport), l'IRSN estime que ceux-ci devraient faire l'objet d'une attention particulière, notamment pour ce qui concerne les marges allouées par la pression de gonflement vis-à-vis des différences de charges hydrauliques de part et d'autre de ceux-ci.

En conclusion, l'IRSN considère que l'acceptabilité des marges allouées par la pression de gonflement vis-à-vis des différences de charges hydrauliques de part et d'autre des scellements de liaisons surface-fond nécessite d'être vérifiée par des études hydromécaniques prenant en compte le transitoire de rééquilibrage hydraulique et les possibles hétérogénéités de densité au sein du noyau afin d'évaluer finement les contraintes effectives à l'interface avec la roche et les conséquences d'éventuels excès locaux (ou au contraire d'insuffisances) de la pression de gonflement. Ce point (cf. § 3.5.6 du présent rapport) fait l'objet de l'engagement E.3.1 lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

L'IRSN estime que cette étude préfigure la définition d'un essai de démonstration en vraie grandeur de scellement de liaison surface-fond envisagé par l'Andra [2] entre 2025 et 2030 dans un diverticule de descenderie.

3.5.2.3.3.2 Sollicitation due aux gaz

L'Andra [2] indique qu'en l'absence de zone endommagée de type EDZ, la sollicitation de la pression des gaz sur les scellements des liaisons surface-fond portera principalement sur les noyaux. L'Andra [2] précise qu'en fonction du flux d'hydrogène produit par le stockage et de la capacité de celui-ci à l'accueillir (volume ou rapport surface/volume élevé favorisant un transfert du gaz à l'état dissous), la pression de gaz peut :

- rester inférieure à la pression d'entrée de gaz dans les scellements de liaisons surface-fond ; le gaz s'arrête alors au plus loin à la base de ces scellements ;
- franchir les scellements de liaisons surface-fond et arriver dans les horizons poreux (Hp) de l'Oxfordien.

Compte tenu des incertitudes actuelles sur les paramètres de transfert du gaz dans les différents éléments du stockage et à leurs interfaces (pression d'entrée de gaz, coefficient de diffusion du gaz dissous...), l'Andra [2] estime qu'il n'est pas possible de trancher aujourd'hui entre ces deux comportements et qu'ils doivent donc être considérés à parts égales dans l'évolution normale du stockage. Ceci n'appelle pas de commentaire particulier à ce stade du projet de la part de l'IRSN.

Pour ce qui concerne la manière dont les gaz franchiraient le noyau de scellement, l'Andra [2] indique que l'utilisation de pellets conduit à des pressions d'entrée de gaz faibles (entre 1 et 3 MPa au maximum), de sorte que la partie saturée du noyau ne s'opposerait pas à la migration de l'hydrogène gazeux et que quel que soit le mécanisme de transfert retenu, comme le montrent les observations expérimentales, cette migration n'entraîne pas de déplacement significatif de l'eau et ne modifie pas le comportement mécanique du matériau. L'IRSN en convient mais rappelle que le comportement d'un assemblage de pellets est particulier au regard des effets des gaz sur celui-ci et de son processus de saturation (cf. § 3.5.2.3.1 du présent rapport).

En conclusion, l'IRSN constate que les données (terme source gaz, architecture...) nécessaires à l'évaluation de l'impact des gaz sur les scellements de liaisons surface-fond doivent être consolidées et ne peut conclure à ce stade quant à la robustesse vis-à-vis des perturbations induites par les gaz de cet ouvrage essentiel pour la sûreté en phase de post-fermeture.

3.5.3 PERTURBATIONS LIEES AUX INTERACTIONS BETON-ARGILES

L'Andra [2] retient, parmi les processus chimiques identifiés comme pouvant participer à l'évolution d'un scellement, (i) la perturbation alcaline créée par les composants en béton (massifs de confinement, revêtement de galerie, cf. Figure 6) sur l'argilite et sur les composants à base d'argile avec lesquels ils sont en contact, due à des processus de dissolution/précipitation qui génèrent une zone reminéralisée à l'interface et peuvent entraîner ainsi une modification des propriétés hydrauliques ou de gonflement des matériaux argileux et (ii) la dégradation des composants en béton sous l'effet des eaux porales des argilites (hydrolyse, carbonatation sous eau, attaque par les sulfates) qui peut s'accompagner d'une diminution de leurs propriétés mécaniques. Comme indiqué au § 3.3.4 du présent rapport relatif aux massifs de confinement, l'Andra prévoit, afin de limiter les perturbations chimiques des matériaux argileux, de mettre en œuvre des bétons dits « bas pH » (pH de l'eau interstitielle ≤ 11)

basés sur des mélanges ternaires composés de liants contenant un très fort pourcentage d'ajouts de minéraux (fumées de silice et cendres volantes ou laitiers de hauts fourneaux).

Perturbation alcaline des composants argileux

Les simulations de l'évolution géochimique sur le long terme d'un scellement de fond de référence présentées par l'Andra [2], basées sur les caractérisations expérimentales disponibles à ce stade, acquises essentiellement sur des bétons classiques et dans une moindre mesure sur des bétons bas pH, indiquent une zone de forte reminéralisation de l'argile gonflante du noyau en contact avec le massif de confinement en béton bas pH (dissolution de la montmorillonite et précipitation d'illite, de saponite, de quartz et de calcite) de faible extension (de l'ordre décimétrique en 100 000 ans) et une zone faiblement perturbée (dissolution et formation de phases minoritaires) d'extension limitée (de l'ordre métrique en 100 000 ans). D'autres simulations présentées par l'Andra [12] montrent que les transformations de l'argile gonflante située dans les zones de dépose sont de même nature mais d'extension moindre compte tenu de la réserve alcaline plus petite que représentent les portions de revêtement laissées en place au regard de celle correspondant à un massif de confinement. L'Andra conclut que les perturbations des composants argileux d'un scellement de fond dues à leurs interactions chimiques avec les composants en béton du type bas pH envisagé ont une extension et une intensité limitées dans le temps et dans l'espace, ce qui préjuge du maintien de la performance en grand du scellement compte tenu de ses dimensions.

Compte tenu d'une part des observations expérimentales rapportées dans la littérature [19] [20] et d'autre part de la cohérence avec l'ordre de grandeur des perturbations attendues de bétons classiques plus « agressifs », évalué sur la base d'un état des connaissances (expérimental et modélisation) à ce jour plus étayé, **l'IRSN considère que l'ordre de grandeur des perturbations minéralogiques des argiles dues à la présence de béton bas pH estimé par l'Andra est vraisemblable.**

L'IRSN souligne que la performance des scellements de fond retenus en option de référence par l'Andra repose essentiellement sur les propriétés du noyau argileux (perméabilité, gonflement) au droit des zones de dépose de 1 ou 2 m du revêtement (cf. § 3.3.2 du présent rapport) ainsi que sur celles de l'EDZ (auto-colmatage) à ce niveau (cf. § 3.3.1 du présent rapport). Aussi, l'IRSN considère que ces parties des ouvrages de scellement sont les plus sensibles aux conséquences de la reminéralisation due aux interactions béton/argile sur les propriétés du noyau argileux (perméabilité, gonflement). À cet égard, l'IRSN constate que les simulations effectuées par l'Andra prennent bien en compte une zone d'argilite autour des ouvrages ayant des propriétés de diffusion plus élevées que celles des argilites saines (coefficient de diffusion effectif de $4,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ au lieu de $2,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$). Néanmoins, l'IRSN observe que la valeur de ce coefficient est d'un ordre de grandeur inférieur à celle retenue dans le « Dossier 2005 » pour l'EDZ ($5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Dans la mesure où ce choix conduit à diriger davantage le panache alcalin vers le noyau, il peut être considéré comme majorant au regard des perturbations alcalines dans le noyau à base d'argile gonflante ($2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) mais tend à sous-estimer l'extension de cette perturbation dans l'EDZ. Par ailleurs, l'IRSN s'interroge sur la possibilité de transformations minéralogiques accentuées des argiles, en particulier dans l'EDZ, par l'eau de gâchage des bétons et/ou dans le cas d'une resaturation hétérogène (non radiale) des ouvrages de scellements. Néanmoins, compte tenu des faibles perturbations estimées à ce stade au regard des dimensions des composants argileux des scellements de fond, **l'IRSN convient que les composants en**

béton bas pH ne devraient pas remettre en cause significativement les performances des composants argileux de l'option de scellement retenue en référence.

De même, s'agissant des scellements de liaisons surface-fond, la perturbation alcaline du noyau en argile gonflante générée par les massifs d'appui (le revêtement au droit de noyau en argile gonflante est entièrement déposé pour ces ouvrages) devrait, compte tenu des éléments présentés ci-avant, rester limitée au regard des dimensions du noyau et **ne devrait pas impacter significativement les performances des composants argileux.**

En revanche, s'agissant de la variante de scellement de fond présentée au § 3.3.5, l'IRSN constate que l'extension de la zone de forte de reminéralisation de l'argile gonflante (cf. ci-avant) due aux interactions avec le revêtement en béton bas-pH pourrait devenir non négligeable au regard de l'épaisseur des coupures hydrauliques (30 cm) envisagée à ce stade. Cette perturbation alcaline pourrait ainsi impacter les performances (gonflement et perméabilité) de l'argile gonflante située au niveau de ces coupures hydrauliques. **L'IRSN considère comme en 2005 [27] qu'il conviendra de porter une attention particulière à ce point lors du développement de cette option de scellement de fond.**

Dégradation des composants en béton

S'agissant de la dégradation des bétons bas pH due aux interactions chimiques avec les argiles (argilite du Callovo-Oxfordien et argile gonflante du noyau), l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *les interactions « béton bas pH/milieux argileux » font l'objet d'un programme expérimental dont une partie a été menée avec une solution représentative des argilites du Callovo-Oxfordien* » et a précisé que « *les schémas d'évolution ne sont pas différents de ceux que l'on peut observer avec des bétons classiques dans les mêmes conditions* ». L'Andra [2] présente des simulations de la dégradation des composants en béton bas pH d'un scellement de fond en contact avec les argiles qui montrent qu'à 100 000 ans, les impacts sur les massifs de confinement ont des extensions d'ordre décimétrique pour la zone fortement perturbée (dissolution des silicates de calcium hydratés (CSH) notamment) et d'ordre métrique pour la zone plus faiblement perturbée (dissolution du quartz initial, précipitation de saponite...).

L'IRSN constate que les simulations présentées par l'Andra ne prennent pas en compte l'ensemble des mécanismes réactifs observés expérimentalement à court terme, et notamment la formation systématique de phases magnésiennes (de type silicates de magnésium hydratés (MSH)), dont l'impact sur la tenue mécanique du matériau n'a pas été investigué [19].

Par ailleurs, l'IRSN estime qu'une dégradation des bétons bas pH au contact de l'eau porale du Callovo-Oxfordien ne peut pas être exclue (notamment au niveau des vides technologiques) et pourrait être plus importante que si celui-ci est en contact direct et parfait avec les argiles. En effet, une étude expérimentale [19] montre que si les mécanismes d'altération d'un matériau à base de liant bas pH et d'un matériau à base de liant CEM I¹ (en immersion dans une eau synthétique représentative de l'eau porale du Callovo-Oxfordien) sont similaires, l'intensité et l'extension de ces altérations sont différentes, en particulier la porosité capillaire est beaucoup plus développée dans le cas du béton bas pH que dans le cas du béton CEM I. L'une des principales raisons de la

¹ CEM I désigne le « ciment portland artificiel »

dégradation accrue de la pâte de ciment bas pH réside dans l'hétérogénéité de ce matériau lors de sa mise en œuvre, en particulier la présence d'agrégats de fumées de silice dont l'hydratation lente a pour conséquence de reporter les interactions chimiques sur les CSH qui les entourent et donc de dégrader le matériau sur une épaisseur plus importante. Aussi, l'IRSN estime que l'homogénéité du béton bas pH lors de sa mise en œuvre peut jouer un rôle important sur l'impact des interactions chimiques avec les eaux du Callovo-Oxfordien. Sur ce point, l'Andra a indiqué lors de l'instruction que le co-broyage des trois constituants (*i.e.* CEM I, fumée de silice et cendres volantes ou laitier) permettait de garantir une répartition homogène de la fumée de silice dans le béton et donc de garantir son hydratation homogène. L'IRSN estime, sur la base des éléments transmis par l'Andra, que les essais réalisés sont intéressants mais mériteraient d'être davantage documentés en vue de soutenir les conclusions précitées.

En conséquence, l'IRSN convient, comme indiqué précédemment, que le choix d'un béton bas pH pour les composants en béton des scellements de fond est favorable à la limitation des perturbations chimiques des argiles mais s'interroge toutefois sur la tenue mécanique des bétons bas pH sur des temps courts, notamment au niveau des revêtements de galeries à l'emplacement des scellements si ces revêtements en béton bas pH étaient mis en place dès la construction du stockage (période d'exploitation).

S'agissant de la dégradation des bétons bas pH par les eaux de l'Oxfordien calcaire, qui resatureront en partie les scellements des liaisons surface-fond, l'Andra a indiqué, au cours de l'instruction, que « *compte tenu de la chimie des eaux de l'Oxfordien calcaire, la principale réactivité chimique attendue devrait être similaire à celle avec les eaux des argilites, à savoir une carbonatation sous eau* ». L'IRSN rappelle [19] que la carbonatation sous eau (facteur limitant l'extension de la perturbation) n'est pas le mécanisme principal de dégradation des bétons bas pH, la lixiviation étant le mécanisme majeur. Aussi, l'IRSN s'interroge sur la tenue de ces bétons bas pH au niveau des massifs de confinement des scellements des liaisons surface-fond et des revêtements au droit de ces massifs.

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction qu'elle prévoyait, concernant les bétons bas pH en interaction avec le Callovo-Oxfordien, l'étude du comportement mécanique des zones chimiquement évoluées du béton bas pH et des argiles en support aux études de conception des massifs d'appui ainsi que la caractérisation expérimentale et/ou numérique des interactions chimiques des bétons bas pH avec l'eau de l'Oxfordien calcaire. En outre, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *les données géochimiques, en particulier sur les CSH et les MSH, sont progressivement introduites dans la base de données ThermoChimie, utilisée dans les simulations numériques en chimie-transport pour rendre compte de l'évolution chimique des scellements* ».

En conclusion, l'IRSN considère qu'il existe des incertitudes relatives à la dégradation physico-chimique des bétons bas pH pouvant avoir des conséquences importantes en termes de propriétés mécaniques.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra montrer, sur la base d'un bilan des connaissances issu de son programme d'études relatif aux bétons bas pH, basé sur des essais et des modélisations, que l'évolution physico-chimique des composants en béton bas pH dans le Callovo-Oxfordien et dans l'Oxfordien calcaire leur permet d'atteindre les performances mécaniques qui leurs sont attribuées en phases d'exploitation et de post-fermeture. Ce point fait l'objet de l'engagement E.2.2 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

Enfin, l'IRSN s'interroge sur le bien-fondé de retenir le béton bas pH aux dépens de bétons classiques, pour les éléments en béton autre que le revêtement non déposé des scellements de fond, où le gain substantiel en terme de préservation des propriétés des argiles procuré par le béton bas pH n'est pas nécessaire et peut être géré par des dispositions relatives au dimensionnement (allongement du noyau par exemple).

3.5.4 IMPACT DES BACTERIES

S'agissant de l'impact des bactéries sur les propriétés des argiles, l'IRSN considère que l'influence la plus significative identifiée à ce stade des connaissances concerne la période de transitoire hydraulique-gaz. L'IRSN note que des bilans en hydrogène observés lors de l'expérience HT (*Hydrogen Transfer*) réalisée au Mont-Terri [25] ainsi que lors d'essais de diffusion réalisés au SCK-CEN dans le cadre du projet européen FORGE [26], corroborés par des simulations géochimiques réalisées à l'IRSN [27] montrent qu'une perturbation chimique liée à l'activité bactérienne lors d'un écoulement de gaz prolongé ne peut pas être complètement écartée. Aussi, l'IRSN estime que l'effet des bactéries sur les équilibres chimiques et leurs possibles conséquences sur la microstructure des milieux argileux soumis de façon prolongée à un écoulement d'hydrogène nécessitent d'être clarifiés.

S'agissant de l'impact des bactéries sur les propriétés des bétons, l'Andra [21] a indiqué au cours de l'instruction qu'aucune action de R&D n'avait encore été engagée à ce jour sur ce sujet et l'IRSN constate que le retour d'expérience international rassemblé par l'Andra [3] ne fait état que d'un essai (BPT, *Backfill and Plug Test*) lancé en 1999 en Suède et visant, notamment, à étudier « *la diversité, la distribution et l'activité des bactéries natives ou introduites dans le scellement* ». L'IRSN relève d'une part que des vides résiduels existeront au sein des ouvrages de scellement et que d'autre part, les bétons bas pH peuvent contenir davantage de matière organique que les bétons classiques, ce qui pourrait favoriser le développement de microorganismes. **L'IRSN estime que ce développement bactérien pourrait modifier les chemins réactionnels et/ou l'extension des fronts de perturbation dans les bétons bas pH.**

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra vérifier que l'activité des bactéries présentes naturellement ou introduites au moment de la construction du stockage ne remet pas en cause les performances des scellements. Ce point fait l'objet de l'engagement E.2.3 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.5.5 TRANSITOIRE HYDROMECHANIQUE

L'Andra [2] présente « *la représentation la plus probable* » à ce stade de l'évolution phénoménologique des différents types de scellements, que viendront consolider d'ici la DAC le programme d'essais (notamment technologiques) et les études de R&D en cours. L'Andra [2] précise que plusieurs points restent à approfondir comme la prise en compte du transitoire hydromécanique de saturation et d'équilibrage entre les argilites et les autres composants du scellement, les effets des interactions chimiques sur les propriétés mécaniques des massifs d'appui, notamment les frottements aux interfaces, etc. L'IRSN constate en effet que l'analyse de l'Andra reste principalement qualitative à ce stade des études. Les remarques formulées par l'IRSN dans le présent chapitre, lorsqu'elles ne font pas l'objet d'une conclusion spécifique, sont reprises dans la conclusion présentée au § 3.5.6 du présent rapport.

3.5.5.1 Scellements de fond

3.5.5.1.1 Comportement hydromécanique d'ensemble

L'Andra [2] indique que dans les zones où le revêtement sera déposé, la pression de gonflement développée par le noyau de scellement en phase de resaturation comprime la zone d'argilites endommagées en paroi qui, dès le premier mégapascal appliqué, se referme et s'auto-colmate comme lors de l'essai CDZ. Dans le même temps, la rigidité de la zone endommagée se restaure selon un processus également observé dans CDZ, le déviateur de contrainte diminue et la déformation différée de la roche ralentit ; l'Andra [2] précise cependant que la cinétique du comportement différé des argilites demeure à ce jour incertaine². Dans les zones où des couronnes de revêtement seront laissées en place, l'Andra [2] estime que leur mise en charge par les argilites débute pendant la période d'exploitation du stockage et que les éventuelles différences de pression de gonflement aux extrémités de celles-ci, inférieures au mégapascal, sont équilibrées par frottement sur la roche sans glissement significatif de ces couronnes sur la roche. Enfin au niveau des massifs d'appui, l'Andra [2] estime que la roche applique lentement des contraintes radiales de quelques mégapascals sur les interfaces roche/revêtement et revêtement/massif leur permettant d'équilibrer, par frottements, la pression de gonflement du noyau de scellement ; l'Andra [2] indique que ces frottements ne nécessitent que quelques mètres linéaires pour s'établir et qu'il pourraient provoquer un glissement des massifs d'appui de quelques centimètres, faible au regard de la longueur décimétrique du noyau et donc insuffisant pour provoquer une perte significative de pression de gonflement.

L'IRSN considère que l'évolution phénoménologique décrite ci-avant nécessite d'être confortée par des études complémentaires, notamment des simulations numériques de l'ensemble du scellement avec ses différents composants et interfaces. L'IRSN estime en particulier que l'aspect poromécanique (porosité des matériaux et présence d'eau) est à prendre en compte dans cette description ; en effet, l'IRSN considère que les couplages hydromécaniques et les effets du rééquilibrage hydraulique d'ensemble affectent les contraintes effectives qui s'appliquent sur les interfaces sollicitées par des frottements. Ces études devraient également évaluer l'impact des différences de comportement (différences de rigidité, de couplage hydromécanique, de comportement différé...) entre les différents matériaux concernés (béton, argilites saines et fracturées, remblais, assemblages de pellets...) et pourraient nécessiter, pour certains matériaux comme le béton, un paramétrage des hypothèses rhéologiques pour couvrir les incertitudes sur le comportement mécanique de ceux-ci sur les échelles de temps considérées (plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années et plus...).

L'IRSN estime que l'Andra devra notamment montrer que le frottement des couronnes de béton laissées en place se fait sans rouvrir les fractures présentes en paroi. À cet égard, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'« *il est prévu de réaliser des essais de cisaillement sur échantillons mais aussi directement à la paroi d'une galerie dans le laboratoire souterrain d'ici 2015 afin d'analyser le comportement de la zone endommagée sous ce type de chargement à la paroi, en particulier les déformations longitudinales et radiales* ». L'IRSN considère que ces

² L'Andra précise que les essais de fluage sur échantillons et le suivi de convergences d'ouvrages au Laboratoire souterrain ne permettent pas d'appréhender avec certitude les cinétiques sur l'échelle de temps après fermeture du stockage, bien que les observations au Laboratoire souterrain soulignent des valeurs faibles entre 10^{-11} s^{-1} et 10^{-12} s^{-1} .

essais seront utiles pour évaluer le frottement aux interfaces avec la roche, *a priori* fonction de son état d'endommagement, de son degré de saturation, de la contrainte moyenne appliquée (roche plus ou moins confinée), d'une présence d'eau à l'interface, etc.

3.5.5.1.2 Impact des massifs d'appui sur la zone endommagée

Compte tenu du contraste de rigidité entre un remblai et les massifs d'appui, l'IRSN s'interroge sur la possibilité que ceux-ci introduisent une singularité (un « point dur ») dans la convergence différée de la galerie susceptible d'endommager la roche à l'interface de ces deux composants. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que *« tant que le soutènement/revêtement est mécaniquement intègre, le remblai ne joue pas de rôle d'appui. À partir de la rupture du soutènement/revêtement, qui est envisagée de manière plutôt localisée, le remblai sera sollicité. Les simulations menées à ce stade montrent que les déformations du remblai ainsi que l'augmentation de l'extension de la zone endommagée qui en résultent seraient limitées. Qualitativement, on considère donc que la présence du massif d'appui, plus rigide que le remblai, n'aura pas néanmoins de conséquence significative sur le comportement mécanique de la galerie à son voisinage ; les simulations à venir doivent permettre d'évaluer ce point de comportement »*.

L'IRSN estime aussi que ce mécanisme pourrait se produire à l'interface massif/noyau dans la période où celui-ci est en cours de saturation, soit de 1 000 à 10 000 ans, et au-delà puisque la pression de gonflement visée à ce stade (de l'ordre de 4 MPa) est inférieure à la contrainte *in situ* (de l'ordre de 7 MPa effectif au Laboratoire souterrain). À cet égard, l'Andra a indiqué pendant l'instruction que *« la configuration est différente de celle du remblai dans la mesure où le noyau, de par sa pression de gonflement, est moteur dans l'équilibre des forces. Les argilites en champ proche réagissent donc à la pression de gonflement du noyau et non directement à sa rigidité »*. L'IRSN estime que cette réponse suppose un gonflement du noyau relativement rapide par rapport au comportement différé des argilites et rappelle que les cinétiques de ces deux processus sont encore incertaines à ce jour. De façon plus générale, l'IRSN estime que les travaux de l'Andra devront préciser le comportement du scellement, notamment de l'EDZ, dans la période où le noyau n'a pas encore développé sa pression de gonflement. L'Andra devra montrer que la différence de comportement mécanique entre les massifs d'appui et le noyau de scellement n'induit pas un endommagement de la roche à proximité des scellements et dans le cas contraire, le quantifier et vérifier qu'il n'affecte pas la perméabilité équivalente « en grand » de celui-ci.

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que les conséquences que pourraient avoir sur la roche et l'EDZ les dispositifs d'ancrage des massifs d'appui envisagés dans le « Dossier 2005 » (cf. Figure 16) sont en cours d'analyse.

Comme indiqué au § 3.3.2 du présent rapport, la longueur minimale du noyau de scellement retenue par l'Andra à ce stade ne prend pas en compte, aux extrémités de l'ouvrage, les perturbations mécaniques détaillées ci-avant. Aussi, l'IRSN estime que **la justification de la longueur des scellements de fond apportée par l'Andra à ce stade devra être complétée par l'évaluation de ces éventuelles perturbations mécaniques et de leur possible effet sur la performance des scellements.**

3.5.5.1.3 Possibilité de surpression induite par le fluage de la roche

L'IRSN remarque que certaines expériences présentées par l'Andra [6] telle que GCS (Galerie de Conception Souple) ou des observations expérimentales présentées dans la littérature [38] pourraient s'interpréter à l'aide d'un modèle viscoplastique simple (de type Norton-Hoff linéaire) et d'une viscosité de la roche de l'ordre de 5.10^{11} MPa.s ; cette valeur, plutôt basse pour une formation géologique comme les argilites, est néanmoins comparable à celle qui se dégageait des essais sur échantillons du « Dossier 2005 » alors entachée d'une grande incertitude due aux difficultés expérimentales à mesurer des déformations très petites sur des durées très longues ; une viscosité de la roche aussi faible, si elle se confirmait, pourrait générer dans les ouvrages remblayés une surpression hydraulique pendant leur convergence différée dont la valeur, en fonction du volume excavé et de la perméabilité de la roche environnante (notamment de l'EDZ), pourrait dépasser la pression de gonflement visée pour les scellements (4 MPa). Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé qu'« aucune estimation quantifiée de ces surpressions n'a été menée à ce stade. Cependant, qualitativement le fluage à prendre en compte à long terme est le fluage après rupture des revêtements et non le fluage initial au moment du creusement. En effet, au moment de la rupture des revêtements de galeries, le fluage sera effectivement réactivé mais il aura une vitesse beaucoup plus faible que celui induit lors du creusement des galeries. Ce fluage initial est principalement lié à la formation de la zone endommagée et à l'activation du potentiel de gonflement des argilites par rupture locale du squelette de calcite. Au moment de la rupture du revêtement des galeries, le fluage qui sera activé sera proche du fluage en grand de la couche, représentatif des mouvements géologiques liés à la compression alpine, et qui est lié à une viscosité minima de 3 à 4 ordres de grandeur supérieure. Avec une telle valeur de viscosité, la surpression hydraulique est négligeable et l'influence sur le transport des solutés également ». L'IRSN estime que cette réponse est qualitative et que pour la DAC,

l'Andra devra évaluer l'impact des possibles surpressions hydrauliques induites par le fluage de la roche sur les performances du stockage à grande échelle. Ce point complète l'engagement E.2.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.5.5.1.4 Variante avec « coupures hydrauliques »

L'Andra [2] indique que les travaux en cours concernent principalement le comportement hydromécanique des coupures notamment au niveau de leur jonction avec le noyau (éventuels effets de cisaillement des argilites, déplacements relatifs de la bentonite dans la coupure et le noyau...), le transfert de gaz (évaluation de la voie de transfert privilégiée : au travers de la coupure, à l'interface de la coupure avec l'argilite, dans le noyau...) et l'interaction chimique de la coupure avec le béton bas pH du revêtement laissé en place. Ceci n'appelle pas de commentaire particulier à ce stade du projet de la part de l'IRSN.

3.5.5.2 Scellements de liaisons surface-fond

L'Andra [2] estime que l'absence de zone fracturée connectée dans l'USC (EDZ) permet de considérer un comportement élastique des argilites autour du noyau principalement piloté par la pression de gonflement de celui-ci ; comme pour les scellements de fond, l'Andra [2] considère un équilibre global assuré par frottements et plus spécifiquement pour les puits, une contribution plus grande (i) du poids de la colonne de matériaux de fermeture due à la verticalité de l'ouvrage et (ii) de la condition à la limite de type « déformation quasi-nulle »

imposée à la base des puits. À l'instar de l'analyse présentée au § 3.5.5.1 relatif aux scellements de fond, l'IRSN estime que l'Andra devra présenter une modélisation d'ensemble des scellements de liaisons surface-fond prenant en compte les effets du rééquilibrage hydraulique, le couplage hydromécanique et le comportement différé des différents matériaux pour évaluer notamment l'état de contraintes effectif aux interfaces sollicitées par des frottements.

3.5.6 CONCLUSION SUR LA PHENOMENOLOGIE PRISE EN COMPTE

L'IRSN estime que :

- l'analyse de l'évolution phénoménologique présentée par l'Andra est à ce stade encore très qualitative et nécessite d'être confortée par des études complémentaires ;
- l'Andra devra notamment étudier le comportement aux interfaces entre les différents composants d'un scellement (frottements, chimie, bactéries...) et préciser les distances d'influence des conditions aux limites.

Notamment, l'IRSN estime que l'Andra devra :

- réaliser, pour les différents scellements (galeries, alvéoles MAVL et liaisons surface-fond), des simulations numériques tenant compte de l'ensemble de leurs composants, du contexte poromécanique, de la sollicitation due au gaz et de l'incertitude sur le comportement rhéologique du béton sur les durées considérées ;
- justifier sur la base de ces modélisations la longueur des scellements (noyau et massifs d'appui).

Ce point fait l'objet de l'engagement E.3.1 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

3.6 ROLE DES SCELLEMENTS SUR LA PERFORMANCE GLOBALE DU STOCKAGE

Comme indiqué au § 3.4 du présent rapport, l'Andra [2] vise une perméabilité équivalente « en grand » (*i.e.* zone endommagée en paroi incluse) de l'ordre de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond et de 10^{-11} m/s pour ceux des liaisons surface-fond. Dans le « Dossier 2005 », l'option aujourd'hui présentée en variante pour les scellements de fond (*i.e.* avec « coupures hydrauliques ») visait une perméabilité équivalente « en grand » de l'ordre de 10^{-10} m/s. Par ailleurs, l'Andra [2] retient à ce stade des longueurs de noyau de scellement de l'ordre de 20 m pour les scellements de fond et de 40 m pour ceux des liaisons surface-fond.

Par rapport aux « Dossiers 2005 » et « 2009 », l'architecture de l'installation souterraine du stockage retenue au stade de l'esquisse présente, tout comme dans le « Dossier Jesq03 (2012) », des galeries de plus faibles longueurs [29]. De plus, la notion de scellements de fractionnement n'est plus retenue (*cf.* § 2.3 du présent rapport) et les connaissances relatives au Callovo-Oxfordien ont progressé (*cf.* Référentiel de site 2012 [26] : coefficient de diffusion de pore pour les anions de l'ordre de 7.10^{-11} m²/s en 2009-2012 contre 10^{-10} m²/s en 2005, soit une diminution d'environ 30 %).

Aussi, afin d'évaluer l'impact de ces différents éléments sur la performance globale du stockage, l'IRSN a réalisé ses propres évaluations (cf. Annexe T1 du présent rapport) sur la base de l'architecture générale présentée dans le « Dossier Jesq03 (2012) » en considérant les options de scellement retenues à ce jour. Les calculs réalisés concernent le transfert d'iode³ 129 depuis la zone de stockage de déchets MAVL selon deux voies : la voie de transfert par la roche et celle par les ouvrages. L'IRSN rappelle que la comparaison de ces deux voies contribue à apprécier, dans le cas de l'iode qui est un radionucléide non sorbé (non retardé) à vie longue, la capacité des ouvrages de fermeture du stockage à freiner les flux d'eau et donc à remplir leur fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ». Les débits d'activité d'iode 129 sont calculés (en Bq/an) au toit et au mur du Callovo-Oxfordien pour la voie de transfert par la roche et à la sortie des liaisons surface-fond pour la voie de transfert par les ouvrages ; ils sont ensuite normés par rapport au pic d'activité en sortie de la voie de transfert par la roche. Ces évaluations permettent de mettre en évidence la sensibilité des flux aux performances hydrauliques des scellements. Pour les besoins de la simulation numérique, l'architecture exacte du stockage est simplifiée : la zone MAVL est modélisée avec deux puits et deux descenderies et les différents scellements retenus par l'Andra (scellements de galeries de liaison, d'alvéoles MAVL et de liaisons surface-fond) sont pris en compte.

Les résultats des calculs de l'IRSN sont synthétisés sur la Figure 25. Cette figure présente le débit d'activité d'iode 129 en fonction du temps à la sortie de la voie de transfert par la roche et différentes courbes de débits d'activité à la sortie des liaisons surface-fond correspondant à différentes hypothèses de calcul énumérées ci-après :

Cas n°1 : cas de référence : les objectifs de perméabilité de l'ensemble des scellements sont supposés atteints : perméabilité équivalente « en grand » de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond et de 10^{-11} m/s pour ceux des liaisons surface-fond ;

Cas n°2 : tous les scellements de liaisons surface-fond (LSF) sont supposés défaillants (10^{-7} m/s), les scellements de fond (de galeries de liaison et d'alvéoles MAVL) sont supposés opérants (10^{-9} m/s) ;

Cas n°3 : un scellement de puits sur les quatre LSF modélisées est supposé défaillant (10^{-7} m/s), tous les autres scellements sont supposés opérants (10^{-9} m/s pour les scellements de fond, 10^{-11} m/s pour les scellements de LSF) ;

Cas n°4 : aucun scellement mis en place ; le stockage est supposé simplement remblayé (10^{-7} m/s) ;

Cas n°5 : comme pour le cas n°2, tous les scellements de LSF sont supposés défaillants (10^{-7} m/s) mais les scellements de fond sont supposés plus performants (10^{-10} m/s).

Le cas de référence (cas n°1) montre (cf. Figure 25) que lorsque les objectifs de perméabilité définis par l'Andra sont atteints, les débits d'activité en sortie des liaisons surface-fond sont toujours inférieurs à ceux estimés au toit et au mur du Callovo-Oxfordien, d'au moins 4 ordres de grandeur, ce qui est satisfaisant : la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est significativement dominante par rapport à celle des ouvrages. Ce rapport de 4 ordres de grandeur est similaire à celui obtenu par l'Andra avec un modèle basé sur l'architecture retenue

³ Les radionucléides les plus mobiles sont l'iode 129, le chlore 36, le sélénium 79 et sont les principaux contributeurs à l'impact à long terme du stockage.

dans le « Dossier 2009 » et un jeu d'hypothèses différent. Par ailleurs, un résultat (non illustré) de calcul réalisé par l'IRSN montre qu'avec l'architecture considérée ici (celle du « Dossier Jesq03 (2012) »), la sortie des radionucléides par les liaisons surface-fond se fait préférentiellement par les puits, ceux-ci étant plus proches des alvéoles MAVL que les descenderies, plus éloignées quant à elles d'environ 600 m. Ceci montre que la défaillance d'un scellement de puits unique pourrait conduire à un débit d'activité plus concentré à la sortie de celui-ci que dans le cas d'une défaillance répartie et donc, à l'apparition d'un « point chaud » à la sortie du Callovo-Oxfordien. L'IRSN observe également que la diminution de charge hydraulique entre le Callovo-Oxfordien et l'Oxfordien se fait essentiellement au niveau des scellements de liaisons surface-fond, qui agissent comme des barrières hydrauliques efficaces, alors que celle au niveau des scellements de fond est relativement faible, ce qui laisse entrevoir un rôle plutôt limité de ces scellements pris seuls. À cet égard, l'Andra a précisé au cours de la réunion préparatoire à la réunion du groupe permanent que l'architecture du stockage répond notamment à l'objectif de « sectorisation de l'installation de stockage en modules pouvant être facilement isolés les uns des autres de manière à minimiser les conséquences d'un court-circuit hydraulique d'une partie du système de stockage » encouragé par le Guide de sûreté [18]. L'IRSN considère que cette sectorisation devrait, de surcroît, être à même de fractionner l'inventaire du stockage et estime que compte tenu des remarques ci-avant, **la contribution des scellements de fond au fractionnement de l'inventaire du stockage serait relativement limitée.**

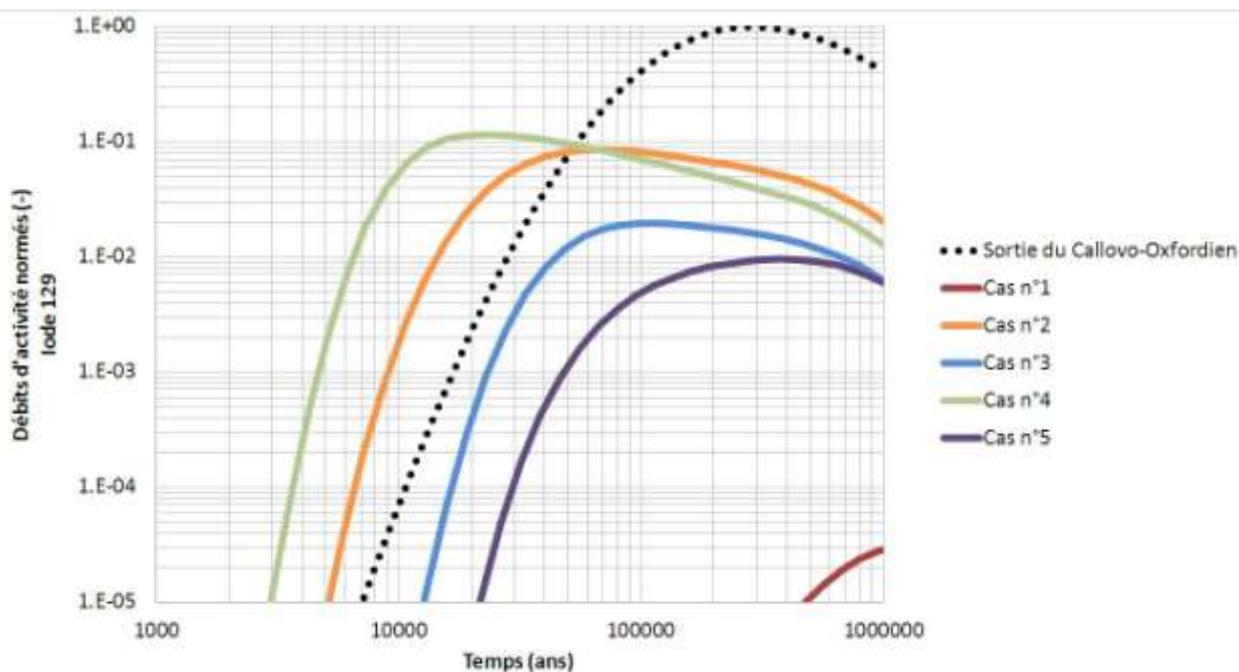


Figure 25 : Débits d'activité d'iode 129 en sortie du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond (IRSN)

Afin d'apprécier la contribution respective des scellements de liaisons surface-fond et des scellements de fond à la répartition du débit d'activité entre la voie de transfert par la roche et celle par les ouvrages, l'IRSN a considéré le cas n°2 où seuls les scellements de fond sont supposés opérants (*i.e.* perméabilité de 10^{-9} m/s) et où l'ensemble des scellements de liaisons surface-fond est supposé défaillant (*i.e.* perméabilité de 10^{-7} m/s, représentative d'un remblai). L'IRSN observe alors que les débits d'activité à la sortie des liaisons surface-fond sont supérieurs à ceux estimés à la sortie du Callovo-Oxfordien pendant environ 50 000 ans, puis au mieux inférieurs d'un ordre de grandeur à ceux à la sortie du Callovo-Oxfordien. L'IRSN constate que selon cet indicateur (débit d'activité normé

d'iode 129) et pour les hypothèses considérées, **les scellements de fond ne permettent pas de pallier une éventuelle défaillance de l'ensemble des scellements de liaisons surface-fond.**

Afin de préciser le rôle des scellements de liaisons surface-fond, l'IRSN a considéré le cas n°3 où seul un scellement de puits est supposé défaillant (*i.e.* perméabilité de 10^{-7} m/s) et où l'ensemble des autres scellements est supposé opérant (*i.e.* perméabilité de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond et de 10^{-11} m/s pour les trois liaisons surface-fond restantes). L'IRSN constate alors que le pic de débit d'activité à la sortie des liaisons surface-fond reste dans le même ordre de grandeur que dans le cas n°2, c'est-à-dire largement supérieur à celui du cas de référence, mais que néanmoins, le débit d'activité à la sortie des liaisons surface-fond est toujours inférieur à celui estimé en sortie du Callovo-Oxfordien, de moins de 2 ordres de grandeur. Si ces résultats montrent que **les conséquences de la défaillance d'un seul scellement de liaison surface-fond sont moindres**, la prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien est dans ce cas nettement plus faible que celle de 4 ordres de grandeur obtenue pour ce même indicateur dans le cas n°1.

En complément, afin d'évaluer le rôle des scellements de fond, l'IRSN a considéré le cas n°4 où aucun scellement ne serait mis en place, le stockage n'étant supposé que remblayé (*i.e.* perméabilité de 10^{-7} m/s). L'IRSN constate que les débits d'activité à la sortie des liaisons surface-fond sont toujours à peu près dans la même décade que dans les cas n°2 et 3. Ceci montre qu'**avec les objectifs de perméabilité retenus à ce stade par l'Andra, dès qu'un scellement de liaison surface-fond est défaillant, les pics de débits d'activité à la sortie des liaisons surface-fond restent sensiblement du même ordre de grandeur, qu'un seul ou tous les scellements soient défaillants**; en d'autres termes, la contribution des scellements de fond à la diminution des gradients hydrauliques et à la limitation des flux d'eau en cas de défaillance des scellements de liaisons surface-fond, objectifs assignés par l'Andra à ces ouvrages (*cf.* § 2.3), est peu significative dans la situation considérée.

Enfin, afin d'apprécier le gain que procureraient des scellements de fond plus performants, l'IRSN a considéré le cas n°5 où, comme dans le cas n°2, l'ensemble des scellements de liaisons surface-fond est supposé défaillant (*i.e.* perméabilité de 10^{-7} m/s) mais où **les scellements de fond sont supposés opérants et plus performants** que retenus à ce stade (*i.e.* perméabilité de 10^{-10} m/s au lieu de 10^{-9} m/s). L'IRSN constate alors le **rétablissement d'une prédominance de la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien d'environ 2 ordres de grandeur par rapport à la sortie par les liaisons surface-fond.**

En conclusion, l'IRSN rappelle que dans son avis [29] relatif aux évolutions du projet Cigéo depuis le « Dossier 2009 », il relevait que l'architecture générale du stockage présentée dans le « Dossier Jesq03 (2012) » montrait une évolution importante par rapport à celle retenue en 2005, avec par exemple une diminution notable des distances entre les alvéoles de stockage MAVL et la base des liaisons surface-fond (plus d'un kilomètre en 2009 contre quelques centaines de mètres en 2012). Or, depuis le « Dossier 2005 », l'Andra n'a pas présenté d'évaluation de la performance globale du stockage ; ces évaluations nécessitent en particulier la définition d'un « scénario d'évolution normale » (évolutions attendues des colis, des ouvrages et de la roche) que l'Andra n'a pas encore explicitement décrit.

Les calculs de transfert d'iode 129 présentés ci-dessus, réalisés sur la base des concepts de scellements retenus à ce stade par l'Andra et de l'architecture présentée dans le « Dossier Jesq03 (2012) », donnent une indication sur la capacité du stockage à freiner les flux d'eau et donc à remplir sa fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » :

L'IRSN note une diminution très nette de cet indicateur depuis le « Dossier 2005 » où la prédominance de la voie de transfert par la roche, même en scénario d'évolution altérée « tous scellements défailants », était très supérieure à celle observée aujourd'hui. Suite à la réunion préparatoire à la réunion du groupe permanent, l'Andra a présenté des éléments permettant d'apprécier l'influence des évolutions depuis le « Dossier 2005 » des connaissances (gradient de charge vertical, perméabilité, coefficient de diffusion, épaisseur de la formation hôte...) et de l'architecture générale du stockage, sur la performance de celui-ci en cas de défaillance de l'ensemble des scellements. L'IRSN note que les évolutions d'architecture ont contribué à l'augmentation des débits d'activité en iode 129 en sortie des liaisons surface-fond d'un ordre de grandeur depuis le « Dossier 2005 ».

L'IRSN considère qu'avec les options de conception actuellement retenues, les scellements de liaisons surface-fond jouent un rôle prépondérant dans la fonction « s'opposer à la circulation de l'eau » et que si l'Andra a réuni des éléments encourageants, la démonstration de performance de ces ouvrages n'est pas acquise à ce stade. En outre, celle relative aux scellements de fond pose la difficulté de la réalisation d'un démonstrateur complet *in situ* à l'échelle 1 en raison de l'extrême lenteur de sa cinétique de resaturation. L'IRSN estime que la contribution des ouvrages à cette fonction ne doit pas reposer sur les performances d'un seul type d'ouvrage, tel que le scellement de liaison surface-fond, mais sur un ensemble de lignes de défenses qui se complètent et, dans une certaine mesure, se suppléent. À cet égard, l'IRSN rappelle [29] que l'architecture générale du stockage (longueur des galeries, positionnement des liaisons surface-fond...) est à même d'apporter des marges supplémentaires en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées, ce que l'Andra a quantifié et présenté suite à la réunion préparatoire à la réunion de groupe permanent. Aussi,

Recommandation n° 1 :

L'IRSN estime que dans le processus d'optimisation en cours de l'architecture générale du stockage, l'Andra doit considérer les dispositions de conception, notamment d'architecture, qui permettent de pallier l'éventuelle défaillance d'un ou plusieurs scellements de liaison surface-fond et d'apporter ainsi une ligne de défense supplémentaire en termes de transfert de radionucléides par les ouvrages. L'IRSN recommande que l'Andra justifie, dans le « Dossier d'options de sûreté », que l'architecture retenue est optimisée à ce stade du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, sur la base d'une étude présentant les avantages et inconvénients des dispositions de conception envisagées eu égard à l'objectif de réduire les relâchements à long terme via les ouvrages et d'assurer la sûreté en exploitation.

Enfin, l'IRSN rappelle qu'à ce stade du projet, la performance des scellements de fond découle principalement de la perméabilité de l'EDZ et que l'Andra s'est engagée (engagement E.1.3 de la lettre Andra [37]) à poursuivre pendant la phase pilote de Cigéo le développement de la variante avec coupures hydrauliques de l'EDZ susceptible d'augmenter sensiblement, le cas échéant, l'efficacité du scellement.

4 LE BOUCHON D'ALVEOLE HA

Ce chapitre traite du bouchon d'alvéole HA selon une démarche similaire à celle adoptée pour l'examen des scellements (cf. § 3.1 du présent rapport). Dans la suite de ce rapport, le terme « bouchon » sans autre précision désigne le bouchon argileux.

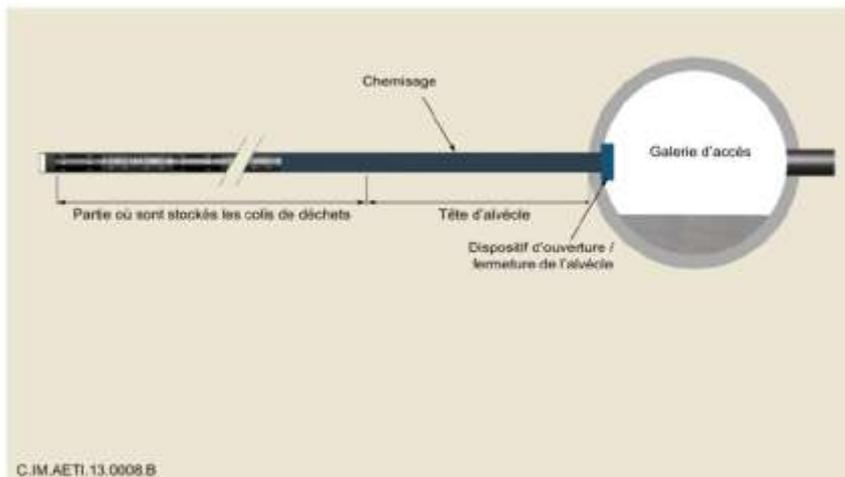
Par rapport aux ouvrages de scellement présentés précédemment dans le présent rapport, les bouchons d'alvéoles HA sont plus petits (environ 70 cm de diamètre, quelques mètres de longueur) et placés dans un contexte radiologique et thermique plus prononcé.

L'Andra [4] indique que l'alvéole de stockage de déchets HA est décrite dans le « Dossier 2009 » et précise (cf. Figure 26) qu'il s'agit à ce stade d'un micro-tunnel borgne d'environ 80 m de long composé d'une « partie utile » dans laquelle sont stockés les colis de déchets et d'une « tête d'alvéole » d'une dizaine de mètres de longueur où sera mis en place le bouchon. La stabilité mécanique de l'alvéole est assurée par un chemisage métallique de quelques centimètres d'épaisseur qui, dans la tête de l'alvéole, est appelé « insert ». Le diamètre de l'insert est légèrement supérieur à celui du chemisage de la partie utile de sorte que ce dernier puisse coulisser dans l'insert sous l'effet de la dilatation thermique. À l'issue de l'instruction du « Dossier 2009 », l'IRSN [28] avait indiqué « *qu'il conviendrait que l'Andra poursuive également la recherche de méthodes permettant une dépose au moins locale de l'insert permettant une mise en place du bouchon argileux au contact direct de la roche et approfondisse son analyse de l'impact sur la sûreté du retrait ou non de l'insert* ».

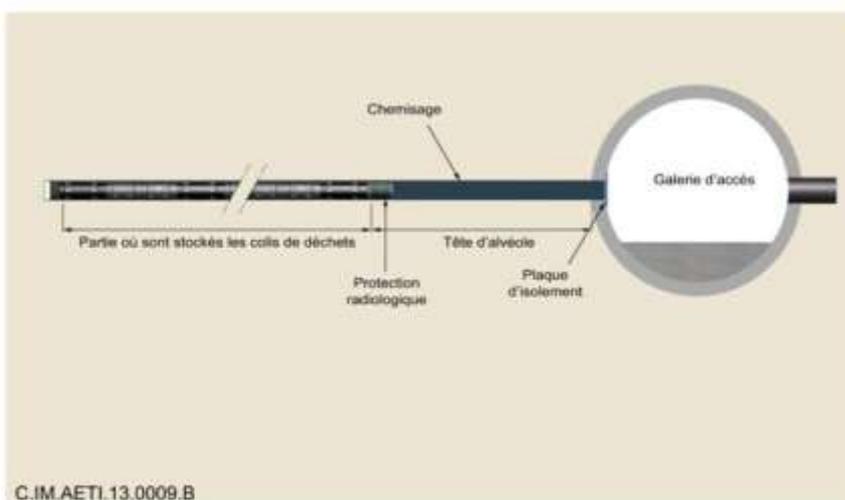
L'Andra [4] précise que :

- en phase de remplissage de l'alvéole, un dispositif d'ouverture/fermeture de l'alvéole placé dans la galerie d'accès permet l'isolement radiologique des colis mis en alvéole (cf. Figure 22a) ;
- lorsque l'alvéole est rempli, dans l'attente de son obturation (maintien au niveau 2 de l'échelle de récupérabilité), un bouchon métallique de protection radiologique est mis en place dans la tête d'alvéole à proximité des colis de déchets (cf. Figure 22b) ;
- lors du passage au niveau 3 de l'échelle de récupérabilité, l'obturation de l'alvéole est réalisée par la mise en place du bouchon dans la tête d'alvéole (cf. Figure 22c).

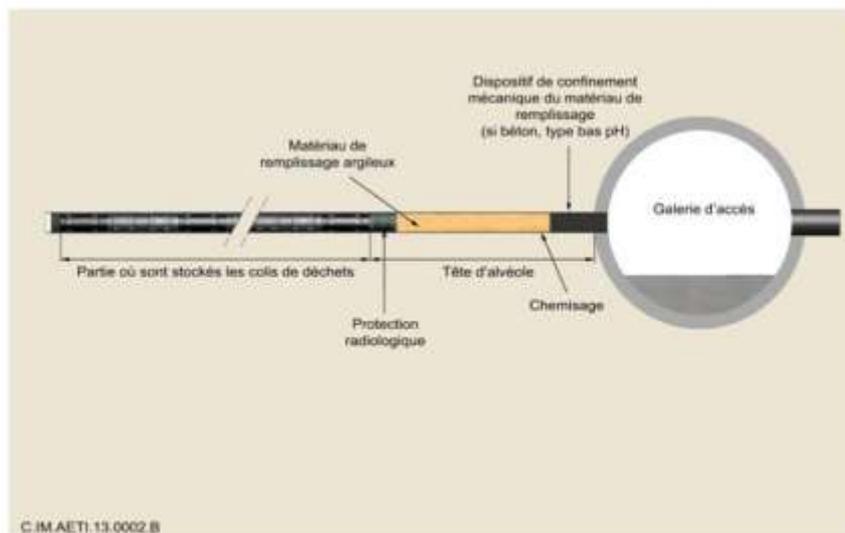
Le bouchon d'alvéole HA contribue aux trois fonctions après fermeture : (1) « s'opposer à la circulation de l'eau », (2) « protéger les colis » et (3) « atténuer-retarder les relâchements ». La suite du présent rapport examine la contribution du bouchon d'alvéole HA à chacune de ces fonctions.



a - alvéole de déchets HA en phase de remplissage



b - alvéole de déchets HA au niveau 2 de l'échelle de récupérabilité



c - alvéole de déchets HA au niveau 3 de l'échelle de récupérabilité

Figure 26 : Schémas de principe de l'alvéole de stockage de déchets HA (Andra [4], 2013)

4.1 OBJECTIF DE PERFORMANCE HYDRAULIQUE DU BOUCHON D'ALVEOLE HA

L'Andra [4] indique que la performance hydraulique d'un bouchon d'alvéole HA peut s'apprécier à l'aide d'une « perméabilité équivalente » exprimée analytiquement de façon similaire à la démarche décrite au § 3.2 du présent rapport :

$$K_{\text{bouchon}} = (K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2) / (S_1 + S_2) \quad (\text{équation 1-b})$$

où (K_1, S_1) représentent la perméabilité et la section du noyau argileux et (K_2, S_2) la perméabilité et la section du composant situé entre le noyau et les argilites en paroi, *i.e.* l'insert si celui-ci est laissé en place (*cf.* Figure 27). L'Andra [4] définit ensuite la perméabilité équivalente du bouchon « en grand » qui intègre en plus la zone d'argilites endommagées en paroi d'alvéole (perméabilité K_3 , section S_3) :

$$K_{\text{bouchon "en grand"}} = (K_1 \cdot S_1 + K_2 \cdot S_2 + K_3 \cdot S_3) / (S_1 + S_2 + S_3) \quad (\text{équation 2-b})$$

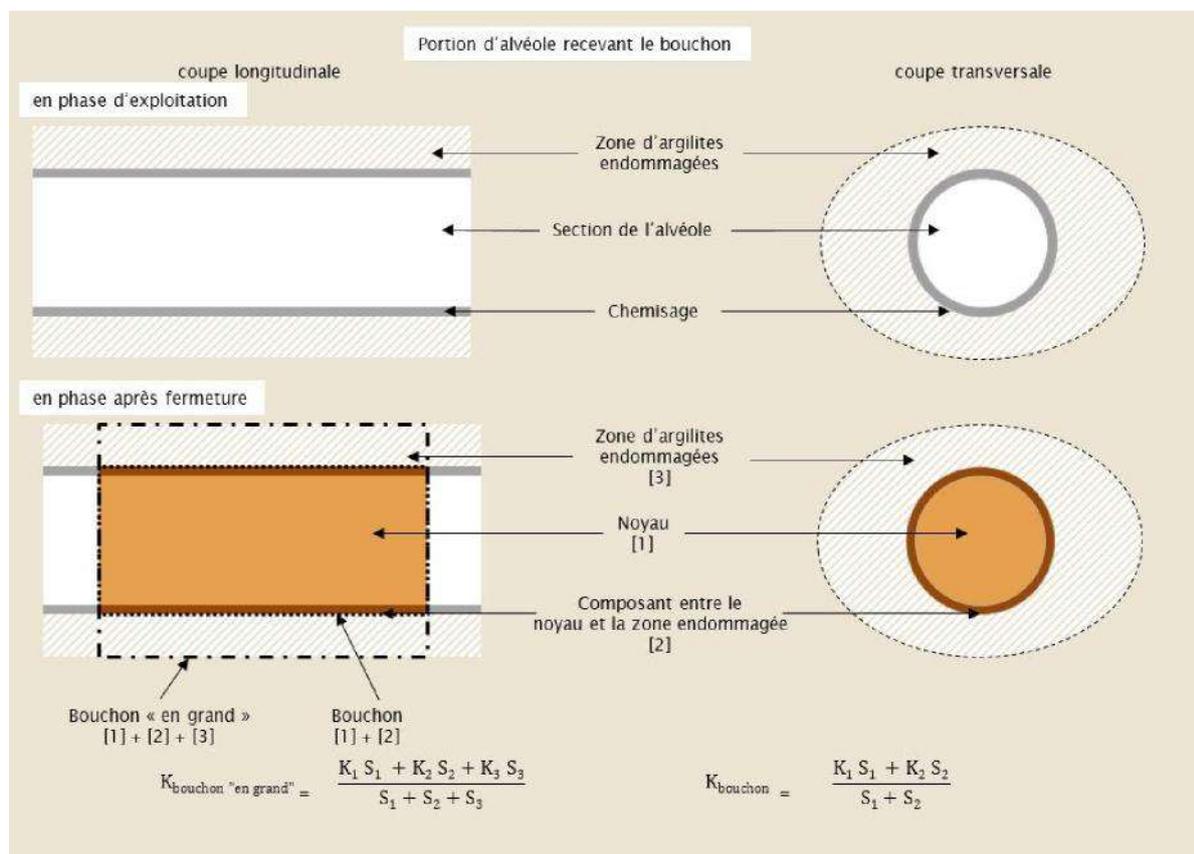


Figure 27 : Schéma de calcul de la perméabilité équivalente du bouchon d'alvéole HA (Andra [4], 2013)

L'Andra [4] indique que les diverses évaluations menées depuis 2009 montrent qu'en situation de fonctionnement normal, la voie de transfert des solutés depuis l'alvéole de stockage de déchets HA vers la galerie d'accès est négligeable et très peu sensible à la perméabilité équivalente du bouchon d'alvéole, ce dernier point étant illustré par la Figure 28. L'Andra [4] explique ce résultat par le fait qu'en régime de transfert diffusif, la contribution de la voie de transfert par le bouchon est directement liée au *ratio* des surfaces d'échange du bouchon et des argilites sur la galerie, ce qui explique que l'essentiel du débit molaire entrant dans la galerie d'accès provienne

de la voie de transfert par les argilites en champ proche. L'Andra [4] précise que l'effet de drain hydraulique par la galerie, la faible perméabilité de la formation hôte et la faible surface drainante de l'alvéole sont insuffisants pour imposer un régime de transfert convectif au sein de l'alvéole.

L'Andra [4] estime donc que le maintien du chemisage autour du bouchon d'alvéole HA, qui peut se traduire après dégradation à long terme de celui-ci par une zone pluri-centimétrique de perméabilité plus élevée, ne modifie pas le transfert de solutés vers la galerie d'accès, comme le montre la Figure 29.

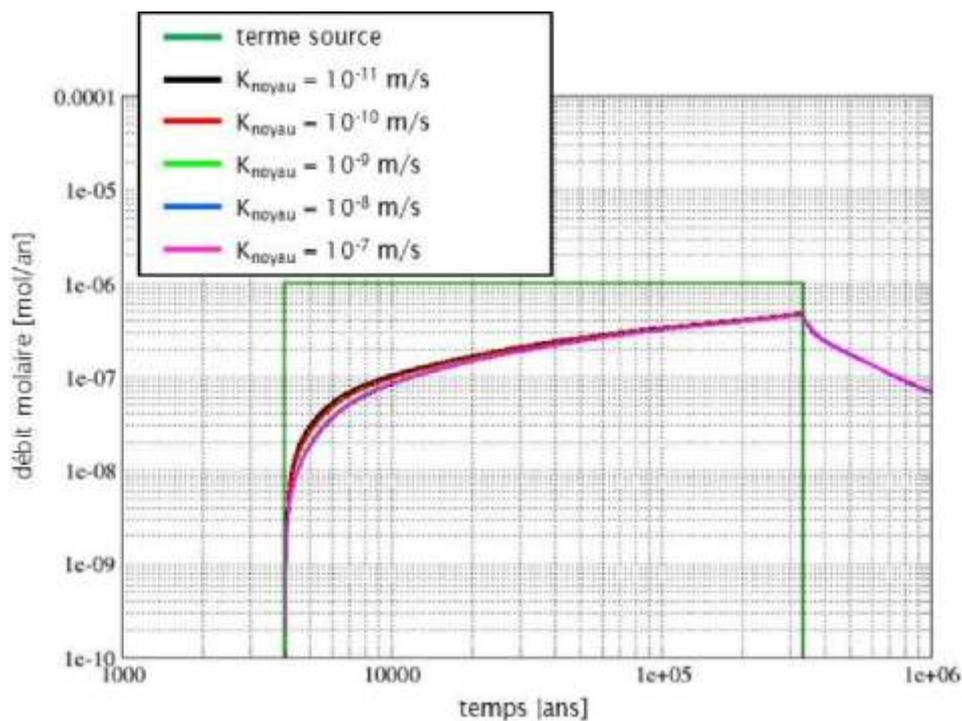


Figure 28 : Influence de la perméabilité du noyau (avec dépose du chemisage) : exemple de débits molaires d'iode 129 arrivant dans la galerie d'accès d'un alvéole HA (Andra [4], 2013)

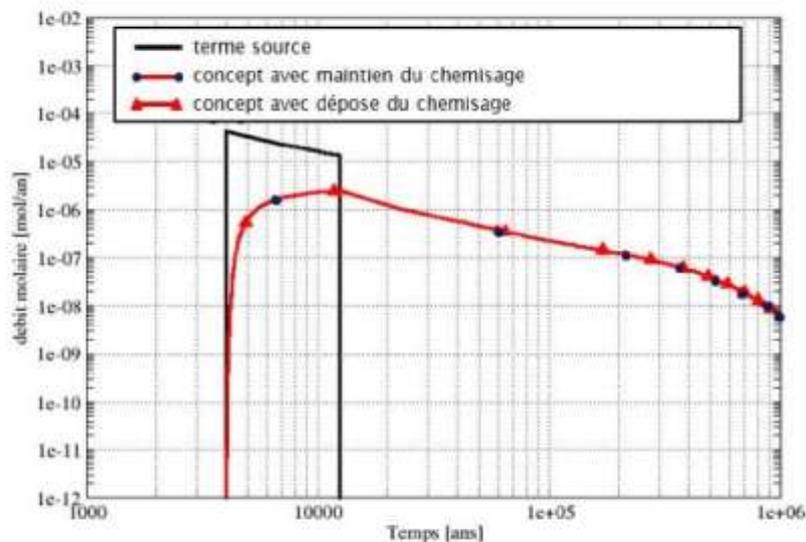


Figure 29 : Influence du maintien ou de la dépose de l'insert en tête d'alvéole HA (Andra [4], 2013)

Le schéma de principe retenu par l'Andra [4] comporte donc un « matériau de remplissage argileux » mis en place dans l'insert métallique entre le bouchon métallique de radioprotection et un « dispositif de confinement mécanique » éventuellement en béton et dans ce cas, bas pH (cf. Figure 30).

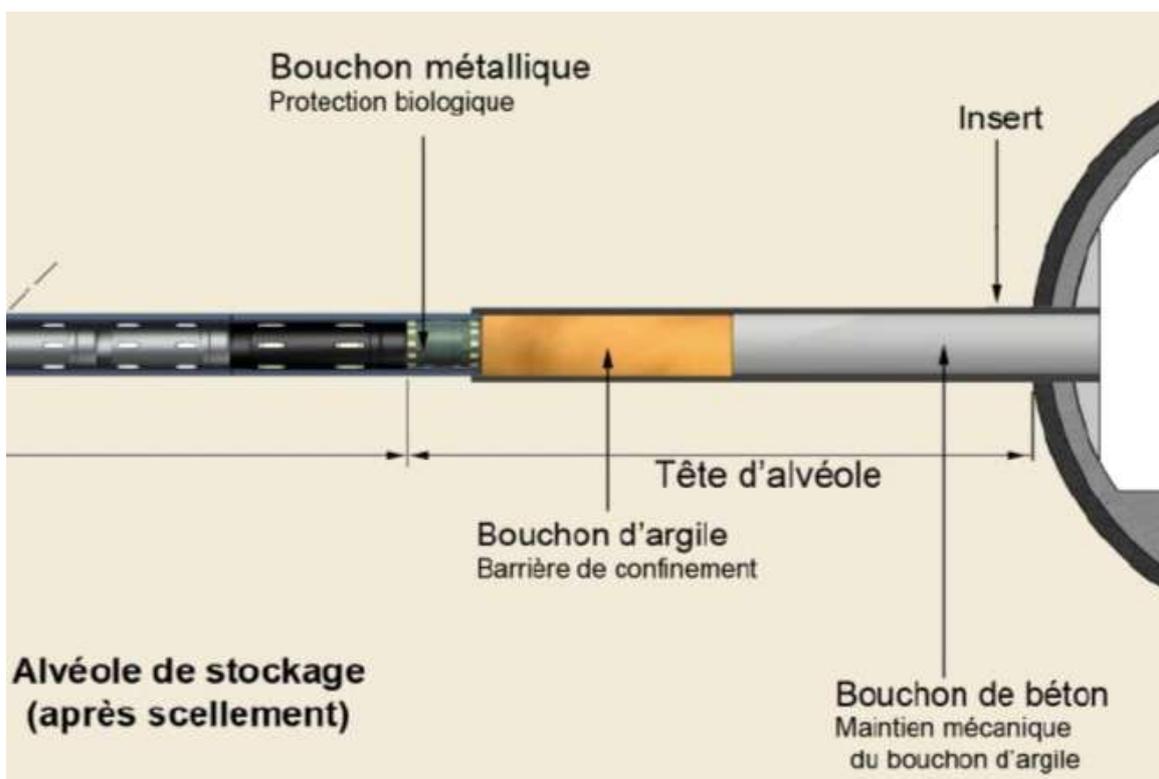


Figure 30 : Schéma de principe du bouchon d'alvéole HA (Andra, « Dossier 2009 »)

L'IRSN constate que l'Andra [4] confirme depuis le « Dossier 2009 » un concept de bouchon d'alvéole HA avec maintien de l'insert en tête d'alvéole et relève qu'à ce stade du projet, l'Andra ne fixe aucun objectif de performance hydraulique (perméabilité) au bouchon d'alvéole HA. L'IRSN convient de la validité du raisonnement mené par l'Andra en situation de fonctionnement normal (*i.e.* tant que les transferts sont principalement diffusifs) mais s'interroge, tout comme lors de l'examen du « Dossier 2009 », « sur la capacité de confinement que pourra atteindre un bouchon argileux ainsi positionné dans l'insert » [28] en situation altérée.

À cet égard, l'Andra [4] précise que des évaluations complémentaires seront réalisées pour des configurations hors évolution normale, notamment en étudiant un scénario de court-circuit hydraulique de la formation hôte résultant par exemple d'un forage intrusif abandonné ; ces évaluations considéreront à la fois le transitoire hydraulique-gaz et le retour à l'équilibre du stockage après resaturation. Dans l'hypothèse où elles montreraient un intérêt à la dépose de l'insert, un essai de dépose et l'essai BHN prévus au Laboratoire souterrain [4] apporteront des éléments relatifs à la faisabilité et à la performance d'un concept où le noyau argileux serait mis en contact direct avec les argilites en paroi. L'IRSN indique qu'à ce stade, ses propres évaluations réalisées en considérant des scénarios d'évolution dégradée de type « intrusion par forage » ne remettent pas en cause l'option de conception avec insert retenue par l'Andra. Il appartient à l'Andra de confirmer ce point, sur la base d'évaluations complémentaires qu'elle a prévues.

4.2 FONCTIONS « PROTEGER LES COLIS », « ATTENUER-RETARDER LES RELACHEMENTS »

L'Andra [4] indique que la participation du bouchon d'alvéole HA à la fonction « protéger les colis » consiste à limiter l'altération de la matrice des déchets vitrifiés en assurant un rôle de tampon vis-à-vis de l'environnement physico-chimique des galeries. À ce titre, l'Andra [4] précise qu'*il est préférable d'éviter de placer les déchets vitrifiés dans un environnement cimentaire qui se caractérise par des pH élevés*. Aussi l'Andra [4] retient, comme concept, le remplissage de l'espace intérieur de la tête d'alvéole par un matériau argileux avec un pH proche de la neutralité. Pour ce faire, l'Andra [4] prévoit un remplissage sur la plus grande longueur possible de la tête d'alvéole afin de se prémunir du risque de propagation d'un panache alcalin lié à la présence de béton dans le soutènement/revêtement de la galerie d'accès à l'alvéole ainsi que l'emploi de matériaux cimentaires de type bas pH pour le dispositif de confinement mécanique. Les interactions chimiques des matériaux cimentaires de type bas pH avec les argiles sont traitées au § 3.5.3 du présent rapport. En outre, l'Andra [4] rappelle que pour limiter la vitesse de corrosion des éléments métalliques (chemisage, insert et conteneurs de stockage), il s'agit de placer l'alvéole dans un environnement anoxique où les processus de corrosion sont plus lents. Ce point est traité au § 4.4.3 du présent rapport.

La participation à la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides » se traduit par la minimisation des flux transitant longitudinalement via les alvéoles et les galeries. À ce titre, l'Andra [4] indique qu'à longueur de tête d'alvéole donnée, le matériau de remplissage argileux peut contribuer à favoriser la voie de transfert des substances par le Callovo-Oxfordien ainsi qu'à augmenter le temps de transfert vers la galerie. L'IRSN souligne qu'*en situation de fonctionnement normal, la longueur de la tête d'alvéole a davantage d'influence sur la limitation des relâchements de radionucléides vers la galerie que la performance hydraulique du noyau argileux. Ceci ne remet pas en cause la pertinence des fonctions allouées au bouchon d'alvéole HA par l'Andra.*

4.3 LES COMPOSANTS

4.3.1 LA ZONE D'ARGILITES ENDOMMAGEES EN PAROI D'ALVEOLE

La formation hôte et la zone endommagée en paroi des ouvrages ont été présentées au § 3.3.1 du présent rapport. L'Andra [4] précise que les alvéoles HA sont orientés selon la contrainte horizontale majeure et que le jeu annulaire entre l'insert et les argilites pourra être réduit par rapport à celui nécessaire en partie utile de l'alvéole, ce qui devrait limiter le développement de la zone d'argilites endommagées autour de la tête d'alvéole.

Afin d'étudier le comportement thermo-hydromécanique (THM) de la roche, notamment en tête d'alvéole, l'Andra [4] réalise au Laboratoire souterrain l'essai « alvéole chauffant » (cf. Figure 31), qui fait partie du projet européen LUCOEX (*Large Underground COnccept EXperiment*, 2011-2014). L'alvéole expérimental a une longueur de 25 m avec une tête d'alvéole de 6 m. L'insert d'épaisseur 21 mm a un diamètre extérieur de 767 mm (diamètre excavé 791 mm) et le chemisage d'épaisseur 20 mm a un diamètre extérieur de 700 mm (diamètre excavé 750 mm). La chauffe est réalisée entre 10 et 25 m par 5 sondes d'un encombrement similaire à celui des colis de déchets. La chauffe, débutée en avril 2013, a pour objectif d'atteindre 90 °C sur la paroi de chemisage en 2 ans

(220 W/m). L'Andra [4] envisage la poursuite de l'essai au-delà du projet LUCOEX avec la mise en place d'un bouchon à l'intérieur du chemisage en tête d'alvéole vers 2016.

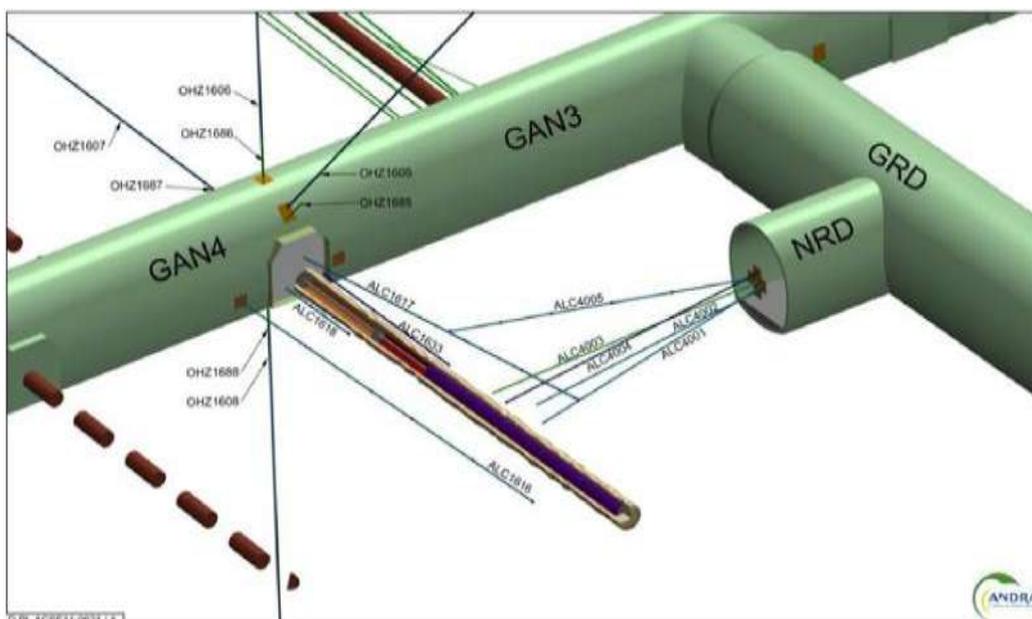


Figure 31 : Expérimentation « alvéole chauffant » (Andra [4], 2013)

L'Andra [4] indique que « *couplées au programme d'essais mis en place [...] les études de R&D en cours [permettront plus spécifiquement] d'évaluer qualitativement la cicatrisation hydraulique des argilites endommagées au droit du noyau [avec] une attention particulière [...] portée à la représentation de la zone endommagée d'argilites et aux frottements entre les différents composants* ». Dans l'attente de ces résultats, l'Andra [4] propose une « *représentation la plus probable* » : le comportement différé des argilites va dans le sens d'une consolidation sur l'insert ; ensuite, après la perte d'intégrité mécanique de l'insert, un noyau argileux gonflant favorise la réduction de la perméabilité de l'EDZ par fermeture mécanique et auto-colmatage des fissures.

L'IRSN note qu'un programme de R&D est en cours et convient de la possible consolidation des argilites sur l'insert tant que celui-ci est intègre ; il s'interroge par contre sur l'aptitude d'un noyau argileux développant une faible pression de gonflement (*cf.* § 4.3.2 du présent rapport) à colmater, après dégradation de l'insert, une EDZ reminéralisée sur une épaisseur centimétrique au contact de celui-ci. En tout état de cause, l'IRSN relève que l'hypothèse d'un auto-colmatage de la zone d'argilites endommagées autour de la tête d'alvéole identique à celui retenu au droit d'un scellement de fond (*i.e.* $\approx 10^{-9}$ m/s pour l'EDZ et $\approx 10^{-11}$ m/s pour l'Edz) postulée pour les évaluations de performance post-fermeture des bouchons d'alvéoles HA [4] devra être davantage justifiée. L'IRSN rappelle néanmoins que le concept retenu par l'Andra ne spécifie pas de performance hydraulique particulière au bouchon d'alvéole HA.

Pour ce qui concerne la faisabilité industrielle du creusement d'une tête d'alvéole, l'IRSN rappelle que l'Andra dispose d'un retour d'expérience probant acquis au Laboratoire souterrain en matière de creusement d'alvéoles expérimentaux au micro-tunnelier ainsi que lors de la mise en place de l'essai « alvéole chauffant ».

4.3.2 LE NOYAU ARGILEUX

L'Andra [4] précise que le matériau argileux du noyau sera de type gonflant afin de reprendre les jeux de mise en place et de comprimer, au fur et à mesure de la perte de résistance mécanique de l'insert, la zone d'argilites endommagées favorisant ainsi l'auto-colmatage de l'EDZ. Les études de dimensionnement du dispositif de confinement mécanique permettront de définir la pression de gonflement du noyau. Les spécifications de mise en œuvre s'ensuivront.

À titre d'exemple (cf. Figure 10), l'Andra [4] indique qu'une pression de gonflement de 0,5 MPa peut être obtenue avec une argile de type Kunigel mise en place avec une densité sèche inférieure à 1,5 ; la même pression de gonflement est obtenue avec une densité inférieure à 1,2 avec une argile de type MX80 et sa capacité de gonflement est alors de l'ordre de 8 % lorsque les vides résiduels à la mise en place obtenus lors d'essais par diverses techniques (briques préfabriquées, compactage *in situ* de mélanges pellets/poudre avec ou sans sable...) ne sont que de quelques pourcents. L'Andra [4] n'écarte pas l'utilisation d'argilites remaniées dont le moindre potentiel de gonflement pourrait être amélioré par l'ajout d'argile gonflante. En considérant la saturation du noyau via les jonctions non étanches de l'insert et/ou l'espace de coulissage insert/chemisage, l'Andra [4] estime que celle-ci interviendrait entre quelques dizaines et plusieurs centaines d'années après fermeture de la galerie d'accès.

Bien qu'aucun objectif de perméabilité ne soit assigné au bouchon d'alvéole HA, l'Andra [4] évalue néanmoins sa perméabilité équivalente à environ 10^{-7} m/s sur la base de l'équation 1-b ; l'Andra considère une perméabilité élevée de l'insert supposé dégradé à long terme (10^{-6} m/s) et une perméabilité du noyau inférieure ou égale à 10^{-8} m/s. Cette valeur est aisément obtenue avec diverses argiles gonflantes et divers modes de mise en place comme le montre la Figure 10 (une densité sèche supérieure à 0,5 suffit pour que la perméabilité d'un noyau soit inférieure à 10^{-10} m/s). L'IRSN estime acceptable cette évaluation mais souligne qu'elle n'inclut pas la zone d'argilites endommagées en paroi.

Pour ce qui concerne la faisabilité industrielle, l'Andra dispose d'ores et déjà d'un premier retour d'expérience acquis au Laboratoire souterrain en matière de mise en place de bouchons argileux en forage de petit diamètre (de l'ordre de 10 cm pour PGZ) et l'IRSN note que l'essai BHN (cf. Figure 13) devrait apporter d'ici la DAC des informations complémentaires relatives aux vides résiduels dans un forage de diamètre équivalent à celui d'une tête d'alvéole. L'IRSN estime que ces éléments sont suffisants à ce stade du projet.

4.3.3 L'INTERFACE DU NOYAU AVEC LA ROCHE (L'INSERT)

Le « Dossier 2009 » présente l'insert comme un tube en acier peu allié bas carbone (par exemple S235) d'une dizaine de mètre de longueur, d'environ 750 mm de diamètre interne, environ 35 mm d'épaisseur et constitué de tronçons de 1,5 à 2,5 m assemblés en galerie par emboîtement ou vissage. Son interface coulissante avec le chemisage de la partie utile de l'alvéole découple les évolutions mécaniques de cette partie utile et de la tête d'alvéole en termes de dilatation thermique, convergence mécanique, etc.

L'Andra [4] souligne que le maintien de l'insert en tête d'alvéole simplifiera la mise en place du bouchon et devrait permettre de réduire les vides résiduels de mise en place. Pour les évaluations de performance post-

fermeture des bouchons d'alvéoles HA, l'Andra [4] retient une perméabilité de l'insert supposé dégradé de 10^6 m/s. L'IRSN précise que cette valeur, certes élevée, est néanmoins purement conventionnelle.

Dans l'hypothèse où les évaluations complémentaires menées hors évolution normale en montreraient l'intérêt (cf. § 4.1 du présent rapport), l'Andra [4] étudie la possibilité de déposer l'insert à l'aide d'un outil coupant rotatif de type « fraise ravageuse ». Les premiers essais ont été réalisés en atelier début 2013. Un essai *in situ*, s'il était retenu, pourrait être réalisé au 2nd semestre 2014 dans un alvéole creusé et chemisé en mai 2011, soit près de 3 ans après la mise en charge du chemisage.

L'IRSN considère que ces essais répondent sa demande de poursuivre « *la recherche de méthodes permettant une dépose au moins locale de l'insert* » exprimée lors de l'examen du « Dossier 2009 ».

4.3.4 LE DISPOSITIF DE CONFINEMENT

L'Andra [4] indique que, si nécessaire, un dispositif de confinement mécanique sera placé derrière le noyau argileux et que dans ce cas, des formulations de matériaux cimentaires de type bas pH ($\text{pH} \leq 11$) seront privilégiées afin de limiter les perturbations alcalines.

L'Andra [4] estime que la construction d'un dispositif en béton bas pH à l'intérieur de l'insert ne devrait pas poser de difficulté et que l'essai BHN (cf. Figure 13) apportera des éléments complémentaires au regard de la faisabilité technique dans des conditions plus difficiles que celles retenues pour l'alvéole HA puisque le forage BHN n'est pas chemisé. Ceci n'appelle pas de commentaire particulier à ce stade du projet de la part de l'IRSN.

L'IRSN rappelle en outre que le rôle du « dispositif de confinement » en amont du noyau argileux est assuré par le bouchon métallique de radioprotection. Le « Dossier 2009 » [33] le décrit comme un bouchon de 2,5 à 3 t en acier non allié d'environ 90 cm de long ; placé à une dizaine de mètres de la galerie d'accès et en fonction des jeux à sa périphérie, il limite la dose reçue par un opérateur en galerie à moins de $3 \mu\text{Sv/h}$. Mis en place après le dernier colis, il est soudé [33] au chemisage, délimitant ainsi la partie utile de l'alvéole. Le « Dossier 2009 » [33] indique qu'un espace d'environ 2 cm est laissé libre entre le bouchon métallique et l'élément le plus proche (colis ou intercalaire inerte) en partie utile. Des lignes de prélèvement, obturées lors de la mise en place du noyau argileux, traversent le bouchon métallique afin de suivre les teneurs en gaz dans l'alvéole et d'en maîtriser l'évolution le cas échéant. Lors de la mise en place du noyau argileux, le bouchon métallique, solidaire du chemisage, isole mécaniquement les colis pendant le compactage de pellets par exemple, puis permet le développement de la pression de gonflement. En cas de décision de retrait des colis, le bouchon métallique assure une protection mécanique des colis et radiologique du personnel pendant la déconstruction du noyau d'argile.

La faisabilité de la déconstruction d'un bouchon d'alvéole HA fait l'objet du § 5 du présent rapport. L'IRSN estime qu'après fermeture de l'alvéole, la rupture à plus ou moins long terme de la liaison du bouchon métallique sur le chemisage est attendue et qu'alors, la pression de gonflement du noyau argileux devrait pousser ce bouchon métallique vers les colis dont le plus proche se trouve à quelques centimètres, soit une distance faible par rapport à la longueur plurimétrique du noyau argileux, et donc insuffisante pour diminuer notablement la pression de gonflement de celui-ci. Or, l'Andra [4] n'indique pas comment les contraintes mécaniques susceptibles d'être appliquées par le bouchon métallique sur les colis après rupture de sa liaison au chemisage sont prises en compte.

Pourtant, l'IRSN considère que le report de la pression de gonflement du noyau argileux sur les surconteneurs de colis HA pourrait induire un impact sur leur tenue mécanique pendant la phase thermique. Ce point vient à l'appui de la conclusion (cf. § 3.3.1.25 du présent rapport) reprise par l'engagement E4 de la lettre Andra [37] relatif à la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté en phases d'exploitation et post-fermeture.

4.3.5 INTEGRATION DES CONTRAINTES LIEES A LA RADIOPROTECTION DU PERSONNEL

L'Andra [4] n'indique pas comment les contraintes liées à la radioprotection du personnel sont prises en compte lors de la mise en place d'un bouchon d'alvéole HA. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que « *les opérations de mise en place du bouchon d'alvéole HA sont sécurisées du point de vue de la radioprotection du personnel par la mise en place de la protection radiologique à proximité du dernier colis. En outre, les opérations de mise en place du bouchon sont facilitées grâce au maintien du chemisage en tête d'alvéole* ». Ceci n'appelle pas de commentaire particulier à ce stade du projet de la part de l'IRSN.

4.4 IMPACT DES PERTURBATIONS

4.4.1 CONTEXTE THERMIQUE

L'Andra [4] estime que la température maximale en tête d'alvéole est de l'ordre de 60 °C à 70 °C. L'Andra [4] souligne que, par rapport au « Dossier 2009 » où la longueur des alvéoles était de 40 m (80 m au stade de l'esquisse) et la durée d'entreposage des colis avant leur mise en stockage de 60 à 70 ans (85 ans au stade de l'esquisse), la température maximale augmente d'environ 5 °C. De même, la durée nécessaire à l'atteinte du paroxysme thermique en tête d'alvéole passe de 20-40 ans (*i.e.* inclus dans la phase d'exploitation) à quelques centaines d'années après la mise en place des colis.

Néanmoins, l'Andra [4] précise que « *la représentation du transitoire thermique à l'échelle de l'alvéole HA et de sa galerie d'accès incluant notamment l'effet de l'allongement des alvéoles (80 m), et l'augmentation de la durée d'entreposage pour les colis les plus exothermiques (85 ans)* » fait partie des axes principaux des études en cours pour « *consolider la représentation la plus probable décrite ci-avant* ».

L'IRSN constate que les évolutions en termes de longueur d'alvéoles et de durées d'entreposage entre le « Dossier 2009 » et l'esquisse actuelle conduisent à repousser le temps d'atteinte du paroxysme thermique en tête d'alvéole au-delà de la période pendant laquelle les alvéoles sont observables et accessibles. **L'IRSN estime que ceci implique une maîtrise accrue par l'Andra des processus d'évolution thermo-hydrromécanique au sein des alvéoles HA et note que des études visant à consolider la représentation du transitoire thermique à l'échelle de l'alvéole HA sont en cours.**

4.4.2 TRANSITOIRE HYDRAULIQUE-GAZ

L'Andra [4] indique que quelques mois après la mise en place du bouchon d'alvéole HA, les conditions anoxiques en partie utile de l'alvéole conduisent à une production d'hydrogène qui migre, soit par dissolution-diffusion dans

l'eau des argilites, soit à l'état gazeux par des interfaces transmissives (chemisage non étanche, bouchon en cours de saturation, EDZ, jeux fonctionnels...) vers la galerie d'accès où, en période d'exploitation, il est dilué par la ventilation ; après remblayage de la galerie, la porosité du remblai et la surface d'échange avec la roche limitent la pression de gaz tandis que la mobilité de l'hydrogène limite le différentiel de pression de part et d'autre du bouchon.

L'Andra [4] estime que le noyau argileux se sature en quelques dizaines à plusieurs centaines d'années par les jonctions de l'insert ou l'espace de coulissage entre l'insert et le chemisage. L'Andra [4] indique que pendant la resaturation de la zone HA, les écoulements d'eau sont principalement radiaux, dirigés des argilites vers les alvéoles et les galeries, et qu'un alvéole étant lui-même un axe radial pour sa galerie d'accès, les écoulements sont globalement dirigés des alvéoles vers les galeries ; la production d'hydrogène dans les alvéoles favorise ce processus par un « effet piston » (cf. § 3.5.2.2 du présent rapport) qui serait néanmoins faible au regard des simulations et [2] correspondrait tout au plus à un transfert d'eau sur quelques dizaines de mètres au sortir des zones de stockage. **L'IRSN considère que cette conclusion, qui est corroborée par celles du projet européen FORGE [25], est cohérente avec l'état des connaissances.**

L'Andra [4] précise qu'en lien avec une possible production de gaz accrue par l'allongement des alvéoles, « *les modalités de transfert de l'hydrogène en tête d'alvéole* » ainsi que celles du transfert de l'eau et de son cheminement font partie des axes principaux des travaux de R&D en cours. Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

4.4.3 TRANSITOIRE CHIMIQUE

L'Andra [4] rappelle que pour limiter la vitesse de corrosion des éléments métalliques (chemisage et conteneurs de stockage), elle prévoit de placer l'alvéole dans un environnement anoxique où les processus de corrosion sont plus lents. L'Andra [4] précise que tant que les galeries d'accès restent ouvertes et ventilées, la tête d'alvéole contribue à l'établissement de conditions d'environnement anoxiques en éloignant la partie utile de l'alvéole du spectre d'influence de la galerie d'accès vis-à-vis des échanges de gaz (et notamment l'oxygène de l'air de ventilation de la galerie d'accès). À cet effet, l'Andra [4] a fixé la longueur minimale de la tête d'alvéole à 7 m en cohérence avec les simulations numériques phénoménologiques qu'elle a menées afin de quantifier les transferts d'oxygène depuis la galerie d'accès ventilée vers l'alvéole en tenant compte (i) des transferts de masse (eau, hydrogène, oxygène), (ii) de la consommation d'oxygène (oxydation de la pyrite, corrosion des matériaux métalliques) et (iii) de la saturation des composants. L'Andra [4] indique que cette étude a montré que les quantités d'oxygène atteignant la partie utile de l'alvéole, pour une longueur de tête d'alvéole de 7 m, sont très limitées sur une durée décennale à centennale. L'Andra [16] précise que dans ses simulations, la saturation en eau initiale est de 100 % pour l'argilite saine, l'EDZ et la zone perturbée, de 80 % pour le béton (soutènement de galerie d'accès et dispositif de confinement du bouchon argileux) et de 75 % pour le noyau argileux. L'IRSN [21] a effectué des simulations sur la diffusion d'oxygène et sa consommation pendant la phase transitoire à l'échelle d'un alvéole de stockage HA qui montrent que si les simulations aboutissent à une consommation rapide et complète de l'oxygène en système fermé, celles-ci sont plus nuancées lorsque les conditions prennent en compte la présence de vides résiduels et/ou des états d'insaturation permettant la diffusion de l'oxygène gazeux. En effet, dans ce cas, le front du transitoire oxydant est fortement dépendant du coefficient de diffusion du gaz dans

les zones partiellement saturées. De plus, des expérimentations effectuées par l'IRSN au laboratoire de Tournemire sur la consommation de l'oxygène en bout de forage (expérimentation OXITRAN) montrent que bien que la partie du forage utilisée pour les mesures soit étanche vis-à-vis de la galerie, la concentration en oxygène au fond du forage (10 m) ne descend pas en dessous de 15 %. **Aussi, comme lors de l'examen du « Dossier 2009 », l'IRSN estime qu'une présence simultanée de conditions humides (saturation partielle) et oxydantes ne peut être exclue en l'état actuel des connaissances, y compris dans la partie utile de l'alvéole. L'IRSN considère que la recommandation du GPD, émise en 2005 et relative au dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles et surconteneurs) permettant d'assurer un retrait aisé des colis pendant une durée séculaire, est donc toujours d'actualité.**

Concernant l'impact du dispositif de confinement éventuellement en béton bas pH sur les argiles, l'Andra [4] indique que les interactions béton-argiles sont localisées à l'interface avec une extension de la zone reminéralisée sur 100 000 ans d'ordre au plus décimétrique (une extension d'ordre métrique est évaluée avec un béton « classique » de type CEM V). En outre, afin de limiter le développement d'un panache alcalin le long de l'interface entre les deux matériaux, l'Andra [4] vise à obtenir une limitation des vides résiduels lors de la mise en place du matériau argileux. L'Andra a indiqué lors de l'instruction que les études expérimentales actuellement disponibles concernent des effets simultanés d'un pH alcalin et de la température sur les transformations fer-argile gonflante et que des essais mettant en œuvre simultanément les argilites, des liants hydrauliques de différentes compositions et de l'acier sont prévus à partir de 2014, leur configuration et mise en œuvre étant encore à l'étude. **Ceci n'appelle pas de remarque particulière de la part de l'IRSN.**

4.4.4 IMPACT DES BACTERIES

Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que des études relatives à l'impact des bactéries sur les phénomènes de corrosion étaient en cours, d'une part dans le Laboratoire souterrain, sur les types de bactéries présentes, des produits de corrosion et de faciès de corrosion pouvant résulter d'une contribution de bactéries, ainsi qu'en laboratoire de surface sur l'influence des bactéries sur la corrosion, les dépôts de soufre provenant du métabolisme des bactéries sulfato-réductrices et l'évolution des couches passivantes de produits de corrosion en présence d'un milieu contenant des micro-organismes. L'IRSN encourage l'Andra à poursuivre ces études afin de réduire les incertitudes relatives à l'impact des bactéries sur la corrosion.

4.4.5 TRANSITOIRE HYDROMECHANIQUE

L'Andra [4] rappelle que la mise en charge mécanique de l'insert est découplée de celle de la partie utile de l'alvéole grâce à l'interface coulissante avec le chemisage. L'Andra [4] indique que cette mise en charge débute de manière anisotrope, dans le plan horizontal de l'alvéole, avec ou sans pression de fluide (eau ou gaz) appliquée aux interfaces avec la roche ou le noyau, puis tend à devenir plus isotrope à l'extrados de l'insert où la contrainte radiale effective peut atteindre 6 MPa dans le plan horizontal en quelques centaines d'années, cet effet conduisant à une « consolidation » des argilites sur l'insert favorable à la réduction de la perméabilité de l'EDZ.

L'Andra [4] estime que sous l'effet du chargement mécanique appliqué sur l'insert qui se corrode, le noyau argileux se déforme et charge longitudinalement le dispositif de confinement mécanique et le bouchon de

radioprotection ; au-delà de quelques milliers d'années à la dizaine de milliers d'années, le comportement mécanique de la tête d'alvéole, saturée en eau, est principalement piloté par la faible vitesse de déformation différée des argilites.

L'Andra [4] précise que l'évaluation fine de « *la mise en charge hydromécanique de la tête d'alvéole, en lien avec les processus hydraulique-gaz et chimiques* », l'évaluation qualitative de « *la cicatrisation hydraulique des argilites endommagées au droit du noyau* » avec « *une attention particulière [...] portée [...] aux frottements entre les différents composants* » font partie des axes principaux des études de R&D en cours pour « *consolider la représentation la plus probable décrite ci-avant* ».

L'IRSN indique qu'à l'instar du § 3.5.5.1 relatif aux scellements de fond, les effets des contrastes de rigidité entre le dispositif de confinement en béton, le noyau argileux et le bouchon de radioprotection métallique sur la convergence différée de la zone d'argilites endommagées en paroi de tête d'alvéole, ainsi que la possible pressurisation de l'alvéole due au fluage de la roche, devront être examinés ; l'IRSN ajoute que ces questions se posent d'autant plus que la pression de gonflement des noyaux argileux est basse, ce qui devrait accentuer ces contrastes.

L'IRSN souligne que la mise en charge anisotrope observée sur des alvéoles expérimentaux au Laboratoire souterrain n'est pas reproduite par la simulation et qu'elle devrait être amplifiée en situation réelle du fait des interférences thermomécaniques entre alvéoles ; l'Andra devra veiller à ce que les dispositifs d'ouverture/fermeture en tête d'alvéole puissent s'accommoder des ovalisations qui en résulteront.

4.4.6 CONCLUSION SUR LA PHENOMENOLOGIE PRISE EN COMPTE

L'IRSN estime que de façon similaire aux scellements, l'évolution phénoménologique des bouchons d'alvéoles HA présentée par l'Andra nécessite à ce stade d'être confortée par des études complémentaires, incluant des modélisations d'ensemble prenant en compte les différents processus et leurs couplages (thermo-hydromécanique, poro-viscomécanique, chimie, gaz...) et comportements rhéologiques avec une attention particulière pour la modélisation des interfaces. L'IRSN note qu'un ensemble d'études visant à réduire les incertitudes résiduelles sont en cours et estime que les résultats devront être présentés pour la DAC.

4.5 CONCLUSION RELATIVE AU BOUCHON D'ALVEOLE HA

L'IRSN constate que l'Andra confirme le concept de bouchon d'alvéole HA construit dans l'insert en tête d'alvéole présenté dans le « Dossier 2009 ». L'IRSN convient de la validité de la justification apportée par l'Andra en situation de fonctionnement normal (*i.e.* tant que les transferts sont principalement diffusifs) mais souligne qu'à ce stade, plus aucun objectif de performance hydraulique (perméabilité) n'est attribué au bouchon d'alvéole HA. L'Andra précise que des évaluations complémentaires seront réalisées pour des configurations hors évolution normale et que dans l'hypothèse où elles montreraient un intérêt à la dépose de l'insert, des essais prévus au Laboratoire souterrain apporteront des éléments relatifs à la faisabilité et à la performance d'un concept avec dépose de l'insert. L'IRSN confirme que ces évaluations complémentaires doivent être menées et indique qu'à ce stade, ses propres évaluations ne remettent pas en cause l'option de conception avec insert retenue par l'Andra.

Par ailleurs, l'IRSN estime que l'analyse de l'évolution phénoménologique des bouchons d'alvéoles HA nécessite d'être confortée par des études et essais complémentaires en cours. Enfin, l'IRSN considère que la recommandation issue de l'examen du « Dossier 2005 » (cf. § 4.4.3) relative au dimensionnement des composants métalliques du stockage (chemisage des alvéoles et surconteneurs) permettant d'assurer un retrait aisé des colis pendant une durée séculaire est toujours d'actualité.

5 ASPECTS LIÉS A LA REVERSIBILITE

Le « Dossier 2009 » indique que « *la gestion réversible du stockage implique que des décisions seront prises, aux différents stades de l'exploitation, dans le sens d'une poursuite du processus de stockage [...], d'un maintien en l'état ou d'un retour en arrière* ». Il précise qu'« *après une phase d'observation et de surveillance, il pourra être décidé de franchir une nouvelle étape dans le processus de stockage. Pour un alvéole HA, le niveau 3 [...] correspond à l'obturation de l'alvéole avec un bouchon d'argile. Pour un alvéole MAVL, l'obturation de l'alvéole correspond à l'arrêt de la ventilation et à la mise en place d'un massif en béton. Les galeries d'accès du module restent accessibles. Le retour au colis nécessite une reconfiguration de la tête d'alvéole. [...] Au niveau 4 [...], les galeries d'accès du module sont remblayées et un scellement hydraulique en argile gonflante est mis en place. Des travaux d'excavation deviennent nécessaires pour revenir aux alvéoles* ».

Le Dossier initialement transmis par l'Andra [2] [4] pour cette instruction ne visait pas les aspects liés à la réversibilité du stockage. Au cours de l'instruction, l'Andra a décrit dans leurs grandes lignes les techniques envisageables ou dispositions retenues pour réaliser les travaux de reconfiguration de tête d'alvéole ou d'excavation nécessaires indiqués ci-avant : « *Les concepts de scellements et de bouchons d'alvéoles HA sont établis sur la base de leurs fonctions de sûreté après fermeture. Des dispositions de conception sont introduites dans les alvéoles pour faciliter et assurer la sûreté des opérations d'obturation ; ces dispositions serviraient également aux opérations de déconstruction des scellements et des bouchons dans l'hypothèse d'un retrait des colis après obturation.*

Ces dispositions comprennent :

- *le chemisage des têtes d'alvéole HA (respectivement le revêtement en béton des têtes d'alvéoles MAVL), qui assure leur stabilité mécanique a minima pendant la durée d'exploitation de Cigéo ;*
- *l'insertion d'une protection radiologique dans l'alvéole après le dernier colis de déchets HA mis en place (respectivement la dernière rangée de colis de déchets MAVL) pour limiter l'exposition du personnel aux rayonnements ionisants, notamment lors des opérations de fermeture* ».

L'Andra a en outre indiqué pendant l'instruction que « *les opérations préalables à un retrait éventuel des colis nécessiteront en premier lieu un contrôle de l'atmosphère dans l'alvéole avec une évaluation du risque ATEX⁴ et évacuation des gaz dangereux. Ceci pourra par exemple être effectué avec la réalisation d'un forage sous atmosphère neutre traversant l'ouvrage de fermeture et permettant un prélèvement de gaz dans l'alvéole, et si nécessaire sa purge et son inertage.*

⁴ ATmosphère EXplosive/explosible

La déconstruction du bouchon ou du scellement proprement dite sera ensuite effectuée par des opérations d'excavation : pour le bouchon d'alvéole HA, la destruction peut être réalisée avec un équipement de type micro-tunnelier et pour le scellement d'alvéole MAVL, elle pourra être réalisée par attaque mécanique (machine de creusement par exemple du type machine à attaque ponctuelle).

Enfin, [le] rétablissement de la ventilation pour les alvéoles MAVL, rééquipement de la tête d'alvéole, et retrait de la protection radiologique [est prévu] ».

L'Andra a précisé qu'à ce stade, un essai de démonstration technologique de déconstruction du scellement/bouchon d'alvéole ou de reconfiguration de tête d'alvéole n'était pas envisagé. Enfin, l'Andra a indiqué que « *si les conditions de réversibilité imposent un retrait aisé des colis pendant la totalité de la période d'exploitation (maintien au niveau 2 de l'échelle internationale de récupérabilité AEN), l'Andra procédera aux opérations de fermeture des alvéoles à la fin de la phase d'exploitation* ».

L'IRSN constate que les techniques de déconstruction et dispositions associées sont très préliminaires et que l'analyse des risques associés à ces opérations n'est pas disponible à ce stade du projet. L'IRSN note que certains éléments laissés en place tels que les chemisages/revêtements et protections radiologiques pourraient faciliter les éventuelles opérations de reprise de colis après fermeture d'un alvéole mais que néanmoins, la déconstruction des ouvrages de fermeture retenus par l'Andra nécessiterait des travaux qui, compte tenu du contexte radiologique, des atmosphères potentiellement explosives et des technologies existantes, pourraient être très délicats à mettre en œuvre.

En conclusion, l'IRSN considère que les opérations de retrait des colis deviennent significativement plus complexes dès lors que les ouvrages de fermeture (bouchons d'alvéoles HA, scellements) sont construits et nécessitent une validation expérimentale. À cet égard, au cours de la réunion préparatoire à la réunion du groupe permanent, l'Andra a indiqué que des essais de réouverture d'alvéoles pourraient être envisagés pendant la phase pilote de Cigéo.

Par ailleurs, l'IRSN relève que le bouchon de radioprotection des alvéoles HA est supposé remplir son rôle lors d'éventuelles opérations de retrait des colis. L'IRSN constate néanmoins que l'Andra ne précise pas comment sont prises en compte (i) les opérations de déconstruction du bouchon d'alvéole, incluant le bouchon de radioprotection ; (ii) l'endommagement du chemisage suite aux opérations de désolidarisation du bouchon de radioprotection en vue de son retrait ; (iii) la possibilité technique de retirer un bouchon de radioprotection dont les dispositifs de manutention (patins, gorge...) auraient été endommagés ; (iv) l'éventuel blocage mécanique du bouchon de radioprotection dans le chemisage ou l'insert. L'IRSN estime donc que la conception et les dispositions de mise en place du bouchon de radioprotection retenues à ce stade entament la possibilité d'un retrait aisé des colis. D'une manière plus générale à l'égard du bouchon de radioprotection, en prenant en compte les conséquences possibles de la rupture de sa liaison avec le chemisage de l'alvéole HA sur la tenue mécanique des surconteneurs de colis HA (cf. § 4.3.4 du présent rapport), l'IRSN considère que ce dispositif complexe soulève des questions importantes quant à son utilisation dans le stockage, en phase d'exploitation (incluant un possible retrait des colis) comme en phase de post-fermeture.

Aussi, l'IRSN estime que l'Andra devra justifier la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté en phase d'exploitation (mise en place et dépose en cas de retrait des colis de déchets HA) et au regard de son impact potentiel sur la sûreté en phase post-fermeture (interaction mécanique avec les colis de déchets HA). Ce point fait l'objet de l'engagement E4 de la lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, rappelée en annexe A2 du présent rapport.

6 CONCLUSION GENERALE

L'IRSN considère que le présent Dossier « Projet Cigéo - Ouvrages de fermeture », transmis par l'Andra dans la continuité des dossiers ayant fait l'objet d'instructions par l'IRSN depuis 2005, montre des avancées par rapport aux options de conception des ouvrages de scellement de liaisons surface-fond, d'alvéoles MAVL, de galeries de liaison et des bouchons HA. Dans la perspective d'un « Dossier d'options de sûreté » de Cigéo qui serait déposé par l'Andra en 2015, et d'une demande d'autorisation de création à l'horizon 2017, l'IRSN estime que ce Dossier permet d'apprécier, à ce stade du projet, la pertinence des objectifs de performance retenus par l'Andra pour les ouvrages de fermeture précités, celle des concepts proposés pour les atteindre, ainsi que le possible impact des perturbations auxquelles ces ouvrages pourraient être soumis pendant la phase de post-fermeture du stockage sur la performance de ceux-ci.

Pour ce qui concerne les bouchons d'alvéoles HA, le concept sans dépose de l'insert en tête d'alvéole, présenté dans le « Dossier 2009 », est confirmé. L'IRSN note qu'à ce stade, plus aucun objectif de performance hydraulique n'est attribué au bouchon d'alvéole HA mais convient de la validité de la justification apportée par l'Andra en situation de fonctionnement normal (*i.e.* tant que les transferts sont principalement diffusifs). Des évaluations complémentaires sont prévues par l'Andra, notamment en scénario de court-circuit hydraulique de la formation hôte résultant d'un forage intrusif abandonné. Dans l'hypothèse où ces évaluations montreraient un intérêt à la dépose de l'insert, des essais prévus au Laboratoire souterrain seront à même d'apporter des éléments relatifs à la faisabilité et à la performance d'un concept avec dépose de l'insert. L'IRSN indique qu'à ce stade, ses propres évaluations et simulations ne remettent pas en cause l'option de conception avec insert mais considère que l'Andra devra en apporter la démonstration. Par ailleurs, l'IRSN s'interroge sur la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté à la fois en phase d'exploitation (mise en place et dépose en cas de retrait des colis de déchets HA) et en phase post-fermeture (interaction mécanique avec les colis HA). L'Andra s'est engagée à justifier la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté en phases d'exploitation et post-fermeture.

S'agissant des opérations de retrait des colis qui pourraient être décidées après fermeture des alvéoles au titre de la réversibilité du stockage, l'IRSN considère que celles-ci nécessiteraient une déconstruction des ouvrages de fermeture (bouchons d'alvéoles HA, scellements) lourde et délicate. À cet égard, une validation expérimentale de ces opérations est nécessaire. L'Andra a indiqué que des essais de réouverture d'alvéoles pourraient être envisagés pendant la phase pilote de Cigéo.

S'agissant des objectifs de performance retenus par l'Andra pour les ouvrages de scellement, l'IRSN estime que la démarche présentée par l'Andra, qui consiste à identifier une valeur limite de perméabilité à partir de laquelle la prédominance de la voie de transfert des radionucléides les plus mobiles par le Callovo-Oxfordien serait remise en cause et de viser une perméabilité de chacun des composants de ces scellements la plus petite possible et en tout état de cause inférieure à cette limite, est satisfaisante. D'une manière générale, l'IRSN estime que l'Andra a réuni des éléments conséquents en vue de la démonstration de la faisabilité des ouvrages de scellement à l'horizon de la DAC. L'IRSN rappelle cependant que la démonstration de la performance des scellements ne sera pas acquise à cette échéance. L'IRSN considère que cette démonstration reste nécessaire, en particulier pour les ouvrages de scellement des liaisons surface-fond, dont l'importance pour la sûreté apparaît prédominante. L'IRSN estime que la réalisation d'un démonstrateur en descenderie, d'ores et déjà prévu par l'Andra pendant la phase pilote de Cigéo, et l'acquisition de résultats pendant la durée de sa resaturation, notamment par les eaux de l'Oxfordien calcaire, sont de nature à apporter les éléments nécessaires à cette démonstration.

Pour ce qui concerne l'option de référence des scellements de fond (galeries et alvéoles MAVL), l'IRSN observe que leur performance hydraulique découle principalement de la perméabilité de l'EDZ et qu'au stade actuel des connaissances en matière de maîtrise de l'endommagement en paroi des ouvrages, cette option pourrait être insuffisante pour maintenir la prédominance de la voie de transfert par la roche hôte en cas de défaillance de scellements de liaison surface-fond et éviter ainsi l'apparition de points chauds au droit des ouvrages de liaison surface-fond. À cet égard, l'IRSN estime que la contribution des ouvrages à la fonction de sûreté « s'opposer à la circulation de l'eau » doit reposer sur un ensemble de lignes de défenses qui se complètent et, dans une certaine mesure, se suppléent. L'IRSN rappelle que l'architecture générale du stockage (longueur des galeries, positionnement des liaisons surface-fond...) peut apporter des marges supplémentaires en cas de défaillance d'une ou plusieurs barrières ouvragées, et estime que, dans le processus d'optimisation en cours de l'architecture générale du stockage, l'Andra doit considérer les dispositions de conception, notamment d'architecture, qui permettent de pallier l'éventuelle défaillance d'un ou plusieurs scellements de liaison surface-fond. Aussi, l'IRSN recommande que l'Andra justifie, dans le « Dossier d'options de sûreté », que l'architecture retenue est optimisée à ce stade du point de vue de la sûreté et de la radioprotection, sur la base d'une étude présentant les avantages et inconvénients des dispositions de conception envisagées eu égard à l'objectif de réduire les relâchements à long terme via les ouvrages et d'assurer la sûreté en exploitation. En outre, l'IRSN estime nécessaire que l'Andra poursuive tous travaux visant à réduire la perméabilité de la zone endommagée, notamment la variante avec coupures hydrauliques de l'EDZ, que l'Andra s'est engagée à développer au cours de la phase pilote de Cigéo, sachant que cette option est susceptible d'augmenter sensiblement l'efficacité du scellement.

Pour ce qui concerne les perturbations auxquelles les ouvrages de scellement seraient soumis pendant la phase de post-fermeture du stockage, l'IRSN estime que l'analyse de la phénoménologie associée nécessite d'être confortée par des études et essais complémentaires, en particulier vis-à-vis de l'impact de la sollicitation due aux gaz sur les scellements des liaisons surface-fond, eu égard à leur importance dans la démonstration de la sûreté de l'installation de stockage. L'IRSN note que l'Andra s'est engagée à réaliser, pour les différents scellements

(galeries, alvéoles MAVL et liaisons surface-fond), des simulations numériques d'ensemble tenant compte de leurs différents composants, du contexte hydromécanique couplé à la sollicitation due aux gaz et de l'incertitude sur le comportement rhéologique du béton sur les durées considérées et à justifier, sur la base de ces modélisations, la longueur des scellements (noyau et massifs d'appui). Par ailleurs, l'IRSN convient de la moindre extension de la perturbation chimique induite sur les argiles par les bétons bas pH mais, compte tenu des incertitudes résiduelles sur ce matériau relativement nouveau, s'interroge sur le bien-fondé de ce choix par rapport aux bétons classiques pour les éléments autres que le revêtement non déposé des scellements de fond, où le gain substantiel en terme de préservation des propriétés des argiles procuré par le béton bas pH pourrait être obtenu par des dispositions de dimensionnement. Les résultats d'études à venir de l'Andra devraient permettre de lever cette interrogation.

REFERENCES

- [1] Saisine de l'Autorité de sûreté nucléaire ASN CODEP-DRC-2013-055527 du 5 novembre 2013
- [2] Note technique Andra CG.NT.ADPG.13.0003/B, 15/02/2013, « Projet Cigéo - Scellements - Options de conception et programme d'essais »
- [3] Note technique Andra CG.NT.ADS.13.0005/A, mai 2013, « Retour d'expérience sur les essais in-situ et les maquettes d'ouvrages à base d'argile gonflante - Mise en place et comportement THM-gaz »
- [4] Note technique Andra CG.NT.ADPG.13.0004/A, 15/02/2013, « Projet Cigéo - Bouchons d'alvéoles de déchets HA - Options de conception et programme d'essais »
- [5] Note technique Andra CG.NT.AMFS.13.0025/A, août 2013, « La zone endommagée initiale autour des ouvrages : synthèse des travaux de caractérisation autour des ouvrages du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne »
- [6] Rapport technique Andra D.RP.AMFS.12.0024.A, 02/07/2012, « Référentiel du comportement THM des formations sur le site de Meuse/Haute-Marne - Centre de Meuse/Haute-Marne »
- [7] Note technique Andra CG.NT.A.DIP.13.0002/A, 30/09/2013, « Projet Cigéo - Programme d'essais relatif aux ouvrages de grandes dimensions »
- [8] Note technique Andra CG.NT.AEAP.12.0081.A, septembre 2012, « Analyse préliminaire de l'évolution chimique des massifs d'appui de scellement de galeries « bas pH » et des perturbations alcalines associées en situation de fonctionnement du stockage »
- [9] Rapport technique Andra C.RP.0LML11.0002.A, 09/09/2010, « Développement de l'EDZ initiale - Etude expérimentale et modélisation numérique de l'EDZ initiale »
- [10] Rapport technique Andra C.RP.0ENG.10.0470, 15/01/2011, « Modélisation de la formation et l'évolution de l'EDZ & Comportement différé des argilites »
- [11] Rapport technique Andra C.RP.0LML.11.0004, 16/11/2010, « Effets de la température sur le comportement des argilites - Etude expérimentale et modélisations des effets de la température sur le comportement des argilites - Rapport final »
- [12] Note technique Andra CG.NT.AEAP.13.0047.A, octobre 2013, « Evolution géochimique sur le long terme d'un scellement de galerie Cigéo - Eléments d'analyse en conditions saturées »
- [13] Rapport technique Andra C.RP.CMFS.09.0003.A, 31/08/2009, « Modélisation numérique de l'expérience PGZ pour l'Andra - Comparaison de résultats entre l'Université de Liège et l'Universitat Politecnica de Barcelona »
- [14] Rapport technique Andra C.RP.CMFS.09.0005.A, 31/08/2009, « Modélisation numérique de l'expérience PGZ pour l'Andra »
- [15] Note technique Andra DRD/EAP/13.0194, 08/11/2013, «Les fondements et les hypothèses des simulations du transitoire hydraulique-gaz à l'échelle du stockage »
- [16] Note technique Andra DRD/EAP/13.0196, 08/11/2013, «Les fondements et les hypothèses des simulations du transitoire oxydant en tête d'alvéole HA »
- [17] Note technique Andra DRD/EAP/13.0197, 08/11/2013, « La prise en compte de la température dans l'évaluation de l'évolution chimique d'un massif d'appui en béton bas pH »
- [18] Guide de sûreté ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, Indice 0 - Version du 12/02/2008 (Ex-RFS III.2.f)

- [19] Article Cement and Concrete Research, n°58, pp 76-88, 2014, A. Dauzères *et al.*, « On the physico-chemical evolution of low-pH and CEM I cement pastes interacting with Callovo-Oxfordian pore water under its in situ CO₂ partial pressure »
- [20] Article Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, n°70-71, pp.71-83, 2014, A. Jenni *et al.*, « In situ interaction between different concretes and Opalinus Clay »
- [21] 5th International meeting « Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement », 22-25 October 2012, Montpellier, France. A. Vinsot *et al.*, « In situ diffusion test of hydrogen gas in the Opalinus clay »
- [22] FORGE International Symposium and Workshop on Gas Generation and Migration, 5-7 February 2013, Luxembourg. E. Jacops *et al.*, « Determination of gas diffusion coefficients in low permeability materials »; FORGE Report D0.09, proceedings of International Symposium and Workshop on Gas Generation and Migration, 5-7 February 2013. E. Jacops *et al.*, « Determination of gas diffusion coefficients in Boom Clay: Effect of Molecular Size and Anisotropy »
- [23] 5th International meeting « Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement », 22-25 October 2012, Montpellier, France. A. Lassin *et al.*, « Impact of H₂ production on the chemical reactivity of partially saturated argillites: towards simulations of scenarios » (to be published)
- [24] FORGE report, D3.38-R, 2014, <http://www.bgs.ac.uk/forge/docs/reports/D3.38-R.pdf>
- [25] FORGE report, D1.5-R, 2013, <http://www.bgs.ac.uk/forge/docs/reports/D1.5-R.pdf>
- [26] Rapport technique Andra D.RP.ASMG.12.0032.A, 27/09/2012, « Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne »
- [27] Rapport IRSN DSU n°106, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2005 Argile » présenté devant le GPD les 12-13 décembre 2005
- [28] Rapport IRSN/2010-00002, Avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sur le « Dossier 2009 - Projet HA-MAVL » et sur le « DAIE » du laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, présenté devant le GPD les 29-30 novembre 2010
- [29] Avis IRSN N°2013-00159 du 26 avril 2013 sur les évolutions du projet Cigéo au stade « Jesq03 » depuis le Dossier 2009
- [30] Rapport IRSN/2013-00001, Projet Cigéo - Examen des études remises depuis 2009, présenté devant le GPD le 5 février 2013
- [31] Etudes, Hydraulique Agricole n°13, CEMAGREF, 1992, Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens
- [32] Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausannes, vol.17, 2011, « Les barrages - du projet à la mise en service »
- [33] Note technique Andra C.NSY.ASTE.08.0165/A, 30/09/2013, « Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets HA et CU3 »
- [34] Lettre ASN CODEP-DRC-2013-033414 du 18 novembre 2013 relative au Dossier « Projet Cigéo - Esquisse Jesq03 (2012) - Document de synthèse des évolutions par rapport au Dossier 2009 et impact sur la sûreté »
- [35] Avis IRSN N°2013-57 du 13 février 2013 sur les commentaires de l'Andra sur le rapport de l'IEER de mars 2011
- [36] Thèse de M. Alexandre Dauzères soutenue le 30 septembre 2010, Université de Poitiers, 249 p., « Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs »

- [37] Lettre Andra DG/14-0162 du 3 juin 2014, Engagements que l'Andra propose de prendre à l'issue de la réunion préparatoire du 12 mai 2014
- [38] Article Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 32, n° 8-14, pp.917-921, 2007, JB Kazmierczak *et al.*, « Influence of creep on water pressure measured from borehole tests in the Meuse/Haute-Marne Callovo-Oxfordian argillites »

LISTE DES TABLEAUX

Tableau T 1 - Valeurs des paramètres retenues par l'IRSN pour évaluer les débits d'activité au toit et au mur du Callovo-Oxfordien ainsi qu'à la sortie des liaisons surface-fond	105
---	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue générale des installations de Cigéo : schéma de principe (d'après l'Andra).....	12
Figure 2 : Représentation schématique des lithologies et horizons poreux sur le site de Meuse/Haute-Marne (Andra, « Dossier 2005 »)	13
Figure 3 : Architecture de l'installation souterraine au stade de l'esquisse (d'après l'Andra - cette architecture, en cours d'optimisation, est en évolution au stade de l'APS-APD)	13
Figure 4 : Schéma de principe d'un alvéole de stockage de déchets MAVL en phase d'exploitation (à gauche) et scellé (à droite) (d'après l'Andra)	14
Figure 5 : Schéma de principe d'un alvéole de stockage de déchets HA en cours de remplissage (en haut) et scellé (en bas) (Andra, « Dossier 2009 »).....	15
Figure 6 : Schéma de principe des scellements (Andra [2], 2013)	19
Figure 7 : Schéma de calcul de la perméabilité équivalente d'un scellement (Andra [2], 2013).....	20
Figure 8 : Débits molaires d'iode 129 en sortie des liaisons surface-fond et en sortie du Callovo-Oxfordien en fonction de la perméabilité équivalente des scellements (architecture du « Dossier 2009 », perméabilité de la zone endommagée de l'ordre de 10^{-9} m/s) (Andra [2], 2013).....	21
Figure 9 : La zone d'argilites endommagées initiale en paroi des ouvrages dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien - représentations schématiques sur les plans mécanique et hydraulique (Andra [2], 2012)	23
Figure 10 : Perméabilité (traits pleins) et pression de gonflement (pointillés) des argiles gonflantes MX80 et Kunigel (Andra [2], 2013)	29
Figure 11 : NSC (Noyau de SCellement) : schéma de principe (Andra [2], 2013).....	32
Figure 12 : NSC : mise en place du noyau de briques de bentonite compactées (Andra [2], 2013)	32
Figure 13 : BHN (Bentonite Hydratation Naturelle) : schémas de principe et forage (Andra [2], 2013)	33
Figure 14 : FSS (<i>Full Scale Seal</i>) : schémas de principe, vue générale et représentation de la texture des argilites (Andra [2], 2013).....	34
Figure 15 : Perméabilités équivalentes de l'interface noyau/argilites et du scellement en fonction de la longueur cumulée de dépose du revêtement (Andra [2], 2013)	36
Figure 16 : Dispositifs envisageables pour assurer la stabilité des massifs d'appui (Andra, « Dossier 2005 »).....	40
Figure 17 : FSS (<i>Full Scale Seal</i>) : coulage d'un massif d'appui en béton bas pH autoplaçant de 250 m^3 (Andra [2], 2014).....	42
Figure 18 : variante du concept de scellement de fond (Andra [2], 2013).....	43
Figure 19 : Perméabilités équivalentes du revêtement (10^{-6} m/s) et de l'EDZ (10^{-6} m/s) interrompus par des saignées (30 cm, 10^{-11} m/s) en fonction du nombre de saignées pour deux longueurs de noyau (40 m et 20 m).....	43
Figure 20 : TSS1 (Test Scellement Saignée 1) : saignée sur un tour complet réalisée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2011 (Andra [2], 2013).....	44
Figure 21 : SET (Saignée à l'Espace Technologique) : méthode industrielle de remplissage d'une saignée (Andra [2], 2014)	45
Figure 22 : Concepts de référence : principe et calcul des perméabilités équivalentes (Andra [2], 2013)	48
Figure 23 : Variante avec coupures : principe et calcul de la perméabilité équivalente (Andra [2], 2013).....	49

Figure 24 : Schéma général de resaturation du stockage : la partie supérieure des scellements de puits est resaturée par l'eau de l'Oxfordien carbonaté, le reste du stockage est resaturé par l'eau du Callovo-Oxfordien (Andra, « Dossier 2005 »)	54
Figure 25 : Débits d'activité d'iode 129 en sortie du Callovo-Oxfordien et des liaisons surface-fond (IRSN)	66
Figure 26 : Schémas de principe de l'alvéole de stockage de déchets HA (Andra [4], 2013).....	70
Figure 27 : Schéma de calcul de la perméabilité équivalente du bouchon d'alvéole HA (Andra [4], 2013)	71
Figure 28 : Influence de la perméabilité du noyau (avec dépose du chemisage) : exemple de débits molaires d'iode 129 arrivant dans la galerie d'accès d'un alvéole HA (Andra [4], 2013)	72
Figure 29 : Influence du maintien ou de la dépose de l'insert en tête d'alvéole HA (Andra [4], 2013)	73
Figure 30 : Schéma de principe du bouchon d'alvéole HA (Andra, « Dossier 2009 »).....	74
Figure 31 : Expérimentation « alvéole chauffant » (Andra [4], 2013)	76

Annexe A1 - lettre CODEP-DRC-2013-055527 de l'ASN



**Direction des déchets,
des installations de recherche et du cycle**

N/Réf. : CODEP-DRC-2013-055527
Affaire suivie par : Cécile CASTEL
Tél. : 01-46-16-42-45
Fax : 01-46-16-44-30
Mel : Cecile.castel@asn.fr

Montrouge, le **05 NOV. 2013**
**Le Directeur de l'Autorité de sûreté
nucléaire**

à
**Monsieur le Président du Groupe
Permanent d'experts pour les déchets**

Objet : Projet de stockage Cigéo – Examen du dossier « ouvrages de fermeture »

Réf. : [1] Lettre Andra DG/DIR/13-0079 du 5 avril 2013
[2] Lettre Andra DG/DIR/13-0146 du 14 mai 2013
[3] Lettre Andra DG/DIR/13-0189 du 20 juin 2013
[4] Lettre Andra DG/DIR/13-0250 du 8 août 2013

Annexe : Rappel des engagements, demande et recommandation issues de l'instruction des dossiers « 2005 – argile » et « Jalon 2009 »

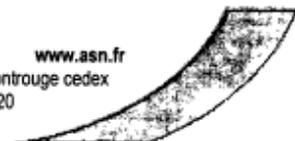
La loi de programme du 28 juin 2006, codifiée dans le code de l'environnement et relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, prévoit la poursuite des études et recherches sur le stockage réversible en couche géologique profonde « de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L.°542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015 ».

Par lettres citées en références [1], [2], [3] et [4], la Directrice Générale de l'Andra m'a adressé le dossier « Projet Cigéo – ouvrages de fermeture », composé des documents suivants :

- « Projet Cigéo - Scellements : options de conception et programme d'essais » (réf. CG.NT.ADPG.13.0003/A)
- « Retour d'expérience sur les essais in-situ et les maquettes d'ouvrages à base d'argile gonflante – Mise en place et comportement THM-gaz » (réf. CG.NT.ADS.13.0005/A)
- « Projet Cigéo - Bouchons d'alvéoles de déchets HA – Options de conception et programme d'essais » (réf. CG.NT.ADPG.13.0004/A)
- « La zone endommagée initiale autour des ouvrages : synthèse des travaux de caractérisation autour des ouvrages du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne » (réf. CG.NT.AMFS.13.0025/A)

Ce dossier est à considérer dans la continuité des dossiers déjà déposés par l'Andra et examinés par le groupe permanent d'experts pour les déchets sur le projet de stockage en couche géologique profonde. Les engagements, demande et recommandation issus de l'instruction des dossiers « 2005 – argile » et « Jalon 2009 », en lien avec les ouvrages de fermeture sont rappelés en annexe.

www.asn.fr
15 rue Louis Lejeune – CS 70013 – 92541 Montrouge cedex
Téléphone 01 46 16 40 00 • Fax 01 46 16 44 20



Afin que l'ASN puisse prendre position sur la sûreté des options présentées par l'Andra concernant les ouvrages de fermeture du projet Cigéo et sur l'évolution des concepts présentés en regard notamment des engagements, demande et recommandation issus de l'instruction des dossiers « 2005 – argile » et « Jalon 2009 », j'ai l'honneur de demander l'avis du groupe permanent d'experts que vous présidez sur le dossier précité eu égard en particulier à :

- la pertinence des objectifs de performance retenus par l'Andra pour les scellements des galeries et des liaisons jour-fond ainsi que les bouchons d'alvéole HA ;
- la pertinence des concepts proposés pour atteindre ces objectifs, en tenant compte notamment des contraintes liées à la réversibilité ainsi que des perturbations hydromécaniques (incluant celles liées aux gaz), chimiques et bactériennes auxquelles ces ouvrages pourraient être soumis ;
- la faisabilité industrielle des ouvrages présentés.

Je vous prie de bien vouloir convier la division territoriale de Châlons-en-Champagne et la direction des déchets, des installations de recherche et du cycle aux travaux menés par le groupe permanent d'experts que vous présidez.

Il serait souhaitable que le groupe permanent d'experts se réunisse au plus tard la dernière semaine de juin 2014.

**Pour le Président de l'ASN et par délégation,
Le Directeur général**

Jean-Christophe NIEL



ANNEXE A LA LETTRE CODEP-DRC-2013-055527

RAPPEL DES ENGAGEMENTS ET RECOMMANDATIONS ISSUES DE L'INSTRUCTION DES DOSSIERS « 2005 – ARGILE » ET « JALON 2009 »

Engagements de l'Andra (en vue de la demande d'autorisation de création) :

Lettre de l'Andra référencée Andra/DMR/DIR/10-0144 du 26 octobre 2010

- Engagement Andra E 15.3: « L'Andra justifiera que la solution technique retenue pour le bouchon d'alséole HA bénéficie de suffisamment d'éléments probants quant à sa faisabilité industrielle et est bien en adéquation avec les exigences de sûreté en phase d'exploitation et en phase de post-fermeture » ;

- Engagement Andra E 15.4 : « L'Andra précisera l'option de scellement de la descendrie et évaluera la robustesse de ce concept en termes de faisabilité et de performance globale ».

Demande de l'ASN

Lettre de l'ASN référencée CODEP-DRC-2011-002092 du 1^{er} juin 2011

L'Andra devra « indiquer sous deux ans, dans quel cadre et à quelle échéance un démonstrateur pourra être réalisé pour la qualification d'ouvrages de grandes dimensions, et [...] préciser le programme d'expérimentations associées ainsi que son articulation avec l'approche de réalisation progressive de Cigéo. ».

NB : la réponse de l'Andra à cette question est attendue pour fin 2013.

Recommandation de l'ASN (en vue de la demande d'autorisation de création) :

Annexe à la lettre de l'ASN référencée CODEP-DRC-2011-002092 du 1^{er} juin 2011

« L'Andra devra présenter les éléments nécessaires à la démonstration de la faisabilité industrielle d'une solution de scellement des galeries et des liaisons jour-fond. Les performances attendues de ces scellements devront être déterminées de manière prudente, en tenant compte de la présence de l'EDZ, des effets éventuels des gaz et des incertitudes sur le degré de saturation du scellement. L'intérêt de procéder, ou non, à la restauration artificielle des scellements lors de leur mise en place devra être évalué. »

Annexe A2 - lettre DG/14-0162 de l'Andra



Châtenay-Malabry, le 03 JUIN 2014

Monsieur Pierre-Franck CHEVET
Président de l'Autorité de Sécurité Nucléaire

15-21, rue Louis Lejeune
CS 70013
92541 MONTROUGE CEDEX

La directrice générale

Tél. 01 46 11 80 00

Affaire suivie par : Corinne BAUER

V/réf : [1] DG/DIR/13-0079 du 5 avril 2013
[2] DG/DIR/13-0146 du 14 mai 2013
[3] DG/DIR/13-0189 du 20 juin 2013
[4] DG/DIR/13-0250 du 8 août 2013

N/réf : DG/14-0162

Objet : Projet de stockage Cigéo - Instruction du dossier « ouvrages de fermeture »

Monsieur le président,

Dans le cadre de l'instruction du dossier « ouvrages de fermeture » transmis par lettres citées en références [1] à [4], vous trouverez en annexe à la présente les engagements que l'Andra propose de prendre selon une structuration permettant de distinguer les thématiques. Ces engagements ont fait l'objet d'échanges avec l'IRSN.

Vous en souhaitant bonne réception, je vous prie de croire, Monsieur le président, à l'assurance de ma considération distinguée.


Marie-Claude DUPUIS

P.J. : Engagements de l'Andra

www.andra.fr

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
Bâtiment 117 - 17, rue Louis Lejeune 92541 Châtenay-Malabry Cedex - RCS Nanterre n° 280 104 245

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
17, rue Louis Lejeune - 92541 Châtenay-Malabry Cedex - RCS Nanterre n° 280 104 245

ENGAGEMENTS ANDRA

1. Scellements

E1 *Pour ce qui concerne la zone endommagée d'argilites au droit des scellements*

- E.1.1 L'Andra définira comment la zone d'argilites endommagées à la paroi d'un ouvrage à sceller pourra être déclarée « acceptable » au regard des options de scellement retenues. Cette définition prendra en compte des marges. Le cas échéant, l'Andra prévoira les dispositions en cas de non-respect des exigences spécifiées.
- E.1.2 L'Andra expliquera l'apparition des fracturations éparses dans la niche (-445 m) et montrera que l'évolution de ces fracturations dans l'unité silto-carbonatée, le cas échéant, est un phénomène suffisamment maîtrisé pour ne pas remettre en cause la possibilité d'y sceller efficacement les liaisons surface-fond du stockage.
- E.1.3 L'Andra poursuivra ses investigations pour développer la variante du scellement de galeries avec coupures hydrauliques jusqu'au stade du prototype dans le cadre de la phase industrielle pilote.

E2 *Pour ce qui concerne l'impact des perturbations*

- E.2.1 L'Andra identifiera les situations hydrauliques possibles, notamment liées à des ruptures des ouvrages ou au fluage de la roche, et évaluera leurs conséquences potentielles sur les performances des scellements et celle du stockage à grande échelle.
- E.2.2 L'Andra justifiera, sur la base d'un bilan des connaissances, que son programme d'études relatif aux bétons bas pH, basé sur des essais et des modélisations, montre que l'évolution physico-chimique des composants en bétons bas pH dans le Callovo-Oxfordien et dans l'Oxfordien calcaire leur permet d'atteindre les performances mécaniques qui leur sont attribuées en phases d'exploitation et de post-fermeture.
- E.2.3 L'Andra vérifiera que l'activité des bactéries présentes naturellement ou introduites au moment de la construction du stockage ne remet pas en cause les performances des scellements.

E3 *Pour ce qui concerne la performance hydraulique des scellements*

- E.3.1 L'Andra :
- réalisera, pour les différents scellements (alvéoles MAVL, galeries et liaisons surface-fond), des simulations numériques tenant compte de l'ensemble de leurs composants, du contexte poromécanique, de la sollicitation due au gaz et de l'incertitude sur le comportement rhéologique du béton sur les durées considérées
 - justifiera sur la base de ces modélisations la longueur des scellements (noyau et massifs d'appui).
- E.3.2 L'Andra présentera un concept de scellement pour les descendries qui tire davantage profit de la hauteur des unités carbonatées de la formation hôte.

2. Bouchons d'alvéoles HA

E4 Pour ce qui concerne la conception du bouchon de radioprotection

L'Andra justifiera la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté en phase d'exploitation (mise en place et dépose en cas de retrait des colis de déchets HA) et au regard de son impact potentiel sur la sûreté en phase post-fermeture (interaction mécanique avec les colis de déchets HA).

Annexe T1 - Evaluations de l'influence des scellements sur la performance globale du stockage

Annexe T1 - Evaluations de l'influence des scellements sur la performance globale du stockage

L'IRSN a réalisé à l'aide de son logiciel Melodie, un modèle numérique simplifié de la zone de stockage de déchets MAVL sur la base des hypothèses et des données retenues par l'Andra dans le « Dossier Jesq03 (2012) ». Ce modèle a pour but d'étudier la sensibilité de la voie de transfert par les ouvrages à la perméabilité des scellements des liaisons surface-fond ainsi qu'à celle des scellements de fond (galeries ou alvéoles MAVL).

Les calculs réalisés concernent le transfert d'iode 129 depuis la zone de stockage de déchets MAVL jusqu'à la formation de l'Oxfordien selon deux voies : la voie de transfert par la roche et celle par les ouvrages. L'IRSN rappelle que la comparaison de ces deux voies contribue à apprécier, dans le cas de l'iode 129 qui est un radionucléide soluble et non sorbé à vie longue, la capacité des ouvrages de fermeture du stockage à freiner les flux d'eau et donc à remplir leur fonction « s'opposer à la circulation de l'eau ». Pour les besoins de la simulation numérique, l'architecture exacte du stockage est simplifiée : la zone MAVL avec deux puits, deux descenderies et les différents scellements retenus par l'Andra (scellements de galeries de liaison, d'alvéoles MAVL et de liaisons surface-fond) sont modélisés comme indiqué sur la Figure T 1.

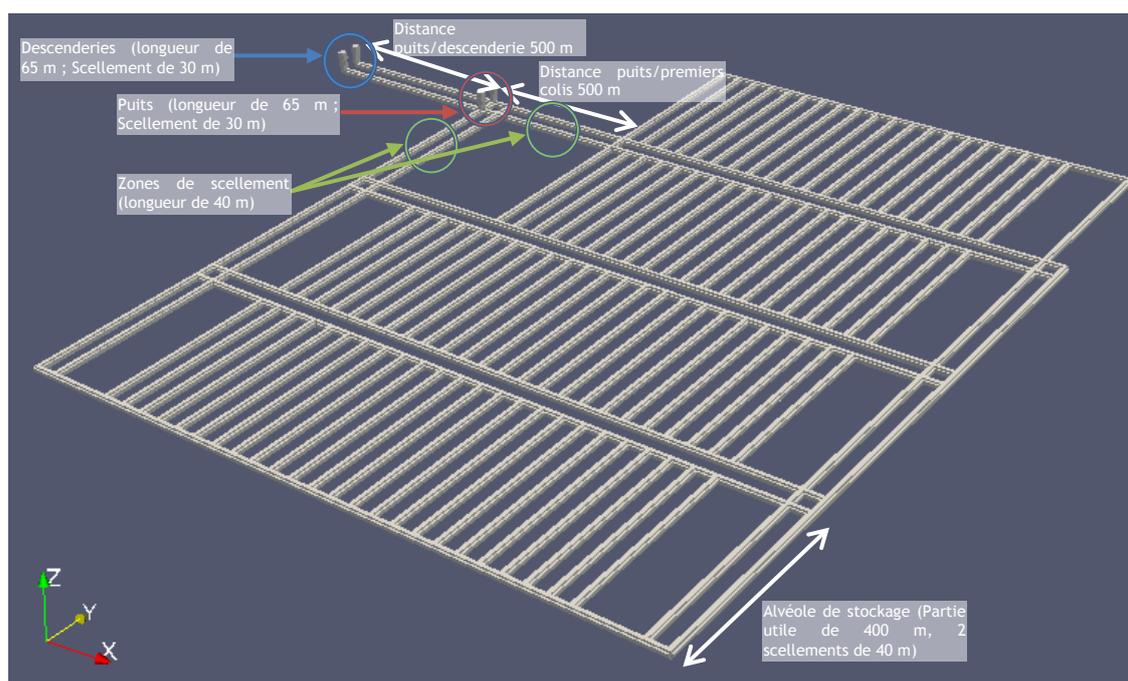


Figure T 1 - Modélisation de la zone MAVL pour évaluer les débits d'activité au toit et au mur du Callovo-Oxfordien ainsi qu'à la sortie des liaisons surface-fond (IRSN)

Les valeurs des différents paramètres retenues dans cette modélisation sont reprises de celles indiquées par l'Andra, notamment celles concernant les scellements pour lesquels l'Andra vise une perméabilité équivalente « en grand » (*i.e.* zone endommagée en paroi incluse) :

- de l'ordre de 10^{-11} m/s pour les scellements de liaisons surface-fond ;
- inférieure à 10^{-9} m/s pour les scellements de fond (galeries ou alvéoles MAVL, référence et variante).

Ces valeurs de perméabilité de scellement font l'objet d'une étude de sensibilité réalisée par l'IRSN dont les résultats sont résumés par la Figure 25 du § 3.6 du présent rapport, sous la forme de débits d'activité d'iode 129 en fonction du temps à la sortie de la voie de transfert par la roche et de différentes courbes de débits d'activité à la sortie des liaisons surface-fond. Pour cette étude, l'IRSN a retenu plusieurs cas de calcul correspondant à différentes hypothèses énumérées ci-après :

Cas n°1 : cas de référence : les objectifs de perméabilité de l'ensemble des scellements sont supposés atteints : perméabilité équivalente « en grand » de 10^{-9} m/s pour les scellements de fond et de 10^{-11} m/s pour ceux des liaisons surface-fond ;

Cas n°2 : tous les scellements de liaisons surface-fond (LSF) sont supposés défailants (10^{-7} m/s), les scellements de fond (de galeries de liaison et d'alvéoles MAVL) sont supposés opérants (10^{-9} m/s) ;

Cas n°3 : un scellement de puits sur les quatre LSF modélisées est supposé défailant (10^{-7} m/s), tous les autres scellements sont supposés opérants (10^{-9} m/s pour les scellements de fond, 10^{-11} m/s pour les scellements de LSF) ;

Cas n°4 : aucun scellement mis en place ; le stockage est supposé simplement remblayé (10^{-7} m/s) ;

Cas n°5 : comme pour le cas n°2, tous les scellements de LSF sont supposés défailants (10^{-7} m/s) mais les scellements de fond sont supposés plus performants (10^{-10} m/s).

En outre, l'IRSN indique que ces calculs sont réalisés en tenant compte d'un gradient hydraulique ascendant de 0,3 m/m. Les valeurs de l'ensemble des paramètres retenues pour ces différents cas de calcul sont synthétisées dans le Tableau T 1.

	Scellement de liaison surface/fond		Scellement de galerie/scellement d'alvéole		Roche		EDZ		EdZ		Remblai/ouvrages bétonnés	
	Perméabilité (m/s) équivalente «en grand»	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)	Perméabilité (m/s) équivalente «en grand»	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)	Perméabilité (m/s) horizontale/verticale	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient de diffusion de pore (m ² /s)
Cas n° 1	10⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹³ 10 ⁻¹³	7,3 10 ⁻¹¹	5.10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁹
Cas n° 2	10⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹³ 10 ⁻¹³	7,3 10 ⁻¹¹	5.10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁹
Cas n° 3	1 LSF à 10⁻⁷ 3 LSF à 10⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹³ 10 ⁻¹³	7,3 10 ⁻¹¹	5.10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁹
Cas n° 4	10⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10⁻⁷	10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹³ 10 ⁻¹³	7,3 10 ⁻¹¹	5.10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁹
Cas n° 5	10⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	2.10 ⁻¹³ 10 ⁻¹³	7,3 10 ⁻¹¹	5.10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	2.10 ⁻⁹

Tableau T 1 - Valeurs des paramètres retenues par l'IRSN pour évaluer les débits d'activité au toit et au mur du Callovo-Oxfordien ainsi qu'à la sortie des liaisons surface-fond