

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES  
À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

*Instituée par la Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006*

## RAPPORT SUR LE DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION DU CENTRE CIGÉO

*Appelé par l'article L542-10-1 du code de l'environnement*

**DÉCEMBRE 2025**



COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION  
DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES  
À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

*Instituée par la Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006*

RAPPORT SUR LE DOSSIER  
DE DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION  
DU CENTRE CIGÉO

*Appelé par l'article L542-10-1 du code de l'environnement*

Décembre 2025



## Résumé - conclusions

La Commission a examiné en détail les fondements scientifiques sur lesquels s'appuie le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation Cigéo. Pour évaluer la démarche scientifique de l'Andra, la Commission a conduit une analyse approfondie de la connaissance du site, des installations prévues et de leur fonctionnement, ainsi que de quelques questions transverses, qui relèvent toutes des enseignements qu'elle a acquis au cours des trente ans durant lesquels elle a suivi les travaux sur le stockage géologique profond en France et à l'étranger.

Le site est correctement caractérisé par l'Andra sur le plan géologique, tant sédimentaire que structural. Les incertitudes sur la géométrie du Callovo-Oxfordien (COx) sont suffisamment réduites pour assurer la présence d'une garde argileuse saine d'au moins 50 mètres d'épaisseur de part et d'autre du stockage. Les travaux réalisés par l'Andra, basés sur des expérimentations notamment *in situ* au laboratoire souterrain et des simulations numériques, fournissent une connaissance robuste et précise des propriétés du COx. Ses caractéristiques essentielles sont sa très faible perméabilité et ses propriétés structurales et chimiques, qui font que les transferts d'espèces chimiques se feront essentiellement par diffusion. En outre, le transfert de la majorité des espèces porteuses de la radioactivité, en particulier les cations, sera très fortement ralenti dans le COx, voire arrêté, en raison de leur interaction avec la matrice argileuse. Seuls quelques radionucléides atteindront les limites du COx après des centaines de millénaires. Ces propriétés favorables sont les fondements de la fonction de confinement du COx. Les autres propriétés relevant de la thermique ou de la mécanique ont fait l'objet de caractérisations détaillées. Il ressort de l'ensemble des études effectuées par l'Andra que la caractérisation du site est complète et que le COx assure l'ultime barrière de confinement de la radioactivité.

Le contexte hydrogéologique régional est décrit grâce à la connaissance abondante de la géologie du Bassin parisien. La modélisation présentée par l'Andra restitue les grandes lignes de l'écoulement des eaux souterraines. La Commission rappelle que les aquifères ne font pas partie des composants du système de stockage et qu'ils ne remplissent pas de fonction de sûreté. Les projections d'évolution du fonctionnement des aquifères sont néanmoins utilisées pour le calcul du transfert des radionucléides depuis les limites du COx jusqu'aux exutoires et pour le calcul de la dose qui est basé sur des scénarios convenus prescrits par la réglementation sur les évaluations de sûreté.

La Commission a porté une attention particulière au rôle et aux performances des différentes barrières de confinement s'opposant à la migration des radionucléides présents dans les colis de déchets HA et MAVL. Les données de chimie concernant le relâchement des radionucléides par les colis et leur migration ont été établies sur la base d'expériences conduites pendant plus de trente ans par une large communauté de chimistes en France et à l'étranger, et publiées. Les calculs des termes sources des quartiers HA et MAVL résultent de l'application de modèles, tant pour le relâchement des radionucléides par les colis que pour leur migration vers le COx sain. Tous conduisent à des valeurs conservatives vis-à-vis des conséquences sur l'homme et l'environnement.

Les études réalisées par l'Andra pour sélectionner, formuler les matériaux et caractériser leur comportement lui ont permis d'acquérir les données suffisantes pour la modélisation à long terme de l'évolution du système de stockage. Bien que l'Andra ait choisi des matériaux courants, la disponibilité des matériaux identifiés pourrait changer au cours de l'exploitation du stockage. Pour remédier à l'évolution des disponibilités, l'Andra prévoit de poursuivre des travaux scientifiques pour ménager une certaine flexibilité dans les choix de matériaux au moment opportun, ce que la Commission soutient.

Pour ce qui concerne l'impact du stockage sur l'environnement, la Commission estime que l'étude d'impact est complète et convaincante. La démarche suivie par l'Andra pour simuler et prendre en compte l'impact des variations climatiques à court et long terme sur la mise en œuvre du projet Cigéo est pertinente : elle a utilisé les résultats des travaux produits par la communauté internationale concernée par la recherche sur le climat.

La Commission considère que la méthodologie et les outils de calculs utilisés par l'Andra pour décrire le fonctionnement intégré du stockage et quantifier le transfert aux exutoires sont qualifiés et correctement appliqués. Les résultats présentés à l'appui de son évaluation de la sûreté à long terme sont robustes et scientifiquement fondés. Ils visent à donner une valeur majorée des impacts sur l'homme et l'environnement à l'attention de l'Autorité de sûreté.

La Commission estime que les choix de géométrie pour les alvéoles HA sont de nature à préserver les propriétés du COx. La Commission considère que l'approche simplifiée qui a été utilisée par l'Andra pour le dimensionnement des quartiers HA a été effectivement qualifiée. Pour protéger les colis HA de la corrosion, un matériau de remplissage de type coulis cimentaire est injecté dans l'espace annulaire en extradors du chemisage. La Commission considère que l'Andra a démontré qu'il existe des matériaux qui répondent à cette nécessité.

La conception de l'alvéole MAVL s'appuie sur la connaissance fine du comportement mécanique de la roche hôte associée à un fort retour d'expérience au laboratoire souterrain. La Commission estime que les dispositions constructives retenues par l'Andra sont de nature à maintenir l'intégrité des alvéoles bien au-delà de la fermeture du stockage. L'Andra a étudié deux options de stockage dans Cigéo pour les déchets bitumés : le stockage en l'état de ces déchets dans des alvéoles MAVL renforcés vis-à-vis du risque incendie ou le stockage des déchets issus de la neutralisation des bitumes dans des alvéoles MAVL non dédiés. Cette démarche fournit un exutoire à ces déchets quels que soient les résultats du programme de R&D encore en cours.

Pour ce qui concerne les ouvrages de scellement, la Commission estime que l'Andra a fait la démonstration de sa capacité à mettre en place le matériau de scellement et à choisir une formulation qui permette d'atteindre les propriétés hydro-mécaniques désirées. La Commission note que le maintien d'une pression de gaz suffisamment faible au sein du stockage pour ne pas conduire à une fracturation du COx à l'horizon de quelques dizaines de milliers d'années après fermeture nécessite l'emploi d'un matériau argileux perméable au gaz et imperméable à l'eau, déjà mis au point en laboratoire. L'Andra a prévu de poursuivre la mise au point de son concept, notamment en programmant des démonstrateurs d'ensemble *in situ* durant la Phase industrielle pilote (Phipil).

La définition de la Phipil est importante dans le processus d'autorisation de création de Cigéo. La Commission estime que les critères de réussite de la Phipil proposés par l'Andra sont globalement pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation. En effet, cette cadence conditionne la durée d'exploitation qui

sera nécessaire pour stocker l'inventaire de déchets prévu. Cette durée devra être compatible avec la durée de vie des infrastructures et des équipements.

L'Andra propose de poursuivre l'exploitation nominale de l'installation pendant l'instruction du rapport de fin de Phipil, dans les conditions fixées par l'autorisation initiale de mise en service, limitée à la Phipil. La Commission appuie cette proposition afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation.

La Commission estime que la conception de l'installation Cigéo prend en compte les quatre composantes de la réversibilité : progressivité de la construction, adaptabilité de la conception, flexibilité d'exploitation, récupérabilité des colis déjà stockés pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture de l'installation de stockage. La mise en œuvre de la récupérabilité, prise en compte dès le début de la conception par l'Andra, est approchée de façon rigoureuse et pragmatique.

La Commission estime que la proposition de l'Andra pour la stratégie de fermeture progressive est pertinente et prudente car elle évite les inconvénients de la coactivité entre des opérations industrielles de natures différentes tout en amenant certains quartiers en situation de sûreté passive bien avant la fermeture du stockage dans son ensemble.

**La Commission considère que les recherches conduites par l'Andra, exposées dans le dossier de DAC, ont permis d'élaborer un concept fiable pour un stockage géologique profond de déchets radioactifs à vie longue. Le choix du site et l'ensemble des dispositions constructives sont de nature à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines, et à limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère, en réponse aux deux principales fonctions de sûreté assignées à Cigéo.**

L'ensemble des travaux décrits dans le dossier de DAC valide scientifiquement la conception de l'installation. La configuration technique du stockage sera, pour autant, appelée à évoluer au cours de la durée d'ordre séculaire qui séparera le décret d'autorisation de création de la loi autorisant la fermeture de l'installation.

Il est indispensable que toutes les évolutions de l'installation de stockage Cigéo, qu'elles soient voulues ou subies, soient instruites avec rigueur.

En conséquence, la Commission recommande fortement de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation *in situ*, bien au-delà de la mise en service du stockage et de la Phipil.





## Recommandations de la Commission

*La Commission recommande que l'Andra achève la mise au point de son concept de scellement en programmant des démonstrateurs d'ensemble in situ.*

*La Commission recommande que l'Andra précise sa stratégie de monitoring et de surveillance avant la mise en service du stockage.*

*La Commission recommande que, dans une approche prudente, l'Andra établisse et teste des procédures de réparation des structures de génie civil endommagées.*

*La Commission observe que dans un cas au moins (dimensionnement thermique des alvéoles MAVL), les résultats des études ont conduit à remplacer une des hypothèses conservatives par une disposition supplémentaire de sûreté de nature organisationnelle. La Commission observe qu'il est dès lors essentiel de s'assurer de la pérennité de l'application effective de cette disposition pendant toute l'exploitation du stockage. La Commission recommande que cette disposition soit très précisément documentée et assortie d'un dispositif de contrôle robuste dans la durée.*

*La Commission estime que les critères de réussite de la Phipil proposés par l'Andra sont pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation.*

*La Commission recommande que le nombre de colis stockés pendant la phase industrielle pilote et la durée de celle-ci soient suffisants pour apprécier la capacité de l'installation à absorber des aléas (perturbations de livraison, pannes de l'installation, etc.) et en particulier démontrer que la capacité d'entreposage tampon sur site est suffisante.*

*La Commission recommande que la procédure de fin de Phipil, incluant les critères de réussite et leur mode d'évaluation, soit fixée dans le décret d'autorisation de création.*

*L'Andra propose de ne pas interrompre les opérations de mise en stockage pendant l'instruction du rapport de fin de Phipil. La Commission recommande que cette proposition soit acceptée afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps risquant d'être préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation.*

*Compte tenu de la durée inhérente aux procédures administratives qui seront mises en œuvre après la parution du rapport de fin de Phipil, la Commission recommande de ne pas limiter le nombre de colis qui seront stockés au titre de la première autorisation de mise en service.*

*La Commission recommande que l'assurance de la capacité de récupérer un colis HA soit apportée par un essai dans un alvéole de longueur égale à celle qui sera retenue pour le quartier de stockage HA.*

*La Commission recommande de dissocier les études d'adaptabilité de l'instruction de la demande d'autorisation de création, qui ne porte que sur le stockage de l'inventaire de référence.*

*La Commission recommande fortement de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation in situ, bien au-delà de la mise en service du stockage et de la Phipil.*

*La Commission recommande la poursuite des actions de recherche conduites sur des matériaux innovants. Ces recherches prospectives peuvent alimenter des évolutions du concept si elles s'avèrent utiles.*

*La Commission recommande de poursuivre les études sur la production d'hydrogène dans les alvéoles HA en conditions d'exploitation en vue d'optimiser la maîtrise du risque de formation d'une atmosphère explosive.*

*La Commission recommande que les conservatismes soient réévalués lors de l'instruction des évaluations futures du stockage à la lumière de la progression des connaissances.*

*La Commission observe que les incertitudes sont abordées dans le dossier indépendamment paramètre par paramètre. À l'appui de la future mise en service, la Commission recommande de poursuivre les études en utilisant des méthodes de traitement multiparamétriques (de type Monte Carlo).*

*La Commission recommande que les évaluations de sûreté déterministes soient, notamment en vue des optimisations futures du système de stockage, enrichies par des évaluations probabilistes pour tout ou partie du stockage, en particulier en définissant les fonctions de densité de probabilité des paramètres dans leur domaine de variation.*

*La Commission estime que l'étude d'impact apparaît complète et convaincante. Elle recommande que les versions ultérieures adoptent autant que possible un format plus compact, limité aux rubriques du format imposé, afin d'améliorer sa lisibilité.*





# Table des matières

<i>Résumé - conclusions.....</i>	<i>3</i>
<i>Recommandations de la Commission .....</i>	<i>7</i>
<i>Table des matières .....</i>	<i>9</i>
<i>Avant-propos.....</i>	<i>13</i>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>2 Principes fondamentaux de sûreté, approche systémique .....</b>	<b>17</b>
2.1 Les grands principes.....	17
2.2 La méthodologie Andra.....	18
2.3 Gestion des incertitudes .....	21
2.3.1 Introduction .....	21
2.3.2 Typologie des incertitudes .....	21
2.3.3 Incertitudes et évaluations de la sûreté.....	22
2.3.4 Gestion des incertitudes par l'Andra, notion de conservatisme.....	22
2.3.5 Avis et recommandations de la Commission .....	24
<b>3 Périmètre et méthode de l'évaluation conduite par la Commission .....</b>	<b>27</b>
3.1 Contenu scientifique du dossier de DAC .....	27
3.2 Périmètre de l'évaluation de la Commission .....	28
3.3 Méthode d'évaluation de la Commission .....	28
<b>4 Piliers scientifiques du dossier de DAC .....</b>	<b>31</b>
4.1 Introduction.....	31
4.2 Géologie .....	32
4.2.1 Compréhension du contexte géologique .....	32
4.2.2 Objets structuraux dans le bloc 3D de la ZIRA .....	33
4.2.3 Appréciation de la Commission .....	34
4.3 Contexte hydrogéologique régional et de secteur.....	35
4.3.1 Démarche de l'Andra.....	35
4.3.2 Formations hydrogéologiques .....	36
4.3.3 Rôle des failles pour l'hydrogéologie en grand, à l'échelle régionale .....	38
4.3.4 Modèle hydrogéologique à grande échelle .....	38
4.3.5 Projections géomorphologiques et hydrogéologiques .....	38
4.3.6 Avis de la Commission .....	39
4.4 Propriétés du COx.....	40
4.4.1 Composition minéralogique.....	40
4.4.2 Données sismiques .....	41
4.4.3 Propriétés thermiques .....	41
4.4.4 Porosité des différentes unités lithologiques .....	41
4.4.5 Perméabilité ou conductivité hydraulique .....	42
4.4.6 Diffusion des espèces chimiques en solution .....	42
4.4.7 Rétention des espèces chimiques cationiques .....	43
4.4.8 Comportement mécanique du COx.....	44
4.4.9 Avis de la Commission sur les propriétés du COx et sur leur préservation.....	45
4.5 Matériaux .....	46

4.5.1	Démarche scientifique d'acquisition des connaissances .....	47
4.5.2	Aciers .....	48
4.5.3	Matériaux argileux.....	48
4.5.4	Matériaux cimentaires .....	49
4.5.5	Avis de la Commission sur l'étude des matériaux .....	50
4.5.6	Matériaux innovants prospectifs .....	51
<b>4.6</b>	<b>Chimie des radionucléides et composants de Cigéo.....</b>	<b>51</b>
4.6.1	Propriétés chimiques.....	51
4.6.2	Colis de déchets HA .....	52
4.6.3	Colis de déchets MAVL .....	53
4.6.4	Migration des radionucléides dans les alvéoles.....	53
4.6.5	Appréciation de la Commission sur les données disponibles .....	54
<b>4.7</b>	<b>Chimie des interfaces.....</b>	<b>55</b>
4.7.1	Interactions COx-béton-perturbation alcaline .....	55
4.7.2	Quartier HA et interactions COx-fer-verre .....	55
4.7.3	Quartier MAVL et interactions COx-sels-matières organiques-perturbations saline et organique .....	55
4.7.4	Appréciation de la Commission sur les données disponibles .....	56
<b>4.8</b>	<b>Couplages entre mécanismes physiques et physico-chimiques.....</b>	<b>56</b>
<b>4.9</b>	<b>Environnement .....</b>	<b>57</b>
<b>4.10</b>	<b>Évolution du climat .....</b>	<b>58</b>
<b>4.11</b>	<b>Modélisation et outils intégrateurs .....</b>	<b>59</b>
4.11.1	Expression de la complexité de la modélisation .....	60
4.11.2	Prise en compte de la complexité et de son incertitude, vers des modèles opérationnels de sûreté .....	61
<b>5</b>	<b>Rôle des composants pour répondre aux exigences de sûreté et à l'exigence de récupérabilité .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Introduction, choix des éléments étudiés .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Choix d'architecture.....</b>	<b>65</b>
5.2.1	Conserver les propriétés de confinement du COx.....	66
5.2.2	Limitier les circulations d'eau pour atténuer et retarder la migration des radionucléides .....	66
5.2.3	Assurer la réversibilité du stockage .....	67
<b>5.3</b>	<b>Alvéoles HA.....</b>	<b>67</b>
5.3.1	Préserver les propriétés du COx .....	68
5.3.2	Limitier le relâchement des radionucléides, atténuer et retarder leur migration .....	69
5.3.3	Assurer la récupérabilité des colis HA .....	70
<b>5.4</b>	<b>Alvéoles MAVL .....</b>	<b>71</b>
5.4.1	Préserver les propriétés du COx .....	71
5.4.2	Limitier le relâchement des radionucléides, atténuer et retarder leur migration .....	72
5.4.3	Assurer la récupérabilité des colis MAVL .....	73
<b>5.5</b>	<b>Alvéoles MAVL pour le stockage des déchets bitumés .....</b>	<b>74</b>
5.5.1	Préserver les propriétés du COx .....	75
5.5.2	Modes de stockage des enrobés bitumés.....	75
<b>5.6</b>	<b>Galleries.....</b>	<b>76</b>
<b>5.7</b>	<b>Ouvrages de scellement.....</b>	<b>77</b>
5.7.1	Préserver les propriétés du COx .....	78
5.7.2	Fonction limiter les flux d'eau via les LSF .....	78
5.7.3	Avis de la Commission .....	79
<b>5.8</b>	<b>Fonctionnement intégré du stockage, transfert aux exutoires .....</b>	<b>79</b>

5.8.1	Flux issus des colis HA .....	80
5.8.2	Flux issus des colis MAVL .....	81
5.8.3	Flux issus des alvéoles jusqu'au COx sain .....	81
5.8.4	Flux traversant le COx, transferts en grand jusqu'aux exutoires .....	82
5.8.5	Mise en œuvre de la démarche de modélisation .....	83
<b>6</b>	<b><i>Les questions transverses</i></b> .....	<b>85</b>
<b>6.1</b>	<b>Phase industrielle pilote</b> .....	<b>85</b>
6.1.1	Enjeux de la phase industrielle pilote pendant la construction initiale du stockage .....	86
6.1.2	Enjeux de la phase industrielle pilote pendant le début d'exploitation industrielle du stockage .....	86
6.1.3	Conditions d'achèvement de la Phipil. ....	87
<b>6.2</b>	<b>Modalités de la réversibilité</b> .....	<b>88</b>
6.2.1	Progressivité .....	89
6.2.2	Flexibilité .....	89
6.2.3	Récupérabilité .....	89
6.2.4	Adaptabilité .....	90
6.2.5	Commentaires et recommandations de la Commission .....	91
<b>6.3</b>	<b>Stratégie de fermeture de l'installation</b> .....	<b>92</b>
<b>6.4</b>	<b>Monitoring et surveillance de Cigéo</b> .....	<b>93</b>
<b>6.5</b>	<b>Mémoire du stockage</b> .....	<b>94</b>
<b>7</b>	<b><i>Synthèse</i></b> .....	<b>97</b>
	<b><i>Glossaire</i></b> .....	<b>101</b>
	<b><i>Composition de la commission nationale d'évaluation</i></b> .....	<b>105</b>
	<b><i>Listes des réunions thématiques organisées avec l'Andra</i></b> .....	<b>107</b>
	<b><i>Composition du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base Cigéo</i></b> .....	<b>109</b>
	<b><i>Annexe I. Géologie</i></b> .....	<b>111</b>
I.1	Géométrie de la formation géologique .....	111
I.2	Objets structuraux dans le bloc 3D de la ZIRA .....	111
I.3	Sismicité .....	114
I.4	État de contraintes naturelles .....	114
I.5	Modèle d'évolution tectonique et climatique .....	114
	<b><i>Annexe II. Hydrogéologie</i></b> .....	<b>117</b>
	<b><i>Annexe III. Propriétés du COx</i></b> .....	<b>121</b>
III.1	Propriétés thermiques .....	121
III.2	Propriétés hydrodynamiques .....	122
III.3	Suppression d'eau dans le COx .....	122
III.4	Propriétés de transfert .....	124
III.5	Comportement mécanique .....	125
III.6	Conséquences du comportement mécanique du COx sur la réalisation des ouvrages .....	125
	<b><i>Annexe IV. Chimie : implication sur les termes sources et la migration des radionucléides</i></b> .....	<b>129</b>

<b>IV.1</b>	<b>Rôle de la chimie dans l'isolement et confinement de la radioactivité .....</b>	<b>129</b>
IV.1.1	Résultats des calculs de l'Andra .....	129
IV.1.2	Fonctionnement phénoménologie de Cigéo en exploitation impliquant la chimie .....	132
IV.1.3	Fonctionnement phénoménologie de Cigéo après sa fermeture impliquant la chimie .....	132
IV.1.4	Modèles et simulations .....	133
IV.1.5	De la science aux calculs de performances pour les scénarios de sûreté .....	134
<b>IV.2</b>	<b>Termes sources dans le quartier HA.....</b>	<b>134</b>
IV.2.1	Perturbations chimiques dans le quartier HA .....	134
IV.2.2	Interactions eau-colis de verres nucléaires.....	135
IV.2.2.1	Généralités .....	135
IV.2.2.2	Altération en situation de stockage.....	137
IV.2.2.3	Termes sources.....	138
IV.2.2.4	Autres verres.....	138
IV.2.3	Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté.....	139
<b>IV.3</b>	<b>Migration des éléments dans le quartier HA .....</b>	<b>140</b>
IV.3.1	Généralités .....	140
IV.3.2	Diffusion des espèces chimiques dans les alvéoles HA .....	141
IV.3.3	Diffusion des espèces chimiques dans le COx sain .....	142
IV.3.4	Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté.....	142
IV.3.5	Conclusion.....	142
<b>IV.4</b>	<b>Termes sources du quartier MAVL .....</b>	<b>142</b>
IV.4.1	Généralités sur les colis de déchets MAVL.....	142
IV.4.2	Perturbations chimiques dans le quartier MAVL .....	143
IV.4.2.1	Perturbations chimiques en période d'exploitation .....	143
IV.4.2.2	Phénoménologie sommaire après fermeture des alvéoles .....	143
IV.4.2.3	Dégradation des matériaux cimentaires .....	144
IV.4.2.4	Interactions eau-colis MAVL .....	144
IV.4.2.5	Corrosion des colis de déchets métalliques .....	145
IV.4.2.6	Dégradation des colis de déchets salins.....	145
IV.4.2.7	Dégradation des colis de déchets organiques .....	147
IV.4.3	Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté.....	147
<b>IV.5</b>	<b>Migration des éléments dans le quartier MAVL .....</b>	<b>148</b>
IV.5.1	Perturbations chimiques et migration des éléments .....	148
IV.5.2	Alvéoles avec colis ne contenant ni sels ni matière organique .....	149
IV.5.3	Milieux cimentaires .....	149
IV.5.4	COx perturbé par des milieux cimentaires .....	150
IV.5.5	Alvéoles contenant des colis salins.....	150
IV.5.5.1	Milieux cimentaires salins .....	150
IV.5.5.2	COx perturbé par les sels .....	151
IV.5.6	Alvéoles contenant des déchets organiques .....	151
IV.5.6.1	Milieux cimentaires perturbés par des molécules organiques .....	151
IV.5.6.2	COx perturbé par les molécules organiques .....	152
IV.5.7	Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives de performances en appui de l'analyse de sûreté .....	152
IV.5.7.1	Alvéoles .....	153
IV.5.7.2	COx perturbé .....	153
IV.5.8	Conclusion.....	153







## Avant-propos

Le présent rapport a pour objet d'analyser les fondements scientifiques et techniques des travaux réalisés par l'Andra à l'appui de sa demande d'autorisation de création de l'installation de stockage géologique Cigéo en Meuse Haute-Marne, à 500 mètres de profondeur, au sein de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien. Les objectifs d'isolement et de confinement des déchets nucléaires assignés à Cigéo sont en accord avec les standards internationaux. Aussi, la Commission a conduit son examen du dossier de DAC en évaluant la pertinence de la démarche scientifique de l'Andra.

L'évaluation de la sûreté de l'installation Cigéo n'est pas du ressort de la Commission, mais de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection à laquelle la Commission ne saurait se substituer.

Le rôle de la Commission est d'évaluer les bases scientifiques et la robustesse de la démarche scientifique suivie par l'Andra. Elle n'a pas abordé la question du calcul de la dose à l'individu critique.

L'Andra est responsable de la conception de son ouvrage. Il n'appartient pas à la Commission de remettre en cause ses choix de conception, mais d'évaluer les connaissances sur lesquelles s'appuie l'Andra pour ses calculs de performance du système de stockage.



# 1 Introduction

La stratégie française de gestion des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue prévoit leur stockage géologique en application du principe énoncé à l'article L542-1-2 du code de l'environnement : « Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde. »

L'Andra a déposé en janvier 2023 une demande d'autorisation de création d'un tel stockage dénommé Cigéo situé sur les territoires de la Meuse et de la Haute-Marne. Conformément à l'article 1er de la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016, codifié à l'article L542-10-1 du code de l'environnement, la demande d'autorisation de création de Cigéo (DAC) donne lieu à un rapport de la Commission nationale d'évaluation (CNE), qui sera joint à l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) et au compte-rendu des débats publics de 2005 et de 2013 organisés par la Commission nationale du débat public (CNDP). Ces documents seront examinés par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

Le présent rapport a pour objet d'analyser les fondements scientifiques et techniques des travaux réalisés et présentés par l'Andra pour évaluer la faisabilité et la sûreté de Cigéo. Il s'appuie sur plus de trente années de travaux d'évaluation continue, par la Commission, des recherches et des études relatives à la gestion des déchets radioactifs. Au cours de cette période, la Commission a émis de nombreuses recommandations qui ont d'ailleurs contribué à la réflexion de l'Andra lors de l'élaboration de son dossier de DAC.

Ce rapport traite dans un premier temps d'aspects méthodologiques. Le chapitre 2 aborde les grands principes de la sûreté et la méthodologie que l'Andra a choisie pour les appliquer. Le chapitre 3 décrit la méthode de travail de la Commission pour l'analyse du dossier de DAC et précise les limites de l'évaluation présentée dans le présent rapport.

L'évaluation proprement dite de la Commission est présentée ensuite. Le chapitre 4, qui constitue le cœur du travail de la Commission, examine la pertinence et la robustesse des acquis scientifiques qui fondent la démarche de sûreté. Le chapitre 5 s'intéresse aux composants du système de stockage qui jouent un rôle prépondérant pour assurer la récupérabilité pendant la phase d'exploitation et la sûreté à long terme après fermeture du stockage.

La Commission aborde au chapitre 6 quelques questions transverses, qui, sans relever exclusivement du domaine scientifique, lui semblent pouvoir être utilement éclairées par l'expérience issue du suivi continu des travaux sur le stockage géologique depuis plus de trente ans.

Enfin, une synthèse est présentée au chapitre 7. Elle évoque les travaux de recherche et développement qui seront nécessaires pendant toute la durée de la construction et de l'exploitation du stockage, travaux qui justifient qu'une capacité de R&D de haut niveau soit maintenue à l'Andra pendant toute cette période.



## 2 Principes fondamentaux de sûreté, approche systémique

### 2.1 Les grands principes

L'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde est la protection de la santé des personnes et de l'environnement. Celle-ci doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques (selon le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, édition 0 de février 2008), tant durant la phase d'exploitation du stockage qu'après sa fermeture.

La première phase de la vie du stockage correspond à la construction des installations de surface et souterraines, puis à la mise en stockage des colis de déchets. Il s'agit de travaux et d'activités classiques de grands chantiers pour lesquels la sûreté est active, fondée sur l'assurance qualité et la réglementation INB.

En seconde phase de vie, le système de stockage assure la sûreté après fermeture, tel que défini par l'Andra. Il comprend la roche hôte, c'est-à-dire la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien (COx) dans laquelle sont implantés les alvéoles de stockage, les colis de stockage des déchets placés dans les alvéoles et les galeries et puits remblayés et scellés.

La réglementation nationale, qui intègre les standards internationaux, requiert également qu'après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement devienne indépendante d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel, qui ne peuvent évidemment être maintenus de façon certaine que sur une période limitée. Ainsi, après fermeture, la protection de la santé des personnes et de l'environnement doit reposer sur des systèmes passifs, sans nécessiter d'intervention.

À ces exigences de sûreté s'ajoute, en application du code de l'environnement, une obligation de réversibilité qui inclut notamment « la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage » (article L542-10-1 du code de l'environnement).

La réalisation des objectifs de sûreté se fait en assignant au système de stockage et à ses composants des fonctions de sûreté multiples et complémentaires.

L'Andra assigne au système de stockage deux fonctions de sûreté fondamentales :

- isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales ;
- limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère.

La deuxième fonction se décline à son tour en trois sous-fonctions (ou fonctions de second niveau) :

- s'opposer à la circulation d'eau ;
- limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage ;

- retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage.

La mise en œuvre de ces trois sous-fonctions implique en priorité de « préserver les caractéristiques favorables des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés contribuant à la sûreté après fermeture » tout au long de la construction, de l'exploitation et de la fermeture du stockage. Cela constitue une contrainte permanente lors du creusement des galeries, alvéoles et puits ainsi que lors du scellement du stockage.

L'application des principes et fonctions de sûreté est reprise et largement explicitée au chapitre 5 ci-après.

L'analyse du comportement et de l'évolution du système de stockage, telle qu'elle peut être appréhendée au vu des connaissances scientifiques et technologiques actuelles, permet d'en déterminer les performances et la robustesse au regard des fonctions de sûreté. Cette analyse repose sur l'identification et la description de scénarios représentatifs de l'évolution du système résultant des sollicitations auxquelles celui-ci pourrait être soumis (scénarios d'évolution normale, d'évolution altérée, ou postulés). Elle repose sur la connaissance et l'analyse du comportement dans le temps des composants du système de stockage ainsi que des processus, événements et phénomènes susceptibles de se dérouler pendant toutes les phases de la vie du stockage. Il est également essentiel d'y intégrer les incertitudes relatives aux caractéristiques, processus et événements au vu des connaissances scientifiques et technologiques actuelles.

L'exigence de récupérabilité induit quant à elle des contraintes au niveau de la persistance dans le temps de la géométrie des structures et de la durabilité des matériaux.

La démarche méthodologique suivie par l'Andra applique les recommandations des standards et guides internationaux développés par l'AIEA et l'AEN/OCDE.

*Les principes et objectifs fondamentaux de sûreté tels que formulés par l'Andra ainsi que l'approche systémique s'appuyant sur les fonctions de sûreté sont cohérents avec les standards internationaux. On peut citer à titre d'exemple les « prescriptions de sûreté particulières » applicables au stockage définitif des déchets radioactifs de l'AIEA (SSR-5), plus précisément, les principes relatifs à l'approche de sûreté : compréhension de l'évolution de l'installation de stockage, surveillance et contrôle en exploitation, moyens passifs pour la sûreté de l'installation de stockage après fermeture, fonctions de sûreté multiples, confinement et isolement des déchets radioactifs.*

## 2.2 La méthodologie Andra

L'étude de la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs s'effectue par l'analyse des performances du système de stockage au moyen de scénarios. La définition et l'analyse de ces scénarios a pour but de vérifier le bon fonctionnement et la robustesse du système de stockage et montrer que l'objectif de protection de l'homme et de l'environnement est atteint avec un haut degré de certitude dans les cas de figures étudiés.



Pour la sûreté durant la phase d'exploitation, l'évolution des composants du stockage et la mise en place des colis sont sous contrôle et ne sont donc pas traités par des scénarios.

Pour la sûreté après fermeture du stockage, l'Andra a défini quatre types de scénarios que l'on retrouve classiquement dans les réglementations nationales et les recommandations internationales. Ces scénarios décrivent une évolution phénoménologique des composants naturels et ouvrages du système de stockage sur le très long terme. Ils doivent permettre d'analyser les différents mécanismes de retour vers la biosphère des éléments radio-chimio-toxiques contenus dans les déchets et d'en évaluer les conséquences sanitaires et environnementales. Ces scénarios sont définis par un choix d'hypothèses, de modèles de fonctionnement et de paramètres issus du socle de connaissances scientifiques et technologiques. Ils doivent couvrir les situations d'évolution du stockage en fonctionnement normal, altéré ou postulé (*what-if ?*) et enfin en cas d'intrusion humaine involontaire.

Typologie de scénario	Intitulé du scénario
Scénario d'évolution normale (SEN)	Situation de référence du SEN
	Situation enveloppe du SEN
Scénario d'évolution altérée (SEA)	Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par l'interface
	Dysfonctionnement des scellements des galeries par l'interface
	Dysfonctionnement de tous les scellements par l'interface
	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage des colis de déchets HA0 du quartier pilote HA
	Dysfonctionnement d'un conteneur de stockage des colis de déchets HA1 ou HA2 par alvéole HA du quartier de stockage HA
Scénario What-if	Dysfonctionnement des scellements des liaisons surface-fond par le noyau argileux et par l'interface
	Dysfonctionnement des scellements des galeries par le noyau argileux et par l'interface
	Dysfonctionnement de tous les scellements par le noyau argileux et par l'interface
	Dysfonctionnement de tous les conteneurs de stockage HA
	Discontinuité non détectée postulée dans la couche du Callovo-Oxfordien
Scénario d'intrusion humaine involontaires (SIHI)	Forage avec prélèvement de carottes
	Forage d'exploitation géothermique du Trias abandonné à la profondeur du stockage
	Forage d'exploration au Dogger abandonné à sa cote prévisionnelle
	Forage exploratoire pendant le transitoire hydraulique-gaz

Figure 1 : définition des types de scénarios étudiés (d'après Andra, dossier DAC).

## Le scénario d'évolution normale (SEN)

Ce scénario vise à représenter l'évolution après fermeture du système de stockage tel qu'il a été conçu ; il suppose que le système fonctionne comme prévu au niveau de ses composants et dans son ensemble. Toutes les fonctions de sûreté sont assurées. L'évolution du système est l'évolution attendue qui prend en considération des événements et phénomènes certains ou très probables.

Le scénario d'évolution normale se décline en un scénario de référence et un scénario enveloppe :

- le scénario de référence (SEN-Ref) s'appuie sur les modèles de fonctionnement et les valeurs des paramètres de ces modèles considérés comme étant les plus étayés scientifiquement. La représentation obtenue est ainsi considérée comme étant « au mieux de la connaissance ». Des valeurs plus conservatives des paramètres, voire pénalisantes, sont utilisées si les connaissances scientifiques et technologiques sont moins bien étayées ;
- le scénario enveloppe (SEN-Env) est établi en sélectionnant les valeurs hautes ou basses dans l'ensemble des données disponibles, en respectant la cohérence physique entre

les différentes grandeurs, afin de majorer le transfert vers la biosphère des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets stockés. Le scénario enveloppe constitue la limite du fonctionnement normal du stockage.

### **Les scénarios d'évolution altérée (SEA)**

Les scénarios d'évolution altérée ont pour but d'évaluer la dérive dans le temps du stockage hors des limites du fonctionnement normal. Ils permettent d'évaluer la robustesse du stockage, c'est-à-dire la capacité de celui-ci de continuer à remplir sa fonction de protection de l'homme et de l'environnement en cas de perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté due au dysfonctionnement ou à la défaillance des composants qui contribuent à leur réalisation. Les hypothèses et paramètres selon lesquelles sont construits les scénarios d'évolution altérée sont pénalisantes et considérées comme peu vraisemblables par rapport aux connaissances acquises. L'étude de ces scénarios permet également d'identifier les composants essentiels pour garantir les performances du stockage.

### **Les scénarios postulés (*what-if ?*)**

Les scénarios *what-if ?* sont établis sur la base d'événements très peu ou pas vraisemblables, dont la survenance est postulée, et qui entraînent la perte d'une ou plusieurs fonctions de sûreté. Ces scénarios, qui correspondent à des sollicitations extrêmes du stockage, permettent d'en évaluer la robustesse et la qualité de la conception. Le choix de ces scénarios résulte souvent de considérations spécifiques aux caractéristiques du site. L'analyse de tels scénarios est considérée comme une bonne pratique au niveau international.

### **Les scénarios d'intrusion humaine involontaire (SIHI)**

La mémoire du stockage peut se perdre et une intrusion dans celui-ci ne peut être exclue (l'ASN a fixé la date de l'oubli à 500 ans après fermeture). Les recommandations internationales font une distinction entre l'intrusion volontaire et involontaire. Ces recommandations internationales excluent de l'analyse les conséquences d'une intrusion volontaire, préparée, documentée et délibérée car ceux qui y procéderaient porteraient la responsabilité de leurs actions. Seule l'intrusion involontaire est donc étudiée.

Comme il est difficile de prévoir et décrire la nature de futures actions humaines et que, par définition, lors d'une intrusion plusieurs ou toutes les barrières mises en place sont traversées, différents scénarios plus ou moins plausibles sont envisagés.

L'établissement des scénarios repose sur des hypothèses de représentation, des modèles et des paramètres qui s'appuient sur le socle de connaissances scientifiques et technologiques acquises par l'Andra aux travers de ses différents programmes de recherche en particulier *in situ*. Pour procéder aux évaluations quantitatives de sûreté après fermeture, l'Andra a par ailleurs sélectionné, développé, qualifié et validé des outils de simulation capables de répondre aux différentes interrogations prenant en compte notamment les grandes échelles de temps et d'espace, et l'aspect multiphysique et couplé des phénomènes.

## 2.3 Gestion des incertitudes

### 2.3.1 Introduction

La conception d'un stockage géologique profond et l'analyse de sa sûreté en exploitation et après fermeture s'appuient sur les connaissances scientifiques disponibles au moment de la rédaction du dossier de demande d'autorisation de création. Les connaissances relatives au milieu géologique dans lequel l'installation sera construite et au comportement des différents constituants du stockage sont particulièrement importantes. Elles ne sont pas, et ne peuvent pas être, totalement exhaustives, et celles qui sont bien connues le sont avec un certain degré de précision. Ainsi la connaissance du comportement à long terme du stockage ne peut-elle être absolue. Loin de tout connaître à un moment donné, la science progresse grâce à la recherche. Par nature, la démarche scientifique est progressive, critiquable, réfutable et évolutive en fonction des avancées de la science. Cela ne s'oppose pas à ce que des décisions soient prises au regard de l'état des connaissances disponibles à ce moment.

### 2.3.2 Typologie des incertitudes

Le problème de la prise en compte des incertitudes pour traiter de l'évaluation de la sûreté d'un stockage géologique, notamment sur le long terme, a été abordé au cours de nombreux travaux internationaux. Il n'existe cependant pas d'approche unifiée de la question.

De façon générale, les incertitudes concernant les données nécessaires à l'évaluation de la sûreté d'un stockage géologique se déclinent en deux grandes catégories : les incertitudes épistémiques et les incertitudes aléatoires. Leurs causes peuvent être intrinsèques ou extrinsèques.

Les incertitudes épistémiques sont liées à l'imperfection des connaissances. Les incertitudes épistémiques intrinsèques, qui concernent directement les composants du stockage et la modélisation de leur évolution, sont susceptibles d'être réduites par une meilleure compréhension du système étudié, en augmentant par exemple le nombre de mesures d'un paramètre, le nombre d'études, ou en améliorant les modèles. Ces démarches permettent d'atteindre une meilleure précision et de réduire l'incertitude. Les incertitudes épistémiques extrinsèques, à l'inverse, résultent de l'influence de facteurs externes au stockage, comme des évolutions socio-économiques, des évolutions réglementaires ou encore les effets anthropiques sur le climat. Ces dernières ne sont pas réductibles.

Les incertitudes aléatoires sont liées au caractère aléatoire inhérent à un phénomène ou un événement, comme la survenue de séismes ou de cataclysmes naturels. Elles concernent des événements de probabilité très faible mais non nulle.

Toutes les incertitudes non réductibles par une meilleure compréhension du système étudié sont prises en compte au travers de scénarios qui incluent la survenue d'événements incertains.

### 2.3.3 Incertitudes et évaluations de la sûreté

Selon le consensus international, toute évaluation de sûreté à long terme d'un stockage géologique prend en compte les incertitudes épistémiques et aléatoires. Le traitement des incertitudes s'effectue en appliquant une ou plusieurs des cinq stratégies suivantes :

1. démontrer que l'incertitude est sans rapport avec la sûreté ;
2. sinon aborder explicitement l'incertitude ;
3. en caractériser la gamme et les bornes ;
4. exclure l'événement ou le processus aggravant l'incertitude au vu de sa très faible probabilité d'occurrence ou parce que d'autres conséquences, si l'événement venait à se produire, l'emporteraient largement sur celles de l'événement exclu ;
5. utiliser une approche dite stylisée, c'est-à-dire basée sur des hypothèses imposées, lorsqu'il n'est pas possible d'aborder explicitement l'incertitude (absence ou insuffisance de données). Cette approche est généralement convenue avec l'Autorité de sûreté.

Les analyses de sûreté, quant à elles, peuvent être abordées de deux façons : déterministe ou probabiliste.

L'analyse déterministe consiste à effectuer un calcul ou une simulation avec un seul ensemble de valeurs des paramètres et un scénario défini. Elle fournit pour le scénario étudié (*cf.* section 2.2) une estimation optimale, prudente ou extrême des performances du système. Elle peut être affinée de façon itérative au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances.

L'analyse probabiliste consiste à effectuer un calcul ou une simulation avec des valeurs des paramètres pertinents variant à l'intérieur de leur domaine de validité, voire en dehors, pour un scénario donné, puis à envisager plusieurs scénarios.

Les deux approches déterministe et probabiliste sont complémentaires.

Au stade d'une demande d'autorisation de création d'une INB, l'approche déterministe est souvent privilégiée car elle permet une représentation majorée et donc enveloppe de la réalité.

### 2.3.4 Gestion des incertitudes par l'Andra, notion de conservatisme

L'approche de l'Andra pour évaluer la sûreté de Cigéo en exploitation et après fermeture est déterministe et s'inscrit dans la méthodologie exposée ci-dessus.

L'Andra a identifié de façon systématique différents types d'incertitudes :

- des incertitudes intrinsèques liées à la conception du stockage. On peut citer à titre d'exemple les données d'entrée des modèles, les caractéristiques des composants, la variabilité de la mise en œuvre technique des composants ou l'évolution phénoménologique du stockage ;
- des incertitudes extrinsèques liées aux événements futurs d'origine naturelle (climatique, géodynamique), ou aux activités humaines (intrusions, effets anthropiques) ;
- des incertitudes de modélisation, liées aux données d'entrée, au choix de représentation phénoménologique, à la résolution des équations et au scénario considéré.

Certaines de ces incertitudes sont couvertes par des dispositions de conception. Les autres sont prises en compte via les scénarios considérés en cohérence avec les standards méthodologiques internationaux décrits ci-dessus et le guide de l'ASN. Des études de sensibilité mono-paramétriques ont été réalisées dans le but d'apprécier la sensibilité du fonctionnement du stockage vis-à-vis de la variabilité de certains paramètres.

La prise en compte des différents types d'incertitude dans les études de l'Andra repose sur la notion de « conservatisme » : pour tout élément de l'évaluation affecté par une incertitude, une hypothèse pénalisante est retenue pour que le résultat soit toujours majorant par rapport au domaine de fonctionnement réel.

Cette logique s'applique à toutes les étapes de l'évaluation. On peut mentionner par exemple :

- les caractéristiques retenues pour les colis de stockage sont plus pénalisantes que les spécifications d'acceptation ;
- les paramètres d'entrée utilisés pour les modélisations sont fixés aux valeurs les plus pénalisantes à l'intérieur de leur domaine de variation. Les paramètres d'entrée qui contribuent à la sûreté mais qui ne peuvent être quantifiés avec certitude sont fixés aux limites les plus pénalisantes qui puissent exister ;
- la modélisation du comportement du stockage est faite avec des modèles qualifiés et validés pénalisants ;
- les agressions subies par le stockage sont majorées par rapport à la valeur réglementaire ;
- les critères utilisés pour apprécier le résultat sont fixés à des valeurs plus sévères que le niveau réglementairement requis.

La robustesse de la conception de Cigéo et de l'évaluation de sûreté repose sur l'application de ces conservatismes. Pour les cas où l'utilisation systématique des hypothèses les plus simples et les plus pénalisantes ne permettaient pas d'aboutir à des conditions de sûreté satisfaisantes au regard des objectifs poursuivis, l'Andra a revu le « conservatisme » moyennant des calculs plus précis ou a pris des options de conception supplémentaires.

Les deux exemples suivants, en lien avec le dimensionnement des quartiers HA et MAVL, illustrent les propos précédents. Pour le dimensionnement thermo-mécanique des quartiers HA, le modèle de comportement choisi (thermo-poro-élastique) est plus simple mais plus pénalisant qu'un modèle plus sophistiqué thermo-poro-visco-plastique (cf. 5.3.1). Les paramètres physiques utilisés dans la modélisation (module d'Young, perméabilité...) sont fixés à des valeurs pénalisantes au sein du domaine de variation identifié. Egalement, pour le dimensionnement thermique des quartiers HA, le critère d'acceptation du résultat, c'est-à-dire la température maximale atteinte au sein du Callovo-Oxfordien, est fixé par l'Andra à 90°C. Pour le dimensionnement thermique des alvéoles MAVL, une première analyse a été réalisée avec des conservatismes extrêmement élevés. Dans cette analyse, l'Andra considère l'hypothèse (doublement pénalisante) que tous les colis sont mis en stockage simultanément et ont tous la puissance thermique maximale autorisée à la réception. Selon cette approche simplifiée, la majorité des colis peut être stockée dans le respect des critères de dimensionnement thermique, à l'exception de deux types d'entre eux. Pour démontrer que ces deux types de colis peuvent être stockés, il faut retirer l'hypothèse simplificatrice de mise en stockage simultanée de tous les colis. Cette approche est pertinente, mais elle impose de compenser l'hypothèse de mise en stockage simultanée de tous ces colis par une exigence opérationnelle de maîtrise de la mise en stockage pour assurer le respect des critères de dimensionnement

thermique. L'abandon d'un conservatisme est donc ici compensé par une contrainte d'exploitation qui nécessitera une organisation précise et contrôlée pendant toute la durée de l'exploitation.

En conclusion, l'évaluation de sûreté de l'Andra présentée dans le dossier de DAC en appliquant systématiquement des conservatismes pour toutes les incertitudes identifiées assure l'existence d'une marge entre le fonctionnement modélisé et le fonctionnement réel, même si ce dernier ne peut pas être complètement évalué. Dans cette approche déterministe, la superposition et l'addition des conservatismes tout au long de l'évaluation de sûreté conduit à une représentation majorée de l'impact du stockage sur l'homme et l'environnement. L'Andra s'est ainsi assurée que le fonctionnement modélisé est bien enveloppe du fonctionnement réel.

Les conservatismes seront réexaminés au cours de la conception, de la construction et de l'exploitation de Cigéo. Une diminution des conservatismes visant à une représentation plus proche de la réalité pourra être obtenue lors des itérations successives de l'évaluation de sûreté, en prenant en compte une réévaluation de choix initiaux, l'amélioration des connaissances et l'évolution des outils de calcul.

Une approche probabiliste de l'étude des performances de Cigéo serait un complément utile car elle permettrait de mieux appréhender le fonctionnement « au mieux de la connaissance » du stockage parmi tous les cas envisageables.

#### 2.3.5 Avis et recommandations de la Commission

*Sans émettre de jugement sur l'évaluation de sûreté elle-même, ce qui n'est pas de sa compétence, la Commission estime que la conception du stockage et l'évaluation de sa sûreté, telles qu'elles sont exposées dans le dossier de DAC, sont fondées sur une méthode robuste de gestion des incertitudes, qui combine la compensation des incertitudes connues par des conservatismes et l'approche des incertitudes non identifiées par l'étude de la résilience du stockage à des scénarios hypothétiques pénalisants. Cette méthodologie est déterministe en conformité avec le guide de l'ASN et les standards internationaux.*

*La Commission estime que dans la version actuelle de l'étude, l'application des conservatismes et leur propagation tout au long de l'évaluation de sûreté permet de couvrir les incertitudes identifiées et d'obtenir une représentation majorante enveloppe du fonctionnement réel du stockage.*

*La Commission recommande que les évaluations de sûreté déterministes soient, notamment en vue des optimisations futures du système, enrichies par des évaluations probabilistes pour tout ou partie du stockage, en particulier en définissant les fonctions de densité de probabilité des paramètres dans leur domaine de variation.*

*La Commission recommande que les conservatismes soient réévalués lors de l'instruction des évaluations futures du stockage à la lumière de la progression des connaissances.*

*La Commission observe que dans un cas au moins (dimensionnement thermique des alvéoles MAVL), les résultats des études ont conduit à remplacer une des hypothèses conservatives par une disposition supplémentaire de sûreté de nature organisationnelle. La Commission observe qu'il est dès lors essentiel de s'assurer de la pérennité de l'application effective de cette disposition pendant toute l'exploitation du stockage. La Commission recommande que cette disposition soit très précisément documentée et soit assortie d'un dispositif de contrôle robuste dans la durée.*

*La Commission observe que les incertitudes sont abordées dans le dossier indépendamment paramètre par paramètre. À l'appui de la future mise en service, la Commission recommande de poursuivre les études en utilisant aussi des méthodes de traitement multiparamétriques (du type Monte Carlo).*





## 3 Périmètre et méthode de l'évaluation conduite par la Commission

### 3.1 Contenu scientifique du dossier de DAC

Le rôle de la Commission est d'éclairer le Parlement sur les aspects scientifiques et techniques de la gestion des matières et déchets nucléaires. Elle s'est concentrée dans le présent rapport sur l'évaluation de la robustesse des bases scientifiques sur lesquelles s'appuie l'évaluation de la sûreté de l'installation Cigéo.

Le dossier de demande d'autorisation de création de l'installation de stockage en couche géologique profonde dénommée Cigéo comporte 23 pièces, représentant environ 10 000 pages et aborde 5 grandes thématiques : présentation générale, impact sur l'environnement, aspects juridiques, concertation et sûreté.

L'Andra fonde l'analyse de sûreté de Cigéo sur un socle de connaissances scientifiques (cf. chapitre 4). Ce socle met en jeu quasiment toutes les disciplines incluses dans les sciences de la matière, les sciences des matériaux et les sciences de la Terre. Toutes ces disciplines sont matures et ont même progressé grâce aux travaux de l'Andra et d'une large communauté scientifique nationale et internationale travaillant sur le stockage géologique.

L'Andra dispose d'une quantité considérable de données sur la géologie et l'hydrogéologie du site, sur le devenir des composants de Cigéo (colis de déchets, matériaux des ouvrages, matériaux de scellements), sur l'évolution des propriétés du CO<sub>x</sub> soumis à diverses sollicitations et sur les mécanismes de libération et de migration des radionucléides dans les composants dégradés après resaturation par l'eau des quartiers de stockage. Les expériences dans ces domaines ont été conduites pendant plusieurs décennies par une large communauté scientifique, à différentes échelles (expérimentations en laboratoire de surface et *in situ* en laboratoire souterrain). L'Andra maîtrise l'utilisation des codes de calculs et techniques de simulation qui permettent, à partir des modèles établis sur la base de données expérimentales, de reproduire les phénomènes et de les projeter dans le futur.

Les résultats obtenus sur Cigéo ont été confrontés à des données acquises sur d'autres sites notamment en Europe, et ont bénéficié aussi d'exercices réguliers, par des équipes internationales indépendantes, d'inter-comparaisons de codes de calculs. Une part importante de ces résultats a fait l'objet de publications dans des revues scientifiques internationales après le processus de revue par les pairs.

Le socle de connaissances scientifiques est utilisé par l'Andra pour la conception de l'installation et l'évaluation de sa sûreté, qui comporte elle-même deux volets : la sûreté en exploitation (sur une durée séculaire) et la sûreté après fermeture (sur un million d'années).

Le premier volet concerne le choix des matériaux et composants intervenant dans la construction des installations, en particulier souterraines, l'acheminement et la mise en place des colis de déchets, le comblement des vides résiduels et le scellement des ouvrages et des liaisons surface-fond. Il repose sur la capacité de la science à fournir aux ingénieurs les éléments permettant de garantir que les objectifs de construction et d'exploitation définis seront atteints. La démarche pourra être vérifiée et adaptée tout au long de l'exploitation avant la fermeture de Cigéo. Ce volet relève de l'état de l'art du génie minier, du génie civil, et de la réalisation des grands chantiers. Une durée d'ordre séculaire doit être considérée.

Le second volet concerne l'évolution des composants du stockage à très long terme, jusqu'au million d'années, sans intervention humaine après la fermeture. Il repose sur la capacité de la science à comprendre et modéliser les processus. Pour un système passif et aux échelles de temps visées, la démarche de vérification que les objectifs peuvent être atteints est basée sur la qualité des données, la robustesse des modèles et des codes de simulation.

### 3.2 Périmètre de l'évaluation de la Commission

Dans son analyse, la Commission s'est attachée à évaluer la pertinence et la qualité du socle de connaissances scientifiques sur lequel s'est basée l'Andra pour réaliser son évaluation de sûreté à long terme.

L'évaluation de la sûreté de l'installation Cigéo n'est pas du ressort de la Commission, mais de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection à laquelle la Commission ne saurait se substituer. Ainsi, la Commission s'est uniquement penchée sur le calcul des flux de radionucléides qui sortiront du COx à long terme mais la discussion de savoir si ces flux sont acceptables vis-à-vis de la protection de l'homme et de l'environnement relève de l'Autorité de sûreté et de radioprotection et sort du champ de l'évaluation de la Commission.

Pour ce qui concerne la phase d'exploitation, la Commission a choisi de ne pas traiter les installations de surface qui relèvent de mises en œuvre classiques dans l'industrie nucléaire. La partie souterraine de Cigéo s'apparente également à une installation nucléaire relativement classique, malgré quelques particularités, comme l'environnement souterrain et la durée d'exploitation séculaire. La Commission a donc seulement examiné les aspects de la période d'exploitation en lien avec la récupérabilité.

L'Andra est responsable de la conception de son ouvrage. Il n'appartient pas à la Commission de remettre en cause les choix de conception, mais d'évaluer les connaissances sur lesquelles s'appuie l'Andra pour ses calculs de performance du système de stockage.

### 3.3 Méthode d'évaluation de la Commission

Il est nécessaire de s'assurer que le niveau de connaissance atteint est suffisant pour permettre de concevoir l'installation Cigéo et d'évaluer ses performances au regard de sa capacité à isoler les déchets des phénomènes de surface et à limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère. Il convient de plus d'identifier les incertitudes résiduelles pour vérifier qu'elles sont compensées par des marges ou des hypothèses conservatives à un niveau suffisant.

La Commission s'est attachée à évaluer les fondements scientifiques sur lesquels l'Andra a construit son analyse de sûreté, en basant son évaluation sur l'examen de l'ensemble des documents du dossier de DAC. La Commission s'est également emparée, lorsque cela lui a semblé nécessaire, de la littérature scientifique internationale qui lui est associée (rapports, travaux d'intercomparaison), de publications scientifiques (articles dans des revues à comité de lecture) et de travaux de thèse commandités ou non par l'Andra. Des réunions de travail thématiques organisés avec l'Andra à la demande de la Commission ont permis d'approfondir un certain nombre de sujets. La Commission a mobilisé également une connaissance construite sur la durée par l'examen des documents émis au fil des années par l'Andra. La Commission a

en effet été instituée il y a plus de 30 ans pour suivre et évaluer les travaux scientifiques et technologiques concernant la gestion des déchets radioactifs et en particulier leur stockage. Cela lui a permis de suivre de façon continue les études et recherches pendant toute la durée du développement du projet de stockage profond de déchets radioactifs. Cette connaissance capitalisée renforce sa capacité d'évaluation du dossier de DAC présenté par l'Andra.

La Commission s'est particulièrement attachée à évaluer la qualité, la pertinence et la suffisance du socle scientifique au regard des besoins de la conception du stockage et de l'évaluation de sa sûreté après fermeture. Pour cela, elle a examiné les méthodes, les données et les processus concernant les points susceptibles d'affecter significativement les fonctions de sûreté à long terme du stockage, en particulier :

- la géologie et l'hydrogéologie de la zone où sera implanté le stockage ;
- les propriétés de la roche hôte (COx) et de ses encaissants ;
- les matériaux utilisés pour la réalisation des colis et des ouvrages ;
- la chimie des radionucléides, des matériaux employés et de leurs interfaces ;
- l'influence des variations climatiques sur l'environnement de Cigéo à différentes échelles de temps.

Après évaluation du socle scientifique, la Commission a examiné la manière dont il a été utilisé par l'Andra pour concevoir le projet Cigéo. La Commission a, pour ce faire, sélectionné les composants du stockage importants pour la récupérabilité des colis de stockage en exploitation et la sûreté à long terme de l'installation : colis de stockage, alvéoles, galeries, ouvrages de scellement. Elle a aussi examiné la pertinence de leur architecture. Pour chacun de ces composants et pour leurs dispositions relatives, la Commission a examiné et a vérifié si les connaissances scientifiques (compréhension des processus physico-chimiques, modélisation et paramètres associés, démarche de calcul et de simulation) étaient correctement établies et suffisantes, en particulier pour leur impact potentiel sur la qualité de la roche hôte.

Enfin la Commission a examiné comment la connaissance du comportement de ces composants traduite dans les modèles a permis de réaliser l'ensemble des calculs et simulations nécessaires à l'évaluation de sûreté.



## 4 Piliers scientifiques du dossier de DAC

### 4.1 Introduction

Ce chapitre s'emploie à décrire les différents piliers scientifiques nécessaires à l'évaluation des performances de Cigéo. Ce socle scientifique est essentiel pour apporter une base physique à la conceptualisation des scénarios de sûreté. Des processus thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques sont attendus dans le stockage sur des périodes temporelles transitoires, dont la date d'arrivée et la durée seront variables suivant le phénomène considéré. Leur maîtrise est nécessaire pour évaluer les performances du COx et en préserver les propriétés.

Les phénomènes thermiques résultent du dégagement de chaleur des déchets HA et de certains déchets MAVL. Un flux de chaleur se transmet au COx dès la mise en place des déchets dans les alvéoles. La persistance du phénomène est de quelques milliers d'années.

Les phénomènes hydrauliques sont associés aux transferts d'eau et de gaz. Ils interviennent à deux grands niveaux. Au sein des ouvrages et dans le champ proche, il est important de comprendre les phénomènes de désaturation et de resaturation en eau du stockage (en particulier dans l'environnement des alvéoles, des galeries, des liaisons surface-fond et des noyaux de scellement). Pendant plusieurs centaines de milliers d'années, deux mécanismes antagonistes interviennent : d'une part l'arrivée d'eau en provenance du COx, d'autre part la production d'hydrogène consécutive à la corrosion anoxique des aciers et à la radiolyse. L'étude de ces phénomènes est nécessaire pour évaluer les pressions de gaz autour des quartiers HA et MAVL, dont le maximum est attendu sur une période de 10 000 à 100 000 ans. Dans le champ lointain, l'hydraulique permet de caractériser les écoulements et les transferts d'eau dans le COx et les aquifères encaissants, qui est nécessaire pour la compréhension du transfert des radionucléides depuis les colis de déchets jusqu'à la biosphère au cours du prochain million d'années.

Les phénomènes physico-chimiques et la chimie jouent un rôle majeur dans la phénoménologie évolutive du stockage. Plusieurs systèmes chimiques sont présents à différentes époques de la vie du stockage. Les lois fondamentales de la chimie permettent de comprendre le comportement et les modes de transfert des radionucléides et toxiques chimiques depuis les colis jusqu'aux alvéoles et au COx, depuis la dégradation des aciers et bétons des colis de déchets (cause de perturbation saline et alcaline), qui interviendra après la fermeture, jusqu'à l'évaluation des transferts vers la biosphère. Ces phénomènes sont influencés par les transitoires thermique et hydraulique.

La mécanique des roches et des structures joue un rôle dans la conception et l'évolution du stockage. A court terme, pendant la phase d'exploitation d'une durée séculaire, la stabilité mécanique des ouvrages doit être assurée. A long terme, après fermeture du stockage, l'enjeu est de minimiser l'endommagement du COx consécutif à la ruine des colis et ouvrages. Les propriétés mécaniques du COx et des matériaux constitutifs de l'ouvrage sont essentielles pour caractériser leur comportement.

La constitution du socle scientifique destiné à comprendre et modéliser les phénomènes relevant de ces différents processus, qui sont souvent couplés, nécessite d'une part la

connaissance des lois qui gouvernent ces processus, d'autre part l'acquisition de leurs paramètres dans le contexte spécifique de Cigéo.

## 4.2 Géologie

Le secteur de Meuse Haute-Marne fait partie du Bassin de Paris, qui est un grand ensemble sédimentaire d'âge Mésozoïque (ère secondaire) à Cénozoïque (ère tertiaire) et qui repose sur le socle hercynien (ère primaire). Il est bordé à l'est par le massif des Vosges, au nord-est par le massif des Ardennes, au sud par le Morvan et le Massif central et à l'ouest par le Massif armoricain. Sa morphologie se présente sous la forme d'une cuvette, avec une puissance (épaisseur) plus importante des dépôts en son centre, qui atteint 3200 m à l'aplomb de la Brie. Les formations les plus récentes se trouvent à l'affleurement au centre du bassin, alors que les plus anciennes affleurent en auréoles sur les bordures.

La formation du Callovo-Oxfordien (COx) fait partie de cette pile sédimentaire du Bassin de Paris (*cf.* Annexe I). Il s'agit d'une formation d'argilites et de marnes, âgée d'environ 160 millions d'années, qui est constituée d'un ensemble de dépôts sédimentaires détritiques fins de type marin d'âge Jurassique. Elle affleure sur les bordures ouest, sud et est du Bassin de Paris.

### 4.2.1 Compréhension du contexte géologique

Le concept de l'Andra pour Cigéo fait reposer les deux fonctions fondamentales de sûreté (isoler les déchets et limiter le transfert) principalement sur les propriétés de la barrière géologique. La formation hôte (COx) a ainsi été étudiée en détail à différentes échelles par l'Andra dès l'origine des recherches sur le site de Meuse Haute-Marne. Pour ce faire, l'Andra a déployé depuis une trentaine d'années l'ensemble des méthodes disponibles pour l'investigation géologique :

- analyse bibliographique du contexte du Bassin parisien permettant de circonscrire la présence d'une roche-hôte argileuse potentielle à profondeur optimale (environ 500 m) sur le secteur de Meuse Haute-Marne ;
- inventaire et analyses des données des forages existants ;
- retraitement des profils sismiques 2D, hérités de la prospection pétrolière ;
- réalisation de forages spécifiques accédant à la couche argileuse et à ses encaissants, y compris des forages obliques destinés à recouper d'éventuelles structures verticales ;
- corrélations entre forages par la méthode de la stratigraphie séquentielle ;
- études structurales régionales et détaillées par sismique 2D (profils) et 3D (bloc) haute résolution ;
- examen détaillé de la couche argileuse et de son encaissant supérieur au laboratoire souterrain.

L'Andra a progressivement fait converger l'état des connaissances grâce à l'ensemble des études conduites selon ces méthodes. Elles ont permis d'acquérir les données confirmant que la couche du Callovo-Oxfordien possède des propriétés adaptées au stockage qui correspondent aux exigences du guide de sûreté de l'ASN relatif au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Ce résultat a été obtenu après une démarche scientifique sur plusieurs décennies qui a permis progressivement :

- de déterminer l'étendue d'une zone homogène de 250 km<sup>2</sup>, dite zone de transposition (ZT), cernée par des traits structuraux constitués à l'ouest par le système de failles de la Marne, à l'est par le fossé tectonique de Gondrecourt et au sud-ouest par une zone de fracturation diffuse,
- de vérifier de vérifier que la ZT est exempte de failles majeures (rejet supérieur à 10 m et extension déca kilométrique) et secondaires (rejet supérieur à 5 m et extension pluri-kilométrique), notamment de failles pouvant traverser le COx ;
- d'avancer qu'aucune ressource naturelle d'intérêt exceptionnel ne se trouve au droit de la ZT ;
- d'évaluer le risque sismique en notant que le site est placé dans une zone très peu active, ce qui est attesté par les données historiques, par la situation du Bassin parisien éloigné des sources d'orogénèse et par la régularité sédimentaire et structurale du COx dans la ZT. L'Andra calcule néanmoins les effets de séismes dimensionnants sur le stockage et les ouvrages de surface provenant du rejeu hypothétique des failles bordières de la ZT. Cet aléa sismique est également pris en compte pour les dispositions constructives ;
- de choisir une zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (ZIRA) de 30 km<sup>2</sup> qui est contenue dans la ZT où il est montré, par la sismique haute résolution, l'absence de failles de rejet supérieur à 2-4 m sur un domaine dont le volume permet d'implanter les ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo définissant ainsi la zone d'intérêt pour les ouvrages souterrains (ZIOS) d'environ 15 km<sup>2</sup> ;
- d'établir que le COx présente une épaisseur variant entre 140 m et 160 m dans la ZIOS et est constitué du bas vers le haut par une unité argileuse (UA), une unité de transition (UT) et une unité silto-carbonaté (USC). L'incertitude associée à la position du mur (c'est-à-dire à la base) et du toit (c'est-à-dire au sommet) de la formation, et en conséquence à son épaisseur, résulte essentiellement du modèle de vitesse de propagation des ondes sismiques, qui permet de transformer les cartes « temps double en position » en profondeur des réflecteurs sismiques. Il en résulte une incertitude d'une quinzaine à une vingtaine de mètres (pour un intervalle de confiance à 90%) sur le positionnement des réflecteurs identifiés au mur et à proximité du toit du COx. Ces deux incertitudes combinées mais interdépendantes, conduisent à estimer l'incertitude sur l'épaisseur du COx à une dizaine de mètres ;
- de proposer un modèle d'évolution géodynamique et climatique permettant de construire des scénarios de comportement à long terme du stockage.

#### 4.2.2 Objets structuraux dans le bloc 3D de la ZIRA

L'Andra a mené les études permettant de caractériser la structure géologique de la ZIRA sur 2 000 m d'épaisseur (depuis la surface jusqu'à la base du Trias). Pour cela, elle s'est appuyée sur un ensemble d'éléments : histoire géologique régionale, données de forages, profils sismiques 2D existants ou acquis spécifiquement sur la ZT, et campagnes de sismique 3D. Le maillage du bloc sismique 3D est de 10 m, ce qui est exceptionnellement dense. Ces données ont été traitées pour le dossier de DAC. Pour le bloc sismique 3D, ce traitement intègre le filtrage des données, l'identification et le recalage des réflecteurs aux données de forage (y compris un forage qui atteint la base du Trias), la comparaison avec les lignes sismiques 2D, et une correction des effets de surface.

Plusieurs anomalies sont mises en évidence par ces méthodes dans la pile sédimentaire, bien en-dessous du COx (*cf.* Annexe I.2). Des structures orientées dans la formation du Dogger, formant des linéaments d'orientation N120°E, sont identifiées au mur du Dogger qui contient l'aquifère présent sous la formation du COx. Ces structures ont été interprétées comme des corps récifaux, en cohérence avec les données de forages et les structures sédimentaires observées à l'affleurement à une trentaine de kilomètres plus à l'est. Ces corps récifaux se développent sur une trentaine de mètres d'épaisseur, au sein du Bajocien (vers 950 m de profondeur). Leur présence n'a pas d'impact sur les propriétés du COx.

Le réflecteur situé vers le sommet du Trias supérieur (1 400 m de profondeur) montre une structure dépressionnaire orientée nord-sud d'environ 20 m d'amplitude, d'un kilomètre d'extension suivant l'orientation est-ouest et suivie sur trois kilomètres jusqu'à l'extrémité nord de la ZIRA, alors que les réflecteurs sus-jacent (140 m au-dessus) et sous-jacent (320 m en dessous) sont bien continus. Cette structure est interprétée comme résultant de la dissolution précoce de faisceaux salifères avant le dépôt des couches sus-jacentes. Ce phénomène n'est plus observé à la base du Lias (profondeur 1 250 m), et n'a donc aucun effet sur le COx.

Une interprétation alternative serait l'existence de failles syn-sédimentaires orientées nord-sud, de rejet 20 m. Cette hypothèse est cependant peu compatible avec l'orientation ou les dimensions (relations entre longueur, extension et rejet) des failles du secteur, ou avec le contexte géodynamique (extension est-ouest) au Trias supérieur au moment de sa présupposée formation. Notons que dans l'hypothèse d'une faille, cette dernière serait très ancienne (plus de 200 millions d'années), d'extension verticale limitée (rejet de 20 m), et n'aurait jamais rejoué depuis.

Dans tous les cas, l'analyse des données de la géophysique montre une pile sédimentaire continue à partir de la base du Lias (Jurassique inférieur, profondeur 1 250 m), indiquant que le COx et ses formations encaissantes sont exemptes d'accident tectonique majeur de type faille à l'endroit de la ZIRA.

#### 4.2.3 Appréciation de la Commission

L'Andra s'est donné tous les moyens pour vérifier que les données acquises sur le COx à grande et à petite échelle sont bien représentatives de celles de la ZIRA, en évitant d'y accéder directement, afin de ne pas altérer les propriétés de confinement de la roche hôte. Cette garantie est fournie d'une part par de nombreuses mesures et l'analyse de leur variabilité spatiale autour de la ZIRA, d'autre part par la compréhension de l'histoire géologique de la formation du COx.

Le site apparaît très bien caractérisé par l'Andra sur le plan géologique, tant sur le plan sédimentaire que structural. La bonne connaissance de l'histoire géologique et des mécanismes (sédimentation, déformation) qui ont conduit à la géologie actuelle apporte des éléments permettant de recouper et rassembler dans un ensemble cohérent les informations obtenues à différentes échelles par des méthodes et mesures directes (par exemple observations de lames minces) ou indirectes (par exemple inversion de données géophysiques à l'échelle du secteur) de modélisation. La redondance et la cohérence des données entre les différentes échelles permettent de réduire l'incertitude sur les propriétés à grande échelle requises pour l'analyse des performances du COx.



Concernant les incertitudes résiduelles, la profondeur et l'épaisseur du COx avec ses incertitudes de  $\pm 19$  m et  $\pm 13$  m, respectivement (intervalle de confiance à 90 %), ont été déterminées et encadrées par la reconstitution de l'histoire géologique du Bassin de Paris à partir des études stratigraphiques, pétrographiques, géochimiques, tectoniques et géophysiques.

Compte-tenu de l'épaisseur du COx comprise entre 140 m et 160 m, l'incertitude sur sa géométrie apparaît suffisamment bien établie pour assurer la présence d'une garde argileuse saine d'au moins 50 m d'épaisseur de part et d'autre du stockage. L'Andra prend en compte la géométrie du COx, y compris ses incertitudes, pour la conception de Cigéo. Les incertitudes résiduelles seront encore réduites pendant la phase de construction initiale, avec l'accès direct à la couche par les puits et descenderies.

Des objets structuraux, situés dans la pile sédimentaire sous la formation du COx ont été reconnus et expliqués grâce à l'utilisation des meilleures techniques disponibles de traitement du signal géophysique (notamment correction des effets de la topographie de surface et de l'hétérogénéité des vitesses des ondes dans les zones altérées de surface). La Commission note que les structures identifiées à la base du Lias (1 400 m de profondeur) sont attribuées à des phénomènes de dissolution précoce de faisceaux salifères, qui ne se propagent pas au-delà de la base du Lias. L'interprétation alternative pour expliquer ces structures, qui ferait intervenir une faille dans le Trias (à plus de 1 400 m de profondeur, d'extension verticale limitée, et sans rejou depuis le dépôt du Lias il y a 200 millions d'années), est très peu vraisemblable. Dans les deux cas, ces structures n'ont aucun effet sur le COx.

## 4.3 Contexte hydrogéologique régional et de secteur

### 4.3.1 Démarche de l'Andra

Le référentiel géologique constitué par l'Andra permet de circonscrire le contexte hydrogéologique régional. En effet, dans un bassin tel que le Bassin parisien, la pile sédimentaire est suffisamment régulière dans ses grandes lignes pour que l'on puisse suivre sur l'ensemble de la structure des horizons lithologiques de nature relativement homogène. Les horizons calcaires ou gréseux qui permettent le stockage et la circulation de l'eau souterraine sont dits *aquifères*, tandis que les horizons argileux n'autorisent pas les écoulements et sont dits *semi-perméables* (selon le terme scientifique consacré). Les semi-perméables présentent donc un *a priori* favorable pour limiter la circulation de l'eau. C'est ce qui a motivé l'Andra à rechercher au sein de la pile sédimentaire, formant un système multicouche, une cible dans le Callovo-Oxfordien argileux en Meuse Haute-Marne, dont la profondeur et l'épaisseur étaient susceptibles de convenir.

À l'échelle du secteur de Meuse Haute-Marne, le schéma hydrogéologique multicouche se complique du fait de la présence de failles pouvant affecter, sur la verticale comme sur l'horizontale, la continuité hydraulique des formations. Des études structurales complétant les études sédimentaires ont donc été nécessaires.

Les études hydrogéologiques de l'Andra ont été menées à deux échelles :

- à l'échelle régionale du Bassin parisien pour cerner la circulation générale des eaux souterraines depuis les zones d'alimentation par les précipitations jusqu'aux exutoires

naturels et prévoir ainsi à grande échelle les trajets et les temps de transfert potentiels d'éléments en solution issus du stockage qui seraient émis aux limites du COx ;

- à l'échelle du secteur, autour de la ZT, pour détailler la structure des aquifères encaissant le COx, déterminer les exutoires locaux et identifier les paramètres permettant d'alimenter les modèles.

Les données relatives à l'hydrogéologie sont multiples et concernent :

- la géométrie (extension, profondeur, épaisseur) des formations aquifères et semi-perméables ;
- les paramètres hydrodynamiques des formations, essentiellement leur perméabilité et leur porosité ;
- le rôle hydraulique des failles sur l'écoulement ;
- la répartition des zones d'alimentation et les flux afférents ;
- la localisation des exutoires.

#### 4.3.2 Formations hydrogéologiques

Les formations aquifères présentes sur la zone de transposition sont, de la surface vers la profondeur, celles des calcaires du Barrois, des calcaires de l'Oxfordien, des calcaires du Dogger et des grès du Trias inférieur (aquifère GTI dit nappe des grès des Vosges) et supérieur, séparées par des formations ou niveaux semi-perméables.

Le COx est la formation semi-perméable qui sépare les aquifères de l'Oxfordien de l'aquifère du Dogger. Ces aquifères forment ainsi les encaissants sus- et sous-jacents immédiats du COx et ont pour cela été particulièrement étudiés par l'Andra. Ils affleurent sur la bordure est du bassin où ils se rechargent sous l'effet des précipitations et constituent de bons réservoirs pour la ressource en eau locale. L'Oxfordien est présent à l'affleurement à une vingtaine de kilomètres au sud-est de la ZT et le Dogger à une quarantaine. L'intérêt économique de ces aquifères diminue vers l'ouest en raison de l'augmentation de leur profondeur et, pour le Dogger, de la salinité. A titre d'exemple, la salinité atteint  $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  en ions chlorures à quelques kilomètres au nord-est de la ZIRA. L'écoulement souterrain s'effectue globalement en direction du nord-ouest vers le centre du Bassin parisien ; il est localement intercepté (pour l'aquifère du Barrois, qui est le plus superficiel) par la vallée de la Marne qui constitue un exutoire de secteur.

Les grès du Trias inférieur, que l'on trouve au droit de la ZT à une profondeur supérieure à 1900 m (forage EST433) n'ont pas d'intérêt du point de vue de la ressource en eau étant donné leur forte salinité ( $160 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  équivalent NaCl). Ils ont été étudiés pour leur potentiel géothermique dont il a été établi qu'il ne présente pas un caractère exceptionnel.

L'aquifère le plus superficiel au droit de Cigéo est l'aquifère des calcaires du Barrois. Il est alimenté par l'infiltration des eaux météoriques et les pertes des cours d'eau. Les écoulements se dirigent vers le nord-nord-ouest et sont drainés localement par les vallées de la Saulx, de l'Orge et de l'Ormançon (affluents de l'Ornain), et plus régionalement par la Marne. Les écoulements sont, dans le détail, fortement influencés par la topographie des plateaux et vallées, ainsi que par un réseau de drainage karstique superficiel bien développé dans les calcaires du Barrois. Les niveaux piézométriques sont sensibles aux précipitations et, en période de hautes eaux, des zones de débordement peuvent apparaître. Cela est pris en compte dans l'évaluation du risque inondation des constructions de l'installation nucléaire de base (INB).

Les aquifères sus-jacents du COx (aquifères du Barrois et de l'Oxfordien) seront traversés par les ouvrages de liaison surface-fond (puits et descenderies). La phase de creusement des liaisons surface-fond nécessitera le rabattement temporaire du niveau de l'eau dans l'aquifère du Barrois, ce qui n'aura pas d'impact hydraulique au delà de cette phase, car il sera étanché conformément à l'état de l'art des techniques minières. Son étanchéité pourra être vérifiée et entretenue pendant toute la durée d'exploitation. Un choix différent a été fait pour les eaux des aquifères de l'Oxfordien qui seront drainées jusqu'à la fermeture du stockage. Ce choix est similaire à celui fait pour le laboratoire souterrain, puisque les deux puits d'accès ont été conçus pour drainer les eaux des aquifères. Le rabattement occasionné par ce drainage sur la piézométrie de cet aquifère a été suivi, ce qui a permis de caractériser son comportement hydrodynamique à l'échelle du secteur pendant plusieurs années.

L'Andra poursuit ses travaux pour préciser les incidences qui seront présentées dans l'étude d'impact figurant dans le dossier révisé.

Le caractère semi-perméable du COx est confirmé par sa régularité géométrique, lithologique et sa très faible perméabilité (cf. 4.4.5). Le très fort contraste de perméabilité entre le COx et les aquifères encaissants (3 à 9 ordres de grandeur en fonction des horizons aquifères considérés) est responsable de l'indépendance des écoulements entre les aquifères du Dogger et de l'Oxfordien qui se manifeste par une différence de niveau piézométrique de quelques mètres entre ces deux aquifères sur l'étendue de la ZIRA. Ce gradient hydraulique est susceptible d'engendrer un très faible flux de drainance vertical entre le Dogger et l'Oxfordien. Ce flux est théoriquement capable de transporter des éléments en solution, mais il a été montré que cette voie de transfert est minoritaire vis-à-vis de la diffusion (cf. section 4.4).

Le profil de charge hydraulique au sein du COx indique une surpression d'environ 45 m (< 0,5 MPa). Ce phénomène est couramment rencontré dans les formations géologiques sédimentaires peu perméables. La surpression peut résulter de phénomènes de différentes natures : physiques (modifications récentes à l'échelle géologique des conditions hydrauliques aux limites aquifères, réduction de la porosité...), physico-chimiques (phénomènes de pression de disjonction) ainsi que de phénomènes de transferts couplés thermo-osmose et osmose chimique (cf. Annexe III.3). La question des surpressions hydrauliques dans les formations très peu perméables reste une question scientifique d'intérêt.

*Il existe une surpression hydraulique avérée dans le COx. Plusieurs phénomènes liés à sa très faible perméabilité peuvent contribuer à son explication sans que l'Andra ait pu jusqu'à présent identifier leur part relative.*

*L'impact de cette surpression, quelle qu'en soit la cause, est pris en compte de manière conservative dans les études de sensibilité sur les performances du stockage. Cette approche est suffisante pour l'évaluation de sûreté car elle est considérée majorante pour le calcul des flux de radionucléides dans le COx. La question présente néanmoins un intérêt scientifique certain et la Commission encourage l'Andra à poursuivre des recherches sur ce sujet.*

#### 4.3.3 Rôle des failles pour l'hydrogéologie en grand, à l'échelle régionale

Les failles majeures sont réputées être absentes de la zone de transposition car c'est précisément à partir du constat de leur absence que l'on a pu définir une zone de transposition. Les failles bordières de la ZT peuvent néanmoins jouer un rôle hydraulique à grande échelle. Le rôle de ces failles ne peut être apprécié par des observations directes, mais il peut être inféré en fonction de leur orientation par rapport à l'état des contraintes tectoniques (direction des contraintes majeure et mineure). Ainsi, les failles parallèles à la contrainte majeure peuvent constituer une direction de drainage des eaux alors que les failles de direction orthogonale peuvent former des barrières hydrauliques. La démarche de quantification du rôle des failles dans l'hydrogéologie régionale repose au final sur la modélisation de l'écoulement, intégrant ces indices, et validée à partir de la piézométrie locale (c'est-à-dire le niveau de l'eau dans les forages).

#### 4.3.4 Modèle hydrogéologique à grande échelle

Les données concernant l'hydrogéologie sont nombreuses et difficiles à acquérir ; elles ne peuvent être connues de manière homogène et exhaustive à toutes les échelles sur l'ensemble du bassin. Aussi, le recours à la modélisation qui garantit que les données sont cohérentes dans le respect des lois de l'hydraulique est essentiel pour parvenir à des évaluations quantitatives des transferts d'eau et des éléments en solution. En hydrogéologie, la grandeur caractéristique qui renseigne sur l'écoulement est la charge hydraulique, ou niveau piézométrique, que l'on peut mesurer en forage et dont la variation est suffisamment régulière pour permettre les interpolations entre les points de mesure (au niveau des forages). C'est cette grandeur que les modèles hydrodynamiques s'emploient à reproduire en vue de leur validation.

En matière de modélisation hydrogéologique, l'Andra a mené un travail progressif très important appuyé par plusieurs intervenants successifs (cf. Annexe II). L'Andra décrit et justifie les concepts, les méthodes et les outils utilisés pour modéliser les écoulements souterrains à l'échelle du Bassin parisien et à celle du secteur incluant la ZT du site Meuse Haute-Marne. L'intérêt de l'étude est d'identifier et quantifier, à l'échelle régionale puis à une échelle plus locale, les voies de transfert potentielles des radionucléides au sein des aquifères. Ces résultats sont essentiels pour paramétrer le volet transfert de l'analyse de sûreté. La démarche finale aboutit à un modèle de référence dit *intégré* (en ce qu'il permet de simuler un modèle régional et un modèle de secteur plus précis). Le modèle de référence s'emploie à reproduire la situation hydrogéologique actuelle et à mettre en évidence les exutoires de l'Oxfordien calcaire et du Dogger qui intercepteraient des écoulements ayant capté des flux de radionucléides en provenance du COx.

#### 4.3.5 Projections géomorphologiques et hydrogéologiques

Le modèle hydrogéologique est ensuite utilisé pour décrire l'évolution de l'écoulement souterrain sur un million d'années sous l'effet de mécanismes géodynamiques internes (tectonique, eustatisme) et externes (érosion). Les données tectoniques sont issues d'études sur les mouvements passés, basées sur le tracé des rivières et la datation des terrasses alluviales du secteur. Les données climatiques font l'objet de deux hypothèses enveloppe distinctes :

- le maintien du climat actuel, c'est-à-dire l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires selon les cycles de Milanković en poursuivant l'interglaciaire actuel pendant 50 000 ans pour tenir compte de la valeur de départ déjà élevée de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ;
- l'installation d'un climat sub-tropical persistant pendant 500 000 ans (en raison de perturbations anthropiques intenses sur le climat), suivi d'un retour aux alternances de périodes glaciaires et interglaciaires.

Ces conditions climatiques, couplées aux effets géodynamiques internes, sont traduites en vitesse d'érosion des plateaux et d'incision ou d'alluvionnement des rivières et également en présence ou non d'un pergélisol.

Cette évolution géomorphologique aura pour conséquence une accentuation du découpage du réseau hydrographique de drainage des calcaires du Barrois, et la mise à l'affleurement à l'échéance de 400 à 500 000 ans des calcaires de l'Oxfordien dans la vallée de l'Ornain qui deviennent un exutoire.

#### 4.3.6 Avis de la Commission

*Le contexte hydrogéologique régional est bien décrit grâce à la connaissance abondante de la géologie du Bassin de Paris et par le fait que la modélisation réalisée restitue bien les grandes lignes des écoulements. L'Andra a réduit progressivement les incertitudes en suivant l'évolution de l'état de l'art et en utilisant des outils capables de prendre en compte une phénoménologie de plus en plus détaillée. À l'échelle du secteur, des caractéristiques de l'écoulement qui étaient mal restituées par les premiers modèles ont conduit l'Andra à renforcer les mesures en créant de nouveaux forages et à analyser le rôle des failles régionales. C'est ainsi que les modèles ont permis de réviser le schéma d'écoulement dans le Dogger en introduisant un exutoire dans la Marne.*

*L'existence d'une surpression dans le COx par rapport aux aquifères sous- et sus-jacents est identifiée. Plusieurs phénomènes sont invoqués pour l'expliquer. La Commission note que chaque phénomène pris séparément peut générer des surpressions mais ne peut à lui seul expliquer celles observées dans le COx. L'Andra tient compte des incertitudes résultantes en adoptant des hypothèses conservatives sur l'origine des phénomènes et leurs paramètres lors de l'analyse des fonctions de sûreté assurées par les composants du stockage.*

*La présence du laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne dont les puits d'accès ont été volontairement conçus comme drainants a permis l'observation sur une trentaine d'années de l'influence de prélèvements d'eau sur les aquifères de couverture (calcaires de l'Oxfordien et du Barrois), ce qui constitue une information majeure sur le fonctionnement hydrodynamique pour renseigner l'étude d'impact des ouvrages de stockage, qui est une pièce réglementaire du dossier.*

*L'Andra s'est assurée que les besoins en eau, aussi bien pendant la phase de construction que la phase d'exploitation, seront couverts au moyen d'une ressource en eau locale*

*capable de satisfaire la demande. Toutes phases confondues, l'Andra prévoit qu'environ 80% des besoins totaux en eau soient couverts par les eaux recyclées sur site.*

*La prévision des conséquences de l'évolution géomorphologique et climatique repose sur la modélisation à long terme de plusieurs phénomènes (climat, érosion-sédimentation, tectonique). Elle est prise en compte en se référant à des situations enveloppe. Pour ce qui concerne la géodynamique, l'Andra s'est basée sur l'analyse des configurations géomorphologiques passées qui sont bien documentées sur le Bassin parisien, une structure géologique stable. Pour le climat, le maintien du climat actuel (avec ses cycles glaciaires), combiné à une surrection maximale, est retenu comme scénario extrême car cette hypothèse maximise les phénomènes érosifs.*

*Les aquifères ne font pas partie des composants du stockage, et ils ne remplissent pas à ce titre de fonctions de sûreté. Quelle que soit l'évolution géomorphologique sur le prochain million d'années, les écoulements dans les aquifères n'ont aucune influence sur les flux de radionucléides aux limites du COx, car ces derniers sont gouvernés par la diffusion dans le COx (cf. 4.3.6).*

*Le fonctionnement actuel des aquifères et ses projections dans le temps sont néanmoins utilisés pour le calcul des transferts de radionucléides depuis les limites du COx jusqu'aux exutoires, et pour le calcul de la dose qui est basé sur des scénarios convenus entrant dans le cadre de la sûreté.*

#### 4.4 Propriétés du COx

La connaissance des caractéristiques de la roche hôte est le préalable scientifique majeur du stockage géologique profond. Les propriétés du COx (cf. Annexe III) conditionnent le transfert de la chaleur et des fluides, la migration des espèces chimiques en solution et son comportement mécanique. Les paramètres contrôlant ces phénomènes ont été mesurés par l'Andra, pour Cigéo, à différentes échelles à partir de mesures en laboratoire de surface et *in situ*, en forage et dans le laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne. Les mesures ont porté sur la caractérisation du COx mais également de ses encaissants.

L'Andra s'est ainsi intéressée à l'ensemble des phénomènes et paramètres nécessaires à la compréhension du comportement thermo-hydro-mécano-chimique du COx dans son état naturel comme dans son état perturbé. La présence des ouvrages introduit en effet des perturbations dépendantes de mécanismes couplés qui seront examinées à la section 4.7.

##### 4.4.1 Composition minéralogique

La composition minéralogique influe sur plusieurs phénomènes. La teneur en argiles conditionne la perméabilité de la formation et la rétention des solutés cationiques. Les carbonates et le quartz donnent de la rigidité à la matrice rocheuse favorable à la bonne tenue des excavations. Les connaissances acquises par l'Andra sur la minéralogie du COx ont permis de distinguer sur la ZIRA trois unités continues, de bas en haut l'unité argileuse (UA), plus riche en minéraux argileux (environ 40%), l'unité de transition (UT), et l'unité silto-carbonatée (USC)

présentant une variabilité minéralogique et un enrichissement en minéraux carbonatés. La composition minéralogique a conduit à la préqualification du COx comme roche hôte.

#### 4.4.2 Données sismiques

Les données sismiques sont basées sur la mesure à haute résolution au sein de la formation des vitesses des ondes sismiques et permettent de détecter avec une incertitude de l'ordre de 2 m la position de marqueurs sismiques au sein de la formation qui révéleraient la présence de discontinuités lithologiques ou tectoniques. Leur traitement numérique permet également d'évaluer à grande échelle la rigidité de la formation (module d'Young dynamique) qui intéresse les phénomènes thermo-hydro-mécaniques (THM).

#### 4.4.3 Propriétés thermiques

La connaissance de la conductivité thermique et de la capacité calorifique est nécessaire pour prévoir l'évolution de la température au sein du COx sous l'effet du dégagement de chaleur, d'une durée séculaire, des déchets exothermiques (essentiellement les colis de déchets HA). Ces paramètres se mesurent assez facilement sur des échantillons.

Les mesures de l'Andra montrent que ces valeurs sont peu variables dans le COx et bien corrélées à la lithologie. La valeur moyenne de conductivité thermique pour l'unité argileuse est de  $1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , avec un écart type de 0,25 (cf. Annexe III.1). Le phénomène diffusif du transfert de chaleur peut ainsi être modélisé avec une bonne fiabilité. Cette modélisation est utile pour dimensionner les alvéoles et les quartiers HA en respectant des contraintes de température. Par exemple, une température maximale de 90°C est visée au contact entre les colis de déchets HA et le COx et l'élévation de température au niveau de l'entraxe entre deux alvéoles HA doit être suffisamment faible pour garantir l'absence de fracturation de la roche sous l'effet de la dilatation thermique différentielle entre l'eau porale et la matrice solide. La modélisation de ce dernier phénomène nécessite la connaissance de paramètres supplémentaires tels que le module d'Young et le coefficient d'expansion thermique de la roche qui ont été aussi mesurés par l'Andra.

#### 4.4.4 Porosité des différentes unités lithologiques

La porosité est une grandeur complexe car elle dépend des différentes interactions de l'eau et des solutés avec le milieu poreux.

La porosité totale, qui est le rapport entre le volume des vides et le volume de roche, renseigne sur le contenu total en eau lorsque la roche est saturée en eau. Elle est accessible par plusieurs méthodes expérimentales en laboratoire ou *in situ*. L'Andra retient en référence les valeurs obtenues par la mesure simultanée de la teneur en eau à 150°C et de la masse volumique des grains solides, qui fournit une valeur majorante car elle inclut l'eau liée contenue dans l'espace interfoliaire des argiles. Les valeurs apparaissent assez homogènes et augmentent avec la teneur en argiles de la roche. Une moyenne entre 15 et 18 % a été mesurée dans les trois unités argileuses du COx.

Un second type de porosité est la porosité accessible, qui correspond la fraction de la porosité totale dans laquelle une espèce chimique en solution peut pénétrer. Elle dépend de

mécanismes physico-chimiques se développant à l'échelle du pore, et varie avec la nature du soluté, la taille et l'organisation des pores. L'Andra a étudié ces interdépendances en laboratoire et *in situ* au laboratoire souterrain, au moyen d'expériences de diffusion de traceurs (anions, cations et eau tritiée HTO). La mesure de la porosité accessible, effectuée en même temps que celle du coefficient de diffusion est donc disponible pour différentes espèces chimiques. Les résultats montrent que la porosité accessible aux molécules d'eau tritiée est peu différente de la porosité totale.

Enfin, la porosité cinématique représente la fraction de la porosité totale dans laquelle l'eau porale peut circuler sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique. Elle dépend de la taille et de la connectivité des pores. L'Andra estime sa valeur dans le COx à 40 % de la porosité totale, soit 8 %. La porosité accessible et la porosité cinématique interviennent dans les équations du transfert des radionucléides au sein du COx pour caractériser respectivement les termes diffusifs et de convectifs.

#### 4.4.5 Perméabilité ou conductivité hydraulique

La perméabilité ou conductivité hydraulique est le paramètre essentiel du transfert convectif de l'eau dans le milieu poreux. Elle intervient comme paramètre de la loi de Darcy qui quantifie le flux d'eau en fonction du gradient de charge hydraulique. Sa mesure s'effectue sur des échantillons de roche ou *in situ* (forages et laboratoire souterrain) (*cf.* Annexe III.2).

Les différentes mesures de perméabilité réalisées par l'Andra s'accordent bien sur une loi log-normale unique, avec des valeurs comprises entre  $10^{-14}$  et  $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

La perméabilité est anisotrope, en raison de la stratification du dépôt sédimentaire, avec une valeur suivant la direction horizontale environ trois fois supérieure à la valeur suivant la direction verticale. La perméabilité en grand, c'est à dire à l'échelle de la formation du COx, est d'environ  $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Ces valeurs sont extrêmement faibles et confèrent au COx des propriétés exceptionnelles de confinement en limitant drastiquement les transferts d'eau.

#### 4.4.6 Diffusion des espèces chimiques en solution

L'Andra a accordé beaucoup d'attention à la composition chimique de l'eau porale et a développé des méthodes pour prélever des échantillons représentatifs d'eau dans le COx qui est un milieu extrêmement peu perméable. Les concentrations mesurées ont été confrontées avec succès à un modèle thermodynamique de spéciation aqueuse capable de décrire la composition chimique d'une eau en fonction de la minéralogie de la matrice poreuse avec laquelle elle est en contact. La compréhension de la chimie de l'eau a permis de reconstituer une eau porale artificielle en quantité suffisante pour différentes expérimentations comme la mesure des coefficients de diffusion.

La diffusion des espèces chimiques dans l'eau libre ou contenue dans un milieu poreux est un phénomène physique bien connu, dû à l'agitation thermique qui uniformise au cours du temps les concentrations des espèces, dans l'espace qui leur est accessible. La diffusion se manifeste macroscopiquement par leur déplacement, qui est mesurable. Elle est décrite par la loi de Fick, dont le paramètre est le coefficient de diffusion.



Pour ses évaluations de sûreté, l'Andra a adopté un modèle de diffusion généralisé basé sur la notion de coefficient de diffusion effectif ( $D_e$ ) d'une espèce et sur la porosité accessible. Dans ce modèle, le coefficient de diffusion effectif est défini par rapport au coefficient de diffusion de l'espèce dans l'eau pure ( $D_0$ ) par la relation  $D_e = D_0 \times F$ , avec  $F$  le coefficient de mobilité relative, inférieur à 1, qui traduit le ralentissement des espèces dû à la géométrie et à la tortuosité de l'espace poral et aux interactions avec les surfaces minérales. Cette approche est validée par une explication de nature microscopique.

Le coefficient de diffusion effectif est directement mesurable pour une espèce chimique donnée grâce aux expériences de diffusion de traceurs. L'Andra a effectué des mesures sur échantillons en laboratoire et a vérifié les valeurs *in situ* par des expériences en laboratoire souterrain dont une menée sur 4 ans (*cf.* Annexe III.4). En se basant sur des expériences réalisées avec une espèce de charge nulle (molécule d'eau tritiée HTO), des espèces anioniques représentatives des radionucléides les plus mobiles ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ) et des espèces cationiques (notamment  $\text{Cs}^+$  et  $\text{Na}^+$ ), il a été constaté en règle générale que les anions diffusent moins vite que l'eau tritiée, qui diffuse elle-même moins vite que les cations. Le coefficient de mobilité relative  $F$  est de l'ordre de 0,01 dans l'unité argileuse du COx pour la molécule d'eau tritiée, c'est-à-dire qu'elle diffuse 100 fois plus lentement dans l'argilite du COx qu'elle ne le ferait dans un volume d'eau libre.

Le coefficient de diffusion effectif, pour les molécules d'eau tritiée HTO, est de l'ordre de  $2,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et pour les chlorures de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . S'agissant des cations, des mesures ont été obtenues pour  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  et indiquent des coefficients de diffusion effectif 2 à 8 fois plus élevés que celui de l'eau tritiée. Par ailleurs, on dispose de nombreuses données de diffusion de radionucléides dans l'eau pure à partir desquelles on peut remonter au coefficient effectif par analogie chimique de comportement.

L'Andra s'est également intéressée aux traceurs naturels dans le COx ( $\text{Cl}^-$ , He, isotopes stables de l'eau) avec des résultats assez peu significatifs étant donné les incertitudes sur l'origine de ces traceurs.

#### 4.4.7 Rétention des espèces chimiques cationiques

Certaines espèces chimiques, principalement les cations, peuvent être retenues par la matrice solide, en particulier par sorption sur des sites à la surface des minéraux, ce qui peut fortement influencer leur migration. Cet effet est d'autant plus important que la teneur en minéraux argileux dans la roche est élevée. Compte tenu de la lenteur des déplacements par diffusion, le mécanisme chimique d'interaction peut être considéré comme instantané et réversible. Les modèles numériques couplés chimie-transport prennent en compte rétention et mécanismes de transport (diffusion et convection) pour modéliser la migration des espèces chimiques.

Une approche plus simple que cette modélisation couplée consiste à prendre en compte les phénomènes de rétention dans les modèles de transport hydro-dispersif via un coefficient de retard  $R$  par rapport à la vitesse de déplacement de la molécule d'eau tritiée. On peut démontrer que les deux approches sont équivalentes sous certaines conditions. Cette formulation est majorante vis-à-vis des temps de transfert au sein du milieu géologique, car l'effet est simplement de ralentir et non de retenir définitivement les radionucléides. Elle présente l'avantage de conduire à une modélisation simple car le coefficient de retard dépend uniquement de la porosité accessible et du rapport entre la concentration massique de soluté

fixé sur la matrice solide et sa concentration volumique dans l'eau porale. Ce rapport est appelé coefficient de distribution ( $K_d$ ), il est exprimé en  $L \cdot kg^{-1}$ . S'agissant de la molécule d'eau tritiée, le  $K_d$  est nul et le coefficient de retard  $R$  vaut 1.

Il existe des bases de données internationales rassemblant des valeurs de  $K_d$  pour différents milieux et différents radionucléides (cf. 4.6.4). Les valeurs de  $K_d$  pour les actinides sont très élevées ; c'est pourquoi les calculs de transfert de l'Andra qui prennent en compte les incertitudes sur les paramètres de diffusion montrent qu'ils ne migrent pas hors du COx sur un million d'années.

#### 4.4.8 Comportement mécanique du COx

Les propriétés mécaniques du COx concernent plusieurs phénomènes naturels ou induits par la présence du stockage.

La formation est soumise à un état de contrainte naturel. L'Andra a réalisé des mesures sur les différents forages de reconnaissance de la ZT et a identifié un état de contrainte uniforme en compression dans le COx (cf. Annexe I.4). La contrainte principale horizontale majeure ( $\sigma_H$ ) est orientée  $N153^\circ E \pm 11^\circ$  et vaut en moyenne 14,5 MPa à 500 m de profondeur ; la contrainte principale horizontale mineure ( $\sigma_h$ ), qui lui est orthogonale, est de 12 MPa, ce qui est conforme à ce que l'on peut attendre sur le Bassin parisien. Il existe une légère anisotropie (entre 1,2 et 1,3) bien que ce type de roche soit capable de fluer. Pour mémoire, la contrainte verticale à cette même profondeur s'élève à 12 MPa.

L'état de contrainte naturel joue un rôle de premier rang sur la nature et l'extension de la zone endommagée qui apparaît lorsque l'on réalise une excavation au sein du COx. Pour définir la conception des ouvrages, l'Andra a analysé en détail la géométrie et les caractéristiques de la zone endommagée mécaniquement par le creusement de galeries de différentes orientations dans l'unité argileuse de son laboratoire souterrain. Autour de l'excavation, deux zones de fracturation tridimensionnelle apparaissent au creusement, dont la propagation dépend de l'orientation de l'ouvrage par rapport à l'état de contraintes *in situ* :

- une zone de fractures en extension connectées (ZFC) qui se développe depuis la paroi des ouvrages ;
- au-delà, une zone de fractures discontinues (ZFD) de cisaillement subparallèle à la paroi et faiblement connectées entre elles, dite zone de fracturation discrète.

L'extension de la zone fracturée reste proportionnelle au rayon  $R$  de la galerie creusée. Dans le cas de l'orientation de la galerie suivant la contrainte horizontale mineure, la valeur médiane de l'extension de la ZFC varie entre  $0,2 \times R$  (au parement) et  $0,4 \times R$  (au radier), tandis que pour la ZFD elle varie entre  $0,2 \times R$  et  $1,0 \times R$ , respectivement. La zone fracturée se compose alors de fractures de traction puis de fractures de cisaillement, qui se superposent en pelure d'oignon. Pour des ouvrages orientés selon la contrainte horizontale majeure, l'extension de la ZFC n'excède pas  $0,3 \times R$  (au parement) et pour la ZFD elle est au maximum de l'ordre de  $R$ . Les fractures s'organisent en chevrons successifs.

Ainsi, pour limiter l'endommagement des argilites, il est préférable d'implanter les alvéoles de stockage dans la direction de la contrainte horizontale majeure et, par conséquent, les galeries d'accès seront orientées dans la direction de la contrainte horizontale mineure.

Une conséquence majeure de la zone endommagée mécaniquement est la présence de fractures qui modifient en l'augmentant la perméabilité locale du COx sur une extension ne dépassant pas quelques mètres. Ce phénomène n'est pas de nature à compromettre la capacité de confinement du COx, dans la mesure où on s'assure qu'il subsiste une garde d'argilite saine suffisante au-dessus et en dessous de la zone endommagée par le creusement des galeries et alvéoles. Il peut cependant être une cause de contournement par l'eau des scellements des ouvrages souterrains après fermeture et resaturation du stockage. Des expériences dans le laboratoire souterrain ont montré que la perméabilité pouvait augmenter d'un facteur 100 dans la zone endommagée mais qu'il se produisait une cicatrisation des fractures lorsqu'elles se retrouvaient sous contrainte en présence d'eau, entraînant un retour des valeurs des perméabilités aux valeurs initiales du COx. De surcroît, l'Andra étudie des dispositions constructives particulières pour intercepter ces zones de circulation potentielles et les remplacer par un matériau très imperméable.

La connaissance du comportement hydro-mécanique du massif rocheux dans le temps est également essentielle pour dimensionner le mode de soutènement et de revêtement des ouvrages souterrains qui doivent rester fonctionnels sur un temps séculaire pour satisfaire les contraintes d'exploitation et de réversibilité. La zone endommagée induit un chargement mécanique anisotrope rapide puis résiduel sur les ouvrages, autrement appelé convergence, dès leur mise en place. L'Andra a réalisé au laboratoire souterrain de très nombreuses mesures de convergence en variant les diamètres, le mode de creusement, la nature des revêtements et l'orientation des galeries par rapport aux contraintes naturelles. Les mesures de déformation du COx en champ proche des excavations ont révélé le rôle hydro-mécanique primordial de la zone fracturée sur la tenue des ouvrages. Selon l'orientation des galeries, l'intensité de la convergence varie : si la galerie est orientée suivant la contrainte horizontale mineure, les déplacements verticaux peuvent atteindre 15 à 20 cm en 7 ans, alors que pour l'orientation suivant la contrainte horizontale majeure les déplacements les plus importants (horizontaux) se stabilisent à une valeur inférieure à 6 cm dès 4 ans. L'Andra a ainsi mis en évidence le comportement différé par fluage de la roche qui est bien représenté par une loi de type Lemaître. L'ensemble de ces données a servi à valider les modélisations du comportement hydro-mécanique du COx nécessaires au dimensionnement des excavations.

Une description fine des couplages entre la thermique, la mécanique et l'hydraulique est également nécessaire pour s'assurer de l'absence de fracturation du COx pendant la phase thermique engendrée par les colis de déchets HA. Sur la base d'expériences en laboratoire souterrain, l'Andra a recherché quel était le meilleur modèle conceptuel permettant de représenter ces couplages et l'a utilisé pour dimensionner les quartiers HA. Ce point est abordé plus spécifiquement à la section 4.11.

#### 4.4.9 Avis de la Commission sur les propriétés du COx et sur leur préservation

*L'analyse conduite par la Commission montre que les travaux réalisés par l'Andra, basés sur des expérimentations et des simulations numériques, permettent d'aboutir à une connaissance robuste et précise des propriétés du COx, lesquelles sont synthétisées ci-dessous.*

*Les caractéristiques essentielles du COx sont sa perméabilité extrêmement faible et ses propriétés structurales et chimiques bien comprises qui permettent de conclure que les transferts d'espèces chimiques se feront essentiellement par diffusion. Cela minimise les conséquences des incertitudes qui peuvent subsister sur la valeur de la perméabilité puisque dans les calculs du flux de radionucléides émanant du COx le terme diffusif sera prédominant sur le terme convectif.*

*Le fait que l'écoulement convectif à travers le COx soit faible est également favorable sur le plan hydrogéologique car il préserve l'indépendance des écoulements locaux entre les aquifères sus-jacents et sous-jacents, ce qui simplifie la modélisation de cet écoulement.*

*Le transfert des espèces cationiques dans le COx est fortement ralenti, voire nul en raison de leur interaction avec la matrice argileuse. Le transfert diffusif des espèces anioniques est ralenti du fait du phénomène d'exclusion anionique (cf. Annexe III). Ces propriétés favorables sont les fondements de la fonction de confinement du COx.*

*Les propriétés relevant de la thermique ou de la mécanique ont fait l'objet de caractérisations détaillées. Elles interviennent dans le choix des options de conception du stockage et dans la démonstration que les propriétés de confinement sont préservées.*

*Le comportement mécanique du COx a fait l'objet d'une caractérisation poussée. L'analyse du développement de zones fracturées induites par le creusement a guidé le choix du positionnement des galeries suivant les contraintes horizontales mineure et majeure. Il a été validé que leur réalisation n'induisait pas de fracturation au-delà d'une zone équivalente au rayon des galeries, et ne perturbait pas les propriétés du COx. Il a également été établi que le COx exerçait une convergence sur les ouvrages dont le dimensionnement des structures devra tenir compte.*

## 4.5 Matériaux

De très nombreux matériaux seront nécessaires pour répondre aux besoins de construction, d'exploitation et de fermeture de Cigéo. Ils sont soigneusement sélectionnés pour répondre à un cahier des charges qui intègre des aspects fonctionnels et sécuritaires. L'élaboration de certains matériaux a nécessité d'importantes études pour optimiser leur composition en vue d'atteindre les propriétés spécifiques attachées à leur usage et à la fonction de confinement.

Dans cette partie, l'analyse de la Commission s'est portée sur les matériaux destinées à assurer les fonctions de sûreté en exploitation et à long terme. Les matériaux dont l'usage est temporaire pour la réalisation de la structure, la manutention des colis ou encore ceux associés à des équipements secondaires (descenderie, ventilation, etc.) ne sont pas examinés.

#### 4.5.1 Démarche scientifique d'acquisition des connaissances

De nombreux résultats sur la caractérisation et l'élaboration des matériaux ont été acquis au travers des différents programmes de recherche menés par l'Andra. A l'issue des différentes études, l'Andra a regroupé les matériaux au sein de référentiels.

Il existe un référentiel pour chaque famille de matériaux. Bien que les différentes familles de matériaux puissent se destiner à plusieurs usages, une méthodologie commune est appliquée dans les études. Pour chaque usage, la méthodologie consiste dans un premier temps à décrire les effets de la nature des différents constituants, de leurs proportions et des conditions de fabrication sur la microstructure et les phases minéralogiques du matériau. Ces dernières exerçant un rôle sur les propriétés physico-chimiques du matériau, ce sont indirectement les propriétés thermo-mécaniques et de transfert des radionucléides qui sont considérées. Ainsi, sur la base de ces connaissances scientifiques fondamentales, le choix de chaque matériau est déterminé pour l'usage spécifique auquel il est destiné. Puis, la durabilité du matériau, c'est-à-dire le maintien de ses propriétés dans les conditions environnantes pendant sa durée de service, est abordée : pour chaque usage, le bilan des sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques (parfois couplées) est dressé, et l'évolution des propriétés des matériaux constitutifs de chaque composant du stockage est examiné. Une attention particulière est portée sur la réactivité aux interfaces entre les matériaux.

Des lois de comportement sont établies sur la base de ces analyses et couplées pour développer des modèles numériques. Les données expérimentales acquises en laboratoire alimentent la modélisation du comportement à long terme dans les conditions environnantes attendues, et permettent ainsi de valider ou au besoin modifier le choix ou la composition des matériaux.

Outre le maintien des propriétés physico-chimiques dans les conditions de fonctionnement, le choix des matériaux découle de compromis entre exigences économiques, techniques et technologiques (faisabilité de mise en œuvre, sûreté d'exploitation), et disponibilité et régularité d'approvisionnement des matières premières sur toute la durée d'exploitation de Cigéo. Certains matériaux sont choisis parmi ceux déjà disponibles sur le marché, d'autres sont spécifiquement développés pour satisfaire aux exigences particulières du site de stockage. L'Andra poursuit ses recherches sur les matériaux (cf. 4.5.6).

*La démarche à très large spectre développée par l'Andra permet de disposer des connaissances de base sur les caractéristiques essentielles (notamment mécaniques, thermiques, physico-chimiques) et la durabilité d'une vaste gamme de matériaux.*

*L'acquisition et la disponibilité des données sur les matériaux permet à l'Andra d'appuyer ses choix de conception, suivant la fonction requise pour le matériau et les sollicitations auxquelles il sera soumis. La démarche est continue et la bibliothèque de matériaux s'enrichit progressivement, mettant à jour certaines caractéristiques, augmentant les gammes de formulation et intégrant de nouveaux matériaux (y compris parfois très prospectifs).*

#### 4.5.2 Aciers

Les aciers ont été sélectionnés pour constituer des éléments du stockage dont la fonction est d'assurer soit la tenue mécanique, soit l'étanchéité. Les aciers ont été étudiés sous différentes sollicitations mécaniques et chimiques, y compris couplées, afin de qualifier leur comportement et quantifier leur évolution dans les conditions du stockage.

La corrosion reste la préoccupation majeure liée à l'emploi des aciers, puisque qu'elle limite la durabilité des éléments métalliques. Après fermeture du stockage, le milieu sera dépourvu d'oxygène. La corrosion anoxique produit de l'hydrogène (dihydrogène,  $H_2$ ). De ce fait, les nuances d'acier sont sélectionnées pour limiter les effets de la corrosion. Les choix sont faits selon le meilleur compromis entre capacités technologiques démontrées, propriétés mécaniques et chimiques, coût maîtrisé et disponibilité des matériaux.

Pour le chemisage des alvéoles HA, le choix s'est porté sur une nuance d'acier à carbone non allié, qui présente un mode de corrosion généralisée. Ce type de corrosion uniformément répartie et homogène présente l'avantage d'être plus prédictible et donc facile à modéliser, que les corrosions localisées. On peut ainsi dimensionner l'épaisseur des composants pour garantir le maintien d'une épaisseur saine suffisante pour assurer les fonctions de sûreté et de récupérabilité sur les périodes considérées. Par ailleurs, l'acier du chemisage des alvéoles HA doit présenter une conductivité thermique assez élevée pour favoriser la dissipation du flux thermique issu des colis primaires HA au travers du COx.

Les galeries, puits, radiers et alvéoles MAVL sont réalisés en béton armé ou béton projeté qui peut être soit boulonné soit revêtu de cintres métalliques. Le ferrailage du génie civil (voûtes et radiers) ainsi que les boulons représentent environ la moitié de la quantité totale d'acier utilisée sur l'ensemble d'un alvéole. Une autre solution envisagée, liée à la démarche de progressivité, est le remplacement du béton armé par du béton fibré dans les parties structurelles les plus sollicitées mécaniquement. Plus résistant mécaniquement, il permet de s'affranchir du renforcement par des armatures métalliques.

#### 4.5.3 Matériaux argileux

Des matériaux argileux sont identifiés pour constituer les noyaux des scellements et les remblais. En plus d'une très bonne compatibilité chimique avec les argilites du COx, ces matériaux sont très peu perméables à l'eau, et donc participent au confinement des radionucléides.

Pour constituer les scellements, une argile gonflante sodo-calciue de type bentonite MX80 au comportement mécanique plastique à l'état saturé, est retenue. Elle présente des pressions de gonflement pouvant être très élevées et ajustables en fonction de la densité sèche obtenue par compactage à la mise en place. Les études ont permis de dégager, en conditions saturées et non saturées (en eau), les grandes lignes des comportements hydraulique-gaz et hydro-mécanique de cette argile, ainsi que des matériaux obtenus par mélange avec des additifs. De plus, ce type d'argile a une capacité de déformation et de cicatrisation hydraulique qui permet d'accommoder les sollicitations hydro-mécaniques.

Dans les études pour la conception de Cigéo, il est apparu que la production d' $H_2$  par corrosion anoxique et par radiolyse de l'eau et des matières organiques pouvait générer des pressions de gaz importantes. Dès lors, l'Andra a travaillé sur la possibilité d'évacuer partiellement cette

pression de gaz au travers des scellements : il s'agissait donc trouver un matériau imperméable à l'eau mais passant au gaz. L'Andra a qualifié un tel matériau constitué d'un mélange d'argiles gonflantes et d'une quantité déterminée de sable (autour de 60 %). La perméabilité au gaz, pilotée par le squelette granulaire de ce matériau saturé, garantit la fonction passante au gaz pour des pressions d'entrée de 1 à 2 MPa, alors que sa conductivité hydraulique reste inférieure à  $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , limitant ainsi fortement la circulation de l'eau.

Les travaux de creusement de Cigéo généreront d'importants volumes de matériaux excavés, notamment les argilites du COx. Ils seront entreposés dans des verses. Pour limiter l'impact environnemental, il est envisagé de réutiliser ces argilites pour le remblaiement des galeries. Elles seraient broyées, éventuellement mélangées à des additifs comme des argiles gonflantes, de la chaux ou du sable puis compactées pour diminuer les vides résiduels, et par conséquent leur compressibilité. On parle alors d'argilites remaniées. Leur comportement physico-chimique est largement caractérisé en fonction de la durée et des conditions d'entreposage, de la granulométrie, du mode de mise en place et de l'emploi d'additifs.

*La Commission note avec intérêt la proposition de réutilisation des argilites excavées pour le comblement des galeries. Le plan de gestion des argilites en surface s'inscrit dans le plan de gestion des verses et tient compte de leur évolution chimique et mécanique en vue de leur réutilisation.*

#### 4.5.4 Matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires (bétons, mortiers ou coulis) sont fabriqués avec des gammes de constituants variées et facilement disponibles. Leur mise en œuvre est simple et robuste. Un important retour d'expérience sur l'utilisation de ces matériaux est disponible dans le domaine du génie civil conventionnel ou nucléaire.

Les propriétés physico-chimiques des matériaux cimentaires peuvent être adaptées en optimisant leur formulation (i.e., la nature des constituants et leurs proportions). Il est ainsi possible de développer un matériau adapté à une exigence spécifique d'utilisation et pour des conditions environnementales particulières.

Pour toutes ces raisons, les matériaux cimentaires ont été sélectionnés pour réaliser la majeure partie des ouvrages du stockage : puits, descenderies, galeries principales et secondaires, alvéoles MAVL et remplissage des vides à l'extrados des alvéoles HA.

Dans les conditions de stockage, les matériaux cimentaires subissent des sollicitations thermiques liées à l'exothermicité de certains colis de déchets, des sollicitations mécaniques induite par le COx (déformations différées due au fluage des argilites) et des sollicitations chimiques au contact de l'eau de la formation hôte. La durabilité des matériaux cimentaires formulés a donc été validée en considérant l'impact de la température, le comportement mécanique différé et les dégradations chimiques (hydrolyse, carbonatation et attaque sulfatique). De plus, la corrosion des armatures en acier dans le béton est étudiée.

Ces matériaux cimentaires sont adaptés aux contraintes liées à leur mise en place. Le soutènement des structures du génie civil est prévu en béton, dont le type est conditionné par le mode de creusement et l'usage : voussoirs préfabriqués en béton C60/75 (classe de résistance en compression de 60 MPa), ou cintrage et boulonnage recouvert par du béton



projeté. Le béton armé des radiers, voiles, et parois de radioprotection de fond d'alvéole est coulé en place.

Le matériau de remplissage de l'espace annulaire (MREA) des alvéoles HA est un exemple d'adaptabilité des matériaux cimentaires aux besoins. Destiné à être injecté entre l'extrados du chemisage des alvéoles HA et le COx, ce coulis doit limiter le volume de vides résiduels. Il permet également la neutralisation de l'acidité résultant de l'oxydation des pyrites contenues dans les argilites, qui provoquerait la corrosion du chemisage en acier pendant la phase d'exploitation où le contact avec l'oxygène de l'air est possible. Le MREA doit donc être suffisamment fluide pour permettre un remplissage optimal du vide annulaire, mais surtout constituer une réserve alcaline suffisante à la neutralisation acide pendant le transitoire thermique. Pour satisfaire le critère d'alcalinité, des matériaux hydrauliques et pouzzolaniques ont été additionnés à un ciment ordinaire Portland (CEM I), tandis que l'ajout d'argile sodocalcique (bentonite) contrôle la demande en eau. Cette première solution a été testée en laboratoire et à plus grande échelle au laboratoire souterrain. La méthodologie de formulation permettant de répondre aux exigences a été validée. D'autres formulations utilisant des ciments à ajouts pouzzolaniques (de type CEM III) ont été par la suite qualifiées. Leur validation démontre la capacité de l'Andra à adapter la composition du MREA le moment venu et en fonction des matières premières disponibles, sur les bases d'une méthode éprouvée.

#### 4.5.5 Avis de la Commission sur l'étude des matériaux

*Le corpus d'études réalisées par l'Andra pour sélectionner, formuler, caractériser le comportement des matériaux lui a permis d'acquérir les données suffisantes pour la modélisation à long terme de l'évolution du site de stockage.*

*L'analyse par la Commission de la méthodologie adoptée par l'Andra pour le choix, la caractérisation multiphysique et à différentes échelles (essais en laboratoire à petite et grande échelle et essais in situ dans le laboratoire souterrain) pour alimenter la modélisation du comportement des matériaux sélectionnés confirme la robustesse de la démarche. Cette démarche repose notamment sur un processus itératif qui permet d'adapter les caractéristiques des matériaux suivant les fonctions particulières visées et les sollicitations de chaque élément du stockage.*

*Bien que l'Andra ait choisi des matériaux relativement courants, la disponibilité des matières premières des matériaux identifiés pourrait changer au cours de la période d'exploitation. Par exemple, la disponibilité du clinker (constituant majoritaire des ciments) est remise en question par la transition énergétique : sa fabrication à très haute température est basée sur une réaction chimique produisant des quantités importantes de CO<sub>2</sub>. De même, la disponibilité de matériaux pouzzolaniques, co-produits industriels comme les cendres volantes et laitiers de hauts fourneaux, est remise en question par les évolutions prévisibles des procédés de fabrication. Pour réagir de façon efficace à l'évolutive des disponibilités, l'Andra prévoit de poursuivre des travaux d'accompagnement scientifique pour ménager une certaine flexibilité dans les choix de matériaux au moment opportun. Si une modification de matériau devait être opérée, sa qualification serait nécessaire. Des études sur des matériaux prospectifs sont d'ores et déjà conduites.*



#### 4.5.6 Matériaux innovants prospectifs

La version actuelle du plan directeur pour l'exploitation de Cigéo prévoit sa fermeture définitive vers 2170. D'ici là, le stockage sera développé de façon incrémentale et déployé progressivement, offrant notamment la possibilité dans le futur d'intégrer les optimisations rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour d'expérience, dans le respect des objectifs de sûreté en exploitation et après fermeture.

À titre d'exemple, l'Andra continue d'explorer trois voies prospectives concernant les matériaux :

- la substitution des aciers par des matériaux non métalliques afin de limiter significativement la production d'hydrogène par corrosion : conteneurs en céramique, armature et fibres en résine pour le béton armé ;
- la valorisation des argilites excavées : matière première pour des géopolymères en remplacement des matériaux cimentaires.

*La Commission recommande la poursuite des actions de recherche conduites sur des matériaux innovants. Ces recherches prospectives peuvent alimenter des évolutions du concept si elles s'avèrent utiles.*

### 4.6 Chimie des radionucléides et composants de Cigéo

#### 4.6.1 Propriétés chimiques

Les radionucléides présents dans les déchets HA et MAVL sont formés dans le combustible nucléaire par fission, captures neutroniques ou décroissances radioactives. On distingue essentiellement les radionucléides « produits de fission » isotopes d'éléments chimiques classiques produits par la réaction de fission, et les radionucléides transuraniens produits par capture neutronique, notamment le plutonium et les « actinides mineurs », dénommés « mineurs » car ils sont très minoritaires par rapport à l'uranium et au plutonium. Le retraitement du combustible usé (CU) pour en extraire le plutonium et l'uranium laisse comme déchets ultimes d'une part des solutions concentrées en produits de fission et en actinides mineurs qui sont conditionnées dans une matrice de verre borosilicaté et constituent les déchets HA, d'autre part des effluents et des matériaux solides contaminés qui constituent les déchets MAVL conditionnés dans différents types de colis. On les retrouve donc tous dans les colis primaires de déchets HA et MAVL, en quantité plus ou moins importantes. Ce sont les déchets HA qui concentrent 95 % de la radioactivité

Les propriétés chimiques générales de ces radionucléides sont connues des radiochimistes. Leurs propriétés particulières, qu'il est nécessaire de connaître pour les conditionner en colis primaires et pour étudier la robustesse de ces colis, ont été étudiées depuis 50 ans. Ainsi, les bases de données sur les propriétés des radionucléides impliqués dans la gestion des déchets HA et MAVL couvrent aujourd'hui toutes les situations chimiques et géochimiques de Cigéo et son environnement et permettent de conduire les analyses de performance.

Le comportement des différents radionucléides à vie longue présents dans les colis de déchets a été étudié en détail par l'Andra tant pour déterminer leurs formes chimiques prépondérantes

(spéciation) que pour caractériser leur capacité à migrer (diffusion, rétention), ce dans l'objectif d'évaluer leur contribution potentielle à l'impact d'un stockage. Parmi tous les radionucléides à vie longue contenus dans les déchets HA ou MAVL, les radionucléides anioniques comme  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , ou  $^{79}\text{Se}$ , produits de fission émetteurs beta plus ou moins radiotoxiques, joueront un rôle important. Pour l'iode et le chlore, les anions sont simples ( $\text{I}^-$  et  $\text{Cl}^-$ ) dans toutes les conditions du stockage. Les formes anioniques sous lesquelles le sélénium peut se trouver sont polyatomiques et dépendent des conditions redox (oxydantes ou réductrices) locales. L'eau porale du COx sain est réductrice et la forme stable du sélénium est  $\text{HSe}^-$ . Les anions ont très peu d'interactions avec les composants du stockage et par conséquent ces radionucléides sont mobiles. Au contraire, les radionucléides comme les isotopes des actinides mineurs (Am, Np et Cm), émetteurs alpha très radiotoxiques, ont des interactions fortes avec les composants du stockage car ils sont sous forme cationique simple ou fortement hydrolysée et seront peu mobiles (voire bloqués) dans les composants de Cigéo.

Dans le stockage des déchets HA et MAVL, la chimie intervient de façon pratique dans la fabrication des colis de déchets, dans l'identification des espèces porteuses de la radioactivité issue de la dégradation des colis par diverses agressions, essentiellement par l'eau, et dans le transport de ces espèces dans les solutions aqueuses en présence ou non de matériaux, notamment du COx sain ou altéré. Elle intervient aussi dans le choix des matériaux argileux pour combler les vides laissés par le creusement des alvéoles de stockage, les galeries et les liaisons surface-fond. Tous les matériaux sont sélectionnés pour leur capacité à être produits à l'échelle industrielle et leur capacité à éviter en toutes circonstances le retour massif des radionucléides à la biosphère.

#### 4.6.2 Colis de déchets HA

Les colis primaires de déchets HA sont des objets manufacturés de haute technologie. La matrice de confinement est un verre borosilicaté, dit verre nucléaire. Sa composition a été étudiée pour qu'il incorpore les produits de fission et les actinides mineurs dans la matrice vitreuse. Le colis primaire contient 400 kg de verre coulés dans un conteneur en acier inoxydable. Sa puissance thermique initiale est de quelques kilowatts et décroît à long terme, après quelques siècles pendant lesquels la majorité des produits de fission auront disparu par décroissance radioactive. Ce colis primaire est mis dans un conteneur de stockage en acier qui assure une barrière supplémentaire entre la matrice vitreuse et l'eau ainsi qu'une limitation de la dose au contact de la surface externe du colis. Tous les paramètres des opérations de fabrication des colis primaires de déchets HA sont spécifiés et contrôlés.

Les colis de stockage HA représenteront 95 % de la radioactivité de Cigéo. La connaissance de leur comportement est donc capitale.

Les colis de stockage des déchets HA en situation de stockage resaturé en eau seront essentiellement altérés sous l'action de l'eau porale provenant du COx. Les métaux seront lentement transformés sur des millénaires en produits de corrosion et les conteneurs finiront par perdre leur étanchéité. Les radionucléides libérés et autres éléments au contact de l'eau commenceront alors à migrer dans le quartier HA en ruine pour rejoindre le COx à proximité des alvéoles puis le COx sain, environnement argileux propice à l'immobilisation des radionucléides, notamment les actinides.

Les mécanismes de lixiviation-dissolution du verre sont bien identifiés ainsi que les paramètres importants qui les accélèrent ou bien les ralentissent. Les données obtenues dans les expériences, dont certaines ont duré jusqu'à une dizaine d'années, ont permis d'établir un modèle cinétique de relâchement des radionucléides en deux temps. La vitesse de dissolution du verre lixivié est initialement importante quand l'eau vient au contact du verre ( $V_0$ ). Les réactions de surface créent un gel d'altération silicaté, qui protège le verre et a pour effet de diminuer la vitesse de dissolution d'un facteur dix mille ( $V_R$ ).

#### 4.6.3 Colis de déchets MAVL

Les déchets MAVL sont très divers : coques en zircaloy et embouts en acier des assemblages de combustible usé, sels et divers composés solides, matières organiques. Ils sont conditionnés dans des matériaux de confinement divers : ciment, sable, bitume. Tous les colis MAVL ont en commun la particularité d'être le siège de phénomènes de radiolyse de l'eau résiduelle des déchets et de la matière organique qu'ils contiennent. Dans tous les cas, il y a production d'hydrogène et, selon les colis, de diverses molécules exogènes au stockage, qui modifient localement le comportement des radionucléides par rapport à leur comportement en milieu simplement alcalin. Les colis de stockage sont des structures en béton qui contiennent en général quatre colis primaires.

Le relâchement des radionucléides à partir des différents colis de déchets MAVL résulte de nombreux phénomènes chimiques de dégradation, qui s'opèrent en synergie. Ces phénomènes sont bien identifiés selon les alvéoles et par famille de colis mais il n'existe pas de modèle général qui puisse les prendre en compte, comme dans le cas des colis de déchets HA, en raison des différences des situations (*cf.* Annexe IV.4). Pour chaque famille et chaque situation, des modèles ont été élaborés. Ces modèles sont souvent compliqués car ils dépendent de nombreux paramètres. Ils sont alors simplifiés en prenant en compte des approximations majorantes, admises par la communauté scientifique.

#### 4.6.4 Migration des radionucléides dans les alvéoles

Les radionucléides libérés lors de la ruine des colis migrent par diffusion depuis les quartiers HA et MAVL vers le COx environnant. Au-delà de l'environnement proche du stockage, la migration dans le COx vers le toit et le mur du COx a lieu par diffusion-convection avec une forte prédominance de la diffusion (*cf.* 4.4.6).

On dispose de valeurs solides des paramètres de diffusion (coefficient de diffusion et porosité accessible) et de rétention (coefficient de distribution  $K_d$ ) pour la plupart des radionucléides et pour des milieux poreux argileux bien définis dans lesquels les espèces des radionucléides et les phases solides sont bien identifiées.

Ce n'est pas le cas pour les systèmes résultant des interactions entre l'eau de pore du COx et les matériaux de dégradation des colis, lorsqu'elle re-sature les alvéoles. Les solutions ont des compositions inconnues et les phases solides sont complexes. Les valeurs des paramètres de la migration des radionucléides dans les milieux dégradés autour des colis HA ne sont pas tous accessibles à l'expérience.

Les valeurs des coefficients de diffusion de ces milieux sont choisies de façon très conservative. La porosité accessible de ces milieux est choisie par analogie. L'approche retenue pour les

valeurs de solubilité s'appuie sur des calculs thermodynamiques à partir des bases de données de thermodynamique chimique qualifiées à l'échelle internationale (notamment sous l'égide de l'AEN/OCDE pour les radionucléides). On calcule une composition des solutions et on définit les espèces dominantes des radionucléides dans ces solutions, pour lesquelles on a des valeurs de Kd obtenues expérimentalement dans d'autres conditions. Cela donne des fourchettes de valeurs de Kd. Même avec les valeurs les plus défavorables de ces fourchettes, il est démontré que les actinides mineurs ne migrent pas, tant les valeurs de Kd associées aux espèces d'actinides sont élevées.

#### 4.6.5 Appréciation de la Commission sur les données disponibles

*Les données scientifiques de chimie concernant le relâchement des radionucléides par les colis et leur migration ont été établies sur la base d'expériences complémentaires conduites depuis plusieurs dizaines d'années par une large communauté de chimistes en France et à l'étranger. Les résultats de ces expériences ont pour la plupart été publiés dans la littérature ouverte, compilés et rendus accessibles dans des bases de données internationales.*

*Concernant le relâchement des radionucléides depuis les colis de déchets HA, les données sont convergentes, fiables et complètes. Elles permettent de construire un modèle paramétré robuste pour évaluer les performances des colis HA vis-à-vis du confinement de la radioactivité.*

*Pour les migrations des radionucléides par diffusion dans le quartier HA, le milieu de diffusion est trop hétérogène et complexe pour une représentation explicite découlant de mesures directes : les valeurs des paramètres caractéristiques sont alors établies par analogies et sur la base de calculs de thermodynamique. Cette façon de faire permet de se ramener à des situations plus simples qui utilisent des valeurs majorantes des paramètres. Les calculs sont classiques et les données thermodynamiques proviennent des bases de données internationales.*

*Pour les colis MAVL ne renfermant ni sels ni matières organiques, les données expérimentales sur les modes de relâchement sont convergentes, fiables et complètes et soutiennent un modèle simple de relâchement. Pour les autres colis MAVL elles sont incomplètes ou trop dispersées et il n'y a pas de modèle universel pour l'ensemble des colis MAVL. Il a donc été nécessaire d'utiliser des modèles spécifiques à chaque cas. Ceux-ci sont simples et utilisent des valeurs majorantes (parfois très majorantes) pour les paramètres.*

*Les données concernant la migration dans le quartier MAVL sont à l'échelle métrique, bien inférieure à la distance entre alvéoles dans le quartier MAVL. À l'échelle du quartier, elles ne sont bien connues que pour les alvéoles contenant des colis sans sels ni matières organiques. Pour les autres alvéoles, les données expérimentales sont dispersées mais sont confortées par des calculs thermodynamiques qui donnent des valeurs compatibles avec les fourchettes des valeurs mesurées. Cette approche est suffisante pour établir une situation enveloppe.*

*En conclusion, les calculs des termes sources des quartiers HA et MAVL résultent respectivement de l'application des modèles élaborés et de modèles simplifiés, tant pour le relâchement des radionucléides par les colis que pour la migration des radionucléides vers le COx sain. Tous ces modèles, en particulier les modèles simplifiés, conduisent à des valeurs majorantes tant pour le relâchement des radionucléides que pour leur migration.*

## 4.7 Chimie des interfaces

Dans Cigéo les interfaces entre matériaux sont nombreuses. En présence d'eau, des réactions chimiques complexes se déclenchent entre matériaux.

### 4.7.1 Interactions COx-béton-perturbation alcaline

Comme il y a beaucoup de matériaux cimentaires dans Cigéo, la perturbation COx-béton a lieu en de nombreux endroits. La dégradation des silicates de calcium des matériaux cimentaires des alvéoles MAVL conduit à l'alcalinisation de l'eau et à une charge en silice et en calcium, lesquels par diffusion en extrados des parois des alvéoles transforment les smectites en illites. Cela modifie, sur le plan chimique, les propriétés de rétention du COx sur au maximum un mètre. La conséquence est que, lorsque les radionucléides diffuseront vers le COx depuis les alvéoles, ils rencontreront d'abord le COx perturbé. Les données de migration (coefficient de diffusion, porosité accessible et  $K_d$ ) dans ce milieu ne sont pas significativement différentes de celles dans le COx sain.

### 4.7.2 Quartier HA et interactions COx-fer-verre

À long terme, l'interface entre le verre des colis de déchets HA et le COx est constituée en majorité de produits de corrosion du fer en milieu anoxique et d'argilites transformées par la présence de matériaux cimentaires de remplissage de l'extrados du chemisage, plus ou moins saturé en eau. C'est une zone à la chimie très complexe, d'épaisseur métrique. Seuls les radionucléides sous forme d'ions simples y diffusent. Tous les autres radionucléides, dont la spéciation est variée en milieu alcalin, sont majoritairement retenus en raison des interactions multiples avec les oxydes de fer et les argilites altérées. Ce phénomène est négligé dans les évaluations de l'Andra, ce qui est conservatif.

### 4.7.3 Quartier MAVL et interactions COx-sels-matières organiques-perturbations saline et organique

La perturbation saline du COX est due à la diffusion en extrados des alvéoles des nitrates et sulfates d'alcalins libérés par les colis MAVL salins. Les propriétés physico-chimiques des minéraux argileux du COx sont modifiées. Le panache salin peut avoir au maximum une extension décamétrique avec un gradient de force ionique diminuant rapidement avec la distance. Les données de migration de quelques radionucléides dans le COx ainsi perturbé peuvent alors être significativement différentes de celles dans le COx sain si la force ionique est élevée. Cela dépend des radionucléides, et va dans les deux sens : augmentation ou diminution des valeurs des paramètres. Ces effets disparaissent à quelques mètres des parois des alvéoles.

De même la perturbation organique du COx a pour origine la diffusion de nombreuses molécules organiques en dehors des alvéoles contenant des colis des déchets organiques. Les paramètres de diffusion de quelques-unes de ces molécules sont connus. Elles entrent en compétition avec les radionucléides lorsque ceux-ci diffusent vers le COx sain et, en général, diminuent leur rétention mais seulement au-delà de seuils de concentration. Le panache organique peut concerner tout le COx entre deux alvéoles de colis de déchets organiques.

#### 4.7.4 Appréciation de la Commission sur les données disponibles

*Les données concernant les modifications chimiques du COx dues à la libération des composés chimiques des colis (sels, matières organiques) accompagnant le relâchement des radionucléides sont bien documentées. Elles donnent la garantie scientifique nécessaire pour la conduite des calculs thermodynamiques sur la migration des radionucléides.*

### 4.8 Couplages entre mécanismes physiques et physico-chimiques

Les paragraphes précédents ont illustré que de nombreux processus physiques et chimiques sont à l'œuvre dans l'environnement proche du stockage. Tous ces processus s'influencent les uns les autres par des couplages plus ou moins forts et parfois des rétroactions.

Par exemple, la température dans le milieu est la résultante du couplage entre la production de chaleur (par les colis les plus exothermiques) et les transferts de chaleur dans le système. La température a un impact sur les écoulements (modification de la densité et de la viscosité des fluides et de la conductivité hydraulique), sur la mécanique (dilatation différentielle des matériaux), sur la chimie (modification des équilibres thermodynamiques et des cinétiques réactionnelles) et sur le transport des espèces chimiques (modification des coefficients de diffusion, et indirectement convection par effet densitaire). La température peut également avoir des conséquences sur les changements de phase (équilibres liquide-gaz, transformations minéralogiques).

L'hydrodynamique a un impact sur les conditions mécaniques (la dynamique de circulation de l'eau et du gaz contrôle l'évolution des pressions de fluides) et sur la thermique (le transfert convectif de la chaleur est dépendant de la vitesse d'écoulement des fluides). La mécanique impacte l'hydrodynamique avec le développement d'une fracturation (zone de fracturation connectée autour des excavations) et sa cicatrisation.

De la même manière, l'évolution chimique (notamment dissolution, précipitation ou transformation de minéraux) modifie les propriétés de la roche et des bétons avec des impacts sur l'hydrodynamique et la mécanique.

Ces processus peuvent se dérouler à différentes échelles de temps, ce qui permet le cas échéant de les découpler dans la chronologie d'évolution de l'ouvrage en ne prenant en compte que ceux qui se manifestent de manière synchrone. Ainsi, les principaux épisodes transitoires après la fermeture du stockage concernent :

- la phase thermique, qui est contrôlée par la décroissance radioactive des colis les plus actifs, et dure plusieurs milliers d'années dans le COx à distance des quartiers HA ;

- la phase de resaturation en eau des alvéoles et de leur environnement proche (aussi appelée transitoire hydraulique-gaz) : la désaturation se produit pendant l'exploitation, elle est maintenue, après fermeture par la pression de gaz liée à la production d'hydrogène (produit par radiolyse de l'eau et corrosion anoxique des aciers) ; sa durée est de quelques centaines de milliers d'années ;
- l'évolution chimique des composants du stockage : elle concerne aussi bien l'évolution minéralogique des matériaux du stockage au niveau des interfaces, la corrosion des colis de stockage, et finalement la rétention des radionucléides dans le COx.

Les couplages dominants peuvent être identifiés au cours de ces différents transitoires.

La phase thermique est associée à des couplages forts entre mécanique, thermique et hydrodynamique avec pour enjeu la quantification des contraintes mécaniques s'exerçant sur le COx, particulièrement à l'entraxe des alvéoles HA. Pendant cette phase, les alvéoles sont désaturées et les colis inaltérés, ce qui permet de découpler les aspects de libération des radionucléides de ceux liés à leur transfert.

Le transitoire hydraulique-gaz présente des couplages forts entre transfert des fluides (avec la resaturation de l'environnement proche du stockage), la production de gaz (production d'H<sub>2</sub> contrôlé par la disponibilité de l'eau et les vitesses de corrosion), et la mécanique (évolution des contraintes en fonction des pressions de gaz dans le milieu). La compréhension détaillée de ces couplages est utile car elle permet de vérifier que les surpressions de gaz au sein de l'ouvrage ne sont pas susceptibles d'endommager le COx. Ces couplages peuvent, en revanche, être ignorés pour le calcul du transfert des radionucléides à travers le COx si l'on fait l'hypothèse conservatrice que le stockage est totalement resaturé dès sa fermeture.

*Le couplage de l'ensemble des mécanismes dits thermo-hydro-mécano-chimiques (THMC), est pris en compte pour la compréhension quantifiée de l'évolution des composants du stockage dans l'objectif de l'évaluation de performance.*

*En fonction des besoins et des contraintes, l'Andra effectue des calculs prenant en compte soit le couplage complet entre ces mécanismes soit une formulation simplifiée par le découplage (éventuellement séquentiel) des processus. La justification des découplages est systématiquement apportée par des conditions de déploiement temporel des processus, par des calculs complètement couplés sur des sous-ensembles du stockage ou par la démonstration que ces découplages conduisent à des calculs majorants (garantie de conservatismes) vis-à-vis du transfert des radionucléides dans le COx.*

## 4.9 Environnement

L'Andra a réalisé une étude d'impact détaillée, qui couvre bien l'ensemble des incidences sur l'environnement du projet global Cigéo, comprenant le centre de stockage et l'ensemble des opérations nécessaires à sa réalisation et son exploitation.

*Ces incidences sont évaluées en suivant la méthodologie consacrée, à partir de la situation initiale et en définissant les mesures d'évitement, de réduction et le cas échéant de compensation. Elles couvrent bien toutes les dimensions attendues : l'atmosphère, le sol,*



*le sous-sol, les eaux, la biodiversité, les risques de catastrophes et le paysage. Conformément à la réglementation, les mesures de compensation sont très finement détaillées.*

La situation de référence, ou état initial, est, dans l'étude d'impact réalisée par l'Andra, la situation sans déchets radioactifs, qualifiée *d'état actuel*. Cette approche est correcte si on se limite à la région dans laquelle est implantée le stockage mais si on considère la situation à l'échelle de la France, elle revient à sous-estimer les aspects négatifs de la situation initiale. En effet, dans la situation initiale, les déchets existants ne sont pas encore stockés mais seulement entreposés ce qui est une situation moins satisfaisante. Cependant, la Commission note par ailleurs que dans certaines parties de l'étude (relatives aux transports notamment), les situations initiales ne sont pas les mêmes, ce qui complique l'interprétation des résultats sans remettre en cause les conclusions ci-dessus.

*La Commission estime que l'étude d'impact apparaît complète et convaincante. Elle recommande que les versions ultérieures adoptent autant que possible un format plus compact, limité aux rubriques du format imposé, afin d'améliorer sa lisibilité.*

#### 4.10 Évolution du climat

Le Centre de stockage Cigéo sera soumis aux aléas météorologiques et climatiques durant toute sa vie, comprenant les phases de construction, d'exploitation, de démantèlement et de fermeture qui s'étendront sur plus d'un siècle. Pendant les phases de surveillance et de post-fermeture, le site d'implantation de Cigéo sera soumis aux conséquences de l'évolution du climat régional sur le très long terme, plusieurs centaines de millénaires. La Commission a donc analysé la fiabilité et la complétude des recherches conduites par l'Andra pour évaluer l'évolution des conditions climatiques sur le site de Cigéo au cours des prochains siècles et, plus généralement, sur la région de Meuse Haute-Marne tout au long du prochain million d'années.

Le climat de la planète Terre sur une période de l'ordre du million d'années dépend principalement de deux facteurs, l'un astronomique (la position de la planète sur l'orbite elliptique qu'elle décrit autour du soleil) et l'autre géochimique (la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère).

L'Andra a fait appel aux équipes scientifiques qui se sont attachées à traiter ce problème dans le cadre du projet européen BIOCLIM. Des modèles climatiques globaux de complexité intermédiaire, seuls applicables sur des périodes de temps aussi longues, ont été développés et validés sur leur capacité à simuler les climats passés.

Pour simuler, à l'aide d'un modèle de climat, les conditions de température et de précipitation sur la région de Meuse Haute-Marne au cours des prochaines centaines de milliers d'années, il est nécessaire de prendre en compte simultanément les variations des paramètres astronomiques et celles de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> déduites d'un scénario d'évolution des activités humaines.

Compte tenu des incertitudes sur le comportement des sociétés humaines et leur capacité à poursuivre leur développement en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub>, deux scénarios enveloppes ont été pris en compte par l'Andra pour simuler les climats futurs : le premier prend en compte l'évolution naturelle du climat imposée par les paramètres astronomiques, en prenant comme



point de départ la concentration en CO<sub>2</sub> actuelle due aux activités humaines depuis 1850 et un modèle simple de cycle du carbone ; le second est un scénario extrême intégrant l'impact des paramètres astronomiques et le cycle du carbone en supposant que les activités humaines conduisent à brûler toutes les réserves de charbon et d'hydrocarbures fossiles en 325 ans.

Le scénario d'évolution naturelle est basé sur les oscillations climatiques dits *cycles de Milanković*. Ces oscillations sont toutefois influencées par la concentration initiale élevée en CO<sub>2</sub> qui assure un climat tempéré sur la Meuse Haute-Marne pendant 50 000 ans. Les oscillations climatiques qui suivent sont similaires à celles connues dans le passé de sorte que, dans ce scénario, le climat une fois passés les premiers 50 000 ans est en moyenne plus froid qu'aujourd'hui, les périodes tempérées étant suivies de conditions de type boréal ou périglaciaire.

Le scénario extrême d'évolution climatique perturbée par les activités humaines montre une évolution du climat actuel sur la France, passant progressivement des conditions tempérées actuelles à une période beaucoup plus chaude et plus humide au cours du prochain millénaire. Celle-ci ne sera suivie que d'un lent retour aux cycles naturels avec des périodes froides qui ne deviendraient comparables à celles de l'ère quaternaire qu'au-delà de 500 000 ans.

*La Commission reconnaît la pertinence de la méthodologie adoptée par l'Andra pour l'évaluation et la prise en compte de l'impact des variations climatiques, qu'elles soient à court ou à long terme, sur le projet Cigéo. Cette approche s'appuie sur la simulation de deux scénarios d'évolution du climat, permettant ainsi de couvrir l'ensemble de la gamme des conditions climatiques susceptibles d'affecter la région de Meuse Haute-Marne au cours du prochain million d'années.*

Les résultats issus des modèles développés sur la base de ces scénarios apportent un cadre permettant d'anticiper les conséquences des évolutions du cycle hydrologique, de l'érosion des couches superficielles du territoire concerné, ainsi que du développement potentiel d'un pergélisol. L'enveloppe obtenue à travers cette modélisation offre ainsi une vision globale des enjeux environnementaux à très long terme auxquels Cigéo sera confronté.

#### 4.11 Modélisation et outils intégrateurs

Comme le montrent les sections précédentes, l'Andra a accordé beaucoup d'importance à la définition et à la quantification des processus à différentes échelles spatio-temporelles intervenant dans les transferts des radionucléides et des toxiques chimiques depuis les colis de déchets jusqu'à la biosphère. Cette démarche constitue le référentiel scientifique de la démonstration de sûreté après fermeture du stockage.

Les mécanismes physiques impliqués sont nombreux et souvent couplés (cf. section 4.7). Leur compréhension finale passe par la modélisation des processus, c'est-à-dire par des outils de prédiction quantitative des grandeurs représentatives des phénomènes. Ces outils sont basés sur des lois validées par l'expérience, exprimées par des relations mathématiques formant des systèmes d'équations souvent non linéaires dont la résolution est le plus souvent numérique. L'intérêt de tels outils est d'être théoriquement universels puisqu'ils sont fondés sur les lois de la physique et qu'ils peuvent donc bénéficier à la fois des connaissances et des validations au niveau international.

La collaboration internationale s'exprime à plusieurs échelons :

- par la mise en commun de dispositifs expérimentaux et de laboratoires (notamment de laboratoires souterrains) ; l'objectif de recherche concerne alors l'identification des mécanismes pertinents et les moyens de les modéliser ;
- par le développement et la mise à disposition de bases de données ; l'objectif est de fournir les valeurs des paramètres. Ce type de collaboration est particulièrement pertinent en chimie où les paramètres sont très nombreux et souvent universels ;
- par la réalisation d'exercices d'intercomparaison de l'interprétation de résultats expérimentaux ; on teste alors la qualité de la représentation de la phénoménologie ;
- par des programmes internationaux d'intercomparaison des outils de calcul (benchmarking) ; on met alors à l'épreuve la validité des systèmes d'équations et des codes informatiques qui en font la résolution.

Cette démarche de qualité de la connaissance scientifique est arrivée à maturité, si bien que le référentiel scientifique de base fait l'objet d'un consensus international et que les outils de calcul sont largement partagés par la communauté scientifique soit de gré à gré, soit sur un mode commercial. Plusieurs codes de calcul peuvent être utilisés pour modéliser une même phénoménologie, ce qui augmente la robustesse par la redondance.

La démarche est constructive en ce qu'elle incite à la complexité croissante des modèles phénoménologiques, ce qui permet de réduire les plages d'incertitude et d'augmenter la confiance que l'on pourra accorder aux modèles simplifiés qui doivent garantir une approche enveloppe des phénomènes.

#### 4.11.1 Expression de la complexité de la modélisation

La complexité s'exerce à plusieurs échelles. Les exemples suivants ont particulièrement retenu l'attention de la Commission au cours des auditions :

- la modélisation macroscopique de la diffusion, mécanisme essentiel du transport dans le COx, a nécessité de comprendre les phénomènes à l'échelle microscopique des structures minérales et à l'échelle du pore, espace accessible entre les minéraux, qui se manifestent différemment entre les cations et les anions. Il en a résulté la confirmation d'une loi macroscopique unique pour les différentes espèces chimiques mais avec des valeurs différentes pour le coefficient de diffusion effectif ;
- le dégagement d'hydrogène gazeux au sein du stockage pendant plusieurs centaines de milliers d'années a conduit à considérer un couplage fort entre la pression du gaz, la resaturation par l'eau des ouvrages et du COx et les contraintes mécaniques exercées sur le COx. La phénoménologie très complexe qui se déroule sur un laps de temps très long n'est évidemment pas accessible à l'expérience. Seule une modélisation fine et le couplage des modèles peut permettre de l'appréhender complètement mais au prix de calculs très lourds. Le calcul complet, réalisable un petit nombre de fois, met en évidence que la pression de gaz est un obstacle à la resaturation de l'ouvrage et se dissipe essentiellement au travers des liaisons surface-fond. Il en résulte des conclusions qui font progresser l'évaluation de la sûreté : d'une part la nécessité d'envisager des options particulières de conception des scellements (perméables au gaz mais pas à l'eau) (cf. section 5.7), d'autre part le fait de considérer que la resaturation

complète du stockage au moment de sa fermeture est une situation pénalisante pour la libération des radionucléides lors de l'analyse des performances ;

- l'effet thermomécanique sur le COx est une conséquence du dégagement de chaleur par les déchets HA qui engendre une perturbation thermique pendant plus d'un millier d'années. Une modélisation fine du phénomène incluant la dilatation différentielle entre l'eau et la roche met en évidence un risque de fracturation du COx au niveau de l'entraxe entre deux alvéoles HA si la température est trop élevée. Un modèle thermo-poro-visco-plastique rend bien compte dans le temps et dans l'espace des résultats en température et pression d'eau des expériences de chauffage *in situ* réalisées par l'Andra au laboratoire souterrain, mais il s'avère qu'un modèle thermo-poro-élastique plus simple conduit à des résultats enveloppe et est suffisant lorsque l'on s'éloigne de quelques mètres du corps chauffant. Cette approche permet de qualifier l'utilisation du modèle simple (poro-élastique) pour le dimensionnement thermo-mécanique dans le quartier HA : calcul de la charge thermique des alvéoles et écartement.

#### 4.11.2 Prise en compte de la complexité et de son incertitude, vers des modèles opérationnels de sûreté

Les exemples qui précèdent montrent que la modélisation phénoménologique fine est nécessaire pour analyser avec confiance le comportement des composants du stockage en situation réelle. Elle est cependant mal adaptée pour l'analyse des performances en grand du stockage pour les raisons suivantes :

- l'analyse doit prendre en compte plusieurs scénarios conformément au guide de sûreté ;
- elle doit s'appuyer sur des simulations sur des temps très longs, typiquement le million d'années, toujours selon le guide de sûreté ;
- chaque simulation doit parfois être répétée un grand nombre de fois pour évaluer les conséquences de l'incertitude sur certains paramètres.

Pour ce faire, les codes doivent exécuter leurs calculs dans des temps raisonnables, d'où l'importance de développer des modèles de sûreté opérationnels. Ces modèles sont issus d'une simplification des modèles phénoménologiques, obtenue de plusieurs façons :

- en négligeant les mécanismes minoritaires vis-à-vis du transfert des radionucléides (par exemple, le gradient de charge hydraulique dans le COx est le moteur principal de l'écoulement devant l'osmose chimique ou la thermo-osmose) ;
- en ramenant un processus complexe à son mécanisme majorant (par exemple, l'altération des verres HA est représentée par leur vitesse initiale de dissolution  $V_0$  (cf. Annexe IV.2.2), très majorante ; ou encore, aucune propriété d'étanchéité ou de confinement n'est attribuée à la matrice bitume de certains déchets MAVL, et un modèle de relâchement basé sur la solubilité des sels est considéré dès la fermeture du stockage ;
- en globalisant à une échelle macroscopique des phénomènes microscopiques aux origines multiples (par exemple, la représentation de la sorption des radionucléides sur la roche via un mécanisme linéaire et réversible (coefficient de distribution  $K_d$ , cf. Annexe IV.3.1) ;

- en évitant des couplages forts entre les mécanismes grâce à des options de conception du stockage (par exemple, les conséquences de l'augmentation de pression d'hydrogène sont supprimées avec des scellements perméables au gaz, le dimensionnement de la charge thermique des quartiers HA est contraint de façon à éviter la fracturation du COx) ;
- en supprimant des couplages par des hypothèses conservatives sur leur chronologie (par exemple, le fait de considérer que le stockage est complètement resaturé en eau au temps « zéro » de l'analyse de sûreté évite de traiter la libération des radionucléides dans les alvéoles en conditions désaturées qui est très difficile à modéliser ;
- en simplifiant la géométrie des composants aux échelles pertinentes (par exemples, la représentation du COx par un milieu unique, le regroupement en un milieu poreux équivalent des objets composants de l'interface entre le COx et le noyau argileux des scellements).

Pour chacune des actions précédentes, il est essentiel de pouvoir montrer le caractère majorant des résultats de modélisation par rapport à ceux d'une modélisation phénoménologique fine pour tous les cas qui seront simulés. Cela est obtenu par l'enchaînement des modèles opérationnels qui doivent chacun être majorants.

Les conséquences du passage des modèles phénoménologiques aux modèles opérationnels est un risque que l'évaluation des performances soit par trop pessimiste vis-à-vis des objectifs de sûreté recherchés. Si c'était le cas, il conviendrait de réduire les conservatismes en raffinant certains modèles opérationnels trop simplistes.

*La Commission souscrit à la démarche de modélisation de l'Andra basée sur des simplifications nécessaires pour que les calculs soient réalisables. Ces simplifications sont justifiées par les hypothèses conservatives adoptées. Cette approche majorante n'interdit pas de réduire ultérieurement le conservatisme en modélisant plus finement certains mécanismes physiques. Cela ne changerait pas les conclusions de l'évaluation de sûreté mais pourrait permettre de réduire certaines marges couvertes par des options de conception.*

*La Commission attire l'attention sur le fait que le modèle de sûreté est conçu pour décrire des situations aux conséquences majorantes destinées à l'évaluation par l'Autorité de sûreté. Avec son accumulation de conservatismes, il est conçu pour donner une valeur assurément majorée des impacts sur l'homme et l'environnement.*

## 5 Rôle des composants pour répondre aux exigences de sûreté et à l'exigence de récupérabilité

### 5.1 Introduction, choix des éléments étudiés

L'architecture du système de stockage est conçue de façon à mettre en place les structures, systèmes et composants (SSC), destinés à assurer les fonctions de sûreté.

L'Andra assigne au système de stockage deux fonctions de sûreté fondamentales, comme indiqué à la section 2.1, rappelées ici :

- « isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines banales » ;
- « limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère ».

La deuxième fonction se décline à son tour en trois sous-fonctions :

- « s'opposer à la circulation d'eau » ;
- « limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage » ;
- « retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auraient été relâchés hors des colis puis des alvéoles de stockage ».

En complément de ces trois sous-fonctions habituellement mentionnées, la « préservation des caractéristiques favorables des argilites de la couche du Callovo-Oxfordien et des composants ouvragés contribuant à la sûreté après fermeture » tout au long de la construction, de l'exploitation et de la fermeture du stockage constitue une quatrième sous-fonction.

L'exigence de récupérabilité, sur une période qui ne peut être inférieure à cent ans, induit quant à elle des contraintes au niveau du maintien de la géométrie des structures et de la durabilité des matériaux.

L'application de ces principes conduit à une architecture de stockage dont les SSC sont conçus pour être complémentaires et fonctionner en combinaison, de façon à ce qu'une fonction de sûreté ne dépende pas d'un seul élément. La contribution de chaque SSC aux fonctions de sûreté doit donc être identifiée, explicitée et doit reposer sur des bases scientifiques et technologiques éprouvées en tenant compte des incertitudes. La période à laquelle ils produisent leurs effets doit être clairement indiquée.

Les SSC comprennent les déchets, la barrière ouvragée et la roche hôte. Selon la fonction de sûreté à remplir, un SSC peut avoir un rôle majeur ou secondaire. Un SSC peut intervenir dans plusieurs fonctions de sûreté à des moments différents et avec une importance différente. La robustesse de l'architecture mise en place est vérifiée en confrontant les SSC aux phénomènes et processus attendus tout au long du fonctionnement du stockage. Ces phénomènes et processus ont été validés au niveau international dans le cadre de l'AEN/OCDE : International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste.

Les aquifères encaissants ne font pas partie des SSC, ils n'assurent pas de fonction de sûreté. Ils exercent un rôle lors de l'apparition d'un flux de radionucléides au toit du COx, c'est-à-dire à la sortie du système de stockage. S'ils ne remplissent pas de fonction de sûreté, ils sont cependant intégrés dans les différents modèles de biosphère et jouent un rôle dans la détermination et le fonctionnement des exutoires. Ils peuvent, par leur capacité de dilution et de dispersion, contribuer à la diminution de l'impact radiologique et chimique du stockage dans la mesure où la pérennité de cette capacité est démontrée dans le temps. L'architecture du stockage en est indépendante.

L'Andra a décliné les composants du stockage suivant une logique de fonction de sûreté, de la façon suivante :

- Fonction de sûreté fondamentale : isoler
  - Absence de ressources naturelles
  - Profondeur d'implantation
  - Mémoire de l'existence du stockage
  
- Fonction de sûreté fondamentale : limiter le transfert
  - Sous-fonction : s'opposer à la circulation d'eau :
    - Conteneurs
    - Callovo-Oxfordien (COx)
    - Architecture borgne
    - Regroupement puits-descenderie
    - Scelllements des alvéoles et liaisons surface-fond
  - Sous-fonction : limiter le relâchement des radionucléides :
    - Conteneur
    - Alvéoles (matériaux, conditions chimiques)
  - Sous-fonction : retarder-atténuer la migration :
    - Géométrie et espacement des alvéoles
    - Épaisseur de la garde de Callovo-Oxfordien sain
  - Sous-fonction : préserver les caractéristiques du COx :
    - Dimensionnement thermique
    - Couplage thermo-hydro-mécanique (THM)
    - Orientation des alvéoles
    - Sismicité faible
    - Choix des matériaux
    - Limitation des vides
    - Évitement du co-stockage
    - Scelllements passants au gaz.

Le schéma présenté sur la Figure 2 illustre la mise en place des SSC et leur fonctionnement en redondance au cours du temps. Il explicite le rôle des différents éléments du concept dans la réalisation des fonctions de sûreté.

Conformément à ce schéma, la Commission a choisi d'analyser comment l'Andra s'est emparée des SSC pour réaliser l'évaluation des fonctions de sûreté et de la récupérabilité. Après l'architecture générale du stockage, le chapitre est organisé en examinant la quantification du

comportement et de l'évolution de composantes emboîtées, depuis le terme source initial (conteneur dans son alvéole) jusqu'au niveau du transfert en grand vers les exutoires.

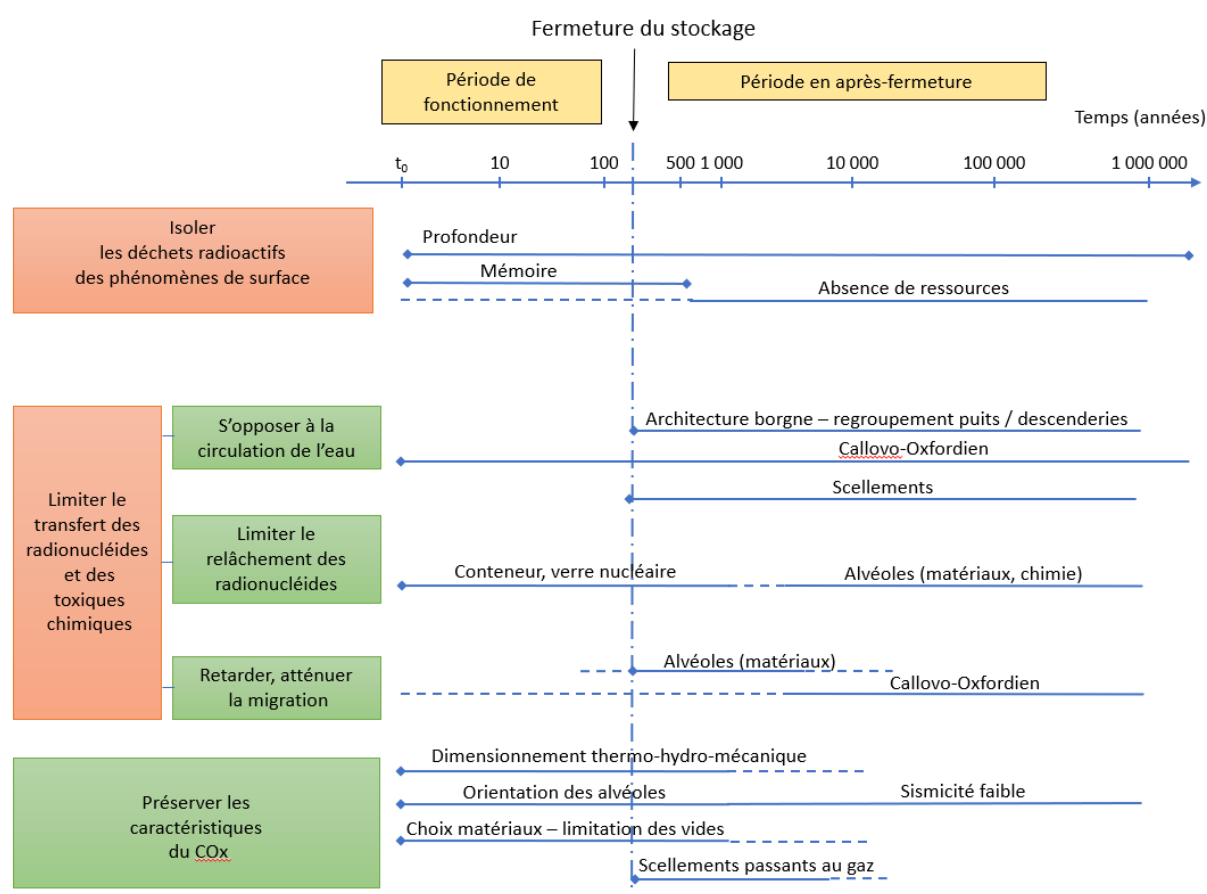


Figure 2 : schéma d'organisation des fonctions de sûreté pour la partie souterraine de Cigéo.

## 5.2 Choix d'architecture

L'Andra a fait le choix d'une architecture souterraine de Cigéo qui répond à la fois à des fonctions de sûreté en exploitation et sur le long terme après la fermeture du stockage. La solution d'architecture retenue comprend deux descenderies qui rejoignent, à environ 500 m de profondeur dans la couche hôte, une zone de « soutien logistique exploitation » par laquelle transitent les colis de déchets, et cinq puits verticaux reliés à une zone de « soutien logistique travaux » par laquelle transitent les équipements et matériaux pour la construction. Ces zones permettent d'accéder à deux grands quartiers de stockage des déchets : sur la partie nord, un quartier de stockage des déchets HA, intégrant le quartier pilote HA chargé d'accueillir un démonstrateur de scellement et les premiers colis de déchets HA lors de la Phipil, (cf. section 6.1) et sur la partie sud un quartier de stockage des déchets MAVL. Au fond, les liaisons surface-fond (LSF), *i.e.* puits et descenderies, sont ainsi regroupées dans une zone d'emprise restreinte. La construction est prévue par phases successives, conformément au caractère progressif et adaptatif de l'ouvrage (cf. section 6.2).

Les fonctions majeures déclinées par l'Andra en lien avec l'architecture du stockage Cigéo concernent la sûreté à long terme et la réversibilité, et sont :

- conserver les propriétés de confinement du COx ;
- limiter les circulations d'eau pour atténuer et retarder la migration des radionucléides ;
- assurer la réversibilité du stockage.

### 5.2.1 Conserver les propriétés de confinement du COx

Les quartiers HA et MAVL sont implantés à environ 500 m de profondeur dans la partie médiane du COx. Cette architecture est globalement plane, tout en suivant le faible pendage de la formation. Elle est choisie de manière à préserver une épaisseur de garde argileuse d'au moins 50 m de part et d'autre des alvéoles. Elle permet d'isoler les déchets et les composants du stockage des activités humaines et des perturbations de surface liées au climat, parmi lesquelles l'érosion (cf. 4.3.5). Par ailleurs, l'exigence de conception consiste à limiter les vides au sein de l'installation souterraine pour limiter l'extension de la zone endommagée du COx sur le long terme. L'architecture de chaque quartier de stockage HA et MAVL se développe, pour cela, sur un seul niveau.

L'Andra s'appuie sur la géométrie du COx pour établir le plan de masse des installations qui pourra éventuellement évoluer dans les détails lorsque les incertitudes résiduelles (position plus précise du toit, épaisseur de la couche) seront affinées lors de l'accès à la couche géologique.

*L'Andra a pu vérifier à l'aide de ses mesures et modèles géométriques que l'implantation du stockage (en tenant compte des zones de COx endommagées par la construction de l'ouvrage) permet de conserver une garde de COx sain supérieure ou égale à 50 m au-dessus et en-dessous du stockage. Les incertitudes résiduelles sur la géométrie (liées au calage du modèle de vitesse de l'imagerie sismique) ne remettent pas en cause l'épaisseur requise du COx pour un stockage ; le positionnement exact des ouvrages au centre de la couche pourra être affiné grâce aux mesures acquises lors du creusement.*

### 5.2.2 Limiter les circulations d'eau pour atténuer et retarder la migration des radionucléides

L'architecture du stockage et la configuration borgne des quartiers de stockage HA et MAVL permettent de limiter les circulations d'eau souterraines dans le stockage en minimisant le gradient hydraulique entre les extrémités des alvéoles. Le regroupement au fond du débouché des LSF limite également la création de gradients hydrauliques au sein de l'ouvrage.

La mise en place de noyaux de scellement dans les galeries de liaison après retrait des voussoirs et dans les LSF vise à sceller les voies de transfert entre les quartiers de stockage et la surface. Elle complète le rôle de l'architecture borgne en limitant encore les flux et les vitesses d'eau circulant au sein de l'ouvrage puis *via* les LSF entre la surface, les aquifères sus-jacents et le stockage.

*Les données sur les propriétés des composants du stockage (cf. sections 4.3, 4.4 et 4.6) et les outils de modélisation développés et qualifiés (cf. section 4.11) permettent à l'Andra de quantifier les flux à travers les ouvrages et le COx.*



*Les modélisations qui prennent en compte ces données confirment quantitativement le comportement attendu : la conception permet de limiter après fermeture les transferts via les galeries et à travers les liaisons surface-fond (cf. section 5.7). Ces transferts restent inférieurs à ceux, eux-mêmes très faibles, qui auront lieu par diffusion des alvéoles vers le COx. De ce fait, la présence des scellements ne remet pas en cause les propriétés particulièrement favorables du COx en termes de capacité de rétention et de vitesses de transfert très faibles.*

### 5.2.3 Assurer la réversibilité du stockage

La réversibilité implique le déploiement progressif de la construction, la flexibilité de l'exploitation, l'adaptabilité des installations et la récupérabilité des colis stockés.

À ce titre, l'Andra prévoit le déploiement progressif de l'architecture souterraine au cours de la Phipil (cf. section 6.1). Il débutera par la construction et l'exploitation du quartier pilote HA et de quatre alvéoles du quartier de stockage MAVL. Il comprendra des démonstrateurs d'alvéoles pour tester les conditions d'exploitation et de fermeture, et des alvéoles témoins.

L'exigence de récupérabilité implique que le stockage doit être construit pour rendre possible les options de retrait des colis stockés. L'Andra prévoit de maintenir en conditions opérationnelles l'ouvrage souterrain pendant la durée retenue pour la réversibilité d'au moins cent ans. Cela implique en particulier de démontrer que les liaisons surface-fond et les galeries associées seront disponibles pendant au moins la durée de l'exploitation (cf. 5.3.3).

Concernant l'adaptabilité, l'Andra a vérifié la disponibilité de réserves de surface et volume dans la ZIRA pour éventuellement accepter les colis identifiés dans l'inventaire de réserve. Cependant, l'Andra ne donne pas d'éléments sur la qualification du stockage pour l'inventaire de réserve, ce qui est conforme aux exigences du dossier de DAC à ce stade du projet, qui ne concerne que l'inventaire de référence.

## 5.3 Alvéoles HA

L'Andra divise l'installation souterraine pour les déchets HA en deux zones : le quartier pilote HA et le quartier de stockage HA, qui sont tous deux perpendiculaires à la galerie d'accès qui les dessert. Les alvéoles HA du quartier pilote sont destinées à accueillir des colis de déchets vitrifiés faiblement exothermiques. Les alvéoles du quartier de stockage recevront les colis HA fortement exothermiques.

Le quartier pilote HA contiendra 22 alvéoles : 18 actifs, 3 inactifs utilisés comme des alvéoles témoin de la déformation du chemisage et de la corrosion des aciers des colis et du chemisage, et un démonstrateur de fermeture. Le quartier pilote HA sera intégré à la première tranche d'exploitation, et aura aussi pour objet la qualification de la constructibilité des alvéoles HA, de la récupérabilité des colis et du déploiement des moyens de surveillance.

Le quartier de stockage HA, dont la mise en service n'est prévue que vers 2080, se répartira suivant 4 sous-quartiers centrés sur 4 galeries d'accès et se composera d'environ 1 000 alvéoles.

Les fonctions majeures assurées par l'architecture du quartier et des alvéoles HA sont les suivantes :

- préserver les caractéristiques du COx ;
- limiter le relâchement des radionucléides, atténuer et retarder leur migration ;
- permettre la récupérabilité des colis HA.

### 5.3.1 Préserver les propriétés du COx

Tous les alvéoles sont creusés sur un seul niveau horizontal avec un pendage légèrement ascendant pour permettre un drainage éventuel, et sont orientés N155°E suivant la direction de la contrainte principale horizontale majeure (cf. 4.4.8).

Les alvéoles du quartier pilote sont organisés suivant une géométrie en peigne perpendiculairement à leur galerie d'accès alors que ceux du quartier de stockage sont organisés suivant une géométrie en râteau par rapport à l'une des 4 galeries d'accès prévues. Le diamètre de creusement est d'environ 80 cm et la longueur est de 80 m pour les alvéoles du quartier pilote et de 150 m minimum pour les alvéoles du quartier de stockage, soit un rapport longueur/diamètre très élevé.

Ces dispositions constructives visent à :

- assurer une épaisseur de garde du COx suffisante de part et d'autre des alvéoles ;
- limiter l'endommagement autour de l'alvéole (qui est proportionnel au diamètre de creusement) ;
- limiter l'endommagement vertical (écaillage, chute de blocs) en lien avec l'état de contraintes de la formation et préserver ainsi l'épaisseur de garde saine du COx.

*La Commission estime que les choix de géométrie pour les alvéoles HA (direction parallèle à la contrainte horizontale majeure, petit diamètre) sont de nature à limiter l'extension de l'endommagement autour de l'alvéole (de l'ordre mètre) et donc préserver les propriétés du COx. Les impacts du creusement des alvéoles sur le COx ont été qualifiés au laboratoire souterrain ; il est prévu de vérifier la transposabilité de ce comportement dans la ZIRA lors de la Phipil.*

La répartition des colis au sein d'un alvéole et l'espacement des alvéoles du quartier HA entre elles (entraxe d'environ 50 m) sont dimensionnés pour limiter la densité de chargement afin de garantir le respect des critères de température et de contrainte mécanique. Le critère thermique considérant une température maximale de 90°C au contact du COx vise à éviter les transformations de phase (notamment ébullition de l'eau à 100°C) qui pourrait générer des perturbations hydraulique/gaz. Les critères mécaniques et thermiques visent à assurer que l'évolution des contraintes, liée aux comportements couplés thermo-hydro-mécaniques (THM) de la roche et des fluides, ne conduise pas à des ruptures en traction ou en cisaillement du COx. Ce phénomène est maximal à l'entraxe entre deux alvéoles pour des raisons de symétrie. Sa modélisation est facilitée par la grande longueur des alvéoles par rapport à leur diamètre qui autorise une approche bidimensionnelle. En se basant sur des expérimentations *in situ*, l'Andra a choisi d'utiliser une loi de comportement simplifiée poro-élastique pour modéliser les processus THM et dimensionner la distance entre alvéoles, afin de ne jamais atteindre le risque de fracturation suite à une rupture en traction.

Ces dispositions visent à limiter les perturbations thermiques ou hydraulique/gaz liées à l'augmentation de température pouvant engendrer des transformations minéralogiques, mécaniques et géochimiques du COx.

*L'Andra a réalisé la modélisation géomécanique de l'endommagement du COx au voisinage des alvéoles suivant différentes hypothèses (géométrie 2D, 3D), en s'appuyant sur des expériences au laboratoire souterrain.*

*Le modèle thermo-poro-visco-plastique développé rend bien compte des expériences en champ proche. L'Andra a utilisé un modèle simplifié thermo-poro-élastique, moins coûteux en temps de calcul, qui donne des résultats enveloppes quand on s'éloigne de quelques mètres du corps chauffant.*

*La Commission considère que l'approche simplifiée qui a été utilisée par l'Andra pour le dimensionnement des quartiers HA est effectivement qualifiée.*

### 5.3.2 Limiter le relâchement des radionucléides, atténuer et retarder leur migration

Les alvéoles sont des tunnels borgnes (i.e., avec un seul orifice d'entrée/sortie), avec un rapport longueur/diamètre élevé. Ils sont creusés suivant une légère pente ascendante (+2% environ). Cette disposition de conception permet de :

- drainer les eaux issues du COx vers les galeries d'accès lors de la phase d'exploitation afin de limiter les phénomènes de corrosion ;
- favoriser la surface de contact avec le COx, ce qui privilégie le transfert diffusif *via* le COx par rapport au flux qui pourrait parvenir aux galeries *via* la tête d'alvéole.

Le matériau de remplissage de type coulis cimentaire (MREA) injecté dans l'espace annulaire en extradors du chemisage et le bouchon de fermeture à gonflement d'argile différé mis en place en tête d'alvéole ont pour fonction de :

- protéger le chemisage de la corrosion ;
- limiter les perturbations chimiques à l'interface avec la galerie ou avec le COx ;
- limiter l'arrivée et la circulation d'oxygène dans l'alvéole depuis la galerie.

Cette conception vise à maintenir à l'interface avec le COx des propriétés physico-chimiques favorables à la conservation des propriétés de confinement du COx. En particulier le MREA doit neutraliser le transitoire à bas pH lié à l'oxydation des pyrites, susceptible d'aggraver la corrosion des aciers des chemisages (cf. 4.7.1 et 4.7.2).

*Un matériau de remplissage de type coulis cimentaire (MREA) est injecté dans l'espace annulaire en extradors du chemisage La formulation du MREA est encore en cours d'affinement.*

*La Commission considère que l'Andra a démontré qu'il existe des matériaux MREA qui répondent aux exigences de conception. Leur formulation devra être précisée.*

### 5.3.3 Assurer la récupérabilité des colis HA

Un chemisage en acier bas carbone de diamètre 66-76 cm et de 25 mm d'épaisseur est mis en place dans les alvéoles HA. Ce chemisage a pour rôle de soutenir mécaniquement l'alvéole en le protégeant de l'effet de la convergence mécanique du COx pendant une durée séculaire. Le taux de vide entre le chemisage et les colis de stockage est minimisé pour restreindre la déformation en champ proche tout en préservant la récupérabilité des colis. La nuance (caractéristique exprimée par les propriétés mécaniques et chimiques) de l'acier a été établie pour satisfaire à un comportement à la corrosion homogène et bien défini (cf. 4.5.2). La modélisation du comportement thermo-mécano-chimique du chemisage montre que sa déformation est suffisamment faible pour garantir la persistance d'un jeu suffisant pour le retrait des colis tout au long de la période de récupérabilité.

La procédure de mise en place du chemisage et la vérification de sa tenue mécanique ont fait l'objet d'expérimentations au laboratoire souterrain et un prototype de robot destiné à retirer les colis HA a été testé en laboratoire. Il est prévu d'expérimenter les équipements et procédures de récupération de colis au cours de la Phipil.

La tête d'alvéole contient le dock d'accostage et les dispositifs d'obturation. Une bride d'exploitation étanche est placée sur la façade d'accostage pour isoler l'alvéole de la galerie au moment du dépôt des colis et des intercalaires. Son rôle est de limiter la pénétration de l'oxygène dans l'alvéole. Les équipements d'obturation intègrent des liaisons avec les dispositifs de surveillance de l'atmosphère ambiante (température, présence d'eau, composition). L'Andra prévoit la possibilité d'évacuer l'eau, ainsi que d'effectuer un balayage à l'azote de l'atmosphère de l'alvéole, en fonction de l'analyse de sa composition (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), afin de maintenir des teneurs en O<sub>2</sub> suffisamment faibles pour exclure le risque ATEX. Ce dispositif peut en particulier être actionné avant ouverture de l'alvéole en vue de la récupération des colis.

*La Commission prend acte du fait que l'Andra a jugé nécessaire à ce stade des études, d'intégrer un dispositif actif (surveillance et balayage à l'azote) pour les alvéoles HA afin de gérer le risque ATEX en exploitation, en particulier au moment d'une éventuelle récupération de colis.*

*La Commission recommande de poursuivre les études sur la production d'hydrogène dans les alvéoles HA en conditions d'exploitation en vue d'optimiser la maîtrise du risque de formation d'une atmosphère explosive.*

Le remplissage de l'alvéole se termine par l'introduction de quatre conteneurs en tôle mince remplis d'argile gonflante compactée. Après fermeture, lorsque la corrosion de la tôle mince sacrificielle permettra l'entrée de l'eau dans ces conteneurs, le gonflement de l'argile assurera l'étanchéité de l'alvéole.

*La Commission note que le risque ATEX est totalement évacué en après-fermeture, en raison de la disparition rapide de l'oxygène dans les galeries d'accès peu après l'arrêt de la ventilation.*

## 5.4 Alvéoles MAVL

Les colis de déchets de moyenne activité à vie longue sont destinés à être stockés dans les alvéoles du quartier MAVL, perpendiculaires à la galerie de liaison. Ces alvéoles sont conçus pour l'entreposage de deux types de colis : des colis en conteneur de stockage et des colis primaires stockés directement ou en panier. Pour diminuer le volume de stockage (et ainsi réduire l'emprise dans la formation géologique et économiser des matériaux de construction) mais aussi limiter les vides résiduels entre les conteneurs, les colis sont empilés selon leur géométrie sur une à trois nappes en hauteur et sur une à trois files en largeur. Seule exception, les colis primaires de grande dimension (CS6) en conteneur métallique sont répartis une seule nappe. Le regroupement des colis par familles de déchets est guidée par la compatibilité physico-chimique des déchets qu'ils contiennent, leur puissance thermique, leur géométrie et leur chronologie d'arrivée.

Les alvéoles MAVL sont de type tunnel circulaire, de 500 m de longueur utile et d'un diamètre de 8 m. Pour l'architecture des alvéoles du quartier MAVL, le caractère borgne n'a pas été retenu pour permettre la ventilation en continu pendant l'exploitation.

Ces alvéoles sont creusés mécaniquement par un tunnelier puis soutenus par des voussoirs en béton préfabriqués. Un matériau compressible est intégré à l'extrados du voussoir au contact de l'argilite du COx (*cf.* Annexe III.6). Un radier en béton est ensuite coulé en partie basse. Pour ajuster la géométrie de la chambre de stockage de l'alvéole à l'empilage des colis, des éléments de remplissage en béton forment une section rectangulaire.

À la fermeture de l'alvéole, la galerie d'accès sera comblée par des remblais après démantèlement des équipements et des cellules de manutention ; les gaines techniques seront injectées de coulis cimentaire.

Les fonctions majeures assurées par l'architecture du quartier et le choix de conception des alvéoles MAVL sont les suivantes :

- préserver les propriétés du COx en limitant les perturbations mécaniques et chimiques induites au voisinage dans la roche ;
- limiter le relâchement des radionucléides et des substances toxiques chimiques, et les immobiliser dans les alvéoles de stockage en fournissant un environnement alcalin favorable à l'insolubilisation ou à la rétention de certains radionucléides ;
- retarder et atténuer la migration des radionucléides et des substances toxiques chimiques qui auront été relâchés des alvéoles de stockage, en préservant une épaisseur d'argilite au-dessus et en dessous de l'alvéole qui constitue une barrière de diffusion.

### 5.4.1 Préserver les propriétés du COx

Les alvéoles MAVL et leurs galeries d'accès sont situés en partie médiane de la couche du Callovo-Oxfordien et orientés selon la contrainte horizontale principale majeure. Cette implantation a pour objectif de garantir une garde argileuse saine minimale de 50 m au-dessus et en dessous de l'ouvrage.

L'orientation suivant la contrainte principale horizontale majeure (N155°E) réduit la propagation en champ proche de la zone fracturée (connectée et non-connectée) au-dessus et

en dessous de l'excavation, tant lors du creusement de l'alvéole que sur le très long terme après la perte d'intégrité des revêtements (cf. 4.4.8). Il a été démontré que la zone du COx affectée par le creusement est inférieure à 0,9 fois le rayon du tunnel excavé.

Du point de vue de la tenue mécanique, comme décrit précédemment, le comportement du COx se caractérise après excavation par une phase de convergence rapide qui induit des efforts sur les voussoirs, maîtrisée par l'utilisation de matériaux compressibles. La tenue des soutènements préserve de l'effondrement de la roche.

D'un point de vue chimique, pendant la phase d'exploitation, le COx et les matériaux cimentaires peuvent interagir (cf. 4.7.1). La présence d'oxygène a pour conséquence une oxydation des pyrites du COx en champ proche. L'extension de cette perturbation du COx a été évaluée à moins d'un mètre.

*La Commission estime que l'Andra a démontré que la conception des alvéoles et l'ajustement de la composition des bétons permettent de limiter les perturbations mécaniques du COx à l'interface avec les structures.*

Après construction et au cours de la période d'exploitation, l'extension et les caractéristiques hydro-mécaniques de la zone endommagée du COx sont surveillées afin de vérifier que le comportement reste conforme aux calculs réalisés pour l'évaluation de sûreté.

Concernant la période post-fermeture, deux dispositions minimisent l'endommagement par foisonnement du COx lors de la ruine des ouvrages à très long terme. D'une part, l'utilisation de matériaux compressibles en extradoss des voussoirs retarde la perte d'intégrité des ouvrages. D'autre part, les vides résiduels sont réduits dans les alvéoles et les galeries d'accès sont remblayées. Ces dispositions contribuent à maîtriser l'évolution mécanique à long terme en limitant l'extension de la zone endommagée.

*La Commission estime que les dispositions constructives retenues par l'Andra sont de nature à retarder la ruine des alvéoles de plusieurs centaines d'années après la fermeture. Les calculs mécaniques, soutenus par des modélisations numériques, montrent que l'extension de la zone endommagée dans le COx résultant de la ruine est inférieure au rayon de l'ouvrage, soit de l'ordre de la dizaine de mètres au maximum, ce qui préserve l'épaisseur de garde du COx requise.*

#### 5.4.2 Limiter le relâchement des radionucléides, atténuer et retarder leur migration

La composition chimique des matériaux cimentaires (béton de revêtement, de colisage et de remplissage) permet le confinement des radionucléides des déchets MAVL. L'alcalinité de l'eau porale diminue la solubilité d'une grande majorité des substances radioactives et toxiques chimiques, notamment des actinides. Les phases de silicates de calcium hydratés participent à l'immobilisation des radionucléides grâce à leurs capacités de sorption.

L'intégrité mécanique des colis MAVL est préservée par la présence d'un revêtement durable des alvéoles, et par la minimisation des vides résiduels. Pendant la phase d'exploitation, la régulation hygrothermique des alvéoles et leur ventilation préservent les bétons de la dégradation, c'est-à-dire de la modification minéralogique de leurs phases hydratées et de leur fissuration.

D'un point de vue chimique, le COx et les matériaux cimentaires peuvent interagir (cf. 4.6.1). Le caractère alcalin des bétons peut augmenter le pH et modifier la composition de l'eau porale du COx via un apport en ions carbonates et sulfates. L'oxydation des pyrites du COx en champ proche en présence d'oxygène se traduit également par une augmentation de la concentration en sulfates. Il a été démontré que les propriétés de rétention et de transfert (caractérisé par la perméabilité et la diffusivité) des radionucléides par le COx n'étaient pas modifiées par l'oxydation des pyrites en milieu alcalin. En particulier, le comportement des actinides reste dominé par les phénomènes d'hydrolyse donnant des espèces fortement retenues sur les argiles. Pour préserver les caractéristiques favorables du COx, la composition des matériaux cimentaires est sélectionnée pour limiter les perturbations chimiques.

*La Commission estime que l'Andra a démontré que la conception des alvéoles et l'ajustement de la composition des bétons permettent de limiter les perturbations chimiques du COx à l'interface avec les structures.*

*La Commission estime que la connaissance des processus chimiques, l'existence de bases de données thermodynamiques internationales, et les codes qualifiés permettent de quantifier la migration des radionucléides de l'alvéole vers le COx. Ces résultats sont intégrés dans les calculs à diverses échelles et participent au calcul de sûreté.*

#### 5.4.3 Assurer la récupérabilité des colis MAVL

La conception des alvéoles MAVL garantit également la récupérabilité des colis pendant la durée séculaire prévue de la phase d'exploitation. La manutention en cas de récupération de colis est facilitée par :

- le jeu prévu entre les colis ;
- la géométrie de l'empilement des colis (forme parallélépipédique) dans l'alvéole de stockage.

*Les dispositifs et procédures de récupération des colis, y compris en cas d'anomalie de gerbage, feront l'objet de tests de qualification pendant la Phipil.*

La condition essentielle pour la récupérabilité est que les alvéoles conservent leur stabilité mécanique pendant toute la durée d'exploitation. Les dispositions constructives ont été choisies pour atteindre cet objectif.

Comme évoqué au paragraphe 4.4.8, après creusement le comportement thermo-hydro-mécanique du COx induit, en réponse à la convergence, des efforts sur le revêtement et les structures du génie civil de l'alvéole. Le comportement différé du COx, de type fluage, entraîne un chargement mécanique des voussoirs. L'Andra a mis au point un concept de voussoirs compressibles pour différer les effets de ces phénomènes de convergence.

Il s'agit d'un dispositif constitué d'un matériau compressible placé derrière le béton du voussoir ou intégré au voussoir. Le matériau compressible absorbe l'essentiel de la convergence initiale en se déformant et réduit la contrainte appliquée à la couche de béton du voussoir.

Pour qualifier ce concept, l'Andra a caractérisé le comportement mécanique de matériaux bi-couche (matériau compressible/béton) en laboratoire, a mené des essais à grande échelle

(échelle ¾) au laboratoire souterrain, et a finalement modélisé leur comportement à long terme sur la base des données obtenues.

Les modélisations numériques sont basées sur un modèle poro-élasto-visco-plastique avec écrouissage (cf. Annexe III.6). Les calculs montrent ainsi qu'une épaisseur de 20 cm de matériau compressible avec une fin de palier plastique à 50 % de déformation associée à des voussoirs de 50 cm de béton armé de classe C60/75 permettent d'assurer la tenue mécanique de la structure de l'alvéole. À la fin de la période séculaire, les contraintes en compression dans le revêtement atteignent 25 à 30 MPa, valeurs inférieures à la résistance de 36 MPa correspondant à l'état ultime de service pour laquelle le soutènement est dimensionné. Un écrasement maximal de 25 % du matériau compressible en résulte. Selon ces hypothèses, la rupture du revêtement commence à partir de 500 ans.

Les simulations numériques ont confirmé l'intérêt de ce concept et déterminé les caractéristiques nécessaires de ce matériau compressible pour assurer la fonction visée. À ce jour, plusieurs formulations de matériaux compressibles ont été testées.

*La démarche de conception de l'alvéole MAVL s'appuie sur la connaissance fine du comportement mécanique de la roche associée à un fort retour d'expérience au laboratoire souterrain. La Commission observe que la proposition de voussoirs composites compressibles (annulaires en béton avec couche compressible en extradors) permet de fortement réduire la contrainte résiduelle que doivent supporter les soutènements. Plusieurs formulations de matériaux compressibles sont à l'étude, avec des expériences à l'échelle 1 en laboratoire pour une étude paramétrique, et sur des alvéoles à l'échelle 3/4 au laboratoire souterrain pour une étude in situ.*

*La Commission estime que l'Andra a validé son concept innovant de voussoirs compressibles. Il reste à l'Andra à finaliser le choix de la composition du matériau compressible et à en qualifier le comportement.*

Pendant la phase d'exploitation, les bétons sont aussi soumis à la carbonatation atmosphérique. Cependant, il a été démontré que l'épaisseur de carbonatation dans les conditions hygrothermiques maîtrisées par la ventilation du stockage ne dépasse pas quelques centimètres, ce qui ne compromet pas l'intégrité des structures.

## 5.5 Alvéoles MAVL pour le stockage des déchets bitumés

Les déchets bitumés figurant dans l'inventaire de référence de l'installation Cigéo appartiennent à la catégorie MAVL. Ils sont donc destinés à être stockés au sein du quartier MAVL dans des alvéoles construits selon les dispositions décrites ci-dessus. Toutefois, ces déchets présentent des risques spécifiques qui ont conduit l'Andra à renforcer les alvéoles qui les contiendront, en particulier pour ce qui concerne la détection et la lutte contre l'incendie.

D'une façon générale, les déchets radioactifs bitumés sont composés de boues séchées radioactives et de quantités importantes de sels solubles ou non, dispersés dans du bitume. Ces enrobés sont conditionnés en fûts en acier (FEB).

Les enrobés bitumés des FEB sont combustibles dans certaines conditions. Les FEB présentent de ce fait un risque spécifique vis-à-vis de l'incendie pendant la phase d'exploitation. Cela a



conduit l'ASN, après examen du dossier d'options de sûreté de Cigéo, à considérer que la connaissance de ces colis de déchets était insuffisante pour permettre leur stockage en l'état. L'ASN a recommandé de poursuivre l'étude de leur comportement et d'étudier en parallèle la neutralisation de leur réactivité chimique. L'ASN a également estimé que leur stockage en l'état, s'il s'avérait possible, nécessiterait des dispositions particulières de maîtrise du risque incendie dans les alvéoles qui les contiendraient. Les travaux de R&D indispensables sur ces points ne sont pas achevés au moment de la parution de la demande d'autorisation de création de Cigéo. Il n'est donc pas possible de statuer sur la possibilité de stocker en l'état les FEB.

*Un programme de R&D quadripartite (CEA, EDF, Orano, Andra) nommé Babylone a été lancé en 2020 pour améliorer la connaissance des fûts d'enrobés bitumés. Il devrait permettre de disposer d'une synthèse générale sur le comportement thermique des enrobés et l'impact du gonflement des bitumes sur le COx. Les résultats sont annoncés par les acteurs pour la fin de l'année 2027. Ils permettront le choix du mode et des modalités de stockage des fûts d'enrobés bitumés, qui sera effectué postérieurement au décret d'autorisation de création de Cigéo.*

#### 5.5.1 Préserver les propriétés du COx

Les FEB présentent un risque spécifique vis-à-vis de la sûreté à long terme. En effet, la reprise d'eau du bitume après la fermeture du stockage conduit à un gonflement susceptible d'induire une mise en contrainte mécanique du COx aux parois des alvéoles, et par conséquent de développer un sur-endommagement mécanique en champ proche par rapport à la zone endommagée initiale induite par le creusement.

Les résultats sur les caractéristiques de gonflement et les simulations de leurs effets montrent une légère extension de l'endommagement dû au creusement, limitée verticalement, qui ne remet pas en cause l'épaisseur de garde saine du COx. Le volet 3 du programme Babylone sur les FEB, dont l'achèvement est actuellement prévu fin 2026, doit améliorer la connaissance afin de consolider le caractère conservatif de l'approche utilisée.

#### 5.5.2 Modes de stockage des enrobés bitumés

Le stockage des FEB est envisagé postérieurement à la Phipil. Le choix du mode de stockage n'est donc pas nécessaire pour le décret d'autorisation de création. L'Andra retient à ce stade du dossier, compte tenu des premiers résultats des études en cours, deux modes de stockage possibles :

- un stockage des FEB en l'état (sans traitement préalable du bitume) placés dans des conteneurs de stockage en béton renforcés vis-à-vis du risque incendie et dans des alvéoles dédiés ;
- un stockage après traitement et reconditionnement visant la neutralisation de la réactivité chimique ; les FEB seraient transformés alors en déchets MAVL stockables dans des alvéoles non dédiés.

*Dans son dossier de DAC, l'Andra a étudié deux options de stockage dans Cigéo (stockage en l'état dans des alvéoles MAVL renforcés vis-à-vis du risque incendie et dédiés ou*

*stockage de déchets issus de la neutralisation des bitumes dans des alvéoles MAVL non dédiés), qui permettront de fournir un exutoire à ces déchets quels que soient les résultats du programme Babylone.*

## 5.6 Galeries

Les galeries n'ont pas de fonction de sûreté à long terme, en revanche elles contribuent à l'objectif de récupérabilité en garantissant l'accès aux alvéoles pendant la durée d'exploitation. Cet enjeu de stabilité des infrastructures sur cette durée concerne l'ensemble des galeries d'accès.

L'objectif de récupérabilité, au moins séculaire, constitue un enjeu particulier pour la démonstration. En effet, les méthodes qualifiées internationalement pour dimensionner les ouvrages de génie civil (Eurocodes) considèrent une durée de vie de 100 ans au maximum. Pour dimensionner les structures, l'Andra s'est basé sur la méthode des Eurocodes, mais en définissant des états limites de service (ELS) et ultime (ELU) étendus. Elle a ensuite fait reposer sa démonstration sur des calculs spécifiques intégrant les résultats de campagnes d'essais adaptées, réalisées au laboratoire souterrain ou dans d'autres infrastructures souterraines.

*La Commission estime que la démarche choisie par l'Andra et les études numériques réalisées permettent de vérifier la tenue des structures du génie civil pendant la durée de service de l'ouvrage.*

Le principal enjeu est la durabilité des structures en béton. Plusieurs solutions ont été développées pour y répondre au niveau de la conception, des dispositions constructives et de la surveillance. Tout d'abord, pour accroître la durée de vie de l'ouvrage soumis aux efforts mécaniques induits par la convergence de la roche, un matériau compressible est incorporé au revêtement ou voussoir en béton (cf. 5.4.1). Ceci permet de réduire les épaisseurs mais aussi les éventuels ferraillements du revêtement, potentiellement corrodables. D'autre part, des formulations spécifiques de béton ont été mises au point et validées par des approches performanciennes en considérant les conditions réelles du stockage. Des recommandations de mises en œuvre ont été formulées pour garantir une exécution de niveau élevé et pour prévenir des pathologies telles que la réaction sulfatique interne et la réaction alcali-granulats. La prédiction du comportement de l'ouvrage à moyen et long terme a été réalisée en couplant des modèles thermo-hygro-mécano-chimiques. Elle a ainsi pu valider les dispositions prises.

Pour finir, les moyens prévus pour surveiller la durabilité des structures (capteurs de température et d'humidité, jauges de contraintes, détection de défauts) vérifieront le bon fonctionnement du stockage durant la phase d'exploitation et guideront au besoin la programmation de réparations voire de jouvences.

*La Commission recommande que, dans une approche prudente, l'Andra établisse et teste des procédures de réparation de structures de génie civil endommagées.*

## 5.7 Ouvrages de scellement

Les scellements interviennent dans la conception du stockage pour fermer définitivement les différents quartiers HA et MAVL et pour isoler définitivement l'ensemble de l'ouvrage de l'aquifère de l'Oxfordien. Dans le premier cas, ils sont réalisés dans les galeries de liaison creusées dans l'unité argileuse. Dans le deuxième cas, ils sont réalisés au droit de l'unité silto-carbonatée (USC) dans les liaisons surface-fond (LSF : puits et descenderies).

Les scellements assurent ainsi une fonction d'isolement en constituant une barrière à l'intrusion humaine au moins aussi difficile à franchir que celle posée par le COx sain. En revanche, les scellements sont une entrave à la récupérabilité. La date à laquelle ils seront construits doit donc être définie en fonction des choix qui seront faits en matière de réversibilité (cf. section 6.2).

La fonction de sûreté principale des scellements est de limiter la circulation d'eau dans le stockage, tout en préservant l'intégrité des propriétés du COx. L'eau qui sollicitera les scellements aura deux origines : d'une part l'eau en provenance des aquifères de la couverture du COx qui exercera très rapidement (quelques années à quelques dizaines d'années après la fermeture) une pression sur l'extrémité externe des scellements des LSF, d'autre part, l'eau issue du drainage du COx vers l'intérieur du stockage qui sollicitera progressivement (quelques dizaines à centaines de milliers d'années) les extrémités internes des scellements des LSF ainsi que les scellements de galeries. Le processus de drainage du COx entrera en compétition avec le dégagement d'hydrogène de radiolyse et de corrosion anoxique des aciers, qui maintiendra une pression de gaz pendant une durée estimée à plusieurs centaines de milliers d'années. Ce délai important pour la resaturation en eau du stockage est favorable pour limiter le relâchement des radionucléides au sein des alvéoles mais le transitoire eau-gaz doit être pris en compte pour éviter un endommagement du COx dû à une surpression de gaz. Ainsi, pour assurer la fonction de sûreté « limiter la circulation d'eau sans endommager le COx », les scellements doivent présenter deux propriétés apparemment contradictoires, être très peu perméables à l'eau et être suffisamment perméables au gaz, même dans des conditions proches de la saturation en eau.

Pour répondre à cette double exigence, l'Andra a proposé un concept général de scellement dont l'élément constitutif actif principal est un noyau argileux, composé d'un mélange d'argile et de sable, aux propriétés adéquates.

Pour assurer la meilleure continuité du scellement avec le COx, le noyau argileux s'appuiera directement sur le COx sain sur la totalité de la longueur du scellement dans les puits ou sur une série de tronçons dans les galeries et descenderies. Dans les deux cas, le contact avec le COx sera assuré par la dépose du soutènement et le purgeage de l'argilite endommagée. Le bouchon aura une longueur de 40 m en galerie et occupera toute l'emprise de l'USC traversée par les LSF (environ 120 m). Le noyau argileux sera confiné mécaniquement à ses extrémités par deux massifs d'appui en béton. Pour les scellements horizontaux, l'Andra a examiné différentes options portant sur la possibilité de supprimer les massifs d'appui en comptant sur la tenue mécanique par simple frottement du noyau sur l'argilite et en recherchant à réduire l'effet de la fracturation connectée dans la zone endommagée au moyen de saignées remplies des matériaux argileux.

La démarche de qualification du concept de scellement repose sur la définition à partir d'essais en laboratoires de surface et souterrain des matériaux constitutifs du noyau argileux, sur la

quantification de leurs propriétés et sur la modélisation du comportement de l'ensemble en conditions de stockage. Les essais ont porté essentiellement sur la phénoménologie de la resaturation en eau du noyau argileux (à l'échelle ½ au laboratoire souterrain) et sur les techniques de mise en place en galerie (à l'échelle 1 en laboratoire de surface).

#### 5.7.1 Préserver les propriétés du COx

Des phénomènes de radiolyse et de corrosion anoxique des aciers auront lieu au sein du stockage et seront générateurs d'hydrogène. La production lente et continue de gaz induira, quelques milliers d'années après la fermeture du stockage, une surpression qui doit rester limitée pour ne pas endommager le COx. L'Andra a montré que le mélange de 40 % de bentonite et de 60 % de sable possède des propriétés adaptées à la migration du gaz : pression d'entrée de gaz inférieure à 2 MPa et perméabilité au gaz élevée, de trois ordres de grandeurs supérieure à celle de l'eau, même pour un milieu quasi saturé en eau, alors même que la perméabilité à l'eau reste très faible, de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (cf. 4.5.3).

Les dernières modélisations du transitoire eau-gaz effectués par l'Andra, prenant en compte les propriétés du matériau du noyau, conduisent à une valeur maximale « au mieux de la connaissance » de pression de gaz de 7,5 MPa, et de 10 MPa dans le cas utilisant les valeurs hautes dans la gamme des incertitudes des paramètres. Ces valeurs sont inférieures à la contrainte horizontale mineure existant dans le COx, mesurée à  $11,5 \pm 0,3 \text{ MPa}$ , ce qui permet d'éviter la fracturation de la roche selon le modèle hydro-mécanique utilisé.

#### 5.7.2 Fonction limiter les flux d'eau via les LSF

La limitation des flux d'eau, utile pour s'opposer au transfert des radionucléides qui parviendraient à migrer des alvéoles vers les galeries d'accès, est assurée par la très faible perméabilité du noyau argileux et par le retour à une perméabilité proche de la perméabilité initiale de l'argilite du COx endommagé environnant, sous l'effet de la pression exercée par le gonflement des matériaux du noyau au cours de la resaturation. Les paramètres dimensionnants sont donc la perméabilité à l'eau du noyau et la pression de gonflement.

Les essais en vraie grandeur ont permis de tester différentes méthodes de mise en place. Ils ont montré que des valeurs adaptées sont obtenues pour un noyau argileux constitué d'un mélange de 40 % de bentonite avec du sable siliceux, avec une densité sèche de 1,3. L'objectif de perméabilité à l'eau obtenu est de  $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et la pression de gonflement est comprise entre 1 et 4 MPa ce qui permet d'assurer la cicatrisation de la fracturation de la zone fracturée (connectée ou non) développée à proximité de l'ouvrage au moment de son creusement, et sans risque d'une nouvelle fracturation du COx.

*La Commission estime que l'Andra a fait la démonstration de sa capacité à mettre en place le matériau de scellement et de choisir une formulation qui permette d'atteindre les propriétés hydro-mécaniques désirées (perméabilité au gaz mais faible perméabilité à l'eau, pression de gonflement) des scellements.*

### 5.7.3 Avis de la Commission

Pour la DAC, le concept de scellement n'est pas encore totalement validé *in situ*. Les calculs de sûreté réalisés par l'Andra montrent que dans le cas d'un scénario *what-if* ? très pénalisant où tous les scellements sont défailants, le débit molaire des radionucléides les plus mobiles ( $^{129}\text{I}$  et  $^{36}\text{Cl}$ ) reste au moins d'un ordre de grandeur inférieur au débit molaire émis par diffusion au toit du COx dans le cas du scénario d'évolution normal.

L'Andra projette dans les prochaines années la réalisation de démonstrateurs pour étudier le mode de mise en place de remblai et de scellement avec ou sans massif d'appui. Un programme expérimental complémentaire a été initié pour consolider les connaissances sur le comportement hydromécanique et chimique du matériau constitutif du noyau, en contexte de stockage.

*Au stade actuel, l'Andra a défini un concept de scellement pour les galeries de fond et les liaisons surface-fond à partir d'éléments matériaux dont le comportement phénoménologique a été étudié, et la mise en œuvre testée à une échelle représentative, en laboratoire.*

*Les différentes configurations simulées des scellements en concept de stockage, conduisent à des performances telles que le flux de radionucléides vers les aquifères via les liaisons surface-fond reste bien inférieur au flux transitant via le COx. Dans tous les cas, le comportement des liaisons surface-fond ne remet pas en cause les performances d'ensemble du stockage.*

*L'Andra a apporté des éléments de démonstration et de quantification des propriétés de tous les éléments constitutifs de son concept de scellement. L'Andra projette dans les prochaines années la réalisation de démonstrateurs pour étudier le mode de mise en place de remblai, de scellement avec ou sans massif d'appui. Un programme expérimental complémentaire a été initié pour consolider les connaissances sur le comportement hydromécanique et chimique du matériau constitutif du noyau, en contexte de stockage.*

La Commission note que le maintien d'une pression de gaz suffisamment faible au sein du stockage pour ne pas conduire à une fracturation du COx nécessite l'emploi d'un matériau argileux composé d'un mélange d'argile et de sable aux propriétés particulières pour lequel le retour d'expérience est limité, ce qui justifie des études complémentaires.

*La Commission recommande que l'Andra achève la mise au point de son concept de scellement en programmant des démonstrateurs d'ensemble *in situ*.*

## 5.8 Fonctionnement intégré du stockage, transfert aux exutoires

Les fonctions de sûreté du stockage sont portées d'une part par les propriétés du COx, d'autre part par les dispositions constructives du stockage, conçues de manière à préserver les propriétés de la roche hôte. Ces éléments contribuent à limiter les flux de radionucléides à des

valeurs extrêmement faibles, le système de stockage n'ayant pas vocation à assurer un confinement absolu.

La démarche de sûreté complète consiste à intégrer les fonctionnements des différentes composantes du stockage en quantifiant les flux de radionucléides, aussi faibles soient-ils, tout au long de leur parcours depuis les colis jusqu'à la biosphère. La modélisation phénoménologique et les calculs associés permettent de quantifier et de suivre les flux provenant des composants du stockage et traversant le COx, puis de simuler leur propagation dans les aquifères jusqu'aux exutoires, qui constituent les points d'entrée dans la biosphère. Cela nécessite des outils de calcul intégrateurs prenant en compte tous les mécanismes de transfert et de retard des radionucléides. La démarche de sûreté repose sur les modèles opérationnels de sûreté évoqués à la section 4.11. Les calculs déterminent au final les chroniques de concentrations aux exutoires des radionucléides mobiles ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , ou  $^{79}\text{Se}$ ) et toxiques chimiques, lesquelles alimentent les modèles de biosphère qui calculent le débit de dose au groupe représentatif dans les différents scénarios.

#### 5.8.1 Flux issus des colis HA

La matrice de verre nucléaire a été spécialement conçue pour incorporer les radionucléides des déchets HA dans un réseau vitreux dont on connaît la résistance vis-à-vis de l'altération par l'eau. L'Andra utilise un modèle opérationnel de relâchement des radionucléides des colis HA très proche du modèle scientifique. Dans le scénario SEN-env, le modèle est fondé sur la vitesse initiale  $V_0$  de dégradation des colis de verre nucléaire (cf. Annexe IV.2.2), la surface de verre accessible à l'eau et un relâchement des radionucléides congruent à la dissolution du verre. Les vitesses sont exprimées en perte de masse de verre par unité de surface et par jour. En les multipliant par la surface du verre en contact avec l'eau on obtient la quantité de verre dissoute en perte de masse par jour, et donc par congruence celle des radionucléides dont la concentration dans le verre est connue.

L'eau vient au contact du verre lorsque les conteneurs des colis n'assurent plus l'étanchéité, à une date qui dépend de la vitesse de corrosion de l'acier du conteneur de stockage, lequel est dimensionné pour que cette date soit postérieure à la phase thermique.

Les choix de l'Andra se portent sur une nuance d'acier sujette à une corrosion de type généralisée et sur des hypothèses de modélisation fondées sur la lixiviation de la matrice de verre par de l'eau pure, et une surface accessible à l'eau égale à la surface géométrique développée au sein du bloc de verre fracturé à l'intérieur du colis. Ces choix et hypothèses sont conservatifs et correspondent à des cas pour lesquels les données et modèles sont les mieux établis.

*En conclusion, les choix et hypothèses de l'Andra pour modéliser la dégradation de la matrice vitrifiée des colis HA sont très conservatifs et conduisent à des valeurs de relâchement des radionucléides largement surestimées par rapport aux vitesses de relâchement attendues en conditions de stockage.*

### 5.8.2 Flux issus des colis MAVL

L'Andra considère que seuls les colis primaires de déchets métalliques activés compactés et les colis de sels enrobés dans du bitume assurent un confinement des radionucléides. Pour tous les autres colis, le terme source est considéré comme labile, c'est-à-dire que l'analyse de sûreté utilise l'hypothèse majorante que toute l'activité est libérée instantanément dès que l'eau arrive au contact des déchets.

Pour les colis de déchets métalliques compactés, le modèle de dégradation est une corrosion généralisée des divers métaux.

Pour la plupart des colis d'enrobés bitumés et dans le scénario d'évolution normale, la modélisation du relâchement des radionucléides est faite en deux temps. Le modèle phénoménologique Colonbo, qui intègre la diffusion de l'eau dans la matrice bitume, la reprise d'eau par les sels solubles, une augmentation de perméabilité, et la migration des sels et radionucléides, est d'abord utilisé pour les calculs de sûreté jusqu'à 1 000 ans. Ensuite, il est considéré une dissolution directe des sels solubles et le relâchement instantané des espèces. Dans la situation enveloppe, le modèle simplifié de dissolution directe des sels solubles et de relâchement associé des radionucléides pour tous les colis d'enrobés bitumés est appliqué dès la fermeture du stockage (hypothèse conservatrice). Ce modèle simplifié est également employé pour les colis dont la teneur en sels n'entre pas dans le domaine d'applicabilité du modèle Colonbo.

Les valeurs des paramètres vitesses de corrosion et fractions de sels solubles par colis sont bien connues.

*Les modèles utilisés par l'Andra pour décrire le relâchement des radionucléides à partir des colis MAVL sont conservatifs. Ces conservatismes conduisent à une forte majoration du terme source.*

### 5.8.3 Flux issus des alvéoles jusqu'au COx sain

La complexité des milieux de diffusion situés entre les colis et le COx sain conduit l'Andra à découper les quartiers HA et MAVL en plusieurs domaines. La partie utile où sont déposés les déchets (lieu d'émission du terme source) est considérée comme un milieu poreux homogène entièrement saturé dès la fermeture de l'alvéole. Dans ce milieu, tous les radionucléides diffusent de manière identique et à la même vitesse suivant un coefficient de diffusion assimilé à celui d'une espèce neutre. Pour le quartier HA, la partie utile comprend les colis de stockage et les intercalaires, les chemisages et vides résiduels, et enfin le coulis cimentaire de remplissage à l'extrados. Pour le quartier MAVL, elle comprend les colis de stockage et les vides.

Les radionucléides ont à franchir d'autres milieux pour atteindre le COx sain. Il s'agit pour les alvéoles HA du COx perturbé autour des alvéoles, et pour les alvéoles MAVL des parois en béton (perturbées par des sels ou des molécules organiques) et du COx perturbé (cf. Annexe IV.4.2). Le mode de transfert à travers les scellements est également pris en compte. Pour tous ces milieux, les valeurs des paramètres de diffusion sont connues. Les valeurs choisies par l'Andra sont en accord avec la vision pénalisante des calculs de performances pour les analyses de sûreté.

*Les valeurs utilisées par l'Andra pour les paramètres des modèles simplifiés de relâchement des radionucléides des colis HA et MAVL et pour leur migration sont très conservatives. La Commission estime qu'elles sont appropriées pour une analyse de sûreté.*

Les calculs de l'Andra conduisent à des débits molaires annuels en radionucléides sortants des quartiers pour les radionucléides les plus mobiles. Les calculs sont conduits jusqu'à un million d'années. Ces flux en sortie de quartier HA et MAVL sont ensuite utilisés comme valeurs d'entrée pour les calculs à l'échelle supérieure.

#### 5.8.4 Flux traversant le COx, transferts en grand jusqu'aux exutoires

Les calculs concernent en premier lieu les mécanismes de transport et de retard dans le COx depuis l'extrados des alvéoles des quartiers HA et MAVL jusqu'aux limites de la roche hôte. Ils sont basés sur une représentation simplifiée de la géométrie du stockage qui repose sur le regroupement de ses composants en macro-composants hydrauliques assimilables à des milieux poreux équivalents. L'Andra distingue ainsi la position des quartiers de stockage et des infrastructures d'accès, les galeries et leurs scellements et les liaisons surface-fond avec leurs scellements. Chaque macro-composant peut être lui-même simplifié en transformant par exemple sa géométrie pour l'adapter aux maillages des modèles numériques.

Le modèle de sûreté du transfert à travers le COx est convectif et diffusif, régi par les paramètres de transport suivants : perméabilité, porosité, coefficient de diffusion, coefficient de distribution  $K_d$  (cf. section 4.4). La simplification est recherchée en adoptant une valeur unique de perméabilité « en grand » pour cette formation provenant d'une analyse probabiliste basée sur les lois statistiques issues des mesures réalisées dans les différentes unités du COx. Les paramètres de porosité accessible, de diffusion et de rétention ( $K_d$ ) sont individualisés pour chaque radionucléide d'intérêt. Les liaisons surface-fond sont intégrées au sein du COx avec une géométrie simplifiée.

Les données d'entrée sont les flux résultant du calcul de relâchement des radionucléides et toxiques chimiques du colis dans les alvéoles selon la démarche discutée au paragraphe 5.8.3. Les résultats de ces calculs fournissent des chroniques de flux aux limites supérieure et inférieure du COx, ainsi qu'à la sortie des liaisons surface-fond.

Pour traiter le transport des radionucléides mobiles depuis les limites du COx au sein des aquifères, le modèle utilisé pour les calculs de sûreté est un modèle hydrogéologique multicouche simplifié dérivé du modèle hydrogéologique de secteur, qui lui-même s'appuie sur des conditions aux limites hydrauliques obtenues à partir du modèle hydrogéologique régional selon la méthodologie présentée au paragraphe 4.3.4. Le transport est modélisé *via* un processus convectif-dispersif dans les aquifères et diffusif dans les horizons peu perméables (dits semi-perméables). Le modèle permet de calculer les trajectoires des différents radionucléides ainsi que leur temps de transfert et les concentrations atteintes aux différents exutoires identifiés par la modélisation de la circulation des eaux dans les aquifères. La géométrie du modèle peut s'adapter aux modifications morphologiques et hydrologiques sous l'effet des évolutions géodynamiques et climatiques anticipées sur le million d'années (cf. 4.3.5).

Le choix des exutoires n'a pas d'influence sur l'écoulement et le transport à grande échelle des radionucléides dans les aquifères. Il joue en revanche un rôle dans l'évaluation de la



concentration des radionucléides dans l'eau qui sera utilisée pour alimenter les modèles de biosphère.

Pour ses calculs conduits sur un million d'années, l'Andra a considéré deux types d'exutoires, le prélèvement d'eau dans les rivières drainantes selon les conclusions du modèle hydrogéologique, et le prélèvement d'eau dans des puits captant les aquifères. Il appartient aux évaluateurs de la sûreté de valider le choix des scénarios et des exutoires associés.

### 5.8.5 Mise en œuvre de la démarche de modélisation

Le calcul intégré a été réalisé un grand nombre de fois pour tester différentes hypothèses concernant le comportement et l'évolution des composants du stockage en situation d'évolution normale ou altérée (scénarios SEN et SEA, cf. section 2.2). Cette possibilité est offerte grâce à la démarche scientifique de l'Andra qui a affecté un modèle simplifié opérationnel à chaque composant du stockage en s'assurant à chaque fois du conservatisme des hypothèses faites sur la phénoménologie et le choix de ces paramètres.

Cette démarche scientifique de l'Andra a plusieurs conséquences :

- Le conservatisme de chaque modèle individuel permet de garantir que chaque composant assurera *a minima* telle ou telle fonction de sûreté. La possibilité de multiplier les simulations avec des paramètres différents permet d'apprécier la dispersion des résultats et de réaliser des analyses de sensibilité. Le conservatisme offre de plus un moyen de pallier les incertitudes résiduelles ;
- Le découpage en modèles par composants du stockage permet de tester l'efficacité d'un composant vis-à-vis de la sûreté intégrée, en simulant différents niveaux de défaillance (scénarios SEA et *what-if ?*, cf. section 2.2) ;
- Le découpage permet d'améliorer la représentation de la phénoménologie d'un composant particulier si cela s'avère nécessaire et si les progrès scientifiques le permettent ;
- Le découpage permet enfin de s'adapter à la simulation de différents scénarios de calcul qui seront requis par les évaluateurs de la sûreté.

La réalisation d'une simulation demande l'articulation entre différents modèles numériques. Pour faciliter cette articulation et éviter les erreurs de manipulations des outils compte-tenu du grand nombre de calculs (plusieurs milliers), l'Andra a développé une plateforme informatique, Cassandra, qui intègre les échanges de données et la réalisation des analyses de sensibilité.

Les calculs effectués par l'Andra suivant les différents scénarios, avec les données disponibles et la démarche de mise en œuvre des modèles opérationnels de sûreté décrite ci-dessus, fournissent les flux et les concentrations aux exutoires de chacun des radionucléides d'intérêt.

Le scénario d'évolution normale (SEN) décrit le fonctionnement du stockage en supposant que le stockage est saturé en eau dès sa fermeture. Le choix d'un milieu saturé dès la fermeture conduit donc à calculer une date d'arrivée des éléments relâchés aux limites des quartiers bien plus précoce que ce qu'elle ne sera en réalité : en effet, l'attaque chimique des composants et les transferts vers le COx sont plus lents pendant la phase de resaturation qui pourrait durer

quelques centaines de milliers d'années. Le calcul est donc très conservatif vis-à-vis de la sûreté.

Dans la situation de référence (SEN-Ref), l'Andra choisit les paramètres (dits de référence) les plus étayés dans les gammes des valeurs disponibles. À défaut, l'Andra choisit les valeurs qui conduisent à des relâchements et des migrations des radionucléides majorants. Dans la situation enveloppe (SEN-Env), les paramètres sont choisis de façon *a priori* conservative en prenant les valeurs extrêmes des gammes de valeurs.

L'étape suivante consiste à convertir ces flux et concentrations en débit de dose au groupe critique. L'Andra conclut avec ses calculs que ses choix de conception, utilisant les propriétés du COx et les contraintes qu'il impose, conduisent à des débits de dose conformes au guide de sûreté de l'ASN.

*La démarche de sûreté de l'Andra repose sur une approche scientifique maîtrisée qui couvre les données, les processus et la modélisation. L'Andra dispose en interne d'un modèle intégré permettant d'évaluer les performances du stockage en individualisant le rôle de chaque composant qui participe à une ou plusieurs fonctions de sûreté. L'analyse détaillée de la phénoménologie des processus attachés à chaque composant a permis la simplification vers des modèles de sûreté opérationnels dont le conservatisme a été établi. L'assemblage final des modèles emboîtés permet de calculer la performance du système de stockage.*

*La Commission considère que la méthodologie et les outils de calculs développés par l'Andra sont qualifiés et correctement appliqués. Ils conduisent à des résultats enveloppes, qui ne visent pas à représenter au plus près la réalité, mais à assurer que les conséquences pour l'homme et l'environnement ne sont pas sous-estimées.*

## 6 Les questions transverses

### 6.1 Phase industrielle pilote

La loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016, inscrite dans le code de l'environnement (article L. 542-10-1), pose le principe de la phase industrielle pilote (Phipil) : « L'exploitation du centre débute par une phase industrielle pilote permettant de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation, notamment par un programme d'essais *in situ*. L'autorisation de mise en service est limitée à la phase industrielle pilote. Tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant cette phase. La phase industrielle pilote comprend des essais de récupération de colis de déchets. »

La proposition de l'Andra quant au contenu et à l'organisation de la phase industrielle pilote figure dans le plan directeur de l'exploitation (pièce 16 du dossier de demande d'autorisation de création) et a été précisée dans un rapport spécifique (documents CG-TE-D-RAP-AMOA-TRO-000-24-0007 du 31 janvier 2025 et COMRPADIC 240024 du 28 janvier 2025). Ces documents distinguent deux phases successives de la Phipil.

- La première phase, qui commencera à la signature du décret d'autorisation de création, couvrira la période de construction et de qualification de l'installation. En parallèle, des démonstrateurs (d'alvéoles, de scellements, ...) seront réalisés. Cette phase inclut le test des installations depuis la surface, la descente de colis inactifs et leur récupération. Elle se conclut par la mise à jour du rapport de sûreté en vue de l'obtention de l'autorisation de mise en service partielle (c'est-à-dire limitée à la phase industrielle pilote) qui sera délivrée par l'ASNR. Cette autorisation permettra les essais avec des colis actifs puis le début de l'exploitation industrielle. La Commission considère cette première phase comme une phase classique de qualification d'une installation industrielle.
- La deuxième phase, à partir de l'autorisation de mise en service partielle de l'installation, commencera par les essais sur colis actifs et se poursuivra par un début d'exploitation industrielle. Elle donnera lieu à un rapport de l'Andra, examiné selon une procédure impliquant notamment l'ASNR, la CNE et le Parlement. À l'issue de cette procédure, l'ASNR délivrera l'autorisation de mise en service complète de l'installation.

Les techniques et les processus qui devront être évalués pendant ces phases sont totalement différents : techniques de creusement et de construction d'ouvrages dans la première phase, mise en œuvre industrielle des opérations de stockage de colis dans la seconde phase. Les objectifs poursuivis, les échéances à respecter et les implications sur les jalons décisionnels sont également différents. L'objectif majeur de la première phase est de conforter *in situ*, dans les conditions réelles d'environnement, de construction et de fonctionnement industriel de l'INB Cigéo, les données utilisées pour sa conception et pour la démonstration de sûreté. Ses résultats devront être entièrement disponibles à l'appui de la première demande d'autorisation d'exploitation. La seconde phase, elle, vise évaluer le fonctionnement industriel de l'installation ; ses résultats constitueront le cœur du rapport destiné au Parlement en vue d'éclairer sa décision sur les conditions de fonctionnement de Cigéo au-delà de la Phipil.

### 6.1.1 Enjeux de la phase industrielle pilote pendant la construction initiale du stockage

La connaissance de la roche hôte du Callovo-Oxfordien dans laquelle sera construit le stockage est obtenue par des mesures réalisées depuis la surface, ainsi que par les expérimentations conduites depuis une vingtaine d'années dans le laboratoire souterrain. Ces résultats alimentent les simulations sur lesquelles se fonde le rapport provisoire de sûreté. Cependant, le laboratoire n'est pas situé exactement au même endroit que le futur stockage, même s'il en est proche. Pendant la phase de creusement des galeries et des alvéoles dans le COx, il sera donc utile de s'assurer *in situ*, au fur et à mesure de la progression des creusements, que les caractéristiques de la roche hôte sont conformes à ce qui est attendu et pris en compte dans le rapport de sûreté. De même, les technologies de creusement ont fait l'objet de nombreuses expérimentations dans le laboratoire. En particulier, l'endommagement du COx autour des excavations, en fonction de leurs tailles et des moyens de creusements employés, a été largement étudié. Les résultats de ces études devront être confirmés lors des creusements à échelle réelle, avec les moyens, les procédures et les cadences industrielles, afin notamment de s'assurer que l'ampleur de l'endommagement de la roche est conforme aux prévisions faites à partir des expériences menées dans le laboratoire souterrain. Il faudra également s'assurer que les ouvrages construits avec les moyens industriels de réalisation sont conformes au rapport de sûreté.

Ces vérifications, qui représentent l'enjeu principal de la première phase de la Phipil, répondent à l'objectif de « conforter les données utilisées pour la conception et pour la démonstration de sûreté ». Il s'agit en fait de passer du rapport de sûreté de l'installation telle que conçue (et figurant au dossier de DAC) au rapport de sûreté de l'installation telle que réalisée et qui sera produit à l'appui du dossier de demande de l'autorisation d'exploiter le stockage (autorisation qui sera donnée par l'ASNR), et donc avant la descente du premier colis actif.

### 6.1.2 Enjeux de la phase industrielle pilote pendant le début d'exploitation industrielle du stockage

La seconde partie de la phase industrielle pilote débutera lorsque l'autorisation d'exploiter aura été donnée par l'ASNR sur la base du rapport de sûreté mis à jour et des essais réalisés avec des colis inactifs. On s'intéressera alors à la mise en œuvre de l'outil industriel de stockage et les technologies concernées relèveront principalement de la manutention et de la surveillance. Il s'agira cette fois de démontrer que l'installation réalisée et qualifiée pourra effectivement être exploitée, en conformité avec le rapport de sûreté, avec les matériels, les procédures et les personnels prévus et atteindre, après une phase de montée en puissance, la cadence de mise en stockage prévue. La validation de ces processus industriels est l'enjeu essentiel de la Phipil.

*La Commission souligne l'importance de la démonstration de la cadence atteignable en régime stabilisé. En effet, cette cadence conditionne la durée d'exploitation qui sera nécessaire pour stocker l'inventaire de déchets prévu. Cette durée devra être compatible avec la durée de vie des infrastructures et des équipements. La Commission estime nécessaire que la cadence atteignable en régime stabilisé soit démontrée pendant la phase industrielle pilote.*

*La Commission recommande que le nombre de colis stockés pendant la phase industrielle pilote et la durée de celle-ci soient suffisants pour apprécier la capacité de l'installation à absorber des aléas (perturbations de livraison, pannes de l'installation, ...) et en particulier démontrer que la capacité d'entreposage tampon sur site est suffisante.*

Par ailleurs, des essais de récupérabilité seront conduits au cours de cette phase et contribueront à la démonstration de la réversibilité du stockage, conformément à la loi.

Les résultats de cette deuxième partie de la Phipil seront destinés à alimenter le rapport destiné au Parlement qui devra statuer sur les conditions d'exercice de la réversibilité.

### 6.1.3 Conditions d'achèvement de la Phipil.

Le code de l'environnement (article L. 542-10-1), stipule : « Les résultats de la phase industrielle pilote font l'objet d'un rapport de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs [qui], accompagné de l'avis de la Commission nationale [d'évaluation] et de l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire est transmis à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques qui l'évalue et rend compte de ses travaux aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat. Le Gouvernement présente un projet de loi adaptant les conditions d'exercice de la réversibilité du stockage et prenant en compte, le cas échéant, les recommandations de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. L'Autorité de sûreté nucléaire délivre l'autorisation de mise en service complète de l'installation. »

Le rapport sur les résultats de la Phipil sera principalement alimenté par les résultats obtenus au cours de la deuxième partie de la Phipil. La satisfaction des critères de réussite qui ont été proposés par l'Andra devra être démontrée dans le rapport.

La Commission considère que les principaux critères pertinents pour apprécier la réussite de la phase industrielle pilote sont les suivants :

- Pour la période de réalisation de l'installation, les critères sont la réussite des essais de qualification avec colis inactifs et l'obtention de l'autorisation d'exploiter partielle délivrée par l'ASNR.
- Pour la période de début d'exploitation, les critères sont la réussite des essais avec des colis actifs, la réussite des essais de récupérabilité, la validation en vraie grandeur des matériels, des procédures et de la qualification des personnels et l'atteinte d'une cadence de mise en stockage stabilisée permettant de stocker l'inventaire de référence au cours de la durée de vie prévue de l'installation.
- Par ailleurs, au cours de la Phipil, un fonctionnement satisfaisant de la gouvernance du stockage devra être atteint. L'Andra a proposé les modalités d'association et d'information des parties prenantes. La Commission rappelle qu'il est important que l'exploitant conserve la pleine responsabilité de la mise en œuvre opérationnelle du projet.

La Commission observe que la plus grande partie de ces critères figurent dans les propositions de l'Andra.

*La Commission estime que les critères de réussite proposés par l'Andra sont pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation.*

*La Commission recommande que la procédure de fin de Phipil, incluant les critères de réussite et leur mode d'évaluation, soit fixée dans le décret d'autorisation de création.*

Le rapport sur les résultats de la Phipil qui sera adressé à l'OPECST contiendra la démonstration de l'atteinte des critères de réussite. L'Andra propose d'y inclure également le résultat de la première réévaluation de sûreté, qui serait réalisée après quelques années d'exploitation. La Commission estime qu'une durée d'exploitation de l'ordre de cinq ans devrait permettre d'atteindre une cadence représentative du fonctionnement pérenne de l'installation.

Entre la parution du rapport sur les résultats de la Phipil et le projet de loi sur la réversibilité du stockage, les instances désignées par la loi (*cf. supra*) devront remettre leur avis à l'OPECST qui fera alors sa propre évaluation destinée aux commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat. L'ASNR de son côté délivrera l'autorisation de mise en service complète de l'installation. Ces procédures, impliquant les commissions compétentes du Parlement, auront une certaine durée, pendant laquelle l'Andra propose de poursuivre l'exploitation du stockage dans les conditions prévues par la première autorisation d'exploiter (limitée aux types de colis autorisés pour la Phipil).

*L'Andra propose de ne pas interrompre les opérations de mise en stockage pendant l'instruction du rapport de fin de Phipil. La Commission recommande que cette proposition soit acceptée afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps risquant d'être préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation.*

En effet, la Commission souligne que la qualification d'une installation industrielle et tout particulièrement nucléaire (incluant les matériels les procédures et les personnels) ne peut être maintenue en cas d'arrêt prolongé de son fonctionnement. Si la mise en stockage de colis devait être arrêtée pendant une durée significative, le redémarrage de l'installation rencontrerait probablement des difficultés techniques qui pourraient même nécessiter une nouvelle qualification.

*Compte tenu de la durée inhérente aux procédures administratives qui seront mises en œuvre après la parution du rapport de fin de Phipil, la Commission recommande de ne pas limiter le nombre de colis qui seront stockés au titre de la première autorisation.*

## 6.2 Modalités de la réversibilité

L'évolution, en France, de la législation et de la réglementation depuis 1991, a permis de préciser progressivement l'acception de la notion de réversibilité d'un stockage géologique, notamment grâce aux lois n° 91-1381 du 30 décembre 1991, n° 2006-739 du 28 juin 2006 et n° 2016-1015 du 25 juillet 2016.

Les quatre composantes de la réversibilité sont :

- la progressivité de la construction ;
- la flexibilité de l'exploitation ;

- la récupérabilité des colis de déchets pendant une certaine durée ;
- l'adaptabilité de la conception et de sa capacité à prendre en compte un inventaire de nature et de volume distincts de celui de départ.

Ces quatre composantes de la réversibilité sont d'importances inégales pour la définition du projet Cigéo et pour l'exploitation du centre de stockage. Leur mise en œuvre s'inscrit dans la gouvernance de Cigéo c'est-à-dire les processus décisionnels qui seront mis en place pour suivre l'évolution du stockage de sa construction à sa fermeture.

### 6.2.1 Progressivité

La progressivité est essentiellement une bonne pratique constructive. Les méthodes de construction de Cigéo pourront être adaptées aux aléas du chantier ou modernisées en fonction des progrès techniques.

### 6.2.2 Flexibilité

La flexibilité de Cigéo concerne ses modalités d'exploitation qui pourront être adaptées au rythme d'arrivée des colis de déchets de haute ou moyenne activité. Par exemple, les chroniques d'arrivées des colis dépendront du rythme des opérations de retraitement et de conditionnement des déchets ultimes qui pourra être affecté par une modification de la durée de vie des réacteurs.

### 6.2.3 Récupérabilité

La récupérabilité des colis de déchets est, pour sa part, un élément essentiel de la réversibilité à laquelle doit se conformer Cigéo. Aisément compréhensible, ce concept doit toutefois être précisé. Dans son acception la plus large, la récupérabilité devrait porter sur la totalité des colis, sans limitation de temps. En réalité, la sûreté à long terme du stockage géologique nécessite sa fermeture. La récupérabilité doit donc être assurée au plus pendant la période d'exploitation. À cet égard, la loi du 25 juillet 2016 précise utilement que « les modalités de la récupérabilité et sa durée d'exercice doivent être cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage ».

La récupérabilité des déchets relève d'une approche prudente de la mise en place du stockage basée sur des choix informés et étudiés soigneusement.

La récupérabilité des déchets requiert la mise en place de mesures actives lors de la construction et de l'exploitation du stockage. Ces mesures ne doivent cependant pas remettre en cause le principe fondamental de fonctionnement passif du stockage après fermeture. L'article L542-1-1 du code de l'environnement définit en effet clairement le stockage de déchets radioactifs comme « l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L. 542-1, sans intention de les retirer ultérieurement ».

Le retrait effectif des déchets, soit en partie, soit en totalité, serait une opération lourde qui devrait être justifiée au vu des bénéfices qu'il pourrait apporter. L'apparition d'alternatives au

stockage ou d'autres filières de gestion ne justifierait pas nécessairement à elle seule une décision de retrait partiel ou total qui serait prise dans un contexte par ailleurs inconnu aujourd'hui.

Au stade de la DAC, la récupérabilité est assurée par un ensemble de mesures organisationnelles et techniques destinées à assurer la robustesse et la durabilité des principaux composants constitutifs du stockage, la disponibilité et la fonctionnalité des équipements de retrait et l'aptitude à la déconstruction des ouvrages de fermeture des galeries.

La Commission a ainsi particulièrement analysé dans le dossier de DAC les éléments permettant de garantir l'accès à l'ensemble des ouvrages souterrains (descenderie, quartiers, alvéoles) pendant toute la durée de l'exploitation du stockage, notamment sous l'angle de leur tenue mécanique et de leur déformation.

*In fine*, des scénarios de retrait ont été étudiés par l'Andra relatifs à l'exploitation normale, à des situations de mise en œuvre de la récupérabilité (retrait complet des colis d'un alvéole, retrait complet à l'issue de la Phipil, ouverture des galeries et des alvéoles du quartier HA) et à des situations de sûreté ou post-accidentelles (retrait d'un colis contaminé MAVL ou HA dont la manutention reste possible).

Des essais de retrait sont également prévus. Ils concernent des situations d'exploitation concrètes et font partie des essais de qualification de l'installation. La réussite de ces essais confortera la récupérabilité des déchets, notamment en démontrant le bon fonctionnement des chaînes de manutention en situation de retrait. C'est à l'issue de cette phase qu'un avis pourra être formulé sur la satisfaction de l'exigence de récupérabilité des colis.

#### 6.2.4 Adaptabilité

La quatrième composante de la réversibilité est « l'adaptabilité de la conception [...] permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique ».

Conformément à la loi, des études dites d'adaptabilité sont conduites pour évaluer la faisabilité du stockage d'autres déchets décrits dans l'inventaire de réserve. Si, dans l'avenir, il était envisagé de stocker certains de ces déchets dans Cigéo, une modification du décret d'autorisation de création devrait être instruite.

##### *L'adaptabilité et l'inventaire de réserve*

Le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo contient, dans le plan directeur d'exploitation (PDE), une liste des déchets pris en compte pour la conception et l'analyse de sûreté du stockage souterrain. En synthèse, il s'agit principalement des déchets existants et de ceux qui seront produits par le fonctionnement puis le démantèlement des installations nucléaires existantes, auxquelles il faut ajouter les installations autorisées mais non encore en service suivantes : réacteur Jules Horowitz (RJH) et installation ITER. Les durées de fonctionnement considérées sont de 50 ans pour les réacteurs électrogènes et le RJH et de 20 ans pour ITER. Pour les déchets de haute activité, Cigéo est conçu avec l'hypothèse du retraitement de tous les combustibles usés, ce qui implique que seuls les déchets ultimes



(actinides mineurs et produits de fission) conditionnés en colis de déchets vitrifiés seront à stocker.

La liste des déchets indiquée dans le PDE constitue l'inventaire de référence (au sens de l'article D542-91) sur la base duquel les études de sûreté présentées dans le dossier de DAC ont été réalisées. En parallèle avec l'instruction du dossier de DAC, l'Andra conduit des études d'adaptabilité qui visent à examiner dans quelle mesure tout ou partie de l'inventaire de réserve pourrait être stocké dans Cigéo.

La Commission souligne que toute modification de l'inventaire affecte potentiellement la démonstration de sûreté de l'installation Cigéo. Toutefois, il convient de différencier deux cas dont les impacts sur les études sont très différents.

S'il s'agissait d'augmenter de façon modérée la quantité de déchets d'un type déjà prévu à l'inventaire de référence, par exemple s'il était question de stocker des déchets vitrifiés identiques à ceux déjà prévus dans les quartiers HA, la Commission estime que la démonstration ne poserait probablement pas de grandes difficultés. Elle note à cet égard que l'Andra n'utilise pas dans la définition actuelle de Cigéo la totalité de la surface utile de la ZIRA.

Si au contraire il s'agissait de stocker des déchets d'un type qui n'est pas prévu dans l'inventaire de référence, la Commission estime que la démonstration de sûreté serait spécifique et pourrait même nécessiter l'acquisition de données scientifiques non disponibles aujourd'hui.

Dans tous les cas, ces nouveaux déchets devraient faire l'objet d'un processus complet incluant notamment une démonstration de sûreté et une nouvelle concertation avec les parties prenantes.

#### 6.2.5 Commentaires et recommandations de la Commission

*La Commission estime que la conception de l'installation Cigéo couvre les quatre composantes de la réversibilité telles qu'elles sont définies dans la loi. La mise en œuvre de la récupérabilité, prise en compte dès le début de la conception par l'Andra, est approchée de façon rigoureuse et pragmatique, en particulier pour ce qui concerne la durabilité des ouvrages. Au stade du dossier de DAC, la Commission est d'avis que la récupérabilité est suffisamment établie.*

*La décision éventuelle de récupération des colis devrait être justifiée et s'appuyer sur une étude de sûreté spécifique qui dépendrait de la situation du stockage au moment où la récupération serait envisagée. En tout état de cause, il demeure fondamental que la mise en œuvre éventuelle de la récupération de certains colis ne puisse en aucun cas affaiblir la sûreté passive à long terme du stockage.*

*La Commission recommande que l'assurance de la capacité de récupérer un colis HA soit apportée par un essai dans un alvéole de longueur égale à celle qui sera retenue pour le quartier de stockage HA.*

*La Commission considère que l'instruction de la demande d'autorisation de création de Cigéo doit se dérouler sur la base de la définition correspondant au dossier de demande. La Commission recommande de dissocier les études d'adaptabilité de l'instruction de la*

*demande d'autorisation de création, qui ne porte que sur le stockage de l'inventaire de référence.*

### 6.3 Stratégie de fermeture de l'installation

Conformément à l'article R. 593-16 du code de l'environnement, le dossier de demande d'autorisation contient un plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance de l'installation (pièce n° 13 du dossier). Schématiquement, la fermeture consiste à obturer les alvéoles et à remblayer progressivement les quartiers. La fermeture définitive consiste à remblayer les galeries souterraines, puis les puits et les descenderies avec la mise en place de scellements. L'engagement des opérations de fermeture fera l'objet d'une procédure d'autorisation adaptée, incluant une loi.

Ces opérations commenceront plusieurs décennies après la mise en service de l'installation. L'Andra propose un scénario pour la fermeture et réalise des études de faisabilité sur les ouvrages de scellement. Le présent paragraphe traite de la stratégie générale de fermeture ; les études relatives aux ouvrages de scellement sont commentées à la section 5.7 du présent rapport.

Divers scénarios sont envisageables pour la phase de fermeture. L'Andra en a examiné trois qui sont :

- la fermeture au plus tôt, après le remplissage de chaque alvéole ou par tranches ;
- la fermeture à la fin du remplissage de chaque quartier ;
- la fermeture de l'installation dans sa totalité à la fin de l'exploitation.

L'INB Cigéo est conçue pour que les opérations d'obturation puissent être décidées et engagées pendant toute la durée de l'exploitation. La définition du scénario est donc flexible. Elle sera nécessairement adaptée par les générations à venir en fonction des contraintes et des enjeux qui seront les leurs, du retour d'expérience de l'exploitation de Cigéo et d'autres installations notamment à l'étranger, et des besoins industriels qui pourront apparaître.

L'analyse présentée par l'Andra sur les trois scénarios qu'elle a envisagés l'a conduite tout d'abord à écarter le scénario de fermeture au plus tôt, en raison principalement de la perturbation induite sur les opérations industrielles de mise en stockage par l'introduction de risques liés aux travaux et à la coactivité. Par ailleurs, ce scénario rend précocement plus complexe la récupérabilité. La Commission estime que ce choix est raisonnable car il n'est pas opportun de compliquer *a priori* les opérations industrielles.

L'Andra écarte également le scénario correspondant à une obturation de la totalité des alvéoles à la fin du fonctionnement du stockage. Elle estime préférable, à juste titre selon la Commission, de pouvoir disposer d'un retour d'expérience des opérations de fermeture d'ampleur et de complexité croissante avant d'engager les étapes finales de fermeture du quartier de stockage HA et des zones de soutien logistique.

Le scénario prévisionnel de fermeture proposé par l'Andra prévoit l'obturation des alvéoles de stockage à la fin du remplissage de chaque quartier. La fermeture du quartier pilote HA est prévue vers 2080, celle du quartier MAVL vers 2100, ce qui permettra de disposer d'un retour d'expérience de plusieurs décennies sur le comportement des démonstrateurs de scellements. La fermeture totale est envisagée vers 2150. Ce scénario, considéré par l'Andra comme un

optimum industriel, n'est cependant pas figé et des options de fermeture plus progressives restent envisageables à ce stade.

*La Commission estime que la proposition de l'Andra est pertinente et prudente car elle évite les inconvénients de la coactivité entre des opérations industrielles de nature différentes tout en amenant certains quartiers en situation de sûreté passive suffisamment tôt pour bénéficier d'un retour d'expérience.*

## 6.4 Monitoring et surveillance de Cigéo

La stratégie de monitoring et de surveillance est établie par l'Andra en cohérence avec les préconisations de l'AIEA. Elle procède de cinq grands objectifs :

- démontrer la conformité aux exigences réglementaires et aux conditions de mise en service ;
- vérifier que le système de stockage et ses composants remplissent leurs fonctions, en conformité avec le dossier de sûreté ;
- vérifier que les hypothèses formulées et paramètres retenus pour l'évolution thermo-hydro-mécano-chimique du stockage et que les prévisions établies par les modèles sont conformes aux conditions réelles ;
- établir une base de données d'informations sur l'installation de stockage, le site et ses environs participant aux décisions futures liées aux périodes de construction, d'exploitation, de fermeture et d'après-fermeture, et aussi appuyer les décisions relatives à la mise à jour des concepts et des procédures de surveillance ;
- fournir des informations au public.

L'Andra a établi un schéma directeur pour répondre à ces objectifs, au regard des spécificités de Cigéo, et afin de répondre aux volets de la réversibilité (cf. section 6.2) et satisfaire la maîtrise de la sûreté dite passive (c'est-à-dire après fermeture). Elle s'appuie sur la notion d'élément important pour la protection (EIP) pour la sûreté en exploitation, et de composants importants pour la protection (CIP) pour la sûreté après fermeture. Ces composants importants sont la couche du COx, les scellements de galeries et des liaisons surface-fond, les conteneurs de stockage et la matrice des colis de déchets HA.

En particulier, le monitoring et la surveillance impliqueront le suivi de paramètres (déformation, température, humidité, composition de gaz, etc.) associés à l'évolution :

- des processus hydro-mécaniques affectant le COx en paroi d'ouvrages tels que les galeries, scellements et liaisons surface-fond ;
- des processus thermo-hydro-mécaniques affectant le COx au droit des alvéoles HA ;
- des processus hydro-mécano-chimiques contribuant au vieillissement des composants cimentaires ou métalliques (dégradation, corrosion...) des alvéoles et conteneurs MAVL et HA.

Cela implique qu'un état zéro du stockage et un domaine de fonctionnement normal soient définis. Pour l'état initial du COx, l'Andra s'appuie sur ses trente années d'études. Pour l'état initial des structures, composants et équipements de l'installation, l'établissement d'une recette correspondant à une vérification que la réalisation de chaque composant est conforme aux exigences spécifiées, qu'elles soient relatives à ses matériaux, sa conception ou son

fonctionnement sera réalisée. Cette recette permettra de disposer d'un état initial caractérisé du composant ouvragé.

La surveillance de Cigéo conduira à l'acquisition d'un nombre important de données, dont il faudra s'assurer de la gestion (acquisition, transfert, traitement, exploitation, archivage) pour répondre aux objectifs dictés. Les dispositifs simples et éprouvés (notamment au regard de leur durabilité) sont à privilégier. Il faut également veiller à ce que ces dispositifs, en lien avec leur mise en place ou leur mode de fonctionnement, ne viennent pas dégrader les performances des différents composants. Il est donc en particulier souhaitable que le nombre de données acquises soit dimensionné au juste besoin de surveillance de l'installation. La surveillance procédera de mesures systématiques, périodiques ou en continu de paramètres ou grandeurs physiques, pendant toute la durée de fonctionnement de l'installation Cigéo et après fermeture, pour vérifier que l'installation reste dans le domaine de fonctionnement défini et identifier d'éventuelles dérives de fonctionnement.

*La Commission encourage la démarche de monitoring et surveillance de Cigéo de l'Andra pendant la phase d'exploitation. La Commission souligne que les informations obtenues seront utiles pour vérifier que l'évolution des composants ouvragés est conforme aux prévisions.*

*La Commission recommande que l'Andra précise sa stratégie de monitoring et de surveillance avant la mise en service du stockage.*

## 6.5 Mémoire du stockage

La réglementation française, qui intègre les standards internationaux, requiert qu'après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement repose sur des systèmes passifs, sans nécessiter d'intervention. Pour autant, il subsiste un risque d'intrusion humaine involontaire dans le stockage après fermeture. Pour réduire ce risque, une exigence de contrôle institutionnel, destinée à prévenir les intrusions, a été ajoutée dans le guide de sûreté. Cette exigence ne peut toutefois être respectée que si la mémoire du stockage est conservée après fermeture, pour une durée fixée à 500 ans dans le guide.

La mémoire du stockage repose principalement sur une mémoire technique, qui s'appuiera sur un fonds documentaire collecté, tout au long du cycle de vie de Cigéo, et archivé. L'Andra conduit des recherches sur la pérennité des supports sur lesquels seront conservés ces dossiers : supports papier, supports gravés, supports numériques, et éventuellement supports émergents.

En complément, l'Andra s'intéresse à d'autres dispositifs comme des processus de transmission intergénérationnelle des pratiques et des savoirs impliquant par exemple les arts, les médias, les lieux de partage du savoir... La coopération internationale peut également contribuer à la préservation de la mémoire par la constitution d'un fonds de mémoire commune. L'Andra est ainsi partie prenante de l'initiative « information, données et gestion des connaissances » (IDKM) lancée par l'AEN/OCDE, qui s'intéresse entre autres aux travaux de préservation de la mémoire.

Enfin d'autres études plus exploratoires sont conduites sur les apports possibles de l'anthropologie, de l'archéologie, de l'archivage numérique de longue durée, de la mémoire des organisations, de la création artistique ou encore de la conservation des informations sur Internet.

*La Commission constate que la question de la mémoire du stockage est bien prise en compte par l'Andra qui conduit des recherches dans des directions variées et est active dans les groupes de réflexions internationaux sur le sujet. La Commission encourage l'Andra à poursuivre ces travaux.*



## 7 Synthèse

La Commission a examiné en détail les fondements scientifiques sur lesquels s'appuie le dossier de demande d'autorisation de création de l'installation Cigéo, en particulier ceux sur lesquels l'Andra fonde son évaluation de la sûreté à long terme de l'installation de stockage. L'évaluation présentée par l'Andra suit la méthodologie internationale qui consiste à vérifier que des fonctions de sûreté sont respectées et à calculer le flux de radionucléides (exprimé en Becquerel) qui peut arriver à la biosphère selon divers scénarios d'évolution du stockage. La dernière étape consiste à évaluer la dose efficace (exprimée en Sievert) à l'individu critique. Elle s'appuie sur des connaissances et des scénarios spécifiques qui ne relèvent pas de l'expertise de la Commission.

### Les piliers scientifiques

Le site d'implantation de Cigéo est correctement caractérisé par l'Andra sur le plan géologique, tant sédimentaire que structural. Les incertitudes sur la géométrie du Callovo-Oxfordien (COx) sont suffisamment réduites pour assurer la présence d'une garde argileuse saine d'au moins 50 mètres d'épaisseur au toit (au-dessus) et au mur (en dessous) des ouvrages de stockage. Les travaux réalisés par l'Andra, basés sur des expérimentations en laboratoire, *in situ* au laboratoire souterrain et des simulations numériques, fournissent une connaissance robuste et précise des propriétés du COx.

Au plan physico-chimique, les transferts d'espèces chimiques se feront essentiellement par diffusion. Le transfert de la majorité des espèces porteuses de la radioactivité, en particulier les cations, sera très fortement ralenti dans le COx, voire arrêté, en raison de leur interaction avec la matrice argileuse. Seuls quelques radionucléides atteindront les limites du COx après des centaines de millénaires. Ces propriétés favorables sont les fondements de la fonction de confinement du COx. Les autres propriétés relevant de la thermique ou de la mécanique ont fait l'objet de caractérisations détaillées. Il ressort de l'ensemble des études réalisées par l'Andra que la caractérisation du site est complète et que le COx assure l'ultime barrière de confinement de la radioactivité.

Le contexte hydrogéologique régional est décrit grâce à la connaissance abondante de la géologie du Bassin parisien. La modélisation effectuée par l'Andra restitue les grandes lignes de l'écoulement des eaux souterraines. La Commission rappelle que les aquifères ne font pas partie des composants du stockage et qu'ils ne remplissent pas de fonctions de sûreté. Les projections d'évolution du fonctionnement des aquifères sont néanmoins utilisées pour le calcul des transferts de radionucléides depuis les limites du COx jusqu'aux exutoires et pour le calcul de la dose qui est basé sur des scénarios convenus prescrits par la réglementation sur les évaluations de sûreté.

La Commission considère que les données hydrogéologiques permettent d'alimenter correctement les modèles de sûreté.

Les études réalisées pour sélectionner, formuler les matériaux et caractériser leur comportement ont permis à l'Andra d'acquérir les données suffisantes pour la modélisation à long terme de l'évolution du système de stockage. Bien que l'Andra ait choisi des matériaux courants, la disponibilité des matériaux identifiés pourrait changer au cours de l'exploitation du stockage. Pour remédier à l'évolution des disponibilités, l'Andra prévoit de poursuivre des

travaux scientifiques pour ménager une certaine flexibilité dans les choix de matériaux au moment opportun, ce que la Commission soutient.

Les données concernant le relâchement des radionucléides par les colis et leur migration ont été établies sur la base d'expériences conduites pendant plus de trente ans par une large communauté de chimistes en France et à l'étranger, et publiées. Les calculs des termes sources des quartiers HA et MAVL résultent de l'application de modèles, tant pour le relâchement des radionucléides par les colis que pour leur migration vers le COx sain. Tous conduisent à des valeurs majorantes dans le but d'être conservatif vis-à-vis des conséquences sur l'homme et l'environnement.

La Commission considère que l'évaluation des termes sources, données premières pour les calculs de relâchement et de migration, est soutenue par des études robustes sur l'altération des matériaux et la diffusion des radionucléides.

Pour ce qui concerne l'impact du stockage sur l'environnement, la Commission estime que l'étude d'impact est complète et convaincante. La démarche suivie par l'Andra pour simuler et prendre en compte l'impact des variations climatiques à court et à long terme sur la mise en œuvre du projet Cigéo est pertinente : elle a utilisé les résultats des travaux produits par la communauté internationale concernée par la recherche sur le climat.

### **Rôle des composants du stockage et leur fonctionnement**

L'architecture du stockage, la conception des alvéoles HA et MAVL, des galeries et des liaisons surface-fond s'appuient sur la connaissance du comportement mécanique et thermique du COx et de la tenue des matériaux sélectionnés. Ces connaissances ont été acquises grâce à des mesures en laboratoire et *in situ* au laboratoire souterrain, et par la réalisation de prototypes.

La Commission estime que les dispositions constructives retenues par l'Andra sont de nature à maintenir l'intégrité des alvéoles bien au-delà de la fermeture du stockage.

La Commission considère que la méthodologie et les outils de calcul utilisés par l'Andra pour décrire le fonctionnement intégré du stockage et quantifier le transfert aux exutoires sont qualifiés et correctement appliqués. Les résultats présentés à l'appui de son évaluation de la sûreté à long terme sont robustes et scientifiquement fondés.

Pour estimer les capacités de Cigéo à assurer les fonctions de sûreté, l'Andra utilise une approche déterministe. Dans cette approche, pour tenir compte des incertitudes sur les paramètres mesurés des modèles et la survenue des événements, l'Andra utilise un double conservatisme, sur les modélisations d'une part et sur les valeurs de leurs paramètres d'entrée d'autre part. Les résultats présentés à l'appui de son évaluation de la sûreté à long terme sont robustes et scientifiquement fondés. Ils visent à donner une valeur majorée des impacts sur l'homme et l'environnement à l'Autorité de sûreté. En vue des optimisations futures du système, les évaluations déterministes pourront utilement être enrichies par des évaluations probabilistes pour tout ou partie du stockage, en particulier en définissant les fonctions de densité de probabilité des paramètres dans leur domaine de variation. La Commission observe par ailleurs que les incertitudes sont abordées dans le dossier indépendamment paramètre par paramètre. À l'appui de la future mise en service, les études pourraient être poursuivies en utilisant des méthodes de traitement multiparamétriques (du type Monte Carlo).



L'Andra a étudié deux options de stockage dans Cigéo pour les déchets bitumés : le stockage en l'état de ces déchets dans des alvéoles MAVL renforcés vis-à-vis du risque incendie ou le stockage des déchets issus de la neutralisation des bitumes dans des alvéoles MAVL non dédiés. Cette démarche fournit un exutoire à ces déchets quels que soient les résultats du programme de R&D encore en cours.

### Questions transverses

La Commission a aussi examiné quelques questions transverses qui ne relèvent pas exclusivement de son expertise dans le domaine scientifique, mais qui relèvent des enseignements qu'elle a acquis au cours des trente ans durant lesquels elle a suivi les travaux sur le stockage géologique en France et à l'étranger.

La Commission estime que la proposition de l'Andra pour la stratégie de fermeture progressive est pertinente et prudente car elle évite les inconvénients de la coactivité entre des opérations industrielles de nature différentes tout en amenant certains quartiers en situation de sûreté passive bien avant la fermeture du stockage dans son ensemble.

La Commission estime que les critères de réussite de la Phipil proposés par l'Andra sont globalement pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation. En effet, cette cadence conditionne la durée d'exploitation qui sera nécessaire pour stocker l'inventaire de déchets prévu. Cette durée devra être compatible avec la durée de vie des infrastructures et des équipements.

L'Andra propose de poursuivre l'exploitation nominale de l'installation pendant l'instruction du rapport de fin de phipil, dans les conditions fixées par l'autorisation initiale de mise en service, limitée à la Phipil. La Commission appuie cette proposition afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation.

La Commission estime que la conception de l'installation Cigéo prend en compte les quatre composantes de la réversibilité : progressivité de la construction, adaptabilité de la conception, flexibilité d'exploitation, récupérabilité des colis déjà stockés pendant une durée cohérente avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du centre de stockage. La mise en œuvre de la récupérabilité, prise en compte dès le début de la conception par l'Andra, est approchée de façon rigoureuse et pragmatique.

La démarche de monitoring et surveillance de Cigéo de l'Andra mérite d'être précisée avant la mise en service du stockage.

La Commission considère que les recherches conduites par l'Andra, exposées dans le dossier de DAC, ont permis d'élaborer un concept fiable pour un stockage géologique profond de déchets radioactifs HA et MA à vie longue. Le choix du site et l'ensemble des dispositions constructives sont de nature à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines, et à limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère, en réponse aux deux principales fonctions de sûreté assignées à Cigéo.

L'ensemble des travaux décrits dans le dossier de DAC valide scientifiquement la conception de l'installation. La configuration technique du stockage sera, pour autant, appelée à évoluer au cours de la durée d'ordre séculaire qui séparera le décret d'autorisation de création de la loi

autorisant la fermeture de l'installation. Il est indispensable que toutes les évolutions du stockage Cigéo, qu'elles soient voulues ou subies, soit instruites avec rigueur.

En conséquence, la Commission recommande fortement de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation in situ, bien au-delà de la mise en service du stockage et de la Phipil.





## Glossaire

AEN : agence de l'énergie nucléaire

AIEA : agence internationale de l'énergie atomique

Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs

Areva : multinationale française du secteur de l'énergie entre 2001 et 2018 (désormais Orano)

ASN : autorité de sûreté nucléaire

ASNR : autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

AVM : (colis de déchets HA vitrifié de l')atelier de vitrification de Marcoule

ATEX : atmosphère explosive

BIM : building information modelling

BIOCLIM : programme de modélisation de l'évolution future du climat piloté par l'Andra

BP : Bassin parisien (Bassin de Paris)

CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Cogema : compagnie générale des matières nucléaires entre 1976 et 2001

Cigéo : projet de Centre industriel de stockage géologique de déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HA et MAVL)

CIP : composant important pour la protection (pour la sûreté après fermeture)

CNDP : commission nationale du débat public

CNE : commission nationale d'évaluation

CNRS : centre national de la recherche scientifique

COx : formation géologique (argilites) d'âge Callovo-Oxfordien

CU : combustible utilisé

De : coefficient de diffusion effectif

DAC : demande d'autorisation de création

DOS : dossier d'options de sûreté

EDF : électricité de France

EDTA : acide éthylène-diamine-tetra-acétique

EIP : équipement important pour la protection (pour la sûreté en exploitation)

ELS : état limite de sécurité

ELU : état limite ultime

FEB : fût d'enrobé bitumé

GEOAN : outil multicouche de modélisation

GTI : grès du Trias inférieur

HA : déchets de haute activité

HCTISN : haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire

HTO : eau tritiée ( $^3\text{H}_2\text{O}$ )

IDKM : Information, Data and Knowledge Management : informations, données et gestion des connaissances

IFEP : International Features, Events and Processes list for the deep geological disposal of radioactive waste de l'AEN/OCDE

IFP : institut français du pétrole (et des énergies nouvelles)

INB : installation nucléaire de base

IPSN : institut de protection radiologique et de sûreté nucléaire

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ITER : projet international dédié à la recherche sur les réacteurs à fusion contrôlée dans un tokamak

Kd : coefficient de distribution

LSF : liaison surface-fond

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue

MOX : combustible composé d'un mélange d'oxydes  $\text{UO}_2$  et  $\text{PuO}_2$  (« mixed oxides » en anglais)

MPa : mégapascal

MREA : matériau de remplissage de l'espace annulaire

OCDE : organisation de coopération et de développement économiques

ONDRAF : organisme national belge chargé de gérer les matières et déchets radioactifs

OPECST : office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques

Orano : multinationale française spécialisée dans les métiers du combustible nucléaire, de l'amont à l'aval du cycle (anciennement Areva)

PDE : plan directeur d'exploitation (de l'installation Cigéo)

Piver : (colis de déchets HA vitrifié) de l'installation pilote Piver de Marcoule

Phipil : phase industrielle pilote

R&D : Recherche et Développement

SEA : scénario d'évolution altérée

SEN : scénario d'évolution normale

SSC : structures, systèmes et composants

SSR-5 : prescriptions particulières de sûreté de l'AIEA

STEL : station de traitement des effluents liquides

THM : thermo-hydro-mécanique

THMC : thermo-hydro-mécano-chimique  
UA : unité argileuse du Callovo-Oxfordien  
UMo : (colis de déchets HA vitrifié) uranium molybdène  
UP2 : usine de traitement du combustible usé à la Hague  
USC : unité silto-carbonatée du Callovo-Oxfordien  
UT : unité de transition du Callovo-Oxfordien  
ZFC : zone de fracturation connectée  
ZFD : zone de fracturation discontinue  
ZIOS : zone d'implantation des ouvrages de stockage  
ZIRA : zone d'intérêt pour des recherches approfondies  
ZT : zone de transposition









## Composition de la commission nationale d'évaluation

**Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM** – présidente de la Commission nationale d'évaluation – ingénieur – conseillère en charge du développement du parc électronucléaire et de la stratégie en matière d'innovation – Vattenfall – Suède.

**Michel DUBOIS** – sociologue, directeur du GEMASS, Sorbonne Université.

**Christophe FOURNIER** – ingénieur général hors classe de l'armement (2S).

**Philippe GAILLOCHET** – directeur de service – Assemblée nationale (1977 – 2015).

**Jean-Paul GLATZ** – ingénieur en chimie nucléaire, ancien directeur de ITU-JRC, Karlsruhe.

**Virginie MARRY** – professeur des universités, chimie, Sorbonne université.

**José Luis MARTINEZ** – directeur de recherche au CSIC (institut de science de matériaux, Madrid, Espagne).

**Jean-Paul MINON** – directeur général de l'ONDRAF de 2006 à 2017 – Belgique.

**Catherine NOIRIEL** – enseignante-chercheuse, Géosciences & Environnement, Université de Toulouse.

**Céline PERLOT-BASCOULES** – professeur, Sciences des matériaux, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

**Christophe POINSSOT** – directeur général délégué du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

**Aude POMMERET** – professeur en sciences économiques à l'Université Savoie Mont Blanc.

### Conseillers de la CNE :

**Jean-Claude DUPLESSY** – président honoraire de la Commission nationale d'évaluation – ancien président de la Commission nationale d'évaluation – membre de l'Académie des sciences – directeur de recherche émérite au CNRS.

**Robert GUILLAUMONT** – membre de l'Académie des sciences – membre de l'Académie des technologies – professeur honoraire chimie-radiochimie - Université Paris Sud Orsay.

**Emmanuel LEDOUX** – directeur de recherche honoraire à l'école des mines de Paris.

**Maurice LEROY** – membre associé de l'Académie nationale de pharmacie – professeur honoraire - École européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg.



## Listes des réunions thématiques organisées avec l'Andra

La Commission a participé à 17 réunions thématiques organisées avec l'Andra sur le contenu du dossier de DAC de l'INB Cigéo :

7 novembre 2023 : Hydrogéologie

12 mars 2024 : Mécanique et structure

12 mars 2024 : La phase industrielle Pilote (Phipil) et la réversibilité

12 mars 2024 : Capacités techniques

15 mars 2024 : Plateforme de simulation Cassandra et calculs des flux jusqu'aux exutoires

15 novembre 2024 : Caractérisation du milieu géologique sur la ZIRA

13 décembre 2024 : Échanges gazeux entre galeries et alvéoles HA

13 décembre 2024 : Tenue mécanique des alvéoles HA pendant la phase d'exploitation

13 décembre 2024 : Comportement des verres en situation de stockage.

13 décembre 2024 : Conceptualisation physique et numérique des scénarios de sûreté et outils

13 décembre 2024 : Durabilité des ouvrages souterrains

17 janvier 2025 : Surveillance dont la R&D sur les fibres optiques et capteurs en général

17 janvier 2025 : Marges de sûreté

14 février 2025 : Représentativité des alvéoles témoins

14 février 2025 : Phase industrielle pilote - Objectifs et critère de réussite - volet technique

19 septembre 2025 : Les marges de sûreté en après-fermeture pour les alvéoles MAVL

14 octobre 2025 : Surpression dans le COx



## Composition du dossier de demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base Cigéo

Pièce 0 – Présentation non technique

Pièce 1 – Identification de l'exploitant

Pièce 2 – Nature de l'installation

Pièce 3 – Carte au 1/25 000<sup>e</sup> de localisation de l'installation

Pièce 4 – Plan de situation au 1/10 000<sup>e</sup> indiquant le périmètre proposé

Pièce 5 – Plans détaillés de l'installation au 1/2 500<sup>e</sup>

Pièce 6 – Etude d'impact du projet global Cigéo

Pièce 7 – Version préliminaire du rapport de sûreté

Pièce 8 – Etudes de maîtrise des risques

Pièce 9 – Capacités techniques de l'exploitant

Pièce 10 – Capacités financières de l'exploitant

Pièce 11 – Justification de la maîtrise foncière des terrains

Pièce 12 – Servitudes et demande de périmètres de protection et de droit exclusif

Pièce 13 – Plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance

Pièce 14 – Bilan de la participation du public à l'élaboration du projet du centre de stockage Cigéo

Pièce 15 – Emission de gaz à effet de serre

Pièce 16 – Plan directeur de l'exploitation

Pièce 17 – Informations juridiques et administratives

Pièce 18 – Avis émis sur le projet

Pièce 19 – Version préliminaire des spécifications d'acceptation de colis

Pièce 20 – Plan de développement de l'installation de stockage Cigéo

Pièce 21 – Guide lecture du dossier

Pièce 22 – Glossaire et acronymes









## Annexe I. Géologie

### I.1 Géométrie de la formation géologique

Le secteur de Meuse Haute-Marne fait partie du Bassin de Paris, qui est un grand ensemble sédimentaire d'âge Mésozoïque (ère secondaire) à Cénozoïque (ère tertiaire), qui repose sur le socle hercynien (ère primaire). Il est bordé à l'est par le massif des Vosges, au nord-est par le massif des Ardennes, au sud par le Morvan et le Massif central et à l'ouest par le Massif armoricain. Sa morphologie se présente sous la forme d'une cuvette, avec une puissance (épaisseur) des dépôts plus importante en son centre, qui atteint jusqu'à 3200 m à l'aplomb de la Brie. Les formations les plus récentes se retrouvent à l'affleurement en son centre, alors que les plus anciennes affleurent en auréoles sur les bordures.

La formation du Callovo-Oxfordien (COx) fait partie de cette pile sédimentaire du Bassin de Paris. Il s'agit d'une formation d'argilites et de marnes, âgée d'environ 160 millions d'années qui est constituée d'un ensemble de dépôts sédimentaires détritiques fins de type marin. Elle affleure sur les bordures ouest, sud et est du Bassin de Paris.

En Meuse Haute-Marne, la formation est subdivisée en trois unités, sur la base de leur composition minéralogique. On trouve de bas en haut sur la verticale : l'unité argileuse (UA) - la plus homogène-, l'unité de transition (UT) et l'unité silto-carbonatée (USC). La composition minéralogique est en moyenne de 42 % d'argiles (illites, micas, interstratifiés illite-smectite, kaolinite et chlorite), de 32 % de carbonates (ankérite, calcite et dolomite), de 23 % de silts (quartz et feldspaths) et 3 % de minéraux annexes dont 1 % de pyrite (sulfure de fer). La formation contient également 1 % de matière organique. La composition lithologique et minéralogique du COx est ainsi bien caractérisée tant horizontalement que verticalement et possède une bonne homogénéité spatiale sur la zone de transposition (ZT).

Le pendage moyen des couches est de 1° vers le NW. Au niveau de Cigéo, les forages montrent qu'elle se trouve à environ 500 m de profondeur et que sa puissance (épaisseur) est comprise entre 130 et 160 m. L'incertitude sur l'épaisseur du COx sur l'ensemble de la ZIOS est issue de l'interprétation et de la conversion temps de trajet/profondeur de la position de trois réflecteurs sismiques (surfaces) LS0, LS1, et LS2 identifiés dans la formation. Elle est de  $\pm 13$  m avec un intervalle de confiance à 90%.

### I.2 Objets structuraux dans le bloc 3D de la ZIRA

L'Andra a mené les études permettant de caractériser la structure géologique de la ZIRA sur 2 000 m d'épaisseur (depuis la surface jusqu'à la base du Trias). Pour cela, elle s'est appuyée sur un ensemble d'éléments : histoire géologique régionale, données de forages, profils sismiques 2D existants (hérités des prospections pétrolières du Bassin de Paris), ainsi que des lignes sismiques 2D sur la ZT (recoupant la ZIRA) et des campagnes de sismique 3D (bloc sismique sur la ZIRA associée à de la sismique réfraction 2D et sondages carottés des formations de surface) qu'elle a fait réaliser. Le maillage du bloc sismique 3D est de 10 m, ce qui est exceptionnellement dense.

Ces données ont été traitées pour le dossier de DAC. Pour le bloc sismique 3D, ce traitement intègre le filtrage des données, l'identification et le recalage des réflecteurs aux données de forage (y compris le forage EST433 qui atteint la base du Trias), la comparaison avec les lignes sismiques 2D, et une correction des effets de surface (appelée correction statique).

La sismique est une méthode indirecte d'imagerie du sous-sol, basée sur la réflexion ou la réfraction d'ondes élastiques au niveau d'interfaces entre couches géologiques présentant un fort contraste de propriétés physiques (densité, élasticité). Ces interfaces sont appelées réflecteurs. Les ondes sismiques sont émises par une ou plusieurs sources, dont le temps de trajet (temps double de l'aller-retour surface-réflecteurs) est déterminé grâce à des récepteurs placés au sol.

L'identification des réflecteurs dans les logs de forage, à une profondeur bien définie, et le pointage des réflecteurs sur les données de sismique permet en premier lieu de reconstituer l'image de la géométrie des couches géologiques sur une carte « équivalent temps double de trajet des ondes ». La projection sur un plan horizontal d'un réflecteur aboutit à une carte d'arrivée en temps sur laquelle figurent des isochrones (lignes d'égal temps de trajet des ondes) : c'est une image de la position du réflecteur en temps.

Les données de forage et les lignes sismiques 2D aident ensuite à déterminer un modèle de vitesse de propagation des ondes dans les différentes couches géologiques ( $\text{vitesse} = \text{distance} / \text{temps}$ ) pour obtenir l'image de la géométrie des formations géologiques sur une carte « profondeur ». La projection sur un plan horizontal d'un ou plusieurs réflecteurs aboutit à des cartes de la position (altitude NGF ou profondeur) du réflecteur ou de l'épaisseur des formations géologiques entre deux réflecteurs.

Le temps de trajet des ondes et le signal sismique sont influencés par la topographie de surface (qui n'est pas plane) et par la présence de formations de surface plus ou moins altérées (pour lesquelles les vitesses et donc les temps de propagation des ondes sont non uniformes). L'interprétation du signal sismique et de la position des réflecteurs en temps s'en trouve perturbée et il est nécessaire d'appliquer une correction dite statique afin de supprimer ces effets. Des profils de sismique réfraction 2D associés à la réalisation de sondages carottés permettant une description détaillée des formations superficielles aident à cette correction.

Ainsi, l'Andra dispose d'un jeu de données détaillé et conséquent sur la zone d'intérêt et a bénéficié des meilleures pratiques d'ingénierie pour les différentes étapes de traitement de ces données.

L'analyse des structures se base sur les cartes « équivalent temps double de trajet des ondes » après les corrections statiques. Deux zones de discontinuités apparaissent sur les données sismiques :

- des structures linéaires orientées dans la formation du Dogger,
- une structure dépressionnaire au sommet du Trias.

Les structures orientées dans la formation du Dogger forment des linéaments d'orientation N120°E, qui affectent les horizons situés au-dessus du réflecteur LS08 (mur du Dogger). Ces structures ont été interprétées comme des corps récifaux, ce qui est confirmé par des données de forages Andra atteignant cette formation et par la comparaison avec les structures sédimentaires observées à l'affleurement à une trentaine de kilomètres plus à l'Est. Ces corps récifaux se développent sur une trentaine de mètres d'épaisseur, au sein du Bajocien (vers

950 m de profondeur). La présence de ces corps récifaux introduit une hétérogénéité des vitesses de propagation des ondes, modifie les isochrones et donc le positionnement des réflecteurs sous-jacents. Cet effet sur les isochrones s'atténue avec la profondeur. La cohérence entre la sismique (méthode indirecte) et les observations directes (forages dans la formation et observations à l'affleurement) conforte l'interprétation.

Dans la formation du Trias, des structures hétérogènes sont observées au niveau du réflecteur situé vers le sommet du Trias supérieur (LS11 dolomie de Beaumont, vers 1 400 m de profondeur), alors que les réflecteurs sus-jacent (LS10 à base du Lias, 140 m au-dessus) et sous-jacent (LS12 Lettenkohle, 320 m en dessous) sont bien continus. Plusieurs interprétations sont actuellement proposées au regard des connaissances géologiques.

Cette structure en dépression peut être interprétée comme résultant de la dissolution précoce (contemporaine de la sédimentation de la formation des Grès à roseaux déposés à la fin de l'épisode salifère) de faisceaux de sel de la formation des Marnes Irisées du Keuper (Trias supérieur), comme observé sur des données de forages réalisés dans les secteurs de Nancy et Saint-Dizier recoupant ces formations. Le fait que la déformation affecte également la Dolomie de Beaumont dont le dépôt est postérieur à celui des Grès à roseaux, peut s'expliquer par une compaction  $\Delta h$  plus grande des formations marneuses aux endroits où elles sont venues combler les vides créés par la dissolution du sel (parce que leur épaisseur  $h_0$  est plus importante ; compaction  $\Delta h = \text{taux de compaction} \times h_0$ ). Ce phénomène n'est plus observé à la base du Lias, et n'a donc aucun effet sur le COx.

Cette structure pourrait également être interprétée comme liée à la présence de failles syn-sédimentaires orientées nord-sud, de rejet 20 m. L'hypothèse de telles failles est cependant peu compatible avec les données observables comme les relations entre longueur d'une faille, extension et rejet (établies sur des bases statistiques à l'échelle mondiale). Par ailleurs, l'orientation relevée N-S ne permet pas de les associer à d'autres failles du secteur, et le contexte géodynamique (extension E-W) au Trias supérieur au moment de leur présumée formation n'est pas propice à la formation de failles d'orientation N-S. Notons que dans l'hypothèse d'une faille, cette dernière serait très ancienne (âge triasique supérieur, soit plus de 200 Ma), d'extension verticale limitée (rejet de 20 m), et n'aurait jamais rejoué depuis.

Le traitement et l'interprétation des données sismiques a évolué au cours des travaux de l'Andra. Le premier traitement de la sismique 3D, réalisé lors de l'élaboration du dossier 2011, n'incluait pas les corrections statiques, par manque de temps avant dépôt du dossier.

A cette époque, une anomalie au niveau des isochrones avait été observée dans le COx et interprétée comme une flexure (pli) d'une trentaine de mètres d'amplitude verticale et d'extension kilométrique. Elle était également perceptible sur les autres réflecteurs situés au-dessus du COx, ce qui n'était pas cohérent avec une explication géologique structurale ou sédimentaire qui aurait affecté la pile sédimentaire à partir du dépôt du COx. En l'absence d'incidence perçue sur le COx, l'Andra n'avait pas jugé utile de revoir rapidement le traitement des données. Depuis, les corrections complètes des statiques ont nettement amélioré la représentativité des isochrones. La comparaison entre les cartes de temps corrigées et non corrigées, appelée carte des statiques primaires, a mis en évidence *a posteriori* les formations de surface responsables de cet "effet de flexure" telles que les vallées de l'Orge et de l'Ornançon, et la présence locale de lentilles de sable valanginien (observés sur les données de sondages carottés associés à la sismique réfraction 2D).

Notons que les corrections statiques dans le traitement 2018 n'affectent pas la géométrie de structures décrites dans le Trias et le Bajocien (cf. 4.2.2) et donc déjà identifiées en 2011.

### 1.3 Sismicité

Cigéo est situé sur la bordure Est du Bassin de Paris, qui est classé en zone de sismicité très faible, la majorité de l'activité sismique étant concentrée plus à l'est (à 70 km environ) à la limite entre le domaine sédimentaire et le socle cristallin du massif des Vosges. Les approches déterministe et probabiliste, qui sont basées sur les séismes historiques, le catalogue de sismicité, les modèles de failles et de contextes crustaux, et les modèles de propagation et d'atténuation des ondes, ont permis d'évaluer l'aléa et de modéliser des spectres de réponse sismique avec des périodes de retour de 10 000 à 60 000 ans. L'enveloppe des spectres reste inférieure au séisme forfaitaire de 0,1 g à fréquence infinie imposé par le RFS n°2001-01, que l'Andra majore à 0,39 g à 10 Hz, et à 0,19 g à fréquence infinie, pour le dimensionnement des ouvrages en phase d'exploitation.

### 1.4 État de contraintes naturelles

Les mesures réalisées par l'Andra sur les différents forages de reconnaissance ont permis de déterminer l'état des contraintes naturelles dans les différentes formations. La contrainte horizontale n'est pas isotrope. Dans le COx, la contrainte (principale) horizontale majeure  $\sigma_H$  est orientée à N153°E  $\pm$  11°. Sa valeur mesurée est d'environ 14,5  $\pm$  1 MPa à 490 m de profondeur. La contrainte horizontale mineure  $\sigma_h$  varie entre 8,0 MPa (sommet de l'USC) et 14,7 MPa (base de l'UA). A 490 m de profondeur, elle est de 12,0  $\pm$  0,5 MPa. Sa variation n'est cependant pas linéaire avec la profondeur.

Sur le plan mécanique, l'état des contraintes *in situ* du COx sur la ZT apparaît homogène et conforme à ce que l'on peut attendre sur le Bassin de Paris. L'existence d'une anisotropie horizontale de l'ordre de 1,3 est cependant surprenante dans une roche capable de fluer.

La contrainte verticale  $\sigma_v$  est d'environ 12 MPa à 500 m de profondeur. Le rapport  $\sigma_h/\sigma_v$  est proche de 1 dans le COx, avec la contrainte verticale pouvant devenir la contrainte principale mineure dans certains horizons.

### 1.5 Modèle d'évolution tectonique et climatique

Le modèle d'évolution tectonique, basé sur le contexte géodynamique de la région (historique, déformation, fracturation, sismo-tectonique), et prenant en compte les grands accidents tectoniques, les zones de déformations beaucoup plus diffuses, les vitesses de déplacement et les régimes de déformation récente, et l'activité sismique et paléosismique, montre que Cigéo restera dans une zone tectonique très stable durant le prochain million d'années. La vitesse de déformation est faible ( $< 10^{-11} \cdot \text{an}^{-1}$ ). Aucune faille majeure (rejet  $> 10$  m et extension déca-km), faille secondaire (rejet  $> 5$  m et extension pluri-kilométrique) ou structure significative (rejet  $> 2-4$  m) n'a été observée dans le COx et les formations encaissantes.

Le modèle d'évolution géomorphologique, intégrant à la fois des effets tectoniques et climatiques (dont un scénario de perturbation anthropique liée aux émissions de CO<sub>2</sub>)

impactant l'état de surface (couverture végétale, sol), la topographie et le réseau hydrographique et intégrant les effets de la karstification, du pergélisol, des vitesses d'érosion (plateaux et vallées) et de dépôts fluvio-glaciaires conduit à évaluer entre 10 et 50 m la profondeur maximale d'incision des vallées et jusqu'à 25 m l'épaisseur d'ablation des plateaux sur le prochain million d'années. Cette évolution géomorphologique aura pour conséquence une accentuation du découpage des formations superficielles des calcaires du Barrois, l'extension des affleurements des marnes du Kimméridgien, et la mise à l'affleurement à l'échéance 400-500 ka des calcaires de l'Oxfordien en vallée de l'Ornain qui devient un exutoire local de cet aquifère.





## Annexe II. Hydrogéologie

L'Andra décrit et justifie les concepts, les méthodes, et les outils utilisés pour modéliser les écoulements souterrains à l'échelle du Bassin parisien et celle du secteur incluant la ZT du site Meuse Haute-Marne. Elle a mené un travail considérable réalisé en collaboration avec plusieurs partenaires (Institut Français du Pétrole, Université de Neuchâtel, Golder Associates).

L'objet de ces études est d'identifier au final les voies de transfert potentielles des radionucléides au sein du système aquifère. Ces résultats sont essentiels pour paramétrer le volet transfert de l'analyse de sûreté. La démarche finale aboutit à un modèle de référence à l'actuel, dit intégré en ce qu'il réunit en seul outil de calcul un modèle régional du Bassin de Paris (BP) et un modèle de secteur plus précis. Le modèle de référence s'emploie à reproduire la situation hydrogéologique actuelle ; il est ensuite utilisé pour décrire son évolution sur un million d'années sous l'effet de mécanismes géodynamiques internes (tectonique, eustatisme) et externes (érosion sous deux options climatiques).

L'Andra a bien compris l'intérêt d'une approche hydrogéologique régionale dont la sophistication a augmenté progressivement. Cette démarche est le résultat d'une longue évolution depuis le dossier 2005 appuyée par les évaluateurs notamment l'IPSN (devenu IRSN)

La démarche globale de construction du modèle et de modélisation hydrogéologique s'appuie sur les données et concepts suivants :

- les données de base sont d'abord la géométrie des couches géologiques (à une échelle litho-stratigraphique) du Bassin de Paris en distinguant les formations aquifères (sables, grès, calcaires) et les formations semi-perméables (marno-calcaires, marnes, argilites, formations salifères). Trois stades d'élaboration de ces données jalonnent les modèles 2015 (rapport argile 2015, rapport DOS 2019 et 2020) pour le dossier DAC. Cette évolution est marquée par la prise en compte progressive de l'intégralité des données de forages historiques sur le bassin, des profils sismiques détaillés sur la ZT puis des nouveaux forages de l'Andra. Les données sont incluses (archivées) dans la géométrie du maillage non structuré support du modèle hydrogéologique de référence en éléments finis. Les améliorations finales de la morphologie des couches portent essentiellement sur la description des niveaux poreux de l'Oxfordien ;
- une nouveauté importante est la prise en compte dans le modèle 2020 des failles majeures à l'échelle du Bassin de Paris et des failles mineures sur la ZT. Ces failles sont considérées initialement comme perméables ou imperméables suivant leur orientation par rapport à la direction de contrainte maximale régionale et ce comportement est ensuite critiqué par l'aptitude du modèle à reproduire la situation piézométrique. Le modèle hydrodynamique assimile numériquement les failles sous forme d'éléments joints 2D ou 1D ;
- le modèle de référence fonctionnant en régime permanent, les paramètres hydrogéologiques sont réduits à la perméabilité des formations. On trouve peu de précisions dans la DAC sur la méthode d'acquisition ; il semble que les valeurs proviennent de données de forage (majoritairement sur la ZT) traitées par des outils de géostatistique et du calage des modèles hydrogéologiques successifs ;

- le calcul du transfert de solutés en régime transitoire nécessite la connaissance de la porosité cinématique. La porosité totale des formations est d'abord recherchée selon les mêmes méthodes que pour la perméabilité ; la porosité cinématique est choisie à 40% de la valeur de la porosité totale. Il n'y a pas de possibilité de calage de cette grandeur par ajustement du modèle de transport, ce qui exigerait des connaissances sur la concentration d'un traceur naturel dont on connaisse le comportement. Ce point est évoqué mais pas exploité ;
- les conditions aux limites sont d'une part des niveaux de drainage par le réseau hydrographique identifié, ce qui pose peu de problème d'acquisition (car ce réseau est simplifié à l'échelle régionale et détaillé à l'échelle du secteur), d'autre part les débits d'infiltration dans le sol où les différentes formations affleurent. Cette question est beaucoup plus complexe et son traitement est peu explicite dans le rapport. On comprend qu'un bilan hydrologique est établi en fonction de la répartition spatiale des pluies par sous-bassin sur l'ensemble du domaine, et ajusté sur les débits des rivières. Les valeurs de perméabilité des zones affleurantes des aquifères sont alors calées pour reproduire le niveau piézométrique moyen observé dans les forages disponibles qui est contraint par le niveau des rivières. Cette approche génère des incertitudes sur le débit circulant dans les aquifères superficiels mais les conséquences sont limitées pour les aquifères profonds car ils sont alimentés par drainance à partir des aquifères superficiels et cette alimentation dépend de la capacité d'absorption liée à leur transmissivité et non pas du bilan hydrique en surface qui est globalement excédentaire dans les conditions climatiques du bassin. En revanche, le bilan hydrique important est celui des calcaires du Barrois sur la ZT car il représente une ressource en eau exploitée localement, et doit donc être pris en compte dans l'étude d'impact. L'Andra s'est donné les moyens d'identifier le fonctionnement du barrois au moyen de mesures locales ;
- les paramètres de calage sont la piézométrie mesurée à l'échelle régionale et surtout localement dans les forages de l'Andra. Une amélioration importante a été obtenue sur la piézométrie du Dogger entre le modèle 2019 et le modèle actuel grâce à de nouveaux forages qui ont permis de comprendre le rôle des failles de la Marne sur les directions d'écoulement de cet aquifère ;
- des données de nature tectonique et climatique servent à construire les scénarios d'évolution à long terme sur 1 million d'années. Les données tectoniques, issues d'études sur les mouvements passés, sont basées sur le tracé du réseau hydrographique et la datation des terrasses alluviales du secteur. Les données climatiques font l'objet de deux scénarios distincts : d'une part une évolution naturelle du climat actuel prenant en compte la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique actuelle et les cycles astronomiques de Milanković, d'autre part une évolution du climat perturbée par les activités anthropiques consistant à consommer toutes les réserves d'énergie carbonée fossiles, se traduisant par un climat sub-tropical persistant pendant 500 000 ans avant un retour des cycles astronomiques. Ces conditions tectoniques et climatiques permettent de déterminer les vitesses d'érosion des plateaux et d'incision ou d'alluvionnement des rivières et également d'évaluer la possibilité d'installation d'un pergélisol. Ces données sont importantes car elles déterminent la date d'atteinte et la localisation des exutoires par des espèces chimiques en solution issues du stockage ;
- ces données alimentent des modèles déterministes décrivant le transfert de chaleur, de l'eau et des solutés en milieu poreux. Trois générations d'outils ont été utilisés : un premier modèle (SimuScoop de l'IFP) basé sur une méthode de résolution

mathématique des équations par différences finies et fonctionnant sur une grille multicouche structurée en mailles carrées ; un second outil quasi tridimensionnel (Ground Water de l'Université de Neuchâtel) basé sur la méthode des éléments finis sur un maillage prismatique ou pyramidal non structuré pour le calcul hydrodynamique ; enfin, un troisième outil multicouche (GEOAN) de résolution par méthode des différences finies pour le calcul du transport de solutés. Des outils géostatistiques sont également utilisés pour attribuer les données spatialisées de porosité et perméabilité aux mailles des modèles.

La modélisation hydrogéologique de secteur et les observations associées ont mis en évidence des configurations hydrodynamiques locales influant sur les écoulements.

La faible différence de charge hydraulique entre les deux formations aquifères de l'Oxfordien et du Dogger, qui sont les encaissants du COx, ainsi que la faible perméabilité du COx, conduisent à conclure que les écoulements dans ces deux aquifères sont très faibles, ce qui les rend hydrauliquement indépendants, malgré l'existence de cette faible drainance potentielle verticale ascendante et descendante dans le COx. La drainance est verticale ascendante dans la partie nord de la zone d'emprise de Cigéo, avec un gradient de charge hydraulique de -10 %, alors que dans la partie sud la drainance est verticale descendante, avec un gradient de charge hydraulique de 4 %. L'Andra a montré que cette situation était sans influence sur les performances globales du système de stockage.

Les failles parallèles aux contraintes tectoniques majeures et la zone de fracturation diffuse sont considérées comme hydrauliquement actives (faille de la Marne, Faille de Poisson), alors que les failles perpendiculaires jouent plutôt le rôle de barrière hydraulique (faille de Gondrecourt, faille de Poisson). Ce rôle hydrodynamique des failles permet d'expliquer la carte piézométrique de secteur dans le Dogger.

Selon l'Andra, l'amélioration du modèle hydrogéologique a permis de réduire significativement les incertitudes grâce à l'augmentation de la puissance de calcul, requise pour prendre en compte des concepts ou mécanismes plus complexes. Du travail sera encore fait selon cette méthodologie par calage sur de nouvelles données de forages à venir. La question des incertitudes sur l'évolution à long terme est différente : elles proviennent d'une part des incertitudes sur le modèle hydrogéologique, qui devraient être réduites avec son amélioration, d'autre part de la construction des scénarios d'évolution géodynamiques. L'Andra pense que des améliorations sont possibles en suivant l'évolution des modèles climatiques et considère qu'elle a utilisé des scénarios enveloppes et encadre ainsi la gamme des incertitudes.

S'agissant du calcul de l'écoulement et du transport de solutés en milieu poreux, l'Andra a mobilisé les meilleures techniques existantes. Les méthodes numériques des codes de calcul sont éprouvées. On note que les outils de calcul ont évolué pendant la durée de l'étude pour s'adapter aux particularités du sujet, par exemple le rôle des failles et la nécessité d'une échelle variable de représentation entre le domaine régional et le domaine local.



## Annexe III. Propriétés du COx

### III.1 Propriétés thermiques

Le transfert de chaleur est dominé par la conduction. Ce mode de transfert est décrit par la loi de Fourier dont le paramètre est la conductivité thermique. La conductivité thermique des argilites est comprise entre  $1,3 \pm 0,2$  et  $2,1 \pm 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , typique des roches argilo-marneuses stratifiées. Elle présente un degré d'anisotropie d'environ 1,3 lié au dépôt sédimentaire : pour un flux de chaleur donné, la température augmente plus rapidement suivant le plan de stratification que suivant la direction verticale.

Le principal terme source de chaleur dans le COx sont les colis de déchets HA dont la puissance thermique maximale à réception dans le stockage est de 500 W par colis.

La répartition de colis dans le quartier HA est telle que la puissance thermique initiale transmise au COx est de 2 à  $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ce qui limite l'élévation de température à 80°C en champ proche des alvéoles HA pendant 10 à 15 ans et à 50°C au bout de 400 à 500 ans à quelques dizaines de mètres.

Le gradient de température reste inférieur à  $2^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ , sauf sur le premier mètre ( $20^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

L'Andra a évalué l'effet de l'application d'une charge thermique conduisant à une température de 90°C aux parois du COx par des expériences sur échantillons et au laboratoire souterrain. La phase de chauffe entraîne une augmentation des pressions interstitielles dans la roche de 0,3 à 0,5 MPa·K<sup>-1</sup> (pressurisation thermique), due à la différence de dilatation thermique entre l'eau et la roche, qui se dissipe ensuite par diffusion. Ce phénomène traduit un comportement thermo-poro-visco-plastique du milieu ; il peut être modélisé de manière enveloppe par une approche thermo-poro-élastique qui en majore les effets.

La dilatation thermique qui est différente, à plus petite échelle, suivant les minéraux peut entraîner un endommagement diffus de la roche, qui est cependant jugé négligeable. Cependant, la variation des contraintes locales et l'augmentation des surpressions interstitielles liées à l'élévation transitoire de la température dans le COx induisent une évolution des contraintes effectives, ce qui peut résulter en un endommagement localisé (fractures).

Ces effets thermiques jouent un rôle sur le chargement mécanique (déformation radiale) du chemisage des alvéoles par augmentation de la convergence sous l'effet de l'expansion thermique et de l'augmentation des vitesses de convergence.

De plus, la modification du champ de contrainte effective liée à l'augmentation de température peut être à l'origine d'endommagement de la roche en champ lointain. Les calculs montrent que cet effet est maximum à l'entraxe entre deux alvéoles et peut être évité en maintenant une distance de 50 m entre elles.

### III.2 Propriétés hydrodynamiques

La porosité totale des argilites du COx est en moyenne de 18 %, avec une très grande majorité de pores de taille comprise entre 3 et 20 nm. Cette porosité est d'origine mixte, interparticulaire entre les grains minéraux et interfoliaire au sein de la fraction argileuse. Toute la porosité ne participe pas à l'écoulement ni au transfert des espèces chimiques.

On distingue la porosité accessible qui est la fraction de la porosité totale dans laquelle une espèce chimique peut pénétrer. Sa valeur varie avec la nature de l'espèce. Au moyen d'expériences de diffusion, l'Andra a établi que la porosité accessible était proche de la porosité totale pour les espèces neutres, comme la molécule d'eau tritiée, et les espèces cationiques, alors qu'elle était plus réduite pour les espèces anioniques. Ce comportement est lié à la répulsion électrostatique des anions à proximité de la surface des minéraux argileux qui est chargée négativement dans les conditions physico-chimiques du COx. Il est appelé exclusion anionique.

La porosité cinématique représente la part de la porosité totale dans laquelle l'eau porale peut circuler sous l'effet de gradients de charge hydraulique et donc transporter des solutés par convection. Elle est de l'ordre de 40 à 60 % de la porosité totale.

La perméabilité ou conductivité hydraulique du COx apparaît variable mais assez uniforme dans sa variabilité sur l'étendue de la formation. Les différentes mesures (252) réalisées en forages, en laboratoire de surface et en laboratoire souterrain sont comprises entre  $1 \cdot 10^{-14}$  et  $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La moyenne géométrique de l'ensemble des mesures est de  $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ces valeurs s'accordent bien sur une loi log-normale unique avec une valeur médiane peu variable sur l'épaisseur de la couche, de  $2$  à  $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , et des valeurs comprises entre  $4,2 \cdot 10^{-14}$  et  $2,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  avec un intervalle de confiance de 95 %. Cette conductivité hydraulique est anisotrope, phénomène lié à la stratification du dépôt sédimentaire, avec une valeur horizontale environ trois fois supérieure à la valeur verticale. L'endommagement dû aux ouvrages souterrains a un impact sur la perméabilité en champ proche. Cependant, la présence de minéraux argileux gonflants (smectites des interstratifiés illite-smectite) confère au matériau des propriétés d'auto-cicatrisation des fractures en présence d'eau et cet impact sur la perméabilité est temporaire jusqu'à la resaturation du stockage. Notons que les pressions d'entrée pour ces fractures auto-colmatées sont comprises entre 0,3 et 0,7 MPa contre 5 MPa pour le matériau sain.

### III.3 Surpression d'eau dans le COx

L'Andra a mesuré des pressions interstitielles atypiques dans le COx, se matérialisant au point maximum par une charge hydraulique plus élevée d'une cinquantaine de mètres (soit 0,5 MPa de surpression) par rapport à la charge théorique variant linéairement entre les deux aquifères (Oxfordien et Dogger) encaissant le COx. Ces mesures sont confirmées par des observations se déroulant sur plusieurs années. Ce phénomène de surpression a été constaté à plusieurs reprises à l'échelle mondiale dans les formations très peu perméables, typiquement les formations argileuses présentant une perméabilité inférieure à  $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'Andra a tenté de le quantifier en invoquant et modélisant quatre causes distinctes : l'effet d'un transitoire hydrodynamique long causé par des variations passées de la piézométrie des aquifères

encaissants, la réduction de la porosité, l'effet de la chimio-osmose et l'effet de la thermo-osmose.

L'effet hydrodynamique pourrait avoir été causé par l'incision sur quelques dizaines de mètres des vallées proches du site en particulier de la Meuse pendant le dernier million d'années, ce qui aurait provoqué un abaissement du niveau piézométrique dans l'Oxfordien se transmettant progressivement au COx. Une simulation numérique montre que malgré la très faible perméabilité des argilites, une telle perturbation se dissiperait en une dizaine de milliers d'années et ne pourrait être responsable de la totalité de la surpression qui subsiste dans le COx.

La réduction de la porosité peut avoir une cause mécanique ou chimique. L'effet mécanique résulte de la compaction des sédiments au cours de leur enfouissement progressif. L'effet chimique peut provenir de transformations minéralogiques (évolution des interstratifiés illite-smectite) ou de la précipitation de minéraux néoformés (carbonates). L'augmentation du volume solide se fait au détriment du volume poral ce qui provoque une augmentation de la pression interstitielle d'autant plus importante que l'eau peine à s'évacuer du milieu. L'histoire géologique du dépôt des sédiments et de leur diagenèse montre que de tels événements ont pu se produire mais à des dates suffisamment anciennes pour permettre la dissipation d'une surpression associée.

L'osmose chimique est un phénomène qui engendre des flux d'eau sous l'effet d'un gradient de concentration s'exerçant de part et d'autre d'une membrane semi-perméable, l'eau ayant tendance à s'écouler vers le milieu le plus concentré jusqu'à atteindre un équilibre à concentration uniforme. Ce phénomène dépend d'un gradient de pression osmotique régi par la loi de Van't Hoff et d'un coefficient d'efficacité osmotique dont la valeur est inférieure ou égale à 1. Lorsque la membrane est idéale, elle laisse passer les molécules d'eau mais s'oppose au transfert des ions ; le coefficient vaut alors 1. Le coefficient est inférieur à 1 lorsque les ions peuvent la traverser et les phénomènes d'osmose et de diffusion coexistent. Les argiles se comportent comme une membrane semi-perméable imparfaite en raison de la taille réduite des pores (quelques nanomètres) et de mécanismes électrostatiques. Les différences de salinité entre les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger qui encadrent le COx peuvent atteindre plusieurs dizaines de millimoles par litre pour  $\text{Cl}^-$ , qui est l'ion majoritaire. Le coefficient d'efficacité osmotique de l'argilite a été mesuré par l'Andra autour de 0,1 sur échantillon et en laboratoire souterrain. Avec ces paramètres, les calculs indiquent que la surpression engendrée dans le COx ne dépasserait pas quelques centièmes de MPa. Une configuration enveloppe, tenant compte des incertitudes et de la variabilité des propriétés du milieu, conduirait une valeur maximale de 0,2 MPa, insuffisante pour expliquer la surpression observée.

La thermo-osmose est le phénomène qui engendre des flux d'eau sous l'effet d'un gradient de température. Il dépend d'un paramètre  $k_T (\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$ , appelé perméabilité thermo-osmotique, qui est très peu renseigné dans les milieux naturels. Compte tenu du profil de température dans le COx, les calculs montrent que ce paramètre devrait avoir des valeurs supérieures à la gamme des observations réalisées sur des milieux comparables au COx. Cependant, un cadre théorique récemment développé conclut que de telles valeurs sont possibles. L'explication d'une part de la surpression dans le COx par la thermo-osmose reste donc une hypothèse plausible. L'Andra poursuit actuellement les recherches pour obtenir des données sur les paramètres thermo-osmotiques spécifiques du COx en conditions *in situ*.

La conclusion des études sur la surpression est que les trois phénomènes analysés et quantifiés, hydrodynamique, chimio-osmotique et thermo-osmotique peuvent engendrer des surpressions sans qu'il soit possible à ce stade de distinguer la part de chacun.

Face à l'incertitude, l'Andra adopte une attitude conservatrice pour l'évaluation des performances du stockage. En premier lieu, l'Andra considère que quelle que soit l'origine de cette surpression, les solutés peuvent être transportés par l'écoulement convectif théorique résultant. L'examen du nombre de Péclet (rapport entre la convection et la diffusion) pour les différentes conditions aux limites hydrauliques et chimiques sollicitant le COx, montre que la diffusion reste le phénomène dominant de transport de radionucléides à grande échelle vers les limites de la roche hôte. En second lieu, l'Andra s'intéresse au rôle de la surpression au niveau des ouvrages de stockage. Il est postulé dans les modèles que toute la surpression mesurée serait d'origine hydrodynamique et s'appliquerait dans le stockage après fermeture pendant la phase transitoire de resaturation et au-delà. Les conséquences attendues seraient une augmentation des transferts *via* les liaisons surface-fond (LSF). Les calculs montrent que les flux diffusifs évacués par le COx restent dominants par rapport à ceux empruntant les LSF, dans le cadre du scénario d'évolution normale (SEN). Ces flux, qui restent faibles, deviennent comparables en cas de défaillance des performances des interfaces entre le COx et le noyau argileux des scellements. Enfin l'Andra s'intéresse à la surpression d'origine osmotique qui pourrait apparaître dans certains alvéoles MAVL contenant des déchets salins solubles pouvant engendrer des concentrations de solutés de plusieurs moles par litre. Les calculs concluent que la surpression reste inférieure à quelques dixièmes de MPa, dans la gamme de l'incertitude sur les pressions résultant du transitoire de resaturation.

### III.4 Propriétés de transfert

La perméabilité du COx étant très faible, cette formation constitue un obstacle quasi parfait à la circulation des eaux, même sous un gradient de charge hydraulique élevé. Le mode de transfert des éléments chimiques en solution, en particulier des radionucléides est ainsi essentiellement diffusif sous l'effet du gradient de concentrations (par rapport au transfert convectif lié au mouvement de l'eau sous l'effet du gradient de charge hydraulique).

L'Andra a accordé beaucoup d'attention à la chimie de l'eau porale et a développé des méthodes pour prélever des échantillons représentatifs d'eau dans un milieu très peu perméable. Les concentrations mesurées ont été confrontées avec succès à un modèle thermodynamique de spéciation. Elle a également étudié en détail le coefficient de diffusion des solutés en fonction de l'espèce chimique (anions, cations, eau tritiée HTO) et de la variabilité minéralogique du COx. Un schéma diffusif conceptuel a été établi pour des espèces types (HTO, Cl<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, Cs<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>) présentant des facilités expérimentales car peu retenues sur les argiles. Il est mis en évidence le rôle majeur des phénomènes électrostatiques dans l'argile provoquant une exclusion anionique pour les anions et une diffusion augmentée pour les cations. La variabilité du coefficient de diffusion apparaît plus grande pour les cations dont la chimie peut être complexe, mais l'effet de cette variabilité est atténué par la forte rétention dans les argiles (Kd élevés). Les coefficients de diffusion des espèces types ont été mesurés en laboratoire et *in situ* au laboratoire souterrain (expérience DIR menée sur 4 ans). Des tentatives ont été effectuées pour exploiter les traceurs naturels dans le COx (Cl<sup>-</sup>, isotopes de l'oxygène) avec des résultats peu convaincants. Le coefficient de diffusion effectif pour les molécules



d'eau tritiée (HTO) et les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) est évalué expérimentalement respectivement à  $2,2 \pm 0,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $4,9 \pm 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### III.5 Comportement mécanique

Sur le plan mécanique, l'état des contraintes *in situ* du COx sur la ZT apparaît homogène. Cette roche présente un comportement instantané pseudo-élastique, qui évolue vers un comportement plastique avec rupture ductile et résistance résiduelle. La prédominance de la matrice argileuse confère au COx des bonnes propriétés élastiques. La résistance en traction est de 1,4 MPa, celle à la compression de 20 à 30 MPa. Il existe une anisotropie des propriétés liée à la stratification.

De plus, il existe un changement de comportement mécanique, avec passage d'un comportement élastique à élasto-plastique vers -470 m de profondeur, qui est en lien avec la lithologie. Ce comportement mécanique associé au déviateur des contraintes horizontales existant dans le COx a un impact sur la déformation et l'endommagement (écaillage) en champ proche engendré par les excavations.

Ces considérations d'ordre mécanique ont été prises en compte pour optimiser l'architecture du stockage.

### III.6 Conséquences du comportement mécanique du COx sur la réalisation des ouvrages

Les propriétés intrinsèques du COx ayant été caractérisées, il convient d'évaluer les modifications éventuelles induites par le creusement et l'implantation du site de stockage Cigéo dans la couche géologique pour assurer les fonctions de sûreté. La couche du COx engendre des sollicitations sur la structure du stockage dont il faut tenir compte pour dimensionner des ouvrages de génie civil capables d'assurer leurs fonctions sur toute la durée de service requise.

La caractérisation expérimentale des carottes prélevées dans le COx lors de la réalisation du laboratoire souterrain a montré que l'argilite est un matériau au comportement fragile qui tend à devenir ductile lorsque la contrainte de confinement augmente. Elle présente dans le temps un comportement différé convergent qui a pour conséquence un chargement mécanique des ouvrages. Les observations dans le laboratoire souterrain ont confirmé que ce comportement en champ proche, bien que de nature similaire, engendre des sollicitations anisotropes suivant l'orientation des galeries. Il en résulte dans les galeries orientées selon la contrainte horizontale majeure ( $\sigma_H$ ) un déplacement horizontal qui atteint 60 mm au bout de 400 jours alors que dans les galeries orientées selon la contrainte horizontale mineure ( $\sigma_h$ ) c'est le déplacement vertical qui est le plus important, jusqu'à 200 mm après 2200 jours.

L'approche choisie pour modéliser le comportement hydro-mécanique du COx considère les différentes périodes de vie du stockage, à savoir celles de construction, d'exploitation et post-fermeture. Pour chacune, les processus physico-chimiques prépondérants ont été identifiés. Il a donc fallu développer un modèle conceptuel pour chaque situation et ses conditions propres.

Plusieurs modélisations ont été testées au sein d'un groupe de travail piloté par l'Andra selon une méthodologie d'inter-comparaison de codes de calcul. Dans un premier temps, les différents laboratoires ont suivi des approches variées pour modéliser l'endommagement diffus dû à l'excavation. Les modélisations ont été éprouvées par comparaison avec les données obtenues *in situ* dans le laboratoire souterrain et les modèles ont été recalés au besoin. Un des modèles les plus avancés s'avère être un modèle poro-élasto-visco-plastique utilisant un critère de type Mohr-Coulomb pour calculer la limite d'élasticité, la limite de rupture et l'extension anisotrope. Il permet de prendre en compte l'anisotropie et le traitement de la localisation de l'endommagement pour une meilleure prédiction de la convergence du COx et de son fluage, mais aussi de l'évolution de la perméabilité modifiée par la plasticité du milieu.

Les résultats de cette modélisation des sollicitations du COx ont été utilisés pour dimensionner les ouvrages qui subissent le fluage de la roche et tendent à s'ovaliser. Plusieurs compositions de revêtement de galeries ont été considérées. Ces différentes compositions sont liées au mode de creusement -tunnelier ou attaque ponctuelle- qui implique une technique différente de soutènement, à savoir par des voussoirs ou par projection/coulage en place de béton cintré, respectivement. En fonction de l'activité de la zone (zone d'accostage, cellule de manutention, jonction retour d'air, etc.) le diamètre excavé de la galerie peut aussi varier.

Les premiers calculs ayant spécifié qu'une épaisseur de béton de l'ordre du mètre était nécessaire pour assurer la tenue des galeries sur la durée d'exploitation, des solutions techniques ont été recherchées pour diminuer ces quantités et les délais de pose. L'introduction de matériaux compressibles en extradors de la couche de béton s'est révélée performante et permet de significativement réduire l'épaisseur de béton : pour l'addition de 20 cm de matériau compressible, l'épaisseur de béton B60 passe de 110 à 60 cm. L'emploi de matériaux compressibles a été validé par des essais en laboratoire à plusieurs échelles en laboratoire souterrain et numériquement. De plus, ce dispositif permet de réduire l'incertitude sur le comportement différé pendant la période où l'extrapolation a été effectuée.

La validation des différentes compositions, et donc de la tenue des différentes zones de galeries, a été faite par vérification de leur contrainte de compression maximale  $\sigma_{\max}$  à la fin de la phase d'exploitation (100-150 ans) et de la contrainte par rapport à l'écrasement du matériau compressible via le ratio entre la limite du palier plastique et la déformation radiale. Le seuil de la contrainte maximale est fixé à 29,6 MPa pour les bétons coulés en place et 34,2 MPa pour les voussoirs préfabriqués, modulés par un coefficient de sécurité de  $1,35 \times \sigma_{\max}$ . Par exemple, pour les voussoirs composés de 50 cm de béton B60 et de 20 cm de matériau compressible, selon les deux orientations de galeries  $\sigma_H$  et  $\sigma_h$  les contraintes maximales atteintes sont inférieures au critère d'admissibilité de 34,2 MPa, égales à 23 et 26 MPa respectivement. La déformation maximale du matériau compressible est d'environ 19 % si l'orientation est celle de la contrainte horizontale majeure et 25 % selon la mineure. Les vérifications sont ainsi réalisées sur les parois des différentes parties de l'ouvrage.

Pour qualifier ce concept, l'Andra a caractérisé le comportement mécanique de matériaux bi-couche (matériau compressible/béton) en laboratoire, a mené des essais à grande échelle (échelle ¾) au laboratoire souterrain, et a finalement modélisé leur comportement à long terme sur la base des données obtenues.

Les modélisations numériques sont basées sur un modèle élasto-visco-plastique avec écrouissage. Les calculs montrent ainsi qu'une épaisseur de 20 cm de matériau compressible avec une fin de palier plastique à 50 % de déformation associée à des voussoirs de 50 cm de

béton armé de classe C60/75 permettent d'assurer la tenue mécanique de la structure. À la fin de la période séculaire, les contraintes en compression dans le revêtement atteignent 25 à 30 MPa, valeurs inférieures à la résistance de 36 MPa correspondant à l'état ultime de service pour laquelle le soutènement est dimensionné. Un écrasement maximal de 25 % du matériau compressible en résulte. Selon ces hypothèses, la rupture du revêtement commence à partir de 500 ans lorsque le matériau compressible atteint 20 % de déformation, bien au-delà de la période de fonctionnement sur laquelle la récupérabilité est envisagée.



## Annexe IV. Chimie : implication sur les termes sources et la migration des radionucléides

Cette annexe est, autant que possible, auto-porteuse. Elle décrit l'état de la science pour ce qui concerne la chimie et son implication dans Cigéo.

La chimie intervient dans la mise au point des matériaux pour confectionner les colis primaires de déchets HA et MAVL (conteneurs, matrice de confinement des radionucléides, liant de blocage des déchets, etc.) qui doivent assurer le non-relâchement puis le confinement passif de la radioactivité le plus longtemps possible. Elle intervient également dans la sélection des matériaux métalliques et matériaux cimentaires utilisés pour les colis de stockage, ainsi que dans la sélection des matériaux argileux, incluant les argilites de verse, utilisés pour combler les vides (galeries, extradors des chemisages des alvéoles HA et liaisons surface-fond). Ces matériaux doivent permettre de préserver ou de reconstituer au mieux les propriétés du COx sain.

La chimie intervient également dans les phénomènes de dégradation de tous les matériaux vis-à-vis de diverses sollicitations (air, CO<sub>2</sub>, eau, rayonnements ionisants, bactéries), dans le relâchement des espèces chimiques (radionucléides et toxiques chimiques) au niveau des colis, c'est à dire dans la phénoménologie évolutive du stockage après fermeture. Enfin elle joue un rôle dans la migration des espèces relâchées depuis les colis jusqu'à la biosphère en précisant de quelles espèces il s'agit.

Les lois fondamentales de la chimie permettent a priori de faire des prévisions cinétiques et thermodynamiques lorsqu'on sait caractériser chimiquement le système à un instant et à un endroit donné. Tous les phénomènes chimiques dans Cigéo, même extrêmement lents, conduisent toujours à un état d'équilibre décrit par la thermodynamique des réactions chimiques au regard des durées géologiques qu'il faut prendre en compte.

### IV.1 Rôle de la chimie dans l'isolement et confinement de la radioactivité

#### IV.1.1 Résultats des calculs de l'Andra

Le relâchement des radionucléides commence dès la perte d'étanchéité des conteneurs de déchets soit, selon les calculs de l'Andra, après quelques centaines d'années pour les déchets MAVL et quelques milliers d'années pour les déchets HA. La migration des radionucléides commence dans les 100 ans qui suivent, d'abord dans les alvéoles HA et MAVL en cours de resaturation, puis dans le COx.

L'eau joue un rôle essentiel dans ces phénomènes. Elle est présente initialement dans le COx sain. Une fraction de l'eau est liée aux minéraux argileux du COx, notamment dans les espaces interfoliaires, alors qu'une autre, dite eau interstitielle ou eau de pore, se déplace lentement sous l'effet du gradient hydraulique qui existe dans le COx. La resaturation des ouvrages de stockage après fermeture s'étend sur plusieurs milliers d'années sous la dépendance de plusieurs phénomènes transitoires, notamment le transitoire hydraulique gaz. L'eau du COx atteindra les colis de stockage après avoir traversé les barrières que constituent les composants des alvéoles. Ainsi, les colis se trouveront *in fine* au contact d'une eau quasi immobile qui

contiendra différents éléments chimiques avec lesquels elle aura été en contact. Les radionucléides mis en solution migreront au travers de ces barrières pour atteindre à terme le COx sain, qui est un milieu anoxique (potentiel d'oxydo-réduction inférieur à zéro) au pH neutre ( $\text{pH} \sim 7$ ).

Les radionucléides présents dans les déchets HA et MAVL sont nombreux. Ils sont formés dans le combustible des réacteurs nucléaires par fission ou par capture neutronique ou encore décroissances radioactives. On distingue donc les radionucléides « produits de fission » isotopes d'éléments chimiques classiques résultat de la réaction de fission nucléaire de l'uranium ou du plutonium, et les radionucléides transuraniens produits par capture neutronique, notamment le plutonium et les « actinides mineurs » dénommés ainsi car ils sont très minoritaires par rapport à l'uranium et au plutonium. Le retraitement du combustible utilisé pour en extraire le plutonium et l'uranium laisse comme déchets ultimes d'une part des solutions d'acide nitrique concentrées en produits de fission et en actinides mineurs qui sont conditionnées dans une matrice de verre borosilicaté et constituent les déchets HA, d'autre part des effluents et des matériaux solides contaminés qui constituent les déchets MAVL conditionnés dans différents types de colis. On retrouve donc produits de fission non volatils et actinides mineurs dans les colis primaires de déchets HA et MAVL, en quantité plus ou moins importante (typiquement 15 % dans les colis HA). On y retrouve aussi des radionucléides provenant de l'irradiation par les neutrons des matériaux de structures des assemblages de combustibles appelés produits d'activation.

Les propriétés chimiques générales de ces radionucléides sont connues des radiochimistes. Les propriétés particulières nécessaires pour les conditionner en colis primaires et pour étudier la robustesse de ces colis ont été étudiées pendant les 50 dernières années pour un stockage géologique en profondeur. Ainsi, les bases de données intègrent aujourd'hui toutes les propriétés des radionucléides impliqués dans la gestion des déchets HA et MAVL et les réactions chimiques et géochimiques pertinentes de Cigéo.

Parmi les radionucléides à vie longue contenus dans les déchets HA ou MAVL, les radionucléides présents sous forme cationique, comme les isotopes des actinides mineurs émetteurs alpha très radiotoxiques, sont retenus dans les composants du stockage, à cause en particulier d'interactions fortes avec l'argile du COx. Les radionucléides qui seront présents sous forme anionique comme les produits de fission émetteurs beta  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ , ou  $^{79}\text{Se}$  auront peu d'interaction avec les composants du stockage, et ne seront pas retenus. Néanmoins leur mobilité est très lente car elle est gouvernée par le seul mécanisme de la diffusion.

Selon les simulations de l'Andra, seuls  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$  puis  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{41}\text{Ca}$  peuvent, après quelques centaines de milliers d'années, parvenir dans les encaissants situés au toit et au mur de la couche du COx. Les quelques actinides qui migreraient au delà des limites des quartiers HA et MAVL, seraient retenus dans les premiers mètres du COx. Par ailleurs, la fraction de ces radionucléides qui migreraient par les liaisons surface-fond scellées (descenderies et puits) est négligeable par rapport au COx. Finalement seuls les radionucléides dits mobiles comme  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$  et  $^{36}\text{Cl}$  peuvent arriver aux limites du COx.

A la fermeture du stockage, le stock d'iode  $^{129}\text{I}$  sera de l'ordre de  $4 \cdot 10^{12}$  Bq, soit environ 5 000 moles (activité spécifique  $6,5 \cdot 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ), répartis par moitié entre les quartiers HA et MAVL. La radiotoxicité de  $^{129}\text{I}$  par ingestion est de  $10^{-7} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ , proche de celle des actinides. Ce radionucléide, sous la forme d'anion iodure  $\text{I}^-$ , est le marqueur enveloppe des performances des composants manufacturés et naturels du stockage en matière de confinement sur de

longues périodes. L'iode reste sous forme iodure dans toutes les situations d'évolution des composants du stockage. Le chlore a un comportement chimique proche de celui de l'iode et se trouvera sous la forme d'anion chlorure  $\text{Cl}^-$ . La spéciation et le comportement du sélénium sont plus complexes, car son degré d'oxydation peut changer sous l'effet de phénomènes d'oxydo-réduction. Les périodes de  $^{79}\text{Se}$  et de  $^{36}\text{Cl}$  sont du même ordre de grandeur ( $3,5 \cdot 10^5$  et  $3 \cdot 10^5$  ans) ainsi que leur radiotoxicité par ingestion (environ  $10^{-9} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ) et les quantités respectives sont de l'ordre de 6 800 et 14 000 moles. Toutes les données concernant les quantités de radionucléides sont des valeurs déclarées par les producteurs de déchets. Dans le scénario d'évolution normal, le maximum des débits molaires au toit du COx de  $^{129}\text{I}$  et  $^{36}\text{Cl}$  est de  $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{an}^{-1}$  à 800 000 ans pour  $^{129}\text{I}$ , et 350 000 ans pour  $^{36}\text{Cl}$ . Pour  $^{79}\text{Se}$ , les valeurs sont de  $10^{-4}$  à  $10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{an}^{-1}$  à 600 000 ans. La migration des radionucléides dans les encaissants du COx atténue fortement, par effet de dilution, les débits molaires aux exutoires. Les débits molaires à la sortie des liaisons surface-fond sont par ailleurs négligeables.

L'Andra a estimé les proportions de l'inventaire total en marqueur enveloppe  $^{129}\text{I}$  qui sort, en un million d'années, des quartiers HA et MAVL puis du COx à environ 20 % (répartis à parts égales aux limites supérieure et inférieure de la couche du COx). Dans le calcaire du Barrois, ce pourcentage est de 0,2 %. La majorité des radionucléides est donc piégée dans le stockage et le COx, ainsi que les toxiques chimiques et autres éléments constitutifs des colis. Seuls les éléments les plus mobiles sont attendus aux exutoires après des centaines de milliers d'années. Ces valeurs sont obtenues en faisant des hypothèses qui sont discutées ci-dessous.

Le comportement du stockage tient pour une grande partie à des processus chimiques complexes qui auront lieu après fermeture lors des phénomènes transitoires plus ou moins concomitants qui vont influencer la chimie du stockage.

La construction du stockage (creusement des accès, des galeries et des alvéoles) et l'exploitation du stockage (mise en place des colis, comblement des vides et fermeture) rompent localement les équilibres thermique, hydraulique et chimique qui existent au sein du COx. Le retour des paramètres température, pression de l'eau, saturation en eau du COx à leurs valeurs initiales (30°C, 4,5 MPa, 100 % des pores remplis d'eau) autour des alvéoles est plus ou moins long.

Ces phénomènes transitoires sont le transitoire d'oxydation chimique du COx (centaine d'années), le transitoire thermique (milliers d'années), le transitoire thermo-hydro-mécanique (quelques centaines à quelques milliers d'années) et transitoire thermo-hydraulique-gaz (quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années).

Le transitoire d'oxydation affecte le COx en paroi des cavités sur des distances de l'ordre du mètre, sans grandes conséquences ultérieures sur la migration des espèces chimiques. Le transitoire thermique affecte le quartier HA et le COx à proximité, le transitoire thermo-hydro-mécanique affecte surtout le quartier MAVL, ainsi que le COx sur quelques mètres. Le transitoire thermo-hydraulique-gaz, dû à la production d'hydrogène lors de la corrosion anoxique des aciers et à la radiolyse de l'eau, conduit à une lente augmentation de la pression de  $\text{H}_2$  dans les ouvrages du stockage, qui s'élimine lentement par dissolution et diffusion dans l'eau interstitielle du COx. Ces deux derniers transitoires impactent la migration des espèces chimiques.

#### IV.1.2 Fonctionnement phénoménologie de Cigéo en exploitation impliquant la chimie

L'exposition à l'air des alvéoles ventilées pendant le creusement et l'exploitation conduit à l'oxydation des pyrites du COx et à l'hydrolyse et la carbonatation des composants cimentaires, et à la formation de minéraux secondaires. De façon concomitante, cela conduit également à la désaturation (en eau) du COx. Ces transformations dépendent de l'humidité relative de l'air. La conséquence chimique de ces phénomènes sera une première modification de la composition de l'eau porale du COx sain lors de la resaturation.

#### IV.1.3 Fonctionnement phénoménologie de Cigéo après sa fermeture impliquant la chimie

Le relâchement des espèces chimiques des colis de déchets (radionucléides, éléments toxiques, éléments des conteneurs, éléments des matrices de confinement, etc.) et leur migration sont pilotés par des phénomènes qui n'apparaissent qu'au contact de l'eau lors de la resaturation des composants du stockage.

La progression de l'eau dans le stockage fermé conduit à de nombreuses interactions entre les matériaux des composants ouvragés (béton des galeries, matériaux métalliques, argilites ou matériaux cimentaires de remplissage, bentonite des bouchons d'alvéoles, etc.) d'une part, et ceux des colis (conteneurs métalliques ou cimentaires, matrices de confinement) d'autre part. Il en résulte de nombreuses perturbations chimiques qui modifient les matériaux en surface et sub-surface et conduisent à l'apparition de nouveaux composés produits au fur et à mesure de la dégradation des matériaux. De ce fait, le relâchement des éléments chimiques des colis de déchets est dû à l'action de solutions aqueuses dont la composition varie en fonction des conditions locales rencontrées. La migration des espèces chimiques à proximité immédiate des colis des espèces chimiques se fait donc dans des milieux hétérogènes complexes. Elle est principalement gouvernée par le phénomène de diffusion chimique. Il s'agit en outre d'une diffusion retardée, en raison des nombreuses interactions entre les espèces chimiques et les phases solides.

La migration des éléments relâchés dans le COx altéré puis sain jusqu'aux encaissants (formation de l'Oxfordien au toit et du Dogger au mur de la formation du COx) est uniquement pilotée par la diffusion dans l'eau porale du COx à l'échelle de centaines de milliers d'années. Elle est de surcroît retardée à fortement retardée pour certaines espèces par les interactions entre ces espèces et les minéraux argileux du COx. La migration des radionucléides et toxiques chimiques depuis les encaissants du COx jusqu'à la biosphère est pour sa part contrôlée par des mécanismes essentiellement convectifs.

Toutes les interactions possibles des colis de déchets et des matériaux des composants du stockage et avec leur(s) environnement(s), saturé(s) ou non en eau, et les migrations des espèces à l'intérieur et à l'extérieur des alvéoles ont été étudiées (en laboratoire et *in situ*, en laboratoire souterrain ou au moyen d'analogues naturels). Les interactions sont décrites par les lois des équilibres thermodynamiques et de la cinétique chimique (corrosion des aciers, altérations des nombreux colis de déchets HA et MAVL, etc.). Les migrations sont décrites par les lois de transfert pilotées par les divers gradients de potentiel possibles et modélisées à l'aide d'outils de simulations.



#### IV.1.4 Modèles et simulations

Toutes les études expérimentales et théoriques sur l'évolution physico-chimique de Cigéo ont conduit l'Andra à élaborer des modèles phénoménologiques d'évolution chimique des différents composants du stockage (colis, alvéoles, COx). L'évolution est caractérisée par un ou plusieurs indicateurs de performances, dont les valeurs sont calculées à partir de paramètres et de relations mathématiques représentatifs de la physico-chimie du milieu, qui concernent la thermodynamique et la cinétique des réactions chimiques et le transport des espèces. Les indicateurs de performances sont par exemple les débits d'eau, les débits molaires ou massiques des radionucléides, les cartographies des panaches, les voies de transferts privilégiées.

La plupart des modèles pour décrire des phénomènes physico-chimiques locaux à l'échelle des alvéoles sont très complexes et les valeurs des paramètres peuvent varier de sorte qu'il faut calculer de façon incrémentale, c'est à dire pas-à-pas, les valeurs des indicateurs. Selon l'importance des paramètres et la complexité des relations mathématiques choisies pour décrire la physico-chimie du milieu, les modèles doivent être simplifiés pour permettre des simulations numériques en un temps raisonnable. La description de certains systèmes où se déroulent des processus couplés thermo-hydro-mécano-chimiques nécessite d'emboîter plusieurs sous-modèles.

La modélisation des performances au cours de la resaturation en eau du stockage prend en compte des phénomènes qui se déroulent en sens opposé : la progression de l'eau qui va du COx vers les colis lors de la resaturation, et la migration des espèces relâchées qui va des colis vers le COx sous l'effet de la diffusion.

L'Andra a conduit de multiples simulations traitant de systèmes physico-chimiques à différentes échelles d'espace et de temps. Elle a modélisé et simulé les performances des systèmes à l'échelle du colis de stockage et de l'alvéole (termes sources et migrations locales des espèces sur une longueur décimétrique) et les performances des systèmes de plus grande taille comme les quartiers HA et MAVL (termes sources et migrations des espèces à l'échelle décamétrique), la couche du COx, les scellements et liaisons surface-fond, et les encaissements (migrations à l'échelle kilométrique). L'Andra a aussi conduit de nombreuses analyses de sensibilité consistant à faire varier les valeurs des paramètres d'entrée dans des plages plus ou moins étendues.

Les outils de simulation numérique de l'Andra reposent sur des codes qualifiés et validés sur des systèmes chimiques connus. La plateforme Cassandra (Codes appliqués à la simulation des stockages) intègre la suite des calculs à faire pour un objectif choisi, en permettant l'échange des données entre codes de simulation à différentes échelles et niveaux de simplification. Les codes traitent des écoulements en milieu poreux monophasique (Porflow) et diphasique (Tough), de la chimie en milieu poreux (PhreeqC), du transport de solutés (Porflow) et de mécanique et thermo-hydro-mécanique (Bright). L'exploitation de tous ces outils est réalisée en interne par l'Andra.

Les modélisations/simulations de l'Andra couvrent toutes les situations considérées dans les scénarios associés aux évaluations de sûreté, scénarios d'évolution normale (SEN-Ref et SEN-Env) et autres scénarios dégradés. Dans ces exercices l'évolution de la température en tout point du stockage en fonction du temps est capitale. L'Andra l'a calculée avec précision sur la base des équations de propagation de la chaleur (loi de Fourier).

#### IV.1.5 De la science aux calculs de performances pour les scénarios de sûreté

Les performances des composants de Cigéo en matière de confinement des éléments contenus dans les déchets HA et MAVL calculées par l'Andra sont telles que seule une faible fraction des radionucléides contenus dans les déchets arrivera dans les encaissements entre 600 000 ans et un million d'années (inférieure au % avec, pour le marqueur enveloppe  $^{129}\text{I}$ , un débit de l'ordre de quelques millimoles par an), et à la biosphère bien après.

La complexité des phénomènes qui conduisent à une telle performance globale nécessite une analyse scientifique approfondie de chacun d'eux, notamment de ceux qui se déroulent dans les quartiers HA et MAVL. Ils sont examinés dans ce qui suit.

### IV.2 Termes sources dans le quartier HA

#### IV.2.1 Perturbations chimiques dans le quartier HA

En arrivant sur le quartier HA, l'eau provenant du COx arrive en premier au contact avec le matériau de remplissage à l'extrados du chemisage de l'alvéole (matériau cimentaire bas pH). Le pH de cette eau est inférieur à celui du COx sain ( $\text{pH} \sim 7$ ) sous l'effet de l'oxydation des pyrites du COx en champ proche lors de la phase d'exploitation, qui se traduit par une acidification des eaux interstitielles. Après mise à l'équilibre avec le matériau cimentaire, le pH augmente au-delà de pH 7 et peut atteindre localement pH 11. Du point de vue chimique, le béton bas pH a pour but de tamponner le pH et de maintenir ainsi les matériaux métalliques dans des domaines de passivation. L'eau arrive ensuite sur le chemisage, puis sur le conteneur de stockage, puis sur le conteneur des colis de verres nucléaires, au fur et à mesure de leurs dégradations respectives par corrosion anoxique. La corrosion métallique produit de l'hydrogène.

Les calculs de l'Andra indiquent que la température dans les alvéoles HA est de 30°C vers 10 000 ans. Ils indiquent aussi que la pression d'hydrogène augmente dans les alvéoles jusqu'à 6,5 MPa vers 60 000 ans, puis diminue par diffusion de l'hydrogène dans le COx.

L'Andra fixe par convention la perte d'étanchéité du conteneur de stockage à 4 000 ans environ après la fermeture du stockage (correspondant à une température de 40°C et des pressions d'eau et de gaz de quelques MPa) et celle du conteneur des colis primaires à quelques centaines d'années après. Il s'agit dans les deux cas de valeurs conservatives bien inférieures à ce qu'il devrait advenir réellement dans le stockage.

A ce moment-là, la vapeur d'eau entre en contact avec le verre. Une couche d'altération se forme à la surface du verre dans laquelle les radionucléides restent piégés. L'eau liquide arrive en contact avec le verre après quelques centaines de milliers d'années. La dégradation des verres reprend alors et les radionucléides commencent à migrer.

Les interactions entre l'eau le matériau cimentaire bas pH conduisent à la formation de composés silico-alumineux. La corrosion anoxique des matériaux métalliques (aciers non alliés et inox) produit des oxydes, des carbonates de fer et de l'hydrogène. Il en résulte que la composition de l'eau de resaturation est très différente de l'eau interstitielle du COx. Elle renferme notamment sous forme dissoute du fer, du sodium, du magnésium, du calcium et du potassium, sa composition variant au contact des phases minérales néoformées rencontrées.

Lorsqu'elle arrive sur la matrice de verre son pH est voisin de 7 et sa force ionique est de  $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ .

## IV.2.2 Interactions eau-colis de verres nucléaires

### IV.2.2.1 Généralités

Les colis de verres nucléaires HA ont été très largement étudiés depuis les années 80 et l'Andra a dressé un bon état des connaissances sur ces colis et leur altération, depuis leur composition, les procédés de coulée et de refroidissement dont dépend la fracturation, jusqu'à leur lixiviation-dissolution qui relâche les radionucléides et toxiques chimiques. Les effets intrinsèques des contraintes mécaniques, de l'auto-irradiation ont été étudiés, ainsi que les diverses interactions entre matrice vitreuse, argilite et matériaux métalliques, dont résultent essentiellement des produits de corrosion du fer, des silicates et de la silice dissoute dans le milieu aqueux. La base de données est exhaustive. Ce qui suit est une synthèse.

Les colis primaires de déchets HA sont des objets manufacturés de haute technologie. Le conteneur est un cylindre en acier inoxydable de 0,5 cm d'épaisseur. La matrice de confinement est un verre borosilicaté dit *verre nucléaire*. Sa composition a été étudiée pour qu'il incorpore les produits de fission et les actinides mineurs dans les réseaux formateurs du réseau vitreux constitués par des chaînes d'oxyde de silicium et de bore. Les verres ont une structure amorphe qui leur confère la propriété de dissoudre les éléments étrangers à leur composition initiale sans perdre leurs propriétés intrinsèques. Les solutions de produits de fission et d'actinides mineurs issues du retraitement, qui contiennent également des réactifs chimiques et des fines de cisailage des assemblages de combustible usé sont évaporées, calcinées et les résidus solides sont digérés dans le verre en fusion. Il en résulte un matériau massif et homogène sans joints de grain qui est coulé dans le conteneur et restera amorphe dans les conditions d'entreposage et de stockage. *In fine*, un couvercle est soudé sur le conteneur, et le colis primaire est mis en entreposage pour de longues années pour permettre son refroidissement. Sa puissance thermique initiale est de quelques kilowatts, et elle décroît après quelques siècles au fur et à mesure de la décroissance radioactive des produits de fission.

Le conteneur de stockage des colis primaires sera un cylindre d'acier non-allié de 5 cm d'épaisseur étanché par un couvercle soudé, et muni de patins en céramique pour faciliter son introduction dans les chemisages en acier des alvéoles HA.

Tous les paramètres des opérations de fabrication des colis primaires de déchets HA sont spécifiés et contrôlés. Des échantillons de verre prélevés sur deux coulées de verre à la Hague ont montré la parfaite adéquation entre prévision de composition et composition réelle.

Les colis de verres renferment plus de 95 % de la radioactivité du stockage. La majorité des colis (92%) renferment des verres dits R7T7 produits à la Hague lors du retraitement du combustible usé d'EDF selon un procédé qualifié. Les colis seront stockés dans le quartier HA après refroidissement. D'autres verres plus anciens dits AVM, produits à Marcoule, seront également stockés dans le quartier HA. Des colis moins radioactifs (UMo) seront stockés dans le quartier pilote proche du quartier MAVL.

Pour examiner la robustesse du confinement des radionucléides par le stockage, il est donc capital de s'intéresser à l'altération des verres R7T7, au relâchement des éléments qu'ils

contiennent et à leur migration. L'altération macroscopique des verres est très bien décrite et documentée. La plupart des mécanismes sont confirmés sur la base d'observations microscopiques. Les lois générales de comportement du verre sous diverses sollicitations sont bien établies. Des modèles phénoménologiques existent.

La majorité des expériences de lixiviation-dissolution ont été faites avec le verre nucléaire SON68 de même composition que le R7T7 (sans platinoïdes) mais inactif. Les deux sont des verres borosilicatés (45 % de  $\text{SiO}_2$ , 35 % de  $\text{B}_2\text{O}_3$ , autres oxydes de Na, Al et d'éléments de produits de fission). Les résultats ont été comparés à ceux obtenus sur des échantillons de verre SON68 dopés avec des émetteurs alpha et gamma et sur des échantillons de verre réel prélevés sur deux coulées à la Hague. Le verre R7T7 contient 13 % de produits de fission et d'actinides.

Les méthodes d'imagerie et spectroscopie de la couche altérée permettent de connaître la nature de l'altération.

L'altération du verre est quantifiée par l'épaisseur de verre altéré mesurée à partir de la surface initiale et les relâchements en solution, et par sa vitesse d'altération. Elle est caractérisée par l'examen microscopique de la surface et de la subsurface (sur environ 15  $\mu\text{m}$ ). La vitesse d'altération est exprimée relativement à l'épaisseur ( $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ ) ou la perte de masse par unité de surface ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$ ). Pour le verre R7T7 de masse volumique égale à  $2,7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , la vitesse d'altération est de  $1,35\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ , équivalente à  $10^{-2}\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$ .

L'altération des verres nucléaires par la vapeur d'eau et par l'eau liquide pure dans un domaine de température étendu (et même de pression, mais elle est sans effet) est très bien connue.

#### *Altération par la vapeur d'eau*

L'eau s'adsorbe sur la surface du verre dès que l'humidité relative est de 50 %, puis forme une pellicule d'eau dans laquelle précipitent des hydroxydes de silicium et d'aluminium amorphes et des hydroxo-silicates complexes (mais identifiés), ce d'autant plus que l'humidité relative et la température sont élevées et que l'exposition à la vapeur est longue. Cette couche hydratée n'est pas saturée en eau, de sorte que les éléments relâchés par le verre y restent piégés. Elle joue un rôle de barrière protectrice. En revanche, ils sont libérés si le verre est mis en présence d'eau liquide. Ces phénomènes sont sensibles à l'irradiation (radiolyse dans la couche hydratée). Les expériences sur ce sujet restent toutefois peu nombreuses. La vitesse d'altération du verre est toujours faible, elle est fonction de la température, et se stabilise vers une valeur limite.

#### *Altération par l'eau liquide pure*

En présence d'eau liquide, il se forme à la surface du verre sain une couche d'hydratation via un échange d'ions par inter-diffusion de protons avec les modificateurs du réseau vitreux, notamment le sodium. Cette première étape d'altération est bien documentée. La couche est saturée en eau et donc propice à la diffusion.

On distingue l'altération dynamique (eau renouvelée) et statique (eau non renouvelée) des verres.

La vitesse initiale ( $V_0$ ) de lixiviation du verre par de l'eau liquide pure renouvelée continuellement est bien connue. Dans ces conditions, la surface hydratée du verre n'évolue pas, l'eau diffuse jusqu'au verre et hydrolyse les liaisons chimiques des formateurs de réseau

vitreux (Si, B, Al, etc.), libérant les éléments constitutifs de la matrice et ceux emprisonnés. La vitesse  $V_0$  est facile à mesurer. Les valeurs expérimentales pour le verre SON68 sont très nombreuses entre 50 et 100°C (et jusqu'à 250°C), à divers pH. A partir des mesures, on peut établir l'expression de la vitesse de lixiviation en fonction du pH et de la température.

La lixiviation du verre par l'eau liquide pure non renouvelée, c'est-à-dire en régime statique, est un phénomène plus complexe. La libération du silicium, qui n'est plus éliminé par le renouvellement de l'eau fait que la couche d'hydratation évolue vers un gel de silice amorphe (polymère d'acide orthosilicique) avec des agrégats microcristallins de silicates bien identifiés. En effet, le pH augmentant localement près du front d'altération du verre, il favorise le développement des réactions chimiques de polymérisation dans le gel. Le silicium est d'une part mobilisé pour former ce gel, d'autre part il diffuse dans le gel avant d'atteindre l'eau. En même temps, l'eau pénètre par capillarité au sein du gel pour atteindre le verre sain. Ces mouvements concomitants mais opposés contrôlent l'évolution de l'altération de la matrice vitreuse. Les autres éléments de la matrice doivent aussi diffuser dans le gel avant de passer en solution. Ils peuvent en partie être incorporés dans le gel (actinides par exemple). Cette étape d'hydrolyse/formation du gel est bien décrite et documentée.

Avec le temps la vitesse initiale d'altération  $V_0$  diminue jusqu'à une valeur dite résiduelle constante, appelée  $V_R$ . De nombreuses expériences ont été conduites et plus de 10 modèles ont été proposés pour expliquer la chute de la vitesse d'altération sans qu'émerge un modèle général. Les diverses expressions de  $V_R$  font intervenir les mêmes paramètres température et pH.

Les expressions des vitesses d'altération du verre nucléaire permettent de simuler la disparition d'un bloc de verre en fonction du temps dans des conditions données et de faire des prévisions. Par exemple, pour des conditions correspondant à une situation de stockage, un bloc de verre de 400 kg disparaîtrait en 300 000 ans. Ces modèles ont été confrontés à des analogues archéologiques ou géologiques qui ont confirmé la bonne représentativité des vitesses d'altération simulées.

#### IV.2.2.2 Altération en situation de stockage

En conditions de stockage, le verre n'est pas lixivié par de l'eau pure mais par des eaux de composition chimique, de pH et de force ionique variables. Elles rentrent en contact avec le verre altéré par la vapeur d'eau avec sa couche d'hydratation. La radiolyse de l'eau à proximité de la surface du verre R7T7 modifie la composition de la couche d'altération en régime d'altération dynamique et des gels en régime d'altération statique.

L'altération du verre SON68 dans différentes conditions (au contact des eaux du COx ou d'eaux cimentaires, en présence de produits de corrosion du fer) a fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de contraindre les modèles de vitesse d'altération des verres.

La composition de l'eau porale du COx est parfaitement connue et peut être facilement reconstituée. A 25°C, elle est neutre (pH ~ 7), réductrice ( $E_h = -180$  mV), et sa force ionique est de 0,1 mol·l<sup>-1</sup>. Elle contient comme ions majoritaires Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. La lixiviation de SON68 par cette eau conduit à des valeurs de  $V_0$  environ 5 à 6 fois plus élevées qu'en eau pure. Les valeurs de  $V_R$  sont plus ou moins modifiées dans le même sens. Le rôle du calcium et du magnésium a été mis en évidence.

En percolant à travers les matériaux cimentaires, l'eau altère la composition du ciment et elle se charge en silicates de calcium hydratés et en hydroxyde de magnésium, tandis que le pH devient basique ( $\text{pH} > 7$ ) pour se stabiliser vers  $\text{pH } 10,5$ . Les produits de corrosion des matériaux métalliques par l'eau sont essentiellement la magnétite. Avec l'eau cimentaire, il se forme également autour du verre SON68 des silicates de fer et de magnésium. L'eau en présence de ces composés donne des valeurs de  $V_R$  6 à 12 fois plus élevées qu'en eau pure.

Au final, il est difficile de généraliser les conclusions sur les effets de l'environnement immédiat du verre à partir des expériences de laboratoire couplant toutes les interactions possibles entre le verre, les argiles du COx, les aciers et les matériaux cimentaires en présence d'eau. Dans tous les cas, les actinides sont particulièrement bien retenus dans la couche d'altération, par sorption ou coprécipitation, même en conditions oxydantes.

Pour modéliser les mécanismes pilotant les valeurs de vitesses d'altération du verre  $V_0$  et  $V_R$ , en eau pure ou non, l'Andra a retenu des expressions de  $V_0$  et  $V_R$  introduisant des paramètres correctifs pour prendre en compte les effets spécifiques des conditions de stockage sur l'altération du verre R7T7.

#### IV.2.2.3 Termes sources

La quantité de verre qui passe en solution par jour est proportionnelle à la vitesse d'altération et à la surface d'altération du verre en cours de lixiviation. La surface d'altération comprend la surface externe du colis accessible à l'eau et la surface des fractures et des micro-fissures créées au sein du verre lors de son refroidissement après la coulée. Elle n'est accessible que lorsque le régime d'altération du verre est du type  $V_R$ . Au vu des connaissances scientifiques actuelles, l'eau qui n'est pas renouvelée à la surface du verre a le temps de pénétrer plus ou moins dans une fissure selon sa géométrie (orientation, ouverture et profondeur).

La mesure de la surface de verre accessible à la lixiviation d'un bloc de verre R7T7 inactif de 400 kg lors de son refroidissement et la mesure des quantités de verre passant en solution lors de deux expériences de lixiviation en vraie grandeur sur ces blocs de verre (à 90 et 106°C) en régime de lixiviation  $V_0$  et  $V_R$ , ont permis d'élaborer le modèle de calcul du terme source de chaque colis à toutes les phases de l'évolution du quartier HA.

#### IV.2.2.4 Autres verres

Les verres nucléaires autres que R7T7 sont principalement les verres AVM, Umo et Piver. Les plus nombreux sont les verres AVM (3 000 colis). Ce sont des verres borosilicatés. Leur processus d'altération et la composition des couches d'altération sont donc similaires à celle des verres R7T7, et les expressions de  $V_0$  et  $V_R$  de ces derniers en rendent compte avec des paramètres spécifiques à chacun d'eux, en eau pure ou en conditions de stockage.

De nombreuses études sur des verres naturels volcaniques non borosilicatés et des verres de synthèse archéologiques valident les observations faites en laboratoire sur les verres nucléaires. Les plus proches sont des verres volcaniques basaltiques, qui sont bien datés, riches en silice (50 %) et dans lesquels l'aluminium remplace le bore. Leur altération sur des temps géologiques, par l'eau de mer ou des eaux hydrothermales, ressemble à celle des verres nucléaires. Dans la couche d'altération, on retrouve des phases minéralogiques identifiées dans les gels. La vitesse d'altération diminue aussi avec le temps, puis tend vers une limite, mais la gamme des valeurs  $V_R$  est étendue selon l'âge des verres. Leur vitesse d'altération est de 10  $\mu\text{m}$

sur quelques millions d'années. Le rôle protecteur des verres sur le relargage des éléments chimiques est donc manifeste. Les observations sur les verres archéologiques vont dans le même sens que celles sur les verres volcaniques, sur des échelles de temps plus courtes néanmoins (2 000 ans).

#### IV.2.3 Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté

L'Andra a établi des modèles de dégradation par l'eau des verres nucléaires et du relâchement de la radioactivité, qui sont bien paramétrés. Les valeurs des paramètres sont connues avec une bonne précision dans de larges plages de variation pour couvrir toutes les configurations de l'évolution du quartier de stockage HA. La simulation des termes sources peut être conduite à l'échelle du colis, d'un alvéole et du quartier HA.

Les incertitudes sont également prises en compte dans les modèles. Des incertitudes résiduelles existent sur la durée de la phase de resaturation, le pH de l'eau à l'arrivée sur le chemisage et sur les colis, la nature exacte de la couche de gel d'altération protecteur du verre et le temps de basculement des régimes  $V_0$  à  $V_R$ , qui jouent sur les valeurs des termes sources en fonction du temps. Elles sont prises en compte au travers d'études de sensibilité.

Pour la simulation des scénarios de sûreté, l'Andra a choisi des hypothèses et des valeurs majorantes des paramètres des modèles concernant la chimie en accord avec le guide de sûreté de l'ASNR. En particulier, elle néglige la longue phase d'altération des verres par la vapeur d'eau et suppose que le stockage est resaturé en eau dès sa fermeture. Cela conduit à simuler une arrivée anticipée des radionucléides et toxiques chimiques relâchés.

La modélisation de l'altération des colis HA entre dans la problématique du temps long au regard des possibilités d'expérimentation limitées dans le temps. Elle doit prendre en compte l'implication de nombreux phénomènes cinétiques. Il est possible au laboratoire d'accélérer la vitesse des processus en augmentant les flux des eaux d'altération, leur agressivité chimique, la température et la cadence de divers couplages des colis avec leur environnement. Les résultats obtenus en régime accéléré doivent alors être transposés en régime d'évolution naturel des processus.

Etant donnée la complexité de l'altération des colis HA, l'Andra a développé et utilise des modèles simplifiés mais robustes et conservatifs, qui prennent en compte les mécanismes prépondérants et conduisent à des résultats enveloppes du comportement des colis HA. L'effet de l'auto-irradiation sur la lixiviation peut être pris comme exemple. Les vitesses  $V_0$  mesurées sur les prises d'essais à la Hague sont plus élevées d'un facteur 10 que sur un verre inactif, mais elles concernent un verre très actif par rapport aux verres qui seront stockés (dont la radioactivité aura décru au moment du stockage). Pour couvrir les incertitudes, l'Andra considère ainsi un scénario de relâchement avec auto-irradiation qui réduit le temps de relâchement d'un facteur 10.

Les modèles d'altération construits par l'Andra sont des modèles paramétriques qui prennent en compte les phénomènes prépondérants :

- la formation à la surface du verre d'une couche formée par réaction entre l'eau, les éléments constitutifs du verre et les éléments exogènes de l'environnement immédiat,



responsable de la chute de la vitesse d'altération et de la libération des éléments du verre ;

- la température ;
- le pH des solutions d'altération.

La couche d'altération est essentiellement un gel de silice qui peut aussi contenir des minéraux silicatés. Les valeurs de température sont calculées dans l'espace et dans le temps. Les valeurs des paramètres retenues par l'Andra sont réalistes et justifiées par la réalité des phénomènes qu'elles représentent. Les modèles  $V_0$  et  $V_R$  sont construits à partir de la situation simple de lixiviation du verre par de l'eau pure. La complexité des phénomènes en situation de stockage est ensuite prise en compte par des paramètres correctifs. C'est une démarche prudente et conservatrice.

Avec les expressions de  $V_0$  et  $V_R$  retenues et les paramètres choisis par l'Andra, les vitesses de lixiviation du verre dans une eau à pH 7 et à une température de 30 /40°C seraient typiquement de  $1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  en régime de vitesse  $V_0$  et de  $0,003 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$  en régime de vitesse  $V_R$ . De même, les termes sources calculés pour un bloc de verre de 400 kg sont de  $35 \text{ g}\cdot\text{an}^{-1}$  en régime de vitesse  $V_0$  et de  $4,4 \cdot 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{an}^{-1}$  en régime  $V_R$ .

## IV.3 Migration des éléments dans le quartier HA

### IV.3.1 Généralités

Les éléments libérés par l'altération du verre commencent à migrer vers le COx endommagé au travers de différents milieux poreux saturés en eau, dont le chimisme détermine la nature et la concentration des espèces diffusantes (anions, cations, espèces neutres), puis au travers le couche du COx jusqu'à ses encaissements situés au mur et au toit de la formation. Le transport des espèces chimiques se fait essentiellement par diffusion, les autres phénomènes (convection, thermo-diffusion, thermo-osmose, osmose chimique) restant minoritaires. La taille des pores à travers lesquels diffusent les espèces est trop faible pour autoriser le transport particulaire (colloïdes, etc.).

Le transfert des espèces dans un milieu poreux peut être abordé de plusieurs manières. L'approche suivante pour décrire la diffusion est la plus courante. Un milieu poreux est caractérisé par sa porosité totale  $\phi_T$  (volume de vide /volume total) dont seule une fraction est accessible à une espèce donnée ( $\phi_{acc}$ ). Pour en tenir compte, on définit un coefficient de diffusion effectif pour chaque espèce,  $D_e$  ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ), qui est une fonction de la porosité accessible.

Pour la diffusion, l'Andra a adopté un modèle généralisé basé sur la notion de coefficient de diffusion effectif ( $D_e$ ) d'une espèce et sur la porosité accessible. Dans ce modèle, le coefficient de diffusion effectif est défini par rapport au coefficient de diffusion de l'espèce dans l'eau pure ( $D_0$ ) par la relation  $D_e = D_0 \times F$ , avec  $F$  le coefficient de mobilité relative, inférieur à 1, qui traduit le ralentissement des espèces dû à la géométrie et à la tortuosité de l'espace poral et aux interactions avec les surfaces minérales. Cette approche est validée par une explication de nature microscopique. Le coefficient de mobilité relative est considéré comme identique pour tous les anions (pris égal à celui des chlorures), identique pour tous les cations (pris égal à celui du césium), et identique pour les espèces neutres (pris égal à celui de l'eau tritiée). Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de mobilité relative pour les cations est supérieur



à celui des anions du fait d'une porosité accessible plus faible pour les anions (en lien avec le phénomène d'exclusion anionique).

De plus, une espèce peut être pour tout ou en partie retenue par sorption sur la phase solide. Le coefficient de distribution  $K_d$  ( $\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), qui est le rapport de la concentration de l'espèce retenue sur la phase solide sur la concentration de l'espèce en solution, permet de prendre en compte ces phénomènes de sorption. Ces grandeurs peuvent être déterminées par des expériences de diffusion de traceurs.

Les études pour mesurer les coefficients de diffusion et autres paramètres dans les conditions physico-chimiques du stockage sont nombreuses et approfondies. Elles ont porté sur la spéciation des espèces en fonction du pH, du potentiel redox (Eh) et de la composition des solutions. Pour cela, l'Andra a développé en partenariat avec d'autres établissements de recherche une base de données thermochimiques spécifique, appelée Thermo-Chimie, qui est accessible libre (<https://www.thermochimie-tdb.com/>). Les valeurs des paramètres de migration ( $D_e$ ,  $\phi_{acc}$  et  $K_d$ ) ont également été mesurées pour la diffusion de l'eau tritiée et de différents éléments (environ 50) dans des argiles modèles compactées (bentonite, illite, montmorillonite, etc.), dans les matériaux cimentaires, dans des échantillons du COx sain et altéré, et dans le champ proche des quartiers HA (d'autres mesures concernant le quartier MAVL, les scellements, les formations encaissantes du COx). Il en résulte une quantité de données considérable qui permet de définir des paramètres enveloppe selon les différentes conditions chimiques.

Toutes ces données permettent de décrire des tendances générales sur la migration des éléments chimiques. L'Andra a ensuite choisi des valeurs de référence conservatives pour mener les calculs de performance.

#### IV.3.2 Diffusion des espèces chimiques dans les alvéoles HA

Les éléments diffusent depuis les colis de déchet jusqu'au COx altéré dans une zone d'extension métrique constituée de produits de corrosion du fer en milieu anoxique et d'argilites ayant interagi avec les matériaux cimentaires situées à proximité. La composition élémentaire de l'eau interstitielle dans cette zone a été établie expérimentalement.

Elle est réductrice (Eh  $\sim$  -400 mV vers pH 6-7) en raison des couples redox Fe / phases porteuses de fer (carbonate, silicates, oxydes) et renferme des anions (sulfates et anions provenant des phases solides mise à l'équilibre). Compte tenu de la complexité des interactions entre solides et solutions dans cette zone, aucune mesure directe de diffusion n'a été conduite. La nature des espèces susceptibles d'être retenues ou de diffuser est établie sur la base de données Thermo-Chimie. Ainsi, les actinides (sauf U) ont des  $K_d$  très élevés et sont essentiellement retenus dans le quartier HA.

En conclusion, la phénoménologie de la diffusion des éléments depuis le quartier HA jusqu'au COx sain est compliquée par le fait que le milieu entourant les colis dégradés sera très hétérogène et complexe, et reste difficilement accessible expérimentalement. Dans un tel milieu, le comportement des éléments chimiques a été modélisé par une approche thermodynamique, en faisant des hypothèses très conservatives pour décrire la diffusion des radionucléides dans les alvéoles HA.

### IV.3.3 Diffusion des espèces chimiques dans le COx sain

Les coefficients de diffusion dans le COx sain ont été mesurés en laboratoire et *in situ* au laboratoire souterrain (expérience DIR menée sur 4 ans). Des tentatives ont été effectuées pour exploiter les traceurs naturels dans le COx ( $\text{Cl}^-$ , isotopes de l'oxygène) avec des résultats peu convaincants. Le coefficient de diffusion effectif pour les molécules d'eau tritiée (HTO) et les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) est évalué expérimentalement respectivement à  $2,2 \pm 0,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $4,9 \pm 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### IV.3.4 Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté

Pour caractériser la diffusion des espèces dans le quartier HA, l'Andra considère pour chaque alvéole deux domaines : la partie utile de l'alvéole où sont déposés les déchets et le bouchon de scellement connecté à la galerie remblayée. Dans le scénario SEN, la partie utile est remplie à 35 % de colis. Les coefficients de diffusion dans les produits de corrosion/argilites sont pris égaux à celui de l'eau tritiée pour toutes les espèces chimiques, en supposant également que toutes les espèces ont accès à l'intégralité de la porosité. Tous les  $K_d$  sont considérés comme nuls, ce qui est aussi une hypothèse très conservatrice puisqu'il n'est pas considéré de rétention des espèces sur les phases solides. Enfin, la solubilité est prise infinie, ce qui est également conservatif. En prenant un coefficient de diffusion effectif de l'eau tritiée de  $2,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et une porosité de 17 %, la vitesse de déplacement des espèces chimiques relâchées depuis la surface du verre qui s'altère vers la partie utile de l'alvéole et le COx altéré est de  $22 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{an}^{-1}$ .

### IV.3.5 Conclusion

Les valeurs des paramètres retenues pour estimer le transfert diffusif des éléments dans le quartier HA sont appropriées pour une analyse de sûreté. Il ne s'agit pas d'une prévision réaliste de leur vitesse de migration dans cette partie du stockage mais d'une estimation majorante de cette vitesse de migration. Les estimations surévaluées auxquelles conduisent les valeurs retenues montrent que les éléments les plus mobiles libérés par l'altération du verre atteindraient le COx sain en quelques milliers d'années. Les actinides seraient quasiment totalement retenus dans le quartier HA.

## IV.4 Termes sources du quartier MAVL

### IV.4.1 Généralités sur les colis de déchets MAVL

Les familles de déchets MAVL sont très nombreuses. L'Andra les classe en catégories selon leur nature chimique. Par exemple : colis contenant seulement des sels, colis d'enrobés bitumineux contenant des sels, colis contenant des matières organiques, colis de matériaux métalliques. Il existe aussi 5 familles de colis de déchets MAVL vitrifiés. Tous les colis de déchets MAVL sont athermiques ou peu exothermiques et, à l'exception des déchets métalliques, sont le siège de phénomènes de radiolyse. Les colis de stockage sont regroupés dans les alvéoles MAVL selon

leur compatibilité chimique. Les déchets MAVL contiennent des actinides, des produits de fission et d'activation.

Les colis primaires de déchets métalliques d'Orano (anciennement Cogema puis Areva) sont constitués de coques (zircaloy) et embouts (inox) compactés (environ 50 000 colis). Ils sont chimiquement homogènes. Ceux provenant du CEA et de EDF sont hétérogènes en ce sens qu'ils peuvent renfermer plusieurs composants métalliques, ou non, qui sont bloqués dans du ciment (9 000 colis CEA et 5 000 colis EDF). Orano stockera également environ 14 000 colis de boues salines sèches et 13 500 colis de boues salines enrobées dans du bitume. Ces données sont à comparer avec les 55 000 colis HA qui sont chimiquement homogènes et identiques.

#### IV.4.2 Perturbations chimiques dans le quartier MAVL

Les études sur la dégradation des colis de déchets MAVL, sur les termes sources et sur la migration des éléments dans le quartier MAVL sont nombreuses. La phénoménologie de dégradation des colis par famille et la nature des termes sources a été analysée par l'Andra de manière très complète.

##### IV.4.2.1 Perturbations chimiques en période d'exploitation

Le creusement des alvéoles de grandes dimensions et l'exposition à l'air des alvéoles ventilées pendant la période d'exploitation d'une durée séculaire conduit à plusieurs perturbations chimiques : oxydation des pyrites du COx, hydrolyse et carbonatation des composants cimentaires, formation de minéraux secondaires et de façon concomitante désaturation en eau des matériaux cimentaires et du COx en champ proche. Ils dépendent de l'humidité relative de l'air. Ces perturbations ont été bien analysées. Leur extension lors de la période d'exploitation est limitée, d'ordre métrique. La radiolyse de la matière organique et de l'eau résiduelle des déchets donne des produits gazeux (hydrogène, molécules organiques volatiles, etc.) évacués par la ventilation. La conséquence chimique de ces phénomènes sera la modification de la composition de l'eau porale du COx sain lors la phase de resaturation en eau du stockage (mais qui sera aussi marquée par d'autres perturbations) et la modification de la porosité des matériaux cimentaires. Ces phénomènes sont sans conséquence sur le quartier MAVL en exploitation.

##### IV.4.2.2 Phénoménologie sommaire après fermeture des alvéoles

La resaturation complète du stockage en eau est estimée à plus de 100 000 ans. Elle est précédée par les grands transitoires thermiques et hydraulique-gaz évoqués à propos du quartier HA. Dans le quartier MAVL, la température revient à sa valeur initiale après 1 000 ans. La pression interstitielle de l'eau revient à sa valeur originelle (4,5 MPa) après 10 000 ans. La pression d'hydrogène liée à la corrosion anoxique des aciers atteint une valeur maximale d'environ 7,5 MPa vers 30 000 ans.

Les parois des alvéoles MAVL et les voussoirs sont en béton. Les bouchons de fermeture d'alvéole sont en matériaux argileux. Lors de la resaturation en eau du stockage, l'eau porale du COx oxydé rencontre ces matériaux en premier, en modifie la composition et change elle-même de composition. Au contact de cette eau, la dégradation des colis béton de stockage des déchets MAVL conduit à charger l'eau d'éléments chimiques constitutifs des bétons puis

d'éléments constitutifs des matrices d'enrobage ou de blocage des déchets des colis primaires, ou encore d'éléments provenant de la corrosion des matériaux métalliques activés ou contaminés. Il en résulte, au total et au cours du temps, des perturbations alcaline, saline et organique, ainsi que l'apparition de produits de corrosions des métaux. Ces perturbations pilotent la migration des radionucléides et toxiques chimiques. Par ailleurs, la radiolyse est importante et crée des espèces chimiques exogènes.

Ainsi, d'un point de vue chimique, les phénomènes qui se développent dans le quartier MAVL avec l'arrivée de l'eau sont plus complexes que dans le quartier HA, et les termes sources et la migration des éléments sont plus difficiles à décrire et à quantifier.

#### IV.4.2.3 Dégradation des matériaux cimentaires

La dégradation des matériaux cimentaires des alvéoles MAVL (revêtements de paroi, voussoirs, colis de stockage) commence progressivement avec l'arrivée d'eau porale du COx et entraîne une alcalinisation progressive de l'eau des alvéoles et du COx. Elle est appelée perturbation alcaline. C'est la première et la plus importante de toutes les perturbations du quartier MAVL compte tenu de la quantité de matériaux cimentaires et de leur réactivité vis-à-vis de l'eau.

La dégradation est lente, continue et complexe, mais est bien documentée dans la littérature. Un modèle thermo-cinétique dynamique en rend compte. Il est fondé sur les réactions chimiques entre l'eau et les phases constitutives du ciment, et sur la diffusion de l'eau dans le ciment et des ions constitutifs de ce dernier ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$  et  $\text{OH}^-$ ) vers le COx.

Un indicateur simple de dégradation des matériaux cimentaires est le taux de dissolution de la phase constituée par les silicates de calcium hydratés (CSH<sup>1</sup>), lié à la variation de pH de la solution au contact. On considère que le matériau commence à être altéré quand la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) est dissoute (pH 12,5). La fin de l'altération correspond à la dissolution des CSH jusqu'à la valeur C/S = 0,8 (pH 10,5). Ces phénomènes sont pilotés dans le quartier MAVL par l'arrivée de l'eau porale du COx sur les parois de l'alvéole et de l'évolution de l'état hygrométrique au sein des alvéoles pour les colis de stockage. Après quelques 100 000 ans, l'Andra considère que les parois des alvéoles sont altérées sur toute leur épaisseur et que les conteneurs ne sont altérés que sur quelques centimètres. Avant d'atteindre cette date, les composants de l'alvéole se sont progressivement fracturés. L'évolution mécanique du quartier MAVL accélère la dégradation des matériaux cimentaires et amplifie les cinétiques des phénomènes.

Quant à la vitesse de corrosion anoxique des armatures métalliques en milieu alcalin, elle est de l'ordre de  $1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ . Elles sont ruinées en quelques milliers d'années après l'arrivée de l'eau.

#### IV.4.2.4 Interactions eau-colis MAVL

La dégradation des colis primaires a lieu en milieu de « dégradation cimentaire » où les compositions des solutions aqueuses sont modifiées au fur et à mesure du relâchement des éléments des colis, en commençant par la corrosion des enveloppes généralement métalliques.

---

<sup>1</sup> CSH : silicates de calcium hydratés, produits de l'hydratation du ciment Portland, avec C, S et H représentant la proportion de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  dans la phase cimentaire.

De plus, elle est spécifique de la typologie de l'alvéole de stockage et particulièrement marquée dans les alvéoles des colis salins et organiques.

#### IV.4.2.5 Corrosion des colis de déchets métalliques

La corrosion des matériaux métalliques par l'eau en conditions oxydante ou anoxique est bien documentée. Elle concerne les enveloppes en acier inox ou en acier non allié de quasiment tous les colis des quartiers HA et MAVL. Le quartier MAVL renferme des colis de déchets métalliques de compositions différentes (aciers inox, alliages de nickel, de zirconium, de magnésium, aluminium et autres métaux), qui sont soit activés en subsurface soit contaminés en surface.

La corrosion est considérée comme généralisée. Dans le quartier MAVL, elle a lieu à minima en milieu anoxique et alcalin cimentaire (pH 10 à 12), éventuellement complexant localement, selon les alvéoles.

Chaque type de corrosion métallique est caractérisé par une vitesse de corrosion instantanée dans des conditions données. La corrosion anoxique est due à la réduction de l'eau par un métal, produisant de l'hydrogène et formant une couche d'oxydes en surface, en général protectrice, jusqu'à sa desquamation périodique ou sa dissolution due à un changement local de composition de la solution. La corrosion n'est pas continue et, de fait, c'est une vitesse moyenne  $V_{\text{corr}}$  qui est retenue.

La localisation des radionucléides sur ou dans les pièces métalliques et couche d'oxydes est connue et bien documentée. La corrosion de toutes les nuances d'acier, des nombreux alliages de zirconium et autres alliages a été étudiée en détail dans les conditions de stockage, en mettant l'accent en particulier sur les effets du pH, du potentiel redox (Eh), de la température, de la radiolyse et de la présence de molécules organiques.

Pour ce qui concerne les termes sources, le relâchement des radionucléides présents en surface est considéré comme instantané, ce qui est conservatif, et limité par leur solubilité en présence des minéraux avec lesquels ils sont en équilibre. Pour les autres éléments qui sont en subsurface dans le métal, le relâchement est associé à la vitesse de corrosion si la couche d'oxyde est très fine, ou est retardé si la corrosion a formé une couche d'oxydes plus épaisse, qui impose alors, ou non, aux radionucléides de diffuser dans cette couche. La valeur typique de la corrosion moyenne des alliages de zirconium est de 1 à 2 nm·an<sup>-1</sup>, celle des aciers inoxydables et alliages de nickel de 1 nm·an<sup>-1</sup>, et celle des aciers non alliés de 100 nm·an<sup>-1</sup>. La vitesse de corrosion des alliages d'aluminium peut atteindre 50 mm·an<sup>-1</sup>, celle des alliages de magnésium est comprise entre 50 et 500 µm·an<sup>-1</sup>. Toutes ces valeurs sont très sensibles à l'environnement, et les valeurs de  $V_{\text{corr}}$  peuvent varier sur une large gamme. Selon les valeurs de  $V_{\text{corr}}$ , l'Andra classe les matériaux métalliques en « non réactifs » ou « réactifs ».

#### IV.4.2.6 Dégradation des colis de déchets salins

Les colis de déchets salins renferment des composés chimiques résultant de traitements d'effluents par co-précipitation des radionucléides. Les co-précipités sont en général des sels simples (nitrates, nitrites, sulfates, etc.), des hydroxydes d'éléments lourds ou des sels doubles de ferrocyanure de potassium et de nickel. Avec les excès de réactifs chimiques et les ajouts pour faciliter la précipitation, ils constituent les boues de co-précipitation de traitement.

L'association de certains radionucléides aux composés a bien été identifiée, pour d'autres elle reste incertaine.

#### *Colis de déchets non enrobés dans le bitume*

Les boues (provenant essentiellement de la STEL de l'usine UP2 de la Hague) sont déshydratées, compactées sous forme de pastilles, lesquelles sont soit enrobées dans du ciment, soit bloquées par du sable dans des fûts en inox. On distingue les sels solubles de type nitrate de sodium (environ 20 % par colis) et peu solubles (voire insolubles) de type sulfate de baryum. La radiolyse de l'eau résiduelle des pastilles ou constitutive des sels produit de l'hydrogène. Toutes les caractéristiques de ces sels et les phénomènes afférents (reprise par l'eau, radiolyse, solubilités des sels) sont connus.

L'arrivée d'eau sur les sels est estimée entre dix et cent mille ans. La reprise des sels par l'eau vapeur et liquide pure et dans diverses solutions « cimentaires » est bien documentée. Elle est rapide. Dans le milieu saturé en eau où les dissolutions sont concomitantes, la vitesse de reprise peut varier par le jeu d'équilibres compliqué entre les ions constitutifs des sels (voire autres composés solides présents localement) et les espèces en solution. La réduction anoxique des nitrates en nitrite au contact des aciers joue également un rôle.

La conséquence globale du relâchement massif des sels est l'augmentation de la force ionique de l'eau, qui joue à la fois sur la solubilité des phases solides, la diffusion des espèces chimiques et leur capacité de rétention, et sur la formation d'un panache salin dans l'alvéole et en dehors de l'alvéole, perturbant le CO<sub>x</sub> entre les alvéoles.

Pour ces colis, le modèle de relâchement des espèces radioactives considère qu'ils sont relâchés avec la dissolution des sels dès l'arrivée d'eau, lorsque l'enveloppe du colis n'assure plus l'étanchéité. Leur concentration maximale est limitée par la solubilité des phases minérales. Ainsi le modèle ne dépend que de deux paramètres, la concentration maximale de l'élément en solution et le flux d'eau.

#### *Colis de déchets enrobés dans du bitume*

Les bitumes ont un grand pouvoir agglomérant, une bonne inertie chimique, sont insolubles dans l'eau mais sensibles à la radiolyse. Ils ont largement été utilisés par le CEA et Cogema comme matrice d'enrobage à chaud (150°C, bitume liquide) des boues de co-précipitation pour produire les colis d'enrobés bitumineux où des grains et agrégats de sels (boues calcinées) sont dispersés dans la matrice. Typiquement les colis renferment 40 % de sels dont au maximum 20 % sont solubles. Leur activité beta-gamma est de 1 à 2 TBq et alpha de 0,2 TBq. Ces colis ont fait l'objet de très nombreuses études pour leur fabrication et leur comportement tant en période d'exploitation du stockage (stabilisation, radiolyse, résistance au feu) qu'après fermeture de celui-ci (relâchement des sels et espèces diverses, gonflement par reprise d'eau). La radiolyse conduit à la modification physique du bitume et à la production d'hydrogène et d'acides carboxyliques. L'augmentation de la viscosité (phénomène de durcissement) avec l'activité est importante. Cette modification majeure est modélisée. Le rendement radiolytique de l'hydrogène est connu et l'accumulation de bulles d'hydrogène, qui conduit à un gonflement de la matrice, est également modélisé.

Le comportement de ces colis vis-à-vis de l'eau est modélisé par les modèles « Colonbo ». Ces modèles reposent sur des hypothèses simplificatrices (température comprise entre 20 et 30°C,

bitume visqueux, enrobé homogène, sels solubles assimilés à  $\text{NaNO}_3$  avec une teneur inférieure à 20 %, sels insolubles assimilés à  $\text{BaSO}_4$ , pas de bulles, libre expansion du bitume, eau de composition constante). Ces modèles sont construits spatialement sur l'existence d'une zone altérée de diffusion en avant du front de dissolution de  $\text{NaNO}_3$  (qui modifie le gradient de concentration de l'eau), le front de dissolution lui-même, et une zone non altérée. L'eau diffuse partout, la matière ne diffuse que dans la zone altérée. Il existe plusieurs cas selon le degré de simplification du modèle.

Ces modèles reposant sur des phénomènes compliqués et sur un comportement d'espèces portant la radioactivité mal connu, l'Andra utilise aussi un modèle simplifié mais conservatif basé sur la solubilité des sels, qui considère que toute la radioactivité est associée au sel le plus soluble ( $\text{NaNO}_3$ ), et que celui-ci est dissous dès l'instant où l'eau arrive au contact du bitume. Aucune fonction de confinement n'est attribuée au bitume, le relâchement est instantané. C'est la vitesse d'arrivée d'eau qui contrôle le terme source. En effet, des expériences ont montré que les valeurs des vitesses de corrosion pour les radionucléides sont 100 à 1 000 fois inférieures à celles des sels.

#### IV.4.2.7 Dégradation des colis de déchets organiques

Les déchets MAVL dits organiques sont des polymères variés d'usage courant. Une vingtaine d'entre eux sont bien identifiés. Les plus importants en quantités sont la cellulose, le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et des résines échangeuses d'ions. Tous les polymères sont intrinsèquement dégradables par radiolyse et par hydrolyse au contact de l'eau alcaline. Il en résulte la formation de multiples molécules exogènes au stockage dans les colis. La radiolyse et l'hydrolyse de la matière organique sont bien connues et ont été spécifiquement étudiées sur le plan cinétique pour les conditions de stockage présentes dans Cigéo. Ce sont des processus très lents.

Toutes les molécules issues de la dégradation ont un double comportement. Elles diffusent dans les matériaux et y sont plus ou moins retenues, modifiant ainsi la capacité de rétention de ces derniers pour d'autres espèces, par exemple les radionucléides. Elles agissent en solution au-delà d'une concentration seuil comme des complexants vis-à-vis des espèces provenant des déchets et changent leur spéciation, donc leur relâchement et les caractéristiques de leur migration.

D'une façon générale, les interactions et effets réciproques entre molécules organiques, éléments d'intérêt et matériaux des alvéoles MAVL sont très bien décrits. Pour ces colis le modèle de relâchement est un relâchement piloté par la solubilité des éléments dès que l'eau arrive sur les déchets, solubilité qui est fonction des concentrations en molécules organiques.

#### IV.4.3 Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives en appui de l'analyse de sûreté

Le relâchement des radionucléides à partir des différents colis de déchets MAVL résulte de nombreux phénomènes chimiques de dégradation qui agissent simultanément. Ces phénomènes sont bien identifiés selon les alvéoles et par famille de colis, mais il n'existe pas de modèles qui puisse les prendre en compte sans simplification. Aussi, les modèles simplifiés de relâchement des radionucléides choisis par l'Andra sont très conservatifs. Dans l'ensemble,

ils conduisent à considérer que tout l'inventaire en radionucléides des colis est relâché dans les alvéoles resaturées en eau sans réel confinement par les composants des colis. Ce sont les équilibres entre minéraux radioactifs et radionucléides qui contrôlent la solubilité des radionucléides. L'accès à la spéciation directe des radionucléides dans le quartier MAVL est quasi impossible, soit en raison de la teneur élevée en sels, soit de la présence de molécules organiques exogènes aux colis.

L'Andra a fait des choix de paramètres pour évaluer les termes sources. L'Andra considère ainsi que seuls les colis de déchets métalliques activés compactés et de sels enrobés dans du bitume assurent un confinement des radionucléides. Pour tous les autres colis, toute l'activité est supposée libérée dès que l'eau arrive sur eux aux différents horizons de temps indiqués précédemment. Cette hypothèse est conservative.

Pour les colis de déchets métalliques compactés la dégradation, est une corrosion généralisée des composants et les valeurs de  $V_{\text{corr}}$  attendues sont comprises entre 10 et 20 nm·an<sup>-1</sup>. L'Andra tient compte de la présence éventuelle dans les colis de fines et éclats millimétriques et des couches de zircone (entre 5 et 20 %) à la surface desquels le relâchement est pris comme instantané.

Pour 97 % des colis enrobés bitumineux, le modèle de relâchement est, en situation de référence (SEN-Ref), le modèle Colombo pendant 1 000 ans (soit la durée de vie du conteneur) puis le modèle solubilité de NaNO<sub>3</sub> et en situation enveloppe (SEN-Env), le modèle solubilité de NaNO<sub>3</sub>. Pour les 3 % restants, le modèle est celui de la solubilité de NaNO<sub>3</sub>, quel que soit le scénario.

Les valeurs des paramètres retenues par l'Andra pour les calculs de performances à partir des modèles sont les valeurs maximales enveloppes des valeurs mesurées. Les modèles utilisés pour décrire le relâchement des radionucléides sont, par construction, conservatifs. Les choix de l'Andra ajoutent des conservatismes aux calculs basés sur ces modèles, de sorte que ceux-ci conduisent à une surévaluation des termes sources.

## IV.5 Migration des éléments dans le quartier MAVL

### IV.5.1 Perturbations chimiques et migration des éléments

Les conditions de migration par diffusion des radionucléides relâchés depuis les alvéoles MAVL jusqu'au COx sain dépendent des alvéoles.

Dans tous les cas, les radionucléides des colis de déchets sont relâchés en milieu alcalin anoxique réducteur (en lien avec la présence de H<sub>2</sub>). Dans le cas des alvéoles contenant des colis renfermant des sels ou de la matière organique, le milieu est également chargé en sels et en molécules organiques.

Dans chaque situation la diffusion globale des radionucléides dépend, une fois le stockage resaturé en eau de :

- la diffusion des radionucléides plus ou moins solubles dans les milieux aqueux au contact des matériaux dégradés (colis primaires et colis de stockage) ;
- leur diffusion à travers des matériaux cimentaires dégradés de la paroi des alvéoles ;



- leur diffusion dans le COx altéré en extrados de cette paroi (perturbation alcaline, saline, organique).

Chacune des étapes est caractérisée par des paramètres de diffusion ( $D_e$ ,  $\phi_{acc}$  et  $K_d$ ).

#### IV.5.2 Alvéoles avec colis ne contenant ni sels ni matière organique

Les radionucléides sont relâchés dans les milieux alcalins, voire hyperalcalins ( $9,5 < \text{pH} < 14$ ), au contact des colis de stockage où les anions hydroxydes  $\text{OH}^-$  conduisent à la formation d'espèces hydrolysées plus ou moins solubles et mobiles, et de précipités. Ces espèces diffusent ensuite à travers les matériaux cimentaires dégradés de la paroi de l'alvéole et enfin dans le COx altéré, en extrados de la paroi, au cours de la perturbation alcaline. Du point de vue de la chimie, c'est la situation la plus simple de celles que l'on peut rencontrer dans le quartier MAVL. Elle sert de référence pour décrire le comportement des radionucléides dans les autres situations.

#### IV.5.3 Milieux cimentaires

Les milieux cimentaires concernés ici sont ceux propres aux alvéoles MAVL (en dehors de ceux des galeries et scellements). Les compositions des matériaux cimentaires (pâtes, bétons éventuellement armés) sont bien définies. Ce sont en général des ciments de type Portland ou siliceux bien caractérisés sur le plan minéralogique et de leur réactivité chimique vis-à-vis de diverses agressions (eau,  $\text{CO}_2$ , divers anions comme les chlorures ou sulfates).

Les données expérimentales sur la chimie des éléments lourds (actinides, lanthanides, produits de fission à caractère métallique) en milieux alcalin et les calculs thermodynamiques menés à partir des données rassemblées dans la base Thermo-Chimie permettent de conclure à de très faibles solubilités des radionucléides, contrôlées par la présence de phases solides (hydroxydes, oxydes, carbonates). En revanche l'iode et le chlore restent à l'état d'anion simples ( $\text{I}^-$  et  $\text{Cl}^-$ ), qui sont mobiles. Les nombreuses études conduites spécifiquement dans le cadre du stockage en couche géologique profonde confirment les faibles solubilités des radionucléides et permettent de définir les concentrations maximales des espèces à saturation ( $C_{sat}$ ), par rapport à une phase solide donnée, et la concentration des espèces en solution pour tous les radionucléides.

La rétention des éléments lourds est très élevée sur les phases des matériaux cimentaires dégradés. Celles de  $\text{I}^-$  et  $\text{Cl}^-$  restent très faibles. L'étude des données et mécanismes permet d'établir des gammes de valeurs de  $K_d$  pour la sorption des radionucléides sur des matériaux cimentaires sains et altérés.

La diffusion des radionucléides dans ces milieux poreux hétérogènes et réactifs a été étudiée sous de nombreux aspects (matériaux sains et altérés, pH, température, effets d'un champ électrique), mais il est très difficile d'en déduire des lois généralisées. Seules quelques valeurs fiables de  $D_e$  et  $\phi_{acc}$  pour HTO et  $\text{Cl}^-$  pour quelques systèmes peuvent être retenues, les autres restant indicatives.

#### IV.5.4 COx perturbé par des milieux cimentaires

La perturbation alcaline du COx au contact des matériaux cimentaires est due à la dégradation des parois des alvéoles, avec la diffusion d'une eau alcaline chargée en silicates de calcium vers le COx. Elle modifie la composition minéralogique de l'argilite. Un indicateur simple de perturbation du COx est le taux de transformation des argiles de type smectites en illites. Cela modifie la porosité du COx, ses propriétés d'échange d'ions et sa capacité de gonflement. L'Andra considère qu'après 100 000 ans, toutes les smectites du COx ont disparu sur 50 cm d'épaisseur et qu'il faut 10 fois plus de temps pour que la transformation atteigne 1 m.

Les conséquences de cette perturbation alcaline sur la spéciation des radionucléides ont été étudiées au laboratoire et *in situ*. Au contact des argilites, il peut y avoir des précipitations de phases secondaires silicatées. L'augmentation du pH de l'eau porale des argilites conduit à une spéciation théorique des radionucléides peu différente de celle des milieux alcalins. Les valeurs de solubilité des radionucléides peuvent aussi être considérées proches de celles dans ces milieux.

Concernant les processus de diffusion, il y a peu d'études. Les valeurs de  $K_d$  des radionucléides dépendent des mécanismes d'interaction avec le COx. Par exemple celle du césium  $\text{Cs}^+$  diminue d'un facteur 10 par rapport au COx sain car il entre en compétition avec  $\text{K}^+$ . Cela est valable pour les radionucléides présents sous forme cationique. Pour les autres, il n'y a pas de données.

L'amplitude de la modification minéralogique dominante ne conduit pas à des variations significatives des paramètres de diffusion par rapport à ceux dans du COx sain. La valeur de  $D_{e(\text{Cl}^-)}$  diminue plus que celle  $D_{e(\text{HTO})}$  sans toutefois que cette dernière soit très affectée.

#### IV.5.5 Alvéoles contenant des colis salins

##### IV.5.5.1 Milieux cimentaires salins

La concentration des sels dans les milieux proches des colis contenant des sels peut être élevée, plusieurs  $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$  pour les sels très solubles ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ , ou  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), mais reste en dessous de  $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  pour les autres (carbonates, phosphates, chlorures, fluorures, ammonium, ...). Les sulfates apportés par les sels peuvent conduire, dans un milieu alcalin ou hyper-alcalin au contact des argilites, à la précipitation de phases silicatées (ettringite, gypse, etc.) et modifier la minéralogie des ciments.

La présence de sels augmente la force ionique du milieu, modifiant les équilibres chimiques. Elle augmente en général la solubilité des phases solides conduisant à la formation d'espèces cationiques d'un facteur 10 et reste sans influence sur la solubilité de celles conduisant en milieu alcalin à la formation d'anions. La spéciation des radionucléides dans les solutions salines a été évaluée sur la base des données thermodynamiques. Elle reste toutefois incertaine, car le calcul des coefficients d'activité des espèces dans ces milieux de force ionique élevée à l'aide des modèles classiques de la physico-chimie des solutions requiert des paramètres d'interaction méconnus.

La perturbation saline des matériaux cimentaires modifie leur capacité de rétention et influence les valeurs des paramètres de diffusion. Quelques valeurs de  $K_d$  ont été mesurées. Elles diminuent en fonction de la force ionique, ce qui est probablement une tendance

générale. De même les études de diffusion de HTO et  $\text{Cl}^-$  en milieux cimentaires plus ou moins saturés en eau ne conduisent pas à des valeurs indiscutables de  $D_e$ .

#### IV.5.5.2 COx perturbé par les sels

La perturbation saline du COx est due à la diffusion des sels dans le COx en extrados des alvéoles. Un indicateur simple de l'extension du panache salin est la force ionique de l'eau dans le COx. L'Andra retient qu'en 10 000 ans après la resaturation l'eau de l'alvéole aura une force ionique de  $5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  et que 1 000 ans après la force ionique sera de  $0,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  à 10 m dans le COx. A 100 000 ans le panache aura quasi disparu à cette distance.

L'effet de la présence de  $\text{NaNO}_3$  sur la spéciation des radionucléides et sur leur solubilité a été évaluée par une approche thermodynamique. Elle met en évidence deux effets, l'un dû à la complexation et l'autre dû à l'augmentation de la force ionique, qui s'ajoutent ou se compensent selon les radionucléides.

Les modifications des argilites du COx par les solutions salines ont été très étudiées. Les valeurs de  $K_d$ ,  $D_e$  ont été mesurées et montrent que la présence de sels modifie la double couche électrique à l'interface des minéraux argileux et par là même le mécanisme de diffusion des ions. Cela a des conséquences sur le comportement des radionucléides vis-à-vis du COx.

Pour les radionucléides, on dispose de beaucoup de données pour les valeurs de  $K_d$  en fonction de la force ionique, la tendance générale étant, pour tous les éléments, une diminution des valeurs de  $K_d$  avec l'augmentation de la force ionique. Pour les cations, d'une façon générale les valeurs de  $K_d$  sont réduites de facteurs variables allant jusqu'à 10 par rapport au COx sain.

De même de nombreuses mesures de diffusion sur des échantillons de COx en présence de sels montrent que les valeurs  $D_{e(\text{HTO})}$  diminuent légèrement quand la force ionique dépasse  $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ . Des expériences sur l'effet d'exclusion anionique en comparant  $D_{e(\text{Cl}^-)}$  et  $D_{e(\text{H}_2\text{O})}$  montrent que le comportement des ions  $\text{Cl}^-$  se rapproche de celui de HTO avec l'augmentation de la force ionique. Pour les cations, les valeurs de  $D_e$  ont tendance à diminuer, jusqu'à 50 % pour  $\text{Cs}^+$ .

#### IV.5.6 Alvéoles contenant des déchets organiques

##### IV.5.6.1 Milieux cimentaires perturbés par des molécules organiques

Le comportement de quelques molécules organiques dans les milieux impactés par les matériaux cimentaires a été étudiée sous les aspects de solubilité, de rétention et de diffusion. Ces molécules sont en général peu retenues et les expériences n'ont pas permis d'obtenir de valeurs de  $D_e$  représentatives. Ces études visaient à éclairer les mécanismes d'interaction avec les minéraux des ciments.

Dans les alvéoles libérant des molécules organiques, la solubilité des radionucléides augmente. Bien qu'il y ait quelques exceptions pour des couples radionucléides-molécules organiques, ces tendances sont générales. Elles sont confirmées par de nombreuses données tant expérimentales que théoriques. Il existe en chimie une classification des capacités de complexation des éléments avec les molécules organiques, et suivant leur degré d'oxydation. Elle montre que l'iode et le chlore sont les moins sensibles et restent toujours à l'état d'anion.

En présence de molécules organiques, la rétention des radionucléides sur les matériaux argileux diminue avec l'augmentation de leur concentration. Les études de rétention concernent des systèmes particuliers (couple radionucléides-molécule-phases cimentaire). Aucune donnée ne permet d'évaluer la diffusion des radionucléides dans les milieux cimentaires organiques.

#### IV.5.6.2 COx perturbé par les molécules organiques

La perturbation organique du COx a pour origine la diffusion des molécules organiques en dehors des alvéoles. L'extension du panache peut être évaluée par la concentration de molécules de référence comme l'acide iso-saccharinique. La simulation jusqu'au million d'années montre que le panache organique occupe la partie du COx située entre les alvéoles MAVL concernées mais que les concentrations des molécules restent bien en deçà des seuils où elles deviennent complexantes vis-à-vis des radionucléides.

Le comportement des molécules organiques dans le COx (rétention et diffusion) a été beaucoup étudié, ainsi que les effets de compétition entre molécules. Les mesures de coefficient de diffusion montrent des corrélations entre  $D_e$  et la masse moléculaire des molécules. Ces études visent surtout à expliquer les propriétés du COx vis-à-vis des radionucléides.

L'influence des molécules organiques dans les milieux alcalins sur la spéciation des radionucléides est considérable en raison de leur pouvoir complexant. L'Andra a réuni les études de solubilité de radionucléides et d'identification des équilibres de complexation. Ces études ne correspondent pas toujours à la composition des eaux porales du COx de sorte que seules les tendances de complexation des radionucléides par une molécule donnée sont significatives. Les molécules organiques libérées dans les alvéoles constituent un cocktail, ce qui rend la spéciation des radionucléides incertaine.

Les mesures de rétention concernent quelques radionucléides et plusieurs molécules. Elles montrent toutes une forte diminution des valeurs de  $K_d$  au-delà d'un seuil de concentrations compris entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  mol·l<sup>-1</sup>. Des mesures de  $D_e$  au laboratoire et *in situ* sont disponibles pour l'eau tritiée HTO et quelques radionucléides en présence de l'acide éthylène-diamine-tetra-acétique (EDTA), un acide organique courant utilisé en décontamination en raison de son fort pouvoir complexant.

#### IV.5.7 Choix des paramètres pour les évaluations quantitatives de performances en appui de l'analyse de sûreté

Pour les calculs de performance après resaturation en eau dans le quartier MAVL, l'Andra divise un alvéole MAVL en trois parties :

- une partie dite utile constituée des colis de stockage et de vides ;
- une partie constituée par la paroi en béton perturbée par les matériaux cimentaires seuls ou par des sels ou par des molécules organiques ;
- les matériaux argileux des bouchons de scellement.

La diffusion des radionucléides dans le COx perturbé (perturbations alcaline, saline organique) est ensuite traitée à part.

#### IV.5.7.1 Alvéoles

La partie utile de l'alvéole est considérée comme un milieu poreux homogène et continu. Pour le SEN-Ref, le milieu est considéré comme réducteur (sauf oxydation par les nitrates) avec un taux de vide de 20 %, et les radionucléides sont considérés comme non retenus ( $K_d = 0$ ). Le coefficient de diffusion effectif est :  $D_e = \phi_{acc} \times D_{0(HTO)}$  avec  $\phi_{acc} = \phi_T$  pour tous les radionucléides. Pour le SEN-Env le milieu est considéré comme oxydant avec un taux de vide de 25 %.

#### IV.5.7.2 COx perturbé

Pour le quartier HA, le COx est perturbé chimiquement par le matériaux cimentaires bas pH de remplissage de l'extrados du chemisage. Pour le quartier MAVL, ce dernier type de perturbation alcaline est beaucoup plus important. Pour certains alvéoles, il faut aussi prendre en compte les perturbations saline et organique.

La perturbation alcaline du COx près des alvéoles est décrite par rapport au COx sain. Les valeurs de  $D_e$  sont multipliées par 5 en SEN-Ref. Pour les valeurs de  $K_d$ , les facteurs correctifs sont de 0,1 (rétention divisée par dix) et 0 (pas de rétention). La porosité totale est 35 % et la solubilité est considérée comme infinie.

La perturbation saline du COx est prise en compte quand la force ionique est supérieure à  $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ . Pour le SEN-Ref, les valeurs de  $D_e$  sont celles des matériaux cimentaires de structure perturbés par les sels et les valeurs de  $K_d$  et  $C_{sat}$  sont respectivement multipliées par 0,1 et 10.

La perturbation organique du COx est prise en compte si les concentrations en acides organiques de référence sont au-dessus de  $10^{-4}$  à  $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  et uniquement pour les radionucléides formant des complexes (sont exclus iode, chlore, sodium, calcium et assimilés). Pour le SEN-Ref, les valeurs de  $D_e$  sont celles des matériaux cimentaires de structure perturbés par les sels et les valeurs de  $K_d$  et  $C_{sat}$  sont respectivement multipliées par 0,1 et 10.

#### IV.5.8 Conclusion

La diffusion des radionucléides des colis jusqu'au COx sain se fait dans des matériaux poreux cimentaires et argileux où l'eau de resaturation est toujours hyperalcaline et chargée en sels ou en molécules organiques, les constituants des sels et les molécules se retrouvant eux-mêmes sur les phases solides des milieux. Ces milieux imposent aux radionucléides un comportement très différent d'un alvéole à un autre. Il est souvent très difficile de mesurer les paramètres de diffusion, sauf dans le COx perturbé qui a été très étudiée. Les valeurs choisies pour les paramètres de diffusion sont finalement rapportées à celles que l'on connaît le mieux, celles dans le COx sain. Les facteurs correctifs appliqués relèvent du jugement d'expert. Ils sont largement conservatifs.



# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation

**Michel DUBOIS**  
**Christophe FOURNIER**  
**Philippe GAILLOCHET**  
**Jean-Paul GLATZ**  
**Saida LAAROUCHI-ENGSTRÖM**  
**Virginie MARRY**  
**Jose-Luis MARTINEZ**  
**Jean-Paul MINON**  
**Catherine NOIRIEL**  
**Céline PERLOT-BASCOULES**  
**Christophe POINSSOT**  
**Aude POMMERET**

Président honoraire  
**Jean-Claude DUPLESSY**

Conseillers experts de la Commission

**Robert GUILLAUMONT**  
**Emmanuel LEDOUX**  
**Maurice LEROY**

Secrétaire général & Conseiller scientifique

**Frédéric LAUNEAU**

Secrétariat administratif

**Véronique ADA-FAUCHEUX**  
**Florence LEDOUX**

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Présidente : **Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM**

Secrétaire général & Conseiller scientifique : **Frédéric LAUNEAU**

Secrétariat administratif : **Véronique ADA-FAUCHEUX et Florence LEDOUX**

**[www.cne2.fr](http://www.cne2.fr)**

244 boulevard Saint-Germain • 75007 Paris • Tél. : 01 44 49 80 93

ISSN : 2257-5758